

# ASTRONOMIE A FYZIKA

## HLEDÁNÍ

# Astronomie a fyzika – hledání

Připravil kolektiv autorů pod vedením prof. RNDr. Petra Kulhánka, CSc.:

Ing. Radek Beňo, Ph.D. (1) – Vilém Boušek (6) – Mgr. Petr Brož, Ph.D. (1) – RNDr. Pavel Galář, Ph.D. (2)  
– Ing. arch. Ivan Havlíček (3) – Ing. Miroslav Havránek, MSc., Dr. rer. nat. (1) – Jakub Kast (1)  
– MUDr. Ing. Vítězslav Kříha, Ph.D. (1) – prof. RNDr. Petr Kulháněk, CSc. (23) – Lucie Kulhánková, MSc. (2)  
– Ing. Rudolf Mentzl (17) – Mgr. Dana Mentzlová (7) – Ing. Petr Panchártek (7) – doc. Ing. Vladimír Scholtz, Ph.D. (3) – Martin Špírk (1)

Obálka: Centrum naší Galaxie vyfotografované radioteleskopickým polem Meerkat v roce 2022. © Ian Heywood (Oxford University), SARAO; Color Processing: Juan Carlos Munoz-Mateos (ESO).

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2022, 1. vydání.

Žádná část této publikace nesmí být publikována a šířena žádným způsobem a v žádné podobě bez výslovného svolení sdružení AGA.

Odborná redakce: prof. RNDr. Petr Kulháněk, CSc.

Design: Mgr. Jakub Rozehnal, Ph.D.

Doprovodná grafika a obálka: Ing. arch. Ivan Havlíček

Sazba: Ing. Radek Beňo, Ph.D.

Formát: 20×21 cm, 384 stran

Kontakt: [aldebaran@aldebaran.cz](mailto:aldebaran@aldebaran.cz), [www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)

Tisk: TISK CENTRUM s. r. o.

**ISBN 978-80-906638-7-9**



# Obsah

|                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| I. BLÍZKÝ VESMÍR                                          | 9          |
| CNO cyklus ve Slunci .....                                | 10         |
| Synchronizace sluneční aktivity .....                     | 14         |
| Ohřev sluneční korony stále záhadný .....                 | 18         |
| Kůra Merkuru .....                                        | 23         |
| Exploze, sesuvy a levitace na Marsu .....                 | 26         |
| Polární záře na Marsu .....                               | 36         |
| Pod Marsem, nad Marsem .....                              | 43         |
| Vrstva heliového deště v obřích planetách .....           | 50         |
| Prstencotřesení .....                                     | 54         |
| Polární záře na kometě .....                              | 57         |
| <b>Bonus: Výpravy k ledovým měsícům .....</b>             | <b>59</b>  |
| II. VZDÁLENÝ VESMÍR                                       | 71         |
| Kolik váží Mléčná dráha? .....                            | 72         |
| Jemná struktura ve Střelci .....                          | 78         |
| Jak si Kraken se Sequoiou udělali kulové hvězdokupy ..... | 84         |
| Oblaka nejsilnější kyseliny .....                         | 95         |
| Bájný Ikaros a gravitační superčočka .....                | 99         |
| První snímek černé díry .....                             | 103        |
| Procesy v okolí černých děr .....                         | 108        |
| Na lovu gravitačních vln .....                            | 117        |
| Nekončící příběh Hubbleovy konstanty .....                | 125        |
| Může být vesmír konečný? .....                            | 132        |
| <b>Bonus: Velký třesk – deset největších mýtů .....</b>   | <b>136</b> |

### III. FYZIKA 149

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| Nulté skupenství a beztíže .....                    | 150        |
| I jádro lze vzrušit, aneb jaderné hodiny .....      | 154        |
| Relativistické efekty v atomu .....                 | 159        |
| Antivodík.....                                      | 164        |
| Skyrmiony útočí .....                               | 167        |
| Kvantová provázanost mnohačasticového systému ..... | 172        |
| Strašidelné interakce ve kvantovém světě .....      | 175        |
| Zvítězí Verlinde nad temnotou? .....                | 180        |
| Mapa gravitačních teorií .....                      | 186        |
| Pátá interakce.....                                 | 192        |
| <b>Bonus: To je on, elektron.....</b>               | <b>199</b> |

### IV. KOSMONAUTIKA 211

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| Plovoucí kosmodromy .....                       | 212        |
| Vesmírné zahradničení.....                      | 216        |
| Rozšiřování Mezinárodní vesmírné stanice.....   | 220        |
| Rakety na páru .....                            | 226        |
| Dostane nás metan na Mars? .....                | 230        |
| Orel přistál, všichni na kutě! .....            | 233        |
| Program Artemis – návrat člověka na Měsíc ..... | 238        |
| Program Commercial Crew .....                   | 246        |
| Postavme si raketu .....                        | 251        |
| Vesmírný dalekohled Jamese Webba .....          | 257        |
| <b>Bonus: Raketové motory .....</b>             | <b>262</b> |

## V. TECHNOLOGIE 271

|                                                        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Optická pinzeta a příbuzné jevy .....                  | 272        |
| Kroutíme, kroutíme aneb twistronika na scéně .....     | 276        |
| Atomové hodiny útočí na optické frekvence .....        | 280        |
| Ve vesmíru je zima zdarma .....                        | 283        |
| Poživatelná elektronika.....                           | 290        |
| Od egyptských pyramid k mionovému tomografu .....      | 298        |
| Vlnící se grafenové listy – klíč k čisté energii ..... | 304        |
| Uran, deuterium nebo thorium? .....                    | 308        |
| Kvantové technologie .....                             | 313        |
| Nekrolog za Arecibo (1963–2020) .....                  | 320        |
| <b>Bonus: Stručná historie tokamaků .....</b>          | <b>324</b> |

## VI. BIONIKA 339

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| Inteligentní mikroroboti .....                  | 340 |
| Nejmocnější bionické oko .....                  | 342 |
| Pneumobot à la želva .....                      | 347 |
| Xenobot – první programovatelný organizmus..... | 352 |
| Inteligentní améby .....                        | 358 |
| Slyší rostliny? .....                           | 361 |
| Zelení mužičci jsou žlutí .....                 | 364 |
| Dron – účinná zbraň proti nemocem .....         | 368 |
| Elegantní pohyb medúz.....                      | 374 |
| Je to pták? Letadlo? Ne, je to LEO!.....        | 377 |



Milí čtenářové,

dostává se vám do rukou další ze série knížek *Astronomie a fyzika*. První z nich vyšla už v roce 2004 a tato je již šestá v řadě. Základem knih jsou bulletiny vydávané na serveru Aldebaran, které letos vstupují do neuvěřitelného dvacátého ročníku. Knížky *Astronomie a fyzika* nejsou ale pouhou kolekcí bulletinů. Pečlivě vybíráme jen některé z nich, aktualizujeme je, doplňujeme texty o další zajímavosti, grafiku, souvislosti s ostatními texty, a tak pokaždé vzniká zcela nový celek, který má v původních bulletinech jen odrazový můstek.

Základem *Hledání* jsou zajímavosti a objevy z astronomie a fyziky za poslední čtyři roky. Tentokrát zde nenajdete kapitolu *Kosmologie*. Důvodem je to, že podrobný přehled současné kosmologie vyšel v mé knížce „*Jak vznikl svět*“ (2019) a byla by škoda opakovat to, co už bylo napsáno. Obdobně je v této knize věnováno minimum prostoru neutrinům, kterými se zabývá knížka „*Duchové vesmíru*“ (2021), a magnetickým polím ve vesmíru popisovaným v knize „*Hvězdy, planety, magnety*“ (2021). Uvolněný prostor umožnil do knihy, kterou máte před sebou, přidat kapitolu *Inspirace přírodou*, v níž našly místo nové technologie inspirované chováním rostlin a živočichů. Příroda ve svém dlouhém a pestrém vývoji často nacházela řešení, která jsou funkční a člověk žasne nad jejich jednoduchostí a elegancí.

V našem z astronomického hlediska těsném sousedství překvapil objev vrstvy heliového deště v nitrech planet Jupiter a Saturn. Také detekce polárních září na Marsu, který nemá globální magnetické pole, byla poněkud nečekaná. Mars je tradičně středem pozornosti kosmických agentur, přesto první zprávy o letech dronu nad povrchem planety připomínaly sledování vědeckofantastického filmu. Poznávání vzdálenějšího vesmíru přineslo první fotografii těsného okolí černé díry a rutinní výzkum vesmíru za pomoci gravitačních vln. Detektor KAGRA, o jehož stavbě jsme informovali v předchozí knížce série, se stal skutečností a má za sebou první úspěšnou detekci gravitačního záblesku. Kvantové technologie se postupně stávají všední realitou, zdá se, že fyzikové jsou blízko objevu dalších interakcí a Měsíc se po více než půl století snad opět stane cílem člověka. Věřím, že vybraný pelmel novinek a zajímavostí je dostatečně pestrý, aby si v něm každý čtenář našel to své. Každou kapitolu doplňuje bonus – rozsáhlejší text, jenž s tématem kapitoly více či méně souvisí.

Rád bych poděkoval všem, kteří se na knize podíleli – Ivanovi Havlíčkovi za doprovodné kresby, návrh obálky a podněty k celkovému vzhledu knihy, Radku Beňovi za pečlivou sazbu, Rudovi Mentzlovi za podstatnou část jazykových korektur a samozřejmě všem sedmnácti autorům článků za jejich čtivé rukopisy. Pevně věřím, že se vám, čtenářům, bude další knížka série líbit a opět budou mě i vás fascinovat neuvěřitelné poznatky a technologie, kterými naše civilizace vládne.

V Praze 8. ledna 2022

Petr Kulhánek





# I. BLÍZKÝ VESMÍR



## CNO cyklus ve Slunci

**pp řetězec** – protono-protonový řetězec, skupina jednoduchých reakcí, které jsou hlavním zdrojem energie hvězd podobných Slunci. Nejjednodušší je srážka dvou protonů vedoucí na vznik deuteria, dále probíhá fúze deuteria s dalším protonem za vzniku helia  ${}^3\text{He}$ . Dvě jádra  ${}^3\text{He}$  se při srážce přemění na vysoce stabilní jádro  ${}^4\text{He}$ . Probíhá ale i celá řada dalších reakcí, jejichž výsledkem je přeměna čtyř protonů na jádro helia  ${}^4\text{He}$ , energii a neutrina.

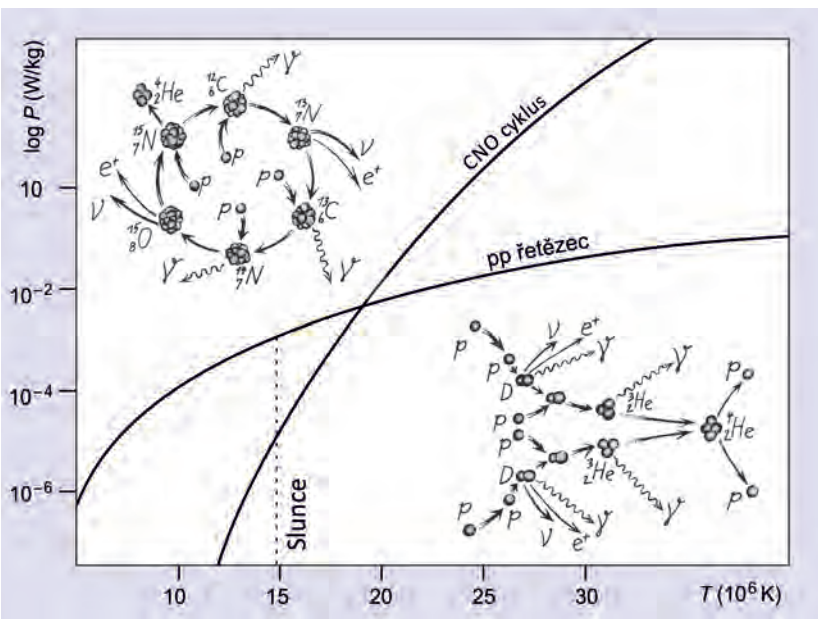
Fúzní reakce ve hvězdách hlavní posloupnosti. U hvězd s nižší teplotou jádra dominuje pp řetězec, u hvězd s vyšší teplotou Betheův CNO cyklus.

Slunce je hvězda, která získává energii termojadernou fúzí probíhající v jejím nitru. Za enormní teploty se v jádru Slunce srážejí částice a probíhá zde řada nejrůznějších reakcí, při nichž se nakonec ze čtyř protonů sestaví velmi stabilní jádro helia složené ze dvou protonů a dvou neutronů. Existují dvě nejvýznamnější skupiny reakcí, kterým říkáme protono-protonový řetězec a Betheův CNO cyklus. První skupina reakcí se podílí na energetické bilanci zcela dominantně. Až donedávna nebylo známo, v jaké míře reakce CNO cyklu ve Slunci probíhají. Uvolněnou energii z obou procesů nesou k povrchu fotony, které interagují s volnými elektrony, a proto jejich cesta není zdaleka přímočará a trvá mnoho set tisíc let. Na povrchu Slunce nevidíme okamžitý výsledek procesů v termojaderném kotli uvnitř, ale obraz zpožděný řádově o milion roků. Existuje jedna možnost, jak pozorovat procesy slučování částic v jádru Slunce přímo. Jde o pozorování neutrin, která z jádra doletí k Zemi bez jediné srážky. A právě s pomocí takových neutrin detekoval na konci roku 2020 historicky poprvé přímo CNO cyklus

v nitru Slunce detektor Borexino nacházející se v Národní italské laboratoři Gran Sasso.

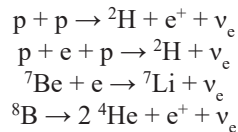
### Fúzní reakce ve hvězdách

Dlouho se váhalo, co je zdrojem energie hvězd. Uvažovalo se o gravitační kontrakci i o dalších mechanismech. Až ve 30. letech dvacátého století se pomalu začalo uvažovat o fúzních reakcích a naplno tento názor zazněl v roce 1938 na čtvrté výroční konferenci teoretických fyziků ve Washingtonu. George Gamow a Carl Friedrich von Weizsäcker na konferenci navrhli, že ve Slunci je základní reakcí slučování dvou protonů. Jednu z možností, jak by reakce mohla probíhat, v zápětí propočítal Hans

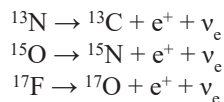




Bethe a v témže roce publikoval slavný CNO cyklus, který je energetickým zdrojem ve hmotnějších hvězdách. Ve hvězdách, jako je naše Slunce, dominují reakce protono-protonového řetězce (zkráceně pp řetězce). Obě skupiny reakcí si můžete prohlédnout na doprovodném obrázku. Vše závisí na teplotě v nitru hvězdy. Do teploty zhruba 18 milionů kelvinů dominuje pp řetězec, od této teploty přebírá železo zdroje energie CNO cyklus (jde o hvězdy hmotnější než 1,3 hmoty sluneční). Naše Slunce má v nitru teplotu 15 milionů kelvinů, proto je dominantním zdrojem energie pp řetězce, ale CNO cyklus zde samozřejmě také probíhá, i když jen menšinově. Obě skupiny reakcí jsou zdrojem elektronových neutrin. V pp řetězci jde zejména o reakce



První z reakcí se zkráceně označuje „pp“ reakce a druhá „pep“ reakce. Další dvě reakce berylia a bóru probíhají menšinově, ale jsou také zdrojem neutrin. Právě poslední z reakcí dala detektoru Borexino jeho jméno. Betheův CNO cyklus je také zdrojem neutrin, zejména jde o reakce



První dvě reakce jsou dominantním zdrojem neutrin v CNO cyklu, třetí produkuje neutrin výrazně méně. Detekce CNO cyklu probíhajícího v našem Slunci byla založena na prvních dvou reakcích. Není bez zajímavosti, že produkce energie v pp řetězci roste se čtvrtou mocninou teploty, zatímco u CNO cyklu se 17. mocninou teploty. To má za následek obrácené pořadí radiační zóny (energie se přenáší zářením, u Slunce je blíže jádru) a konvektivní zóny (energie se přenáší prouděním) u hvězd, v nichž dominuje CNO cyklus.

## Borexino

Ve střední Itálii se pod horským masivem Gran Sasso v hloubce 1 400 metrů ukrývá největší podzemní laboratoř světa – Národní italská

**CNO cyklus** – Betheův cyklus, skupina reakcí, které jsou hlavním zdrojem energie hvězd hmotnějších než Slunce. Obdobně jako v pp řetězci se ve finále sloučí čtyři protony na jádro helia  ${}^4\text{He}$ , energii a neutrina. V reakcích ale vystupují i jádra uhlíku, dusíku a kyslíku (odtud název CNO), která v celkové bilanci nemizí, ani nevznikají. Cyklus těchto reakcí objevil německo-americký jaderný fyzik Hans Bethe v roce 1939.

**LNGS** – Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Národní laboratoř Gran Sasso. Byla vybudována ve střední Itálii na bocích tunelu, který spojuje města Teramo a L'Aquila, přibližně 120 km od Říma. Nachází se 1 400 metrů pod horou Gran Sasso a tvoří ji tři haly, každá o délce 100 metrů a výšce téměř 30 metrů. Je zde umístěno přibližně 20 funkčních experimentů. Celková plocha laboratoří, které byly otevřeny v roce 1987, je 17 300 m<sup>2</sup>. Laboratoře patří pod Národní ústav jaderné fyziky INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). V podzemí jsou především detektory neutrin různého původu, kosmického záření a temné hmoty.

Neutrinový detektor Borexino. Nachází se v největší podzemní laboratoři světa v italském Gran Sasso a za úkol má chytat neutrina z atypických fúzních reakcí v nitru Slunce. Foto: Aldebaran 2010.



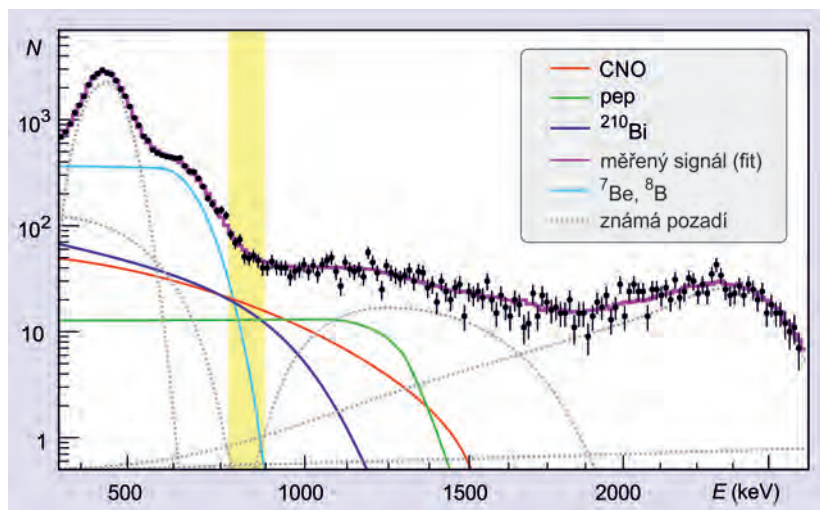
**Borexino** – neutrinový detektor v italské Národní laboratoři Gran Sasso. Nachází se 1 400 metrů pod zemí. Byl zprovozněn v roce 2007. Je schopen detekovat sluneční neutrino s nízkou energií, která vznikají při reakcích berylia a bóru. Podle prvku bor byl detektor pojmenován (BORon EXperiment). Detektor je naplněn 278 tunami scintilační tekutiny. I s vnějšími stínicími obaly má průměr 18 metrů. Záblesky ze scintilační tekutiny jsou zachytávány 2 212 fotonásobiči. Čerenkovovo záření způsobené prolétávajícími miony je detekováno dalšími 208 fotonásobiči. Detektor je citlivý na sluneční neutrino, geoneutrino a exotické rozpady elementárních částic (například elektronu).

laboratoř Gran Sasso. V ní se vědci z celého světa snaží chytat především neutrino z nejrůznějších zdrojů, ale i částice temné hmoty. Jedním ze dvou desítek detektorů je Borexino. Původně se tento detektor měl jmenovat BOREX (zkratka z anglického *BORon solar neutrino EXperiment*) a měl zkoumat atypické sluneční reakce, například tu, již se účastní bór, který dal detektoru jméno. Jak už to bývá, rozpočet na stavbu detektoru byl krácen, a tak vědci přejmenovali experiment na Borexino. Přípona „ino“ v italštině znamená zdvojnásobení, tedy Borexino je doslova „malý BOREX“.

Detektor obsahuje scintilační tekutinu, která při interakci s neutrinem (jedním z mnoha) vydá dva po sobě jdoucí charakteristické elektromagnetické záblesky. Tyto záblesky zachytávají fotonásobiče. Další fotonásobiče na vnějším obalu registrují Čerenkovovo záření rychlých mionů, které mohou vznikat při interakci neutrin s jádry atomů. Nepředstavujte si, že každé neutrino interaguje. Naprostá většina z nich detektorem projde a jen řádově desítka denně je z obrovského množství prolétávajících neutrin detektorem polapena.

## Detekce CNO cyklu ve Slunci

Výsledky měření toku neutrin v detektoru Borexino za období 2016 až 2020. Zdroj: Borexino, Nature.

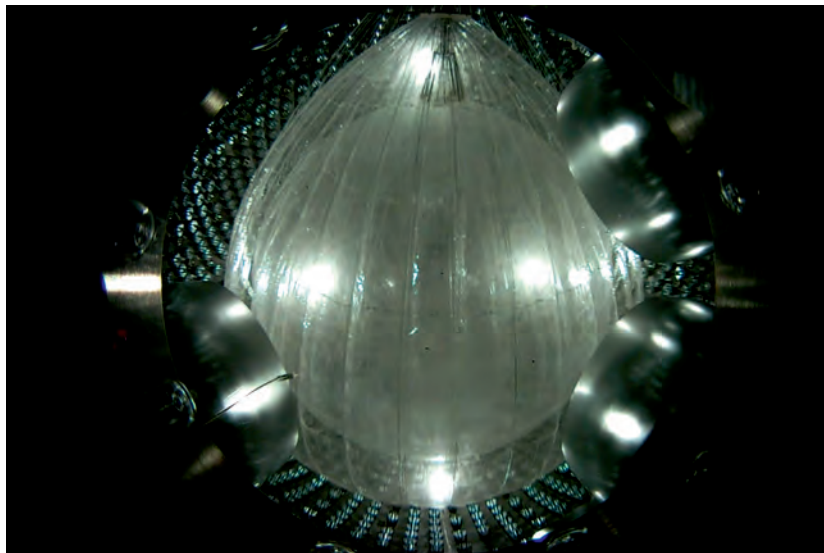


Ve Slunci je CNO cyklus minoritní reakcí. Přesto jsou ale neutrino z tohoto cyklu detekovatelná. Nejsnáze rozeznatelná jsou kolem energie 800 keV, kde jsou dokonce majoritním zdrojem neutrin. Na přiloženém grafu je tato oblast označena žlutým pásem. Neutrino z CNO cyklu (z rozpadů  $^{13}\text{N}$  a  $^{15}\text{O}$ ) jsou znázorněna červenou křivkou. Dalšími zdroji neutrin v této oblasti je pep reakce pp řetězce (zelená křivka), rozpad  $^{210}\text{Bi}$  (modrá křivka, jde o šum, jehož původem je rozpad atomů olova stínění) a další reakce pp řetězce ( $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ).

K tomu, aby bylo možné jednotlivé zdroje neutrin odlišit, bylo zapotřebí velké množství dat. Kolaborace Borexino čítající 96 vědců z mnoha zemí a institucí sbírala

data od července 2016 do února 2020 (celkem 1072 dní). Data byla analyzována v energetickém intervalu od 320 keV do 2,64 MeV. Po pečlivých výpočtech a separaci ostatních zdrojů (na základě znalosti závislosti počtu neutrin na energii) bylo detekováno přibližně 7 neutrin CNO cyklu denně na sto tun scintilátoru. To odpovídá toku 700 milionů slunečních neutrin CNO cyklu jedním centimetrem čtverečním za sekundu. Celkový tok neutrin, včetně těch z pp řetězce, je 60 miliard na centimetr čtvereční za sekundu, tedy mnohem více. CNO cyklus je zodpovědný za 1 % produkce energie, 99 % je výsledkem pp řetězce. Je to historicky vůbec poprvé, co byl detekován CNO cyklus, který je zdrojem energie mnoha hvězd, přímou metodou. Jde o přelomový experiment, který ukázal, že naše představy o procesech ve hvězdných nitrech jsou správné.

■ Petr Kulháněk, 5. 2. 2021, AB 5/2021



*Záběr z vnitřní kamery umístěné v detektoru Borexino, která zaznamenávala situaci uvnitř detektoru. Dobře patrné jsou dvě nylonové sféry. Ve vnitřní je scintilační tekutina, vnější je naplněná vodou a slouží jako stínění. Vně jsou patrné fotonásobiče, které detekují charakteristické záblesky probíhající ve scintilátoru. Detektor Borexino je plně funkční od roku 2007. Zdroj: LNGS/Borexino.*

## Synchronizace sluneční aktivity

**Sluneční cyklus** – přibližně jedenáctiletý základní cyklus v životě Slunce. Během něho se periodicky mění počet slunečních skvrn i samotný sluneční výkon. Poprvé o něm pro nás napsal Heinrich Schwabe v roce 1843, i když objeven byl už v 70. letech 18. století Christianem Horrebowem, jehož práce ale bohužel zapadla. Švýcarský astronom Rudolf Wolf (1816–1893) dopočetl sluneční aktivitu zpětně až do poloviny 17. století a cyklus z let 1755 až 1766 označil jako první. V prosinci 2019 zahájilo Slunce 25. cyklus své činnosti.

Ve vědě se často setkáváme se zajímavým fenoménem. Myšlenky dávno zapadlé jako neperspektivní či zavádějící se občas nečekaně vynoří a domnělá slepá ulička se změní v dálnici. Astrofyzika není výjimkou. Před dvaceti lety jsme byli svědky zmrtvýchvstání kosmologické konstanty, v posledních měsících se vracíme k myšlence, že by sluneční cyklus mohl být ovlivňován planetami.

### Sluneční cyklus

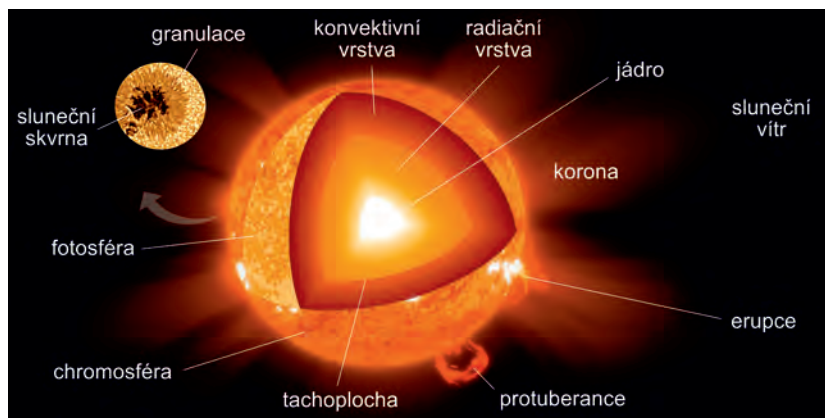
Již koncem 18. století si povšiml Christian Horrebow, že počet slunečních skvrn není konstantní, ale mění se s periodou přibližně jedenácti let. Detailně se pak sluneční periodě věnoval, téměř o sto let později, německý astronom Heinrich Schwabe, po kterém také cyklus získal jméno. Zároveň mnohým astronomům neuniklo, že oběžná doba Jupiteru (11,86 let) se jedenáctileté periodě velice podobá. Taková shoda vybízí k úvahám, že jsou obě periody v příčinné souvislosti. Nebyl však zřejmý mechanismus, který by mohl něco takového způsobovat, a tak myšlenka zůstala jen smělou hypotézou. Když pak byl rozpracován model tekutinového dynama, věc upadla v zapomnění.

Magnetické pole vzniká všude tam, kde se pohybuje elektrický náboj. Nezáleží na tom, zda jde o elektrony prodírající se kovem elektrického

vodiče nebo o nabitě částice unášené okolním prostředím. V nitru Slunce, kde vysoká teplota oddělila elektronové obaly od atomových jader, není o volné elektrické náboje nouze. Tyto náboje se pohybují v mohutných proudech a vytvářejí silné magnetické pole. Tomuto mechanismu se říká tekutinové dynamo.

Vnější vrstvy Slunce však nerotují všude stejnou rychlostí. Díky tomu se siločáry zamotávají a původně jednoduché magnetické

Vnitřní stavba Slunce. Zdroj: Wikipedia/Kelvinsong.





pole se stává obtížně definovatelné. V tuto dobu můžeme na Slunci pozorovat více skvrn, protuberancí a dalších projevů sluneční aktivity. Po čase se vše vrátí do normálu, magnetické pole má opět pouze jeden severní a jeden jižní magnetický pól. Slunce je v minimu své aktivity. Tento cyklus trvá přibližně 11 let. Přes veškeré úspěchy tohoto modelu však zůstávají některé otázky nezodpovězeny.

## Problémy tekutinového dynama

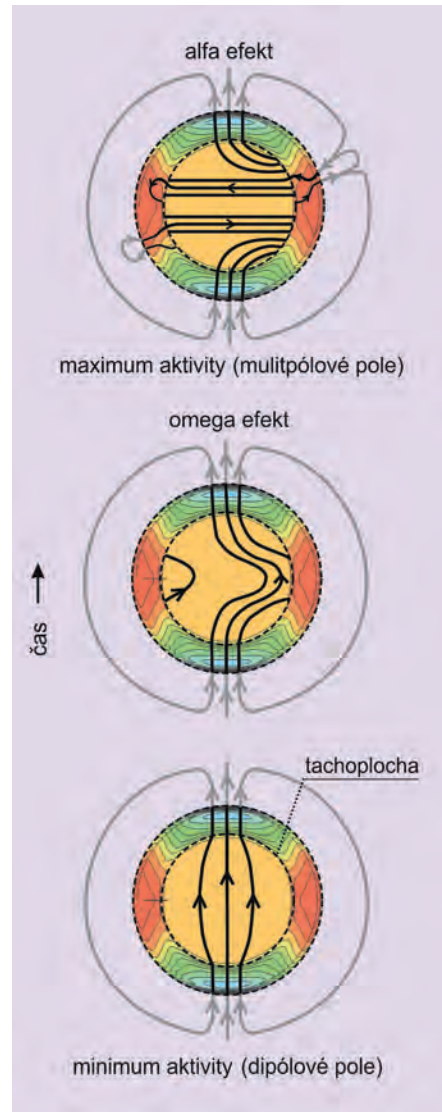
Abychom správně pochopili práci tekutinového dynama, musíme nejprve korektně popsat proudění plazmatu ve Slunci. Vnitřek Slunce rotuje víceméně jako tuhé těleso. Teprve ve větší vzdálenosti od středu se uplatňuje tekutinová mechanika. Jsou tu jednak silné výstupné proudy vynášející horké plazma k povrchu Slunce, jednak horizontální proudy, tím rychlejší, čím blíže k rovníku se nacházejí. Rozhraní mezi málo pohyblivou a tekutou vrstvou se nazývá tachoplocha. Nachází se na hranici radiační a konvektivní vrstvy Slunce.

Jakkoli se zdá takový model průhledný, při výpočtech a simulacích naráží na problémy. Jsou to především problémy nestabilit. Někdy i malá odchylka od předpokládaného stavu může způsobit nečekaný vývoj. Pro příklad nemusíme chodit daleko. Na hodinách fyziky si při výkladu Coriolisovy síly málokterý kantor odpustí poznámku, že se při vypouštění vody vír na severní polokouli stáčí vždy jedním směrem, což je způsobeno rotací zeměkoule. Ve skutečnosti bývá poměrně obtížné takový pokus správně realizovat. Stačí nepatrný počáteční impuls, třeba jen necitlivé vytažení zátky z umyvadla, a vír se začne točit na druhou stranu, než bychom očekávali. Coriolisova síla nedokáže tento stále se zrychlující pohyb výrazně zpomalit, natož zvrátit.

## Vnější vlivy

V rotujícím slunečním plazmatu není o takové víry nouze. Statisticky vzato se roztáčí na tu stranu, která koresponduje s rotací Slunce. I malá výchylka na počátku však může směr změnit a porucha se dál lavinovitě šíří. Podobných nestabilit se tu nachází více. Nastoluje se otázka, zda jsou počáteční malé výchylky opravdu náhodné, nebo je tu nějaký předvídatelný vliv.

Skupina Franka Stefaniho z Helmholtzova střediska v Drážďanech takový mechanismus nabízí. Významný faktor spatřuje v gravitačním působení planet. Celková hmotnost všech planet Sluneční soustavy



Diferenciální rotace Slunce způsobuje deformaci magnetických siločar. Na obrázku zobrazeny dva principy, alfa a omega efekt. Kresba: Paul Higgins, desertace.

**Konvektivní vrstva** – vnitřní vrstva Slunce, která zasahuje až do hloubky 200 000 km pod povrchem. Energie se zde šíří prouděním, ve vrstvách jsou vzestupné a sestupné proudy a mnohé turbulentní oblasti. Vrstva rotuje diferenciální rotací, tj. rychlost rotace závisí na heliografické šířce.

**Tachoplocha** – plocha uvnitř Slunce. Pod touto plochou rotuje Slunce jako tuhé těleso, nad ní rotuje diferenciálně. Tachoplocha se nachází pod konvektivní zónou.

**Tekutinové dynamo** – tekutinová varianta klasického dynamu. Elektrické proudy vznikají při pohybu plazmatu nebo tekutého kovu a generují magnetické pole. Dipólová složka se mění na azimutální tzv. omega efektem a azimutální na dipólovou tzv. alfa efektem. Tekutinové dynamo nemůže být stacionární, jeho základní vlastností je překlápění magnetických pólů.

**Omega efekt** – jev, při kterém rotující těleso (například Slunce) přeměňuje dipólovou složku magnetického pole na azimutální. Magnetické pole je zamrzlé do plazmatu tělesa a otáčí se s ním. Pokud má těleso diferenciální rotaci, magnetické siločáry jsou v místech, kde je rotační rychlost vyšší, vytahovány v azimutálním směru. Tím vzniká azimutální složka pole.

**Alfa efekt** – jev, při kterém u rotujícího tělesa (například Slunce) vzniká z azimutální složky magnetického pole složka dipólová. Jde o statistický jev. Fluktuační rychlostního pole (u Slunce jsou největší na hranici konvektivní a zářivé zóny) se kopírují na fluktuační magnetického pole. Z těchto fluktuačních vzniká rostoucí nenulová střední hodnota magnetického pole v dipólovém směru.

**Rayleighova-Taylorova nestabilita** – nestabilita vznikající na rozhraní dvou tekutin s různou hustotou, které se nacházejí v gravitačním poli (řidší tekutina je „pod“ hustší). V astronomii je ji možno pozorovat při prostupu záření hvězd plynnými oblaky. Nestabilita se vyvíjí do charakteristických obrazců. Nestabilitu poprvé popsal lord Rayleigh (1842–1919) a později zobecnil Geoffrey Ingram Taylor (1886–1975).

sice nepřesahuje 0,15 % hmotnosti Slunce, ale bylo již konstatováno, že by šlo pouze o efekt kamínku strhávajícího lavinu. Navíc je tu pákový efekt. Hmotnost planet je sice zanedbatelná, ale díky obrovským vzdálenostem ve Sluneční soustavě významně posunují její těžiště. Těžiště Sluneční soustavy se tedy nejen nekryje se středem Slunce, ale často se ocitá i mimo jeho vlastní těleso.

Mechanika tekutinového dynamu stojí a padá se způsobem proudění plazmatu. Proudění je významně ovlivňováno způsobem rotace. Zde je třeba započítat i vliv oběhu Slunce kolem těžiště Sluneční soustavy. Frank Stefani se svým týmem argumentuje právě periodicitou slapových sil, která odpovídá cyklům sluneční aktivity. Nejznámější Schwabeho cyklus, známý spíše pod technickou přezdívkou jedenáctiletá perioda, se až nápadně shoduje s periodou 11,07 let, kdy se planety Venuše, Země a Jupiter seřadí přibližně do zástupu.

Stefaniho tým se samozřejmě nespokojil jen s úvahami, ale provedl řadu simulací tekutinového dynamu, do kterých započítal přenos orbitálního momentu Slunce do jeho rotace. Kromě již zmíněné jedenáctileté periody se přirozenou cestou objevily i dlouhodobější cykly. Vlivem planet Jupiter a Saturn dochází k pravidelným změnám po 193 letech. To by mohlo odpovídat Suess-de Vriesovu cyklu, který se pohybuje mezi 180 až 230 roky.

Kromě krátkodobých pravidelných cyklů prochází Slunce i dlouhodobějšími změnami aktivity. Z nedávné historie vzpomeňme především minimum Maunderových mezi lety 1645 a 1715, známé také jako Malá doba ledová. Statistickými metodami bylo dokázáno, že tato minima sice nejsou v pravém slova smyslu periodická, ale přesto se vrací v období jednoho až dvou tisíc let. Frank Stefani proto rozšířil své simulace na časový úsek 30 000 let a zjistil, že i v jeho modelu se v podobném intervalu sluneční aktivita snižuje.

## Simulovat nestačí

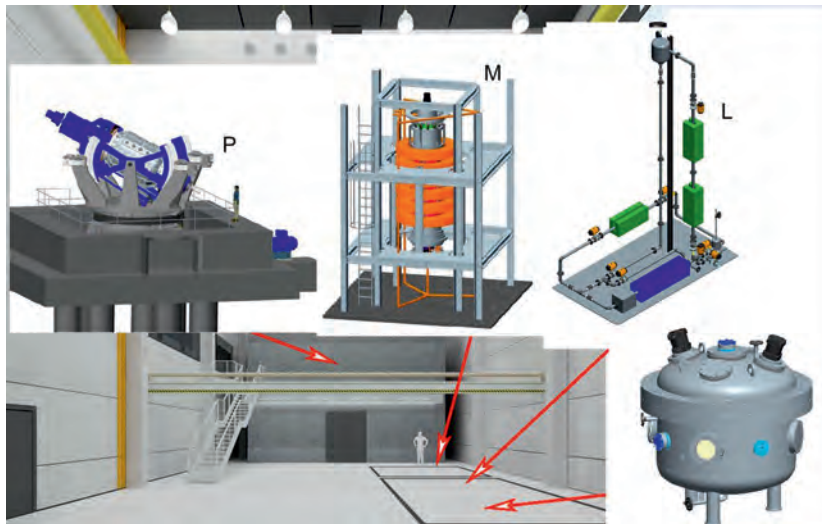
Počítačové simulace se v posledních desetiletích staly důstojnou vědeckou disciplínou, ale poslední slovo ve výzkumu rozhodně nemají. Ověřit činnost tekutinového dynamu v nitru Slunce je samozřejmě těžko uskutečnitelné. I proto v německých Drážďanech vzniká zajímavý projekt DRESDYN (*DREsden Sodium facility for DYNamo and thermohydraulic studies*).



Nejambicioznějším experimentem je dynamo poháněné precesí. Jedná se o nádobu naplněnou tekutým sodíkem. Válcový kontejner o průměru a výšce 2 m se otáčí kolem podélné osy rychlostí 10 otáček za sekundu. Montáž je navíc schopna vnútit nádobě ještě precesi až 1 otáčku za sekundu. Podle toho, jak je nastaven poměr obou frekvencí, vznikají v roztaveném sodíku různé podmínky proudění. Ty jsou pak zkoumány a vyhodnocovány podle toho, jak je která konfigurace vhodná pro buzení magnetického pole. Projekt DRESDYN se nezaměřuje pouze na zkoumání tekutinového dynamu uvnitř Slunce a planet. Přípravuje se zde také experiment zkoumající různé druhy nestabilit. Máme naději, že se tím objasní vznik turbulencí a přenosu momentu hybnosti v akrečních discích, ale i v neutronových hvězdách.

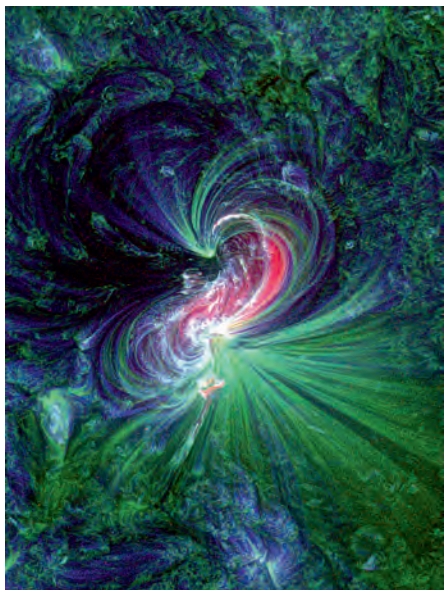
Pokud drážďanský experiment přispěje k odhalení původu sluneční aktivity a potvrdí závěry numerických simulací, půjde o významný krok v pochopení vnitřní sluneční dynamiky, která výrazně ovlivňuje i naši Zemi, včetně klimatických změn způsobených Sluncem.

■ Dana a Rudolf Mentzlovi, 6. 8. 2021, AB 28/2021



Vnitřní pohled na centrální halu s plánovanými experimenty: precesní dynamo (P); Taylor-Couette experiment pro zkoumání Taylorovy nestability (M); okruh s tekutým sodíkem (L); servisní modul (I) Zdroj: HZDR.

## Ohřev sluneční korony stále záhadný



Sluneční korona nad aktivní oblastí. Zelené oblasti mají teplotu 0,8 milionu kelvinů, modré 1 až 2 miliony kelvinů a v červených dosahuje teplota až 5 milionů kelvinů. Plazma sleduje magnetické siločáry. Snímek byl pořízen přístrojem AIA na sondě SDO dne 12. 7. 2017, zpracován byl v roce 2020. Zdroj: NASA, SDO, AIA, Lpchitta.

Zatmění Slunce nejsou jen líbivou podívanou, ale sehrály roli i u důležitých objevů, ať už šlo o ověření ohybu paprsků vzdálených hvězd díky zakřivení časoprostoru kolem Slunce nebo o pozorování korony, vnější atmosféry Slunce, která není za normálních podmínek viditelná. Při zatmění Slunce, které proběhlo 7. srpna 1869 od Aljašky po severní Karolínu, byla ve spektru korony nalezena zcela atypická zelená spektrální čára. Vlnová délka čáry neodpovídala žádnému známému prvku, a tak se vyrojily domněnky, že jde o nový prvek, tzv. koronium. Pro domnělý prvek ale už nebylo v Mendělejevově periodické tabulce místo. Záhada byla vyřešena až po 70 letech. V roce 1939 švédský astronom Walter Grotrian a v roce 1941 další švédský astronom Bengt Edlén zjistili, že jde o spektrální čáru třináctkrát ionizovaného železa. Nešlo tedy o nový prvek, ale prvek důvěrně známý za neobvyklých podmínek. K tomu, aby bylo železo takto vysoce ionizováno, musí být v koruně extrémně vysoké teploty, řádově miliony stupňů. Jedna záhada byla nahrazena jinou: Proč je korona tak horká?

### Od koronia k realitě

Ač to zní velmi zvláště, viditelný povrch Slunce s teplotou 5 800 K je jeho nejchladnější oblastí. Od povrchu směrem do nitra stoupá teplota díky termojaderným reakcím probíhajícím v jádře Slunce. Teplota jádra se odhaduje na 15 milionů kelvinů. Od povrchu stoupá teplota také, korona má teplotu kolem dvou milionů kelvinů, v lokálních oblastech až pět milionů kelvinů. Korona je velmi řídká, proto k jejímu ohřevu na pozorovanou teplotu postačí méně než 0,001 % z celkového slunečního výkonu. Jde o neteplný ohřev, klasický přenos tepelné energie vedením není v koruně možný. Je jasné, že na vině je magnetické pole, které nějakým způsobem umožňuje přenos energie na vzdálenost statisíců kilometrů. V průběhu let se vyrojily desítky hypotéz a teorií o tom, jaké mechanismy by mohly ohřev korony způsobovat. Nakonec zůstaly ve hře jen tři: magnetozvukové vlny, přepojování magnetických siločar a turbulentní procesy ovládané magnetickým polem. Slunce dnes sledují desítky družic a sond vybavených přístroji s vynikajícím rozlišením, a tak bychom očekávali, že problém ohřevu korony byl

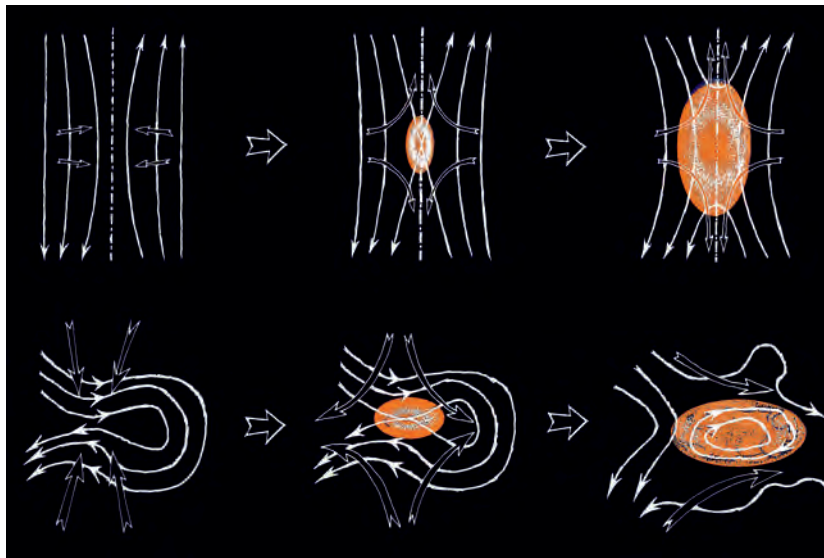
dávno vyřešen. Opak je pravdou. Nej kvalitnější snímky mají rozlišení přibližně 200 kilometrů. Netepelné procesy ohřevu probíhají ale na úrovni šroubovic opisovaných ionty v magnetickém poli. V tomto případě jde o pohyb protonů na škálách řádově stovek metrů.

Současná technika umožňuje jen nepřímá pozorování těchto procesů. Jmenujme alespoň tři observatoře, které výrazně ovlivnily naše znalosti o Slunci. První je bezmála dvoutunový kolos SOHO o velikosti autobusu, který přes čtvrt století obíhá kolem Lagrangeova bodu L1 a odsud neúnavně pozoruje naši nejbližší hvězdu.

Observatoř SOHO mj. položila základy helioseismologie – sledování pod povrchových útvarů za pomoci seismických vln. Na druhém místě je vynikající americká observatoř SDO, jejíž čtyři dvacet centimetrové dalekohledy sledují Slunce od roku 2010 z geosynchronní orbity Země. Snímky chrlené každých 12 sekund umožňují sestavovat videa, na nichž sledujeme děje na Slunci v přímém přenosu. Z mnoha slunečních observatoří jmenujme ještě Parkerovu sondu (PSP), která zkoumá Slunce z největší možné blízkosti. V roce 2025 by se měla přiblížit k povrchu na necelý šestinásobek slunečního průměru.

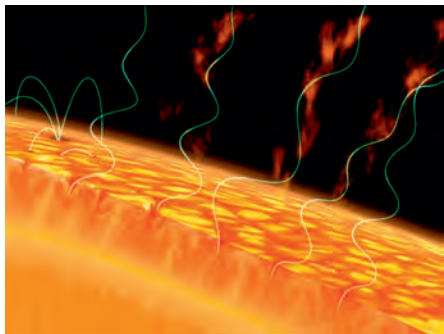
## Vítězné tažení Alfvénových vln

Myšlenka popisovat plazma jako tekutinu pochází už z počátku 20. století. Hlubší teoretický popis se ale objevil až na počátku 40. let. Za otce tohoto popisu je považován švédský fyzik Hannes Alfvén, který v roce 1942 jako první použil pro tekutinový popis plazmatu slovo „magnetohydrodynamika“. Jím navržená soustava rovnic znamenala značný průlom v metodách popisu plazmatu. Vedla na koncept magnetických polí „zamrzlých“ do plazmatu (sledujících plazma), na správný popis vlnových jevů i turbulencí v plazmatu. Hannes Alfvén za průkopnické práce v oblasti magnetohydrodynamiky získal v roce 1970 Nobelovu



*K přepojení magnetických siločar dochází v oblastech, kde mají blízké siločary opačný směr a magnetické pole je nulové. Oblast přepojení má tvar písmene X.*

**Korona** – vnější atmosféra Slunce volně přecházející do meziplanetárního prostoru. Teplota dosahuje až pět milionů stupňů Celsia, pravděpodobně je korona ohřívána rozpadem plazmových vln a lokálními rekonekcemi (přepojování) magnetických siločar. K korona (kontinuum) je způsobena rozptylem slunečního světla na volných elektronech. F korona (Fraunhoferova) je způsobena rozptylem slunečního světla na prachových částicích padajících z meziplanetárního prostoru na Slunce, charakteristické jsou absorpční čáry. E korona (emisní) jsou emisní čáry způsobené přechody ve vysoce ionizovaných kovech. Tyto čáry jsou možné jen za vysokých teplot milionů kelvinů.



Transport energie Alfvénovými vlnami, který byl potvrzen japonskou sondou Hinode. Zdroj: JAXA/Hinode.

**Geosynchronní orbita** – dráha, na které je perioda oběhu družice kolem Země (vzhledem ke hvězdám) stejná jako rotační perioda Země. Družice se pro pozorovatele na určitém místě zeměkoule bude vracet na stejné místo na obloze vždy ve stejný čas (odsud pochází název geosynchronní). Její dráha na obloze připomíná tvarem číslici 8. Speciálním případem je geostacionární dráha, která je kruhová a má nulový sklon. Její výška nad povrchem Země je 35 800 km a družice se pozorovateli jeví na obloze jakoby nehybná.

**Lagrangeovy body** – pět bodů v sousedství dvou obíhajících hmotných těles, ve kterých je gravitační a odstředivá síla vyrovnaná. Polohu těchto bodů poprvé vypočítal italsko-francouzský matematik Joseph-Louis Lagrange. Velmi výhodné je například umístění sond určených k pozorování vzdáleného vesmíru do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, který je vzdálený od Země 1 500 000 km ve směru od Slunce (WMAP, Planck, Herschel). Naopak, do bodu L1 soustavy Země-Slunce se umísťují sondy určené pro monitorování Slunce (například SOHO). Lagrangeův bod L3 soustavy Země-Slunce leží na opačné straně Slunce, nepatrně dále, než je oběžná dráha Země. Body L4 a L5 neleží na spojnici obou těles, ale tvoří s nimi rovnostranné trojúhelníky.

cenu za fyziku. Byl to také on, kdo v roce 1947 navrhl, že by za ohřev korony mohly být zodpovědné magnetozvukové vlny, kterým dnes na počet Hannese Alfvéna říkáme Alfvénovy vlny. Alfvénovy vlny depoují energii do zprohýbaných magnetických siločar, které vlají jako tráva ve větru. Na Slunci byly tyto vlny detekovány japonskou družicí Hinode v roce 2007.

Výpočty americké skupiny vědců vedené Bartem De Pontieeu z laboratoře LMSAL (*Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory*) ukázaly, že pozorované vlny jsou schopné odnášet do korony podstatnou část energie potřebné k jejímu ohřevu. V případě Hinode šlo o otevřené siločáry, podél nichž se Alfvénovy vlny šířily od Slunce. Rozvlnit se ale mohou i uzavřené magnetické smyčky (tzv. *koronální smyčky*), jejichž oba konce procházejí slunečním povrchem. Povrch Slunce funguje podobně jako pevný úchyt struny a smyčka se může rozkmitat stojatým Alfvénovým vlněním. Rozvlněné siločáry následně předávají energii částicím korony. Mechanismus týkající se uzavřených siločar navrhl americký fyzik Eugen Parker v roce 1988. Rychlost Alfvénových vln je nepřímě úměrná odmocnině z hustoty plazmatu. Výskyt lokálních bublin plazmatu či okolních turbulentních mění rychlost šíření Alfvénových vln i účinnost přenosu energie. Podle numerických simulací mohou být Alfvénovy vlny kombinovány s iontovými cyklotronními vlnami. Ty vznikají při krouživém pohybu nabitých částic (protonů či iontů) podél magnetických siločar. Jde o elektromagnetické vlny, jejichž frekvence je blízká cyklotronní frekvenci. Iontové cyklotronní vlny mohou také přenášet energii, a to dokonce na velké vzdálenosti. Kolem roku 2010 se zdálo, že Alfvénovy vlny jsou zcela dominantním mechanismem přenosu energie do korony a další mechanismy k ohřevu přispívají jen zanedbatelně. Dnes víme, že i minoritní mechanismy mohou mít zanedbatelný vliv.

## Mikrorekonekce stále na scéně

V roce 1946 navrhl australský astronom Ronald Gordon Giovanelli, že zdrojem ohřevu plazmatu a urychlení částic může být přepojování magnetických siločar. Bylo tomu zhruba ve stejné době, kdy byl také navržen mechanismus transportu energie do korony prostřednictvím magnetozvukových vln. Při přepojení se magnetické siločáry do- stávají do protisměru, v této oblasti je nulové pole (tzv. nulový bod) a siločáry získají tvar písmene X. V takovém místě může dojít ke změ-



ně topologie siločar a prudkému uvolnění energie. Přepojení siločar je zodpovědné za vznik koronálních výronů hmoty, při nichž se uvolní plazmoid se sbaleným magnetickým polem, který následně putuje Sluneční soustavou. Označení magnetické přepojení (anglicky *magnetic reconnection*) zavedl anglický fyzik a astronom James Dungey, který v roce 1953 objevil, že změna topologie siločar je možná jedinečně v plazmatu s konečným odporem. Na počátku 50. let se vynořila velmi populární představa, že v koroně je velké množství bodů nulového pole, v nichž dochází k minirekonekcím (drobným přepojení siločar) a právě ty způsobují její ohřev.

V roce 2008 se pokoušel tým skotských fyziků vedený Stephanem Régnierem z Univerzity v St. Andrews hledat nulové body magnetického pole na základě měření pole sondou Hinode. Zatímco v blízkosti fotosféry jich našli značné množství, v koroně jich bylo minimálně. Tím poprvé utrpěla představa mikrokonekcí a mikroerupcí jakožto dominantního mechanismu ohřevu korony citelnou porážku. K částečné renesanci došlo až v roce 2019, kdy sonda Parker Solar Probe objevila v těsné blízkosti Slunce minizáblesky, o jejichž existenci se dosud nevědělo, protože bylo Slunce pozorováno z větší vzdálenosti, kam tyto minizáblesky nemají šanci doletět, neboť se záhy po vzniku rozplynou. Mikrokonekce a mikroerupce tedy v koroně skutečně probíhají a přispívají k jejímu ohřevu, i když pravděpodobně nejde o mechanismus dominantní.

## Turbulence není outsider

K přenosu energie také mohou přispívat turbulentní struktury v plazmatu, které jsou ve sluneční koroně hojně pozorovány. Pro turbulence je na první pohled typický chaos, zdánlivě náhodné fluktuace rychlostního i tlakového pole způsobené přechodem do stavu s velkým množstvím vírů. Pro turbulenci je ale nejcharakterističtější jevem tzv. *energetická kaskáda* – vznik vírů nejrůznějších velikostí, velké víry se protahují a rozpadají na víry menší. Víry určité velikosti předávají energii nelineárními jevy vírům menším, ty ještě menším atd. Energie je transformována od největších struktur k těm nejmenším. Velikost vírů má svou dolní hranici – říkáme jí *Kolmogorovova škála*. U malých vírů energetická kaskáda končí a začínají převládat disipativní jevy. Energie vírů se nakonec přemění na chaotickou tepelnou energii. První úspěšný model turbulence předložil sovětský matematik Andrej

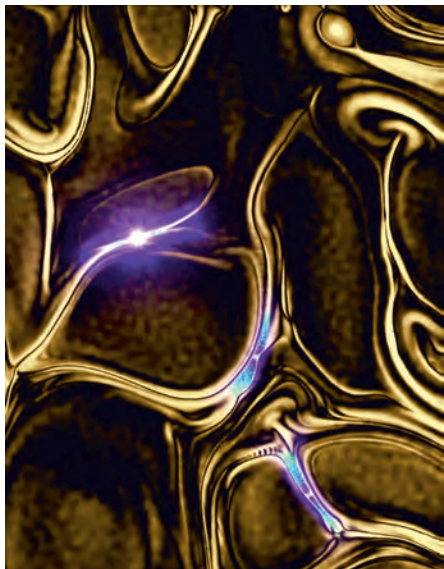
**Zamrzlé pole** – silné magnetické pole je provázáno s plazmatem natolik, že sleduje jeho pohyb. Takové situace říkáme zamrzlé magnetické pole. S jeho konceptem přišel jako první švédský fyzik Hannes Alfvén, když začal plazma popisovat jako tekutinu a zformuloval rovnice magnetohydrodynamiky. Za objevné práce ve fyzice plazmatu získal Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1970.

**Parker Solar Probe** – sonda americké NASA určená pro výzkum Slunce z těsné blízkosti. Startovala v srpnu 2018, mise je plánována do roku 2025. Sonda se na konci mise dostane až do vzdálenosti 6,2 milionu kilometrů od slunečního povrchu. Z dosavadních objevů jmenujme alespoň pozorování nehomogenity a turbulencí slunečního větru, objev bezprašné zóny a objev záhybů tvaru písmene S ve slunečním větru.

Minizáblesky vysoce energetických částic pozorované Parkerovou sondou. Zdroj: NASA, PSP.







*Numerická simulace turbulencí v plazmatu z roku 2017 prováděná na Chicagské univerzitě. V místech doteku magnetických siločar dochází k „divokému“ přepojování magnetického pole. Uvolněná energie zahřívá okolní plazma. Zdroj: NASA GSFC, University of Chicago (Colby Haggerty), University of Delaware (Tulasi Parashar).*

Nikolajevič Kolmogorov v roce 1941. Jeho model vycházel spíše z rozměrové analýzy než ze skutečné znalosti fyzikálních procesů. Ty ostatně neznáme dodnes. Ve slunečním plazmatu je aplikace Kolmogorovova modelu značně diskutabilní, protože na nejmenší škále hraje podstatnou roli krouživé pohyby iontů, se kterými Kolmogorovův model nepočítá. Poloměr krouživých pohybů iontů zde přebírá roli Kolmogorovovy škály. Pro sluneční fyziku z Kolmogorovova modelu zůstává předávání energií mezi jednotlivými škálami vírů. Vlastní disipace energie na úrovni Kolmogorovovy škály (v tomto případě stovky metrů) je nejasná.

Podle rozsáhlých numerických simulací mohou sehrát u ohřevu korony turbulentní struktury také důležitou roli. Například švédský astronom Boris Vilhelm Gudiksen spolu s dánským astronomem Åkem Nordlundem uskutečnili v roce 2005 numerickou simulaci, v níž magnetohydrodynamický algoritmus využíval 3 375 milionů síťových buněk. Takové simulace jsou na hranici výpočetních možností, ale bohužel nestačí. Jak k turbulentním procesům, tak k přepojování siločar dochází na škále stovek metrů, kde se ionty chovají jako samostatná individua a tekutinový model selhává. Korektní numerické simulace tedy musí probíhat buď na základě statistických metod (v rámci kinetické teorie), nebo skutečným výpočtem pohybu jednotlivých částic včetně jejich vzájemných interakcí, což je v současné době nemožné. Jednotlivé mechanismy mohou být navíc propojené. Rozvlnění plazmatu může vést jak k turbulencím, tak ke vzniku nulových bodů potřebných pro přepojení magnetického pole. A samotné přepojení siločar je zpravidla prudký (rychlý) děj, který může plazma rozvlnit a současně způsobit vznik turbulentních struktur. V turbulentním plazmatu naopak dochází k drobným explozivním rekonekcím... Na ohřevu korony se proto budou podílet všechny tři mechanismy – Alfvénovy vlny, přepojování siločar i turbulence. K definitivnímu určení podílu jednotlivých procesů na ohřevu korony budeme potřebovat robustnější numerické simulace a detekční metody pracující na škále pohybů stovek metrů.

■ Petr Kulhánek, 1. 10. 2021, AB 35/2021

## Kůra Merkuru

První planeta Sluneční soustavy, Merkur, stojí poněkud stranou zájmu určitě neprávem. Na první pohled se zdá, že není ničím zajímavá, vypadá trochu jako náš Měsíc, jen na denní straně je ještě více rozpalovaná blízkostí Slunce. Minimální atmosféra, samý kráter, ani ta moře, která známe z Měsíce, tam nejsou.

Stačí však nahlédnout do tabulek a dozajista se nad některými údaji pozastavíme. Předně, má magnetické pole. Na první pohled by se zdálo slabé, na rovníku dosahuje pouze asi jednoho procenta intenzity magnetického pole Země. Je však třeba mít na vědomí, že jsou i tělesa, která magnetické pole nemají, například Venuše či Mars, o Měsíci nemluvě. Není zcela jasné, jak může mít tak malá planeta tak silné magnetické pole. Obvykle se přisuzuje efektu tekutinového dynama, ale to by znamenalo, že planeta musí mít neobvykle velké tekuté jádro. Ukazuje se, že jádro Merkuru zabírá plných 60 % objemu. Pro srovnání, u naší Země je to jen 15 %. Můžeme se jen dohadovat, proč tomu tak je.

Uvažuje se o tom, že se v dobách vzniku Sluneční soustavy Merkur srazil s obrovskou planetkou, která s sebou odnesla velkou část povrchu. Je také možné, že se povrch vypařil a byl odvanut slunečním větrem. V každém případě muselo ke katastrofě dojít až po diferenciaci materiálu, kdy železo zůstalo v nitru a lehčí křemičitany zmizely. Tomu by pak odpovídala i vysoká hustota planety ( $5\,430\text{ kg/m}^3$ ), jen nepatrně nižší než u Země ( $5\,510\text{ kg/m}^3$ ). Je možné, že vysoká hustota Země je způsobena větším tlakem v jejím nitru. Kdybychom porovnávali pouze hustotu materiálu za stejného tlaku, možná by byl Merkur na prvním místě.

### Jak silná je kůra Merkuru?

S velkým objemem jádra souvisí malá tloušťka pláště a kůry. Z měření sondy MESSENGER vyšlo najevo, že je kůra silná pouhých  $35 \pm 18\text{ km}$ . Je zajímavé, že tloušťka kůry nevyvolala údiv odborníků pro svou malou hodnotu, nýbrž se naopak jevila velká. Náš Měsíc, považovaný za Merkurova blízkého příbuzného, má kůru v porovnání se svým pláštěm tenčí. Poměr mezi objemem obou geologických struktur je asi 7 %. U Merkuru plných 11 %. Měsíc ovšem není Merkur a tento nepoměr ani nebyl tak velký, aby se nedal vysvětlit rozdílnými podmínkami při formování obou těles. Byl to příliš malý rozpor, než aby planetology

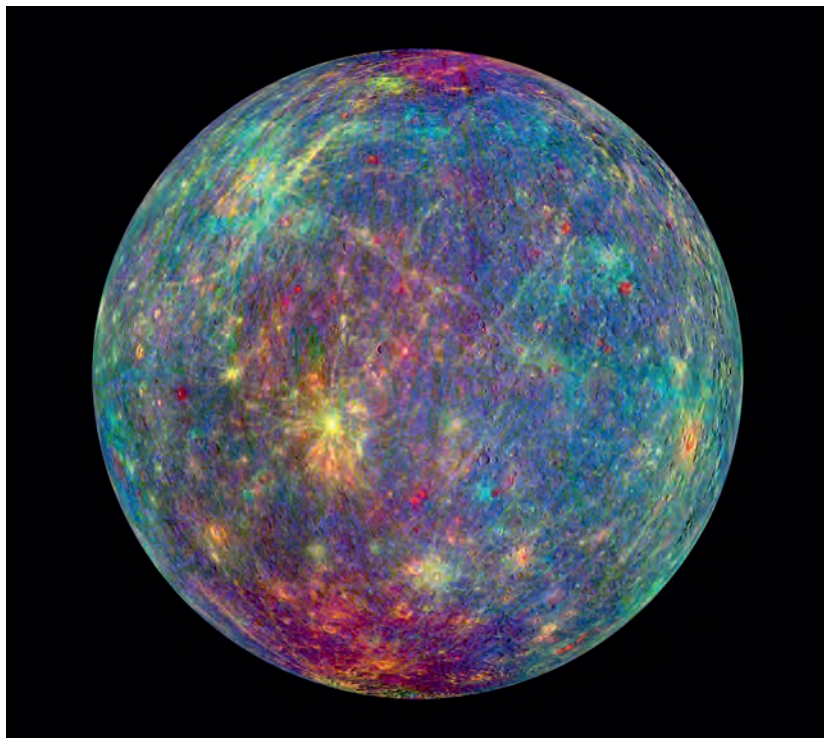
**Izostáze** – stav hydrostatické rovnováhy litosférických bloků plujících na roztaveném magmatu. Každé porušení této rovnováhy vede k přesunům hmoty a ustavení nové izostáze.

**Airyho model** – mechanismus udržení izostáze navržený Airym a Heiskanenem. Podle této teorie je hustota planetární kůry všude přibližně stejná. Hydrostatickou rovnováhu pod horami udržuje mocnější vrstva kůry, pod prohlubněmi je naopak kůra tenčí.

**Prattův model** – mechanismus udržení izostáze navržený Prattem a Hayfordem. Podle této teorie se hustota planetární kůry mění místo od místa. Aby hydrostatický vztlak byl schopen udržet hory v patřičné výšce, musí mít menší hustotu. Materiál prohlubni je naopak hustší.

Merkur s povrchem posetým krátery je na první pohled podobný Měsíci. Zdroj: NASA/MESSENGER.





Hustota povrchu Merkuru příliš nekorresponduje s relativním převýšením. Jednotlivé barvy odpovídají různým horninám a nerostům. Zdroj: NASA, Johns Hopkins University APL, Carnegie Institution of Washington.

**MESSENGER** – sonda NASA, která zkoumala planetu Merkur. Startovala v srpnu 2004, v letech 2006 a 2007 prolétla dvakrát kolem Venuše. Kolem Merkuru poprvé prolétla v lednu 2008. Další průlety proběhly v říjnu 2008 a září 2009. V březnu 2011 byla navedena na oběžnou dráhu kolem Merkuru a od té doby prováděla komplexní měření. Název sondy je zkratkou z anglického *ME*rcury, *S*urface, *Sp*ace *EN*vironment, *GE*ochemistry, and *R*anging. Sonda ukončila svou činnost 30. dubna 2015 řízeným pádem na povrch planety.

dokázal rozčítit. Jak už to však ve vědě bývá, vždy se najde někdo, kdo zapochybuje a hledá jiné řešení. Tou klíčovou postavou je Michael Sori z Arizonské univerzity.

Planetu Merkur si můžeme v prvním přiblížení přirovnat ke kouli roztaveného železa, na které plovou ztuhlé křemičitany. Zdánlivě jednoduchá představa se začne komplikovat, když si uvědomíme, že povrch není hladký, ale jsou na něm vyvýšeniny a prohlubně. To přímo volá po teoretickém modelu vysvětlujícím, jak se realizuje izostatická rovnováha a jak vypadá rozhraní mezi tekutou a pevnou složkou. Tento problém není nic nového, známe ho i ze Země. Izostázi si v podstatě vysvětlujeme dvojím způsobem. Ve skutečnosti se pak oba tyto principy kombinují a doplňují.

## Matematické modely planetární kůry Merkuru

Bud' si můžeme říci, že je hustota kůry v podstatě všude stejná, a pak by se měly těžké hory nořit hlouběji do kapaliny, aby je byl hydrostatický vztlak schopen udržet. Pod prohlubněmi obsahujícími málo materiálu by se naopak kapalina tlačila nad průměrnou úroveň. Tento přístup rozpracovali již v devatenáctém a dvacátém století anglický matematik a astronom George Airy a finský geodet Veikko Heiskanen, proto se běžně mluví o Airyho modelu izostáze.

Naproti tomu, podle britského kněze, astronoma a matematika Johna Pratta a amerického geodeta Johna Hayforda je tekutý vnitřek skoro přesná koule, na které plave kůra s bloky o stejné hmotnosti ale různé hustotě. Bloky s nejnižší hustotou mají největší objem, proto tvoří vyvýšeniny a hodně husté bloky naopak prolákliny. Michael Sori byl první, koho napadlo zjistit, kterému modelu odpovídá kůra Merkuru lépe.

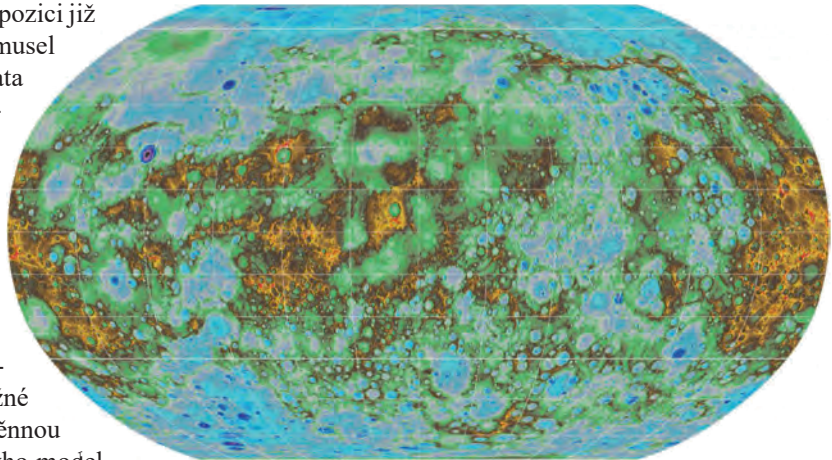


Údaje o relativních výškách měl k dispozici již z mapování MESSENGERU. Nyní musel sestavit mapu hustot. Opět použil data ze sondy. Podle mapy výskytu jednotlivých prvků sestavil mapu nerostů a hornin. Autor uvádí, že jednotlivé prvky sice mohou být obsaženy v různých minerálech, ale jejich hustoty jsou si velmi podobné.

Po porovnání topografické mapy a mapy hustot materiálu se ukázalo, že tu není žádná významná závislost. Prattův model je tedy možné vyloučit a přijmout model s proměnnou tloušťkou kůry. Sori přirovnává Airyho model ke zvrásněnému ledovci na vodní hladině. Nerovnosti ledu nad hladinou jsou víceméně kopírovány nerovnostmi pod hladinou. Podle Archimédova zákona má pak libovolný sloupec vody (daného průřezu) od dna až po vrchol ledu stejnou hmotnost. V případě kulového tělesa však tyto představy selhávají a příslušné vztahy nedávají přesné výsledky. Proto Sori sáhl po nedávno odvozených nových vzorcích Matsuyamy a Hemingwaye, které zahrnují také tlak, kterým působí kůra na plášť.

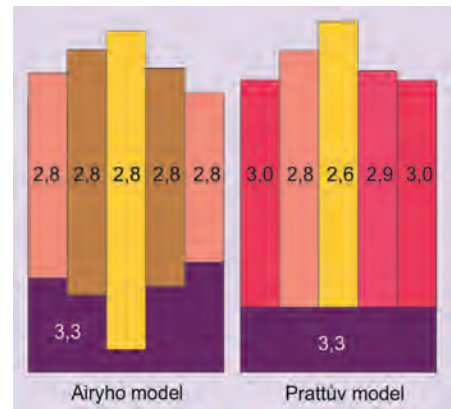
Podle výsledků, ke kterým Sori dospěl, by měla být kůra Merkuru ještě tenčí, pouhých  $26 \pm 11$  km. Tloušťku kůry zatím nemůžeme brát jako definitivní, ale ve prospěch Soriho silně mluví jedna důležitá indicie. Poměr objemu nově spočtené kůry proti objemu pláště se blíží k poměru, který známe z Měsíce. Nová teorie se jistě ještě zpřesní, až získáme přesnější měření z evropsko-japonské sondy BepiColombo, která startovala v roce 2018 a k Merkuru doletí v roce 2025.

■ Rudolf Mentzl, 1. 6. 2018, AB 17/2018, aktualizováno



Topografická mapa Merkuru. Zdroj: United States Geological Survey.

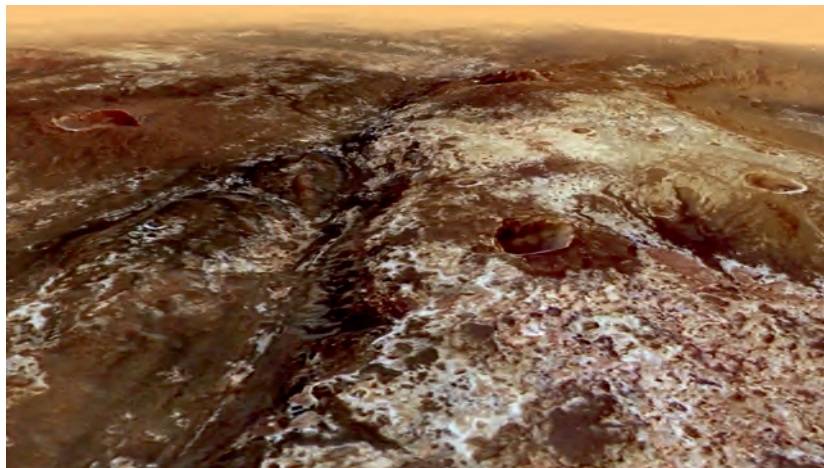
Airyho (1) a Prattův (2) model izostáze. Zdroj: Wikipedia.



## Exploze, sesuvy a levitace na Marsu

**Trakce, saltace a vznos** – specifický transport částic ovlivněný tekutinou, například vodou nebo větrem. Částice podloží jsou tekutinou transportovány na jiné místo. U hmotnějších částic dochází k trakci, vlečení po povrchu. Jejich větší hmotnost neumožní odpoutání od povrchu. Méně hmotné částice jsou tekutinou vyzdvíženy a transportovány nad povrchem na jiné místo, tento jev nazýváme saltace. Příkladem je pohyb písku nad písečnými dunami. Pokud jsou částice transportovány na větší vzdálenosti, hovoříme o vznosu.

Část 600 kilometrů dlouhého a dva kilometry hlubokého údolí Mawrth Vallis, jehož podoba byla rekonstruována ze snímků evropské mise Mars Express. Zdroj: ESA.



Pojďme se na moment zasnít i se současně přenést zpět do dětských let. Představte si, že se nacházíte na povrchu Marsu a v pravé ruce držíte kyblík plný mokrého písku. Jako nespočet generací dětí před vámi máte i vy neskonalou touhu kyblík překlomit a vyrobit první pískovou bábovičku na povrchu rudé planety, a tím se „nesmazatelně zapsat“ do historie lidstva. Zatímco na Zemi by k naplnění touhy stačilo málo – dostatečně rychle kyblík otočit, přitisknout a následně ho opatrně nadzvednout – na Marsu vás při pohledu dovnitř kyblíku jímá neblahý pocit, že je něco neskutečně špatně. Obsah kyblíku totiž vře. A to doslova. Celá masa písku bublá a jednotlivá zrnka jsou vyvrhována do výšky, aby následně dopadla mimo kyblík. Při pohledu dovnitř kyblíku navíc jen těžko věříte tomu, co vidíte. Nad povrchem písku totiž levituje několik centimetrových hrud písku... Ano, čtete správně. Levituje. Ale nebojte, nestane se nám z toho nepovedený úvod béčkového sci-fi filmu, ale naopak čtete začátek cesty do fascinujícího světa nejnovějších vědeckých objevů založených na výzkumu chování směsi vody a sedimentu ve vakuové komoře simulující prostředí na Marsu.

### Dnešní Mars a voda v kapalném skupenství

Mars, čtvrtá planeta Sluneční soustavy, je přibližně poloviční ve srovnání se Zemí a současně je to těleso, které má i menší hmotnost a střední hustotu než Země. To se odráží v menším gravitačním zrychlení panujícím na jeho povrchu. To je ve srovnání se Zemí přibližně třetinové, dosahuje hodnoty  $3,71 \text{ m/s}^2$  oproti tíhovému zrychlení na povrchu Země, které je  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Uniknout z gravitačního působení rudé planety je proto mnohem snazší než v případě Země. A to platí pro kosmické son-

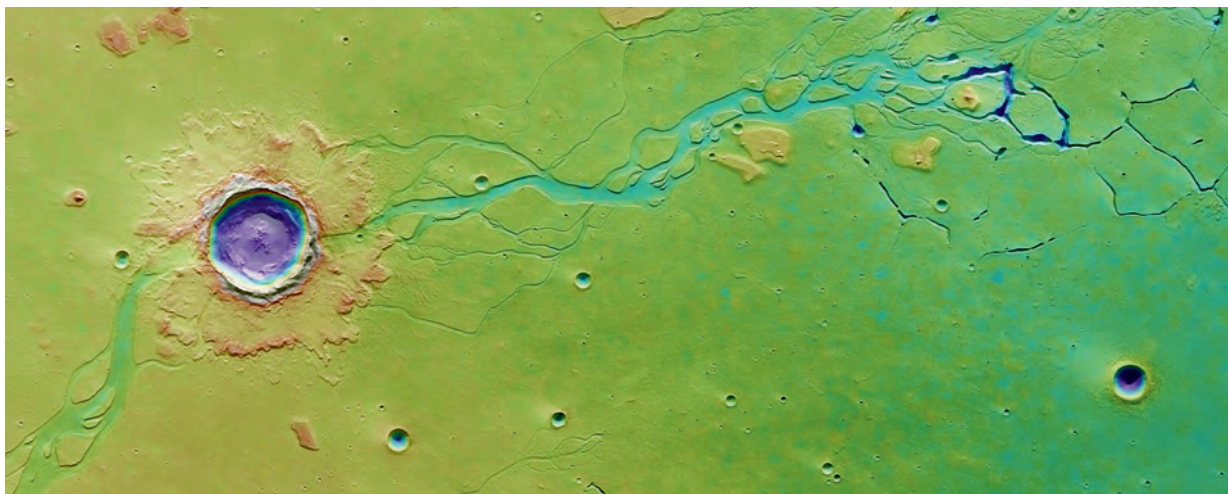


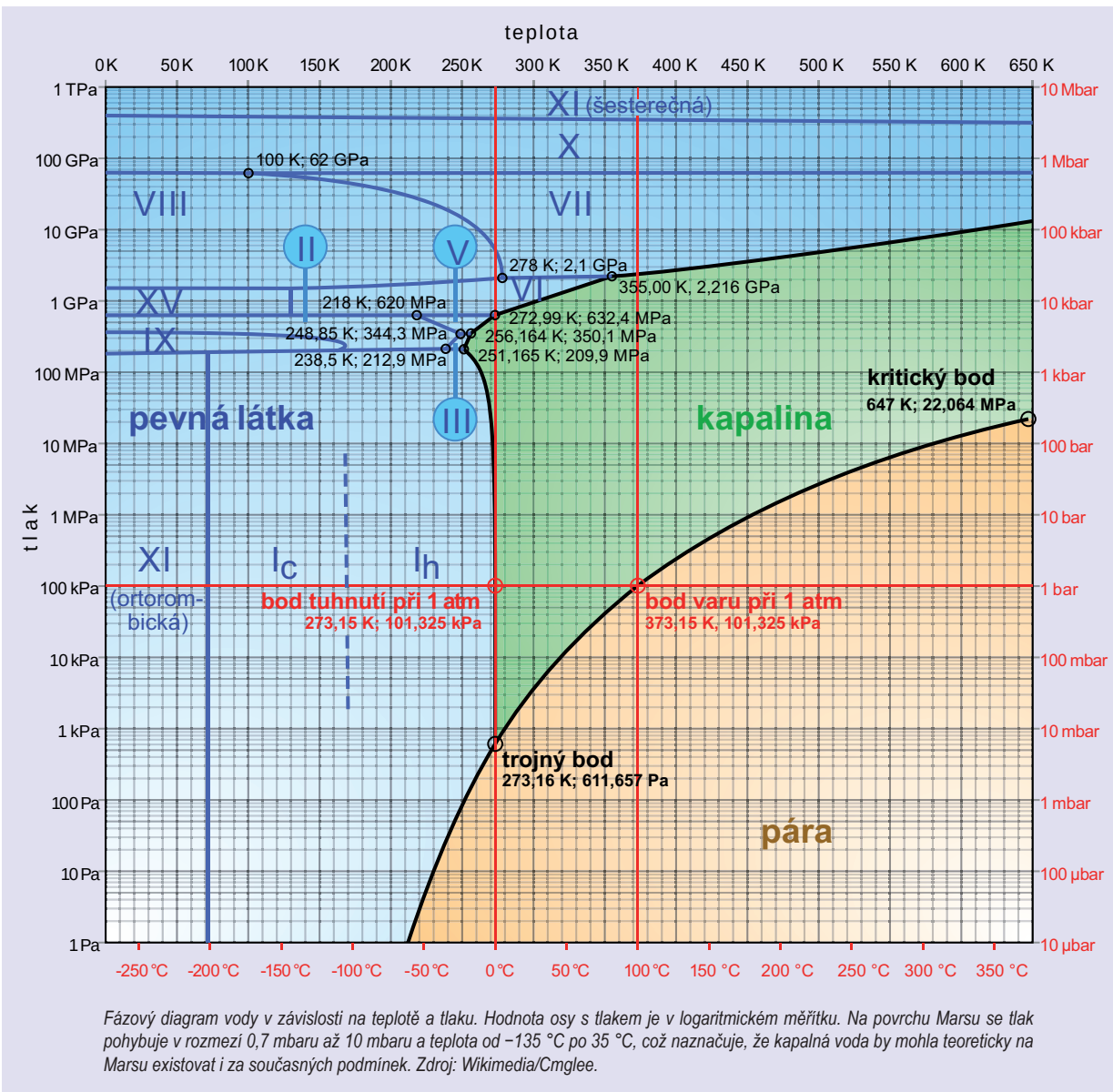
dy, úlomky hornin vyvržené z povrchu následkem dopadů planetek, i pro jednotlivé molekuly různých plynů obsažených v atmosféře. Podobně jako Země má i Mars atmosféru, ta je přibližně  $170\times$  řidší než u Země, průměrný tlak při povrchu dosahuje 6 milibarů. Nízká hustota atmosféry je způsobena právě tím, že molekuly plynů mohou relativně snadno z gravitačního působení Marsu unikát, vlivem čehož se atmosféra neustále zeslabuje. I přes to je ale atmosféra Marsu dostatečně silná k ovlivňování řady přírodních procesů odehrávajících se na povrchu rudé planety. Ovlivňuje proto například průběhy sopečných erupcí, ale také stabilitu látek vyskytujících se na povrchu planety, například kapalné vody či vodního ledu.

O přítomnosti vody na Marsu máme od 90. let 20. století celou řadu pádných důkazů dokládajících její výskyt na samotném povrchu, pod ním, i v atmosféře planety. Voda se vyskytuje převážně ve formě vodního ledu, případně jako vodní pára. Do současnosti ale zůstává nejasné, jestli na povrchu Marsu existuje i voda kapalná. Fotografie povrchu Marsu ukázaly, že se tam určitě nenachází ve větším množství. Nepozorujeme totiž žádné oceány, moře, jezera, či řeky (nicméně spatřili jsme řadu dokladů o její dřívější přítomnosti, například v podobě říčních sítí, jezerních delt či dokonce možné linie pobřeží oceánu...), nicméně je stále nejasné, jestli by se v některých oblastech Marsu nemohla kapalná voda nacházet alespoň v malém množství i dnes.

**Mawrth Vallis** – jedno z nejstarších údolí na Marsu zahloubené dva kilometry pod okolní terén. Jeho délka je přes 600 kilometrů. Jily v údolí jsou pravděpodobně dokladem o vodě, která tudy protékala v minulosti. Údolí je cílem výzkumu mnoha sond, například Mars Global Surveyor, MRO, Mars Odyssey nebo Mars Express.

Na povrchu Marsu můžeme spatřit nejenom doklady o proudění kapalné vody v historii Marsu v podobě rozsáhlých říčních koryt, ale i doklady přítomnosti vodního ledu uloženého pod povrchem. O jeho přítomnosti svědčí například zvláštní lem okolo některých impaktních kráterů (viz okolí největšího kráteru na obrázku). Předpokládáme totiž, že lem vzniká vlivem krátkodobého roztátí podpovrchového ledu v důsledku uvolnění tepla během dopadu. Výškový snímek v nepravých barvách, kdy barvy označují oblasti se stejnou výškou, ukazuje část oblasti Hephaestus Fossae nacházející se na severní polokouli Marsu. Průměr největšího kráteru je přibližně 20 kilometrů. Zdroj: ESA, DLR, FU Berlin (G. Neukum).



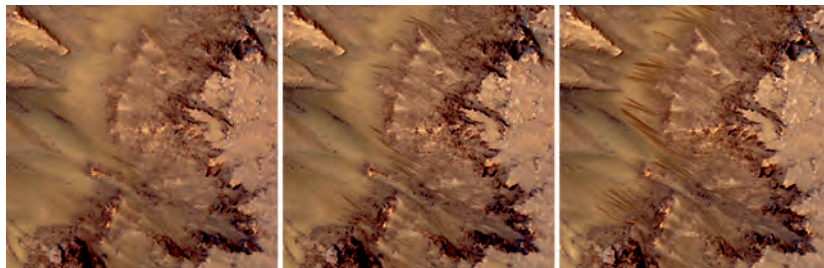


Teoreticky totiž na povrchu Marsu panují podmínky, které existenci kapalně vody v určitých oblastech po krátký čas umožňují. Je to dáno tím, že teplota a atmosférický tlak nejsou všude na povrchu stejné. Podobně jako na Zemi se i na Marsu hustota atmosféry (respektive atmosférický tlak) zmenšuje s rostoucí topografickou výškou. Na Marsu je přitom rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším místem přes 29 kilometrů, což se na hodnotě atmosférického tlaku významně projevuje. Zatímco na vrcholku Olympus Mons, nejvyšší hory Sluneční soustavy, dosahuje pouhých 0,7 milibaru, na dně obrovské impaktní pánve Hellas je to o řád více, a to až 10 milibarů. Data získaná sondami Viking, Mars Pathfinder i Mars Global Surveyor navíc ukázala, že hodnoty atmosférického tlaku překračují hodnotu trojnásobku tlaku vody v rozsáhlých oblastech Marsu. Stejně tak v některých oblastech Marsu panují pro existenci kapalně vody i příznivé teploty. Ty mohou sice klesnout až na  $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$  v oblasti pólů, ale mohou se naopak vyšplhat až k  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  v oblastech rovníku; tedy vysoko nad bod mrazu (nicméně tady je nutno podotknout, že kapalná voda bez příměsí může nejspíše na Marsu existovat jen v určitém rozmezí teplot, konkrétně mezi  $0$  až  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  by totiž docházelo k jejímu zamrznutí, nad  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  naopak k jejímu varu a změně skupenství v plynné. Rozsah oblastí, kde by čistá kapalná voda mohla případně existovat, je proto omezen).

Atmosféra Marsu je navíc velice suchá. Pokud bychom předpokládali výskyt veškeré detekované vody v atmosféře Marsu ve vrstvě do 1 km nad povrchem, pak by se vyskytovala v koncentraci pouhých 600 ppm. Kapalná voda by se proto na povrchu rychle vypařila. Mohla by sice dosáhnout o trochu větší stability ve formě solného roztoku, takový roztok by totiž umožňoval její existenci i za teplot pod bodem mrazu, ale ať už by byla voda ve formě čisté, či solného roztoku, v obou případech by doba jejího výskytu byla v podstatě jepičí.

### Nestabilní voda, aneb kyblíku vař!

Za současných podmínek je proto kapalná voda na povrchu Marsu nestabilní a po krátkém čase zmizí. Nicméně i přes to s ní ale musíme počítat jako s možným agentem spolupodílejícím se, byť jen



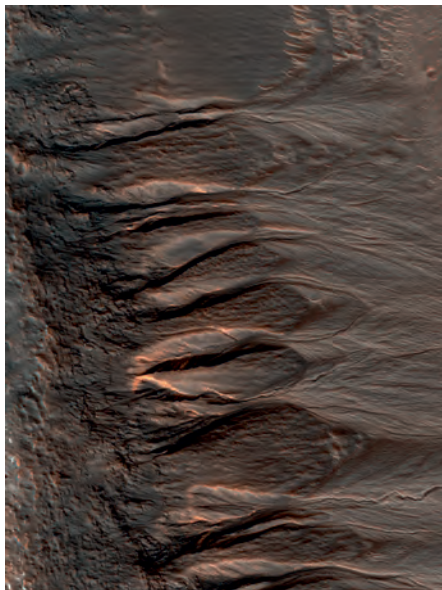
**Olympus Mons** – největší hora Sluneční soustavy, sopka na Marsu s výškou 26 kilometrů nad okolním terénem. Je součástí rozlehlé vulkanické oblasti Tharsis Montes. Tato štítová sopka zaujímá základnu o průměru 600 kilometrů. Na vrcholu je kaldera (proláklna) o průměru 60 až 80 kilometrů.

Série tří snímků pořízených kamerou HiRISE na palubě sondy Mars Reconnaissance Orbiter ukazuje oblast Marsu v době, kdy zde panují vysoké teploty a vhodné podmínky pro případný výskyt kapalně vody. Na snímcích je vidět vznik a prodlužování tmavých proužků, tzv. recurring slope lineae, vznikajících na úbočí stěny impaktního kráteru Newton. Zachycená oblast je přibližně 700 metrů velká. Zdroj: NASA, JPL-Caltech, University of Arizona.

**Leidenfrostův jev** – izolace kapky od rozpáleného podkladu způsobená vrstvou vytvořených par. Kapka může při správné teplotě poskakovat nad plotnou bez odpaření i několik minut. Jev v roce 1756 objevil a popsal německý lékař a telolog Johann Gottlob Leidenfrost. Obdobným jevem je levitace kapek nad povrchem Marsu.

**Viking** – dvojice sond NASA vypuštěná k Marsu ve dnech 20. 8. 1975 a 19. 9. 1975. Obě měly orbitální i přistávací modul. Mise byly úspěšné a bez větších problémů trvaly několik let.

Snímek pořízený kamerou HiRISE schopnou fotografovat povrch Marsu s rozlišením až 25 cm na zobrazovací bod ukazuje stěnu impaktního kráteru v oblasti Ariadnes Colles s řadou malých stružek, tzv. gullies. V oblasti jejich ústí se nachází vějíře tvořené transportovanými sedimenty. Šířka oblasti přibližně jeden kilometr. Zdroj: NASA, JPL, Arizona State University.



krátkodobě, na řadě geologických procesů odehrávajících se na jeho povrchu. Ve vědecké obci se proto již řadu let vede diskuze, jestli zvláštní tmavé proužky, tzv. recurring slope lineae, které se sezóně objevují na strmých svazích marsovských kopců, jsou projevem kapalné vody, svahových procesů v podobě drobných sesuvů či sublimace suchého ledu. A podobné diskuse se vedou u řady dalších útvarů, které na povrchu Marsu pozorujeme. Přitom jedním z problémů pro uzavření diskusí byla až donedávna naše neznalost, jak se vlastně voda při pohybu po povrchu Marsu chová. Poteče stejně, jako jsme ze Země zvyklí, nebo by se chovala rozdílně? A pokud ano, jak?

A právě hledání odpovědi na tuto otázku stálo za zrodem myšlenky využít speciálně upravenou vakuovou komoru umístěnou v laboratoři britské Open University pro pozorování chování kapalné vody během tečení v podmínkách nízkého tlaku. Mezinárodní vědecký tým pod vedením Francouzky Marion Massé proto do vakuové komory umístil box vyplněný pískem, na který položil kostku čistého vodního ledu (kostka ledu měla váhu 70 gramů a box s pískem byl nakloněn pod úhlem 30°). Pokus probíhal za atmosférického tlaku 6,5 mbaru a teploty 20 °C, díky čemuž docházelo k pomalému tání ledu, vzniku kapalné vody a jejímu vsakování do písku. Následně byl pokus zopakován se shodnými parametry, jen s tím rozdílem, že byl atmosférický tlak zvýšen na 1 bar, tedy průměrnou hodnotu tlaku při povrchu Země.

Z počátku se zdálo, že experimenty v obou prostředích vedou ke stejným výsledkům. Kostka ledu začala tát a voda se vsakovala do písku. Po svahu dolů od kostky vznikala tmavá, postupně se zvětšující oblast vyznačující vodou saturovaný písek. Většina kapalné vody se vsákla a pohybovala se pod povrchem, jen příležitostně bylo vidět malé množství kapalné vody přímo na povrchu. Nicméně brzy začaly být zřejmé značné rozdíly. Tmavá oblast saturovaná vodou byla totiž více než dvakrát delší v případě pokusu probíhajícího za normálního tlaku a současně se voda pohybovala pískem rychleji než v prostředí sníženého tlaku (rychlostí 100 cm/h oproti 33 cm/h). Rozdílná byla i doba, po kterou voda pískem protékala. Zatímco v případě normálního tlaku se po roztátí kostky ledu voda i nadále šířila sedimentem, za sníženého tlaku pohyb vody okamžitě ustal. Zastavení tečení souviselo přitom s nestabilitou vody v prostředí sníženého tlaku. Jakmile led roztál, vzniklá voda se okamžitě dostala do varu a vypařovala se, a tím klesalo její množství v písku. Jakmile tedy došlo k přerušení přísunu



dalšího množství vody, její propagace pískem se zastavila. Na Marsu proto můžeme očekávat, že kapalná voda by případně byla schopna ovlivňovat menší oblast, než by dokázalo stejné množství vody na povrchu Země.

Nicméně tím rozdílý neskončily. Ty hlavní byly spojeny s povrchovými projevy nestabilní vody vystavené prostředí nižšího tlaku. Voda se totiž po svém vzniku okamžitě dostala do varu a vypařovala se. Vlivem toho vznikaly na povrchu tající kostky ledu a později i v písku bubliny vyplněné vodní párou, které následně praskaly, a tím způsobovaly vznik malých explozí. Vědci pozorovali, že ke vzniku bublin docházelo všude, kde byl písek saturován vodou, nicméně nejsilněji se tento proces odehrával na kontaktu mezi suchým a saturovaným pískem. Na tomto přechodu se totiž nacházel nejvýraznější teplotní gradient podporující var vody. Splaskávání vzniklých bublin způsobovalo vyvrhování zrn písku do okolního prostředí v procesu saltace, a to rychlostí až 0,35 m/s. Maximální velikost vyvržených zrn dosahovala v prostředí pozemské gravitace 2 mm, ale vědci odhadují, že v případě snížené gravitace Marsu by tento proces mohl být schopen vyvrhovat zrna až o velikosti 4 mm (bohužel prostředí snížené gravitace zatím na delší čas na Zemi navodit neumíme, takže se zpravidla musíme spokojit jen s výpočty). Opakující se vyvrhování zrn vedlo k vytvoření několik milimetrů vysokého hřebenu, který se nacházel před samotným kontaktem suchého a mokrého písku. Výška hřebenu postupně narůstala, s čímž narůstal i jeho sklon, a to až k hodnotě 30° až 35°. Tehdy došlo k dosažení kritického sypného úhlu pro suchý písek, vlivem čehož došlo k sesuvu zrn suchého písku, a tím k částečnému obnažení saturovaného písku, načež se tento proces opakoval. Ve výsledku proto vznikala opakující se řada malých hřebenů a prohlubní vytvářející zvláštní zvlněný reliéf povrchu v místech, kudy voda v písku protekla.

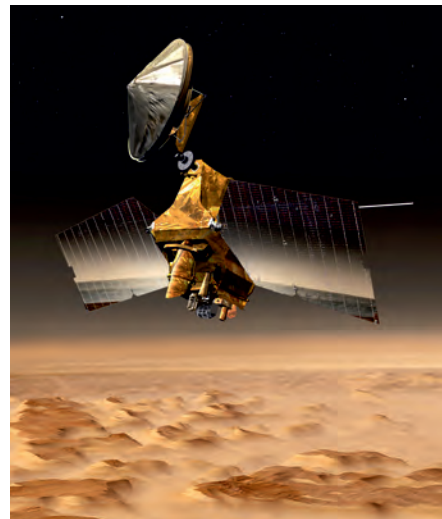
A zde se dostáváme k důležitému výsledku. V případě Země vsakování vody po sedimentu nezpůsobuje příliš jeho transport. Písek se sice zavodní, jak jím voda protéká, ale příliš nedochází k přemísťování jednotlivých zrn písku. V případě sníženého atmosférického tlaku je situace ale naprosto odlišná. Do hry totiž vstupuje mechanismus vyvrhování zrn a jejich následné přesunování vlivem svahových procesů. Vsakování kapalné vody a její následné tečení sedimentem je proto schopno na povrchu Marsu způsobit významný transport materiálu a ovlivnit jeho uložení, respektive přímo pozměnit tvar povrchu

**Mars Pathfinder** – sonda NASA vypuštěná k Marsu dne 4. 12. 1996. Obsahovala orbitální a přistávací modul s vozítkem Sojourner. K přistání došlo 4. 7. 1997. Toto první vozítko mělo plánovanou životnost týden, fungovalo ale celých 12 týdnů.

**Mars Global Surveyor** – další z řady sond NASA určených k průzkumu Marsu. Start se odehrál dne 7. 12. 1996. Měla pouze orbitální modul, který podrobně mapoval povrch Marsu. Mise byla ukončena téměř po deseti letech v listopadu 2006 z důvodu selhání baterií sondy.

**MRO** – Mars Reconnaissance Orbiter (Průzkumná oběžnice Marsu), sonda NASA, která získává detailní informace o vybraných místech na Marsu, zejména s ohledem na přítomnost vody v minulosti i v současnosti. Sonda startovala v srpnu 2005 a na oběžnou dráhu byla navedena v březnu 2006. Rozlišení je pouhých několik decimetrů. Od ledna 2009 slouží také jako retranslační stanice. Od roku 2021 zajišťuje spojení s vozítkem Perseverance.

Umělecká vize sondy Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Zdroj: NASA, JPL, Corby Waste.







Experiment s vyléváním kapalné vody v prostředí sníženého tlaku na studený (označen jako RUN3) i teplý (označen jako RUN5) písek. Výrazné projevy levitujících hroud písku jsou k vidění na posledním obrázku. Převzato z Raack a kol. (2017).

vytvořením série hřebenů a prohlubní. Tím se může na povrchu vytvořit viditelná stopa po vodě protékající uvnitř sedimentu. Navíc se autorům studie podařilo nabídnout i vodítko, proč se nám za pomoci spektroskopických pozorování prováděných sondami z oběžné dráhy nedaří najít na povrchu Marsu spektrální stopy kapalné vody, a tím jednoznačně prokázat její existenci. Experimenty totiž doložily, že kapalná voda v prostředí nižšího atmosférického tlaku zpravidla propaguje uvnitř sedimentu a navíc nedochází ke vzniku mikrofilmu na povrchu písku tak, jak je tomu v případě Země. A přitom je přítomnost vodního mikrofilmu neodmyslitelným předpokladem pro detekci kapalné vody s využitím současné generace spektroskopů, konkrétně zařízení CRISM a OMEGA obíhající na palubě sond MRO a Mars Express. Ty by totiž kapalnou vodu obsaženou v sedimentu nebyly schopny detekovat.

## Levitující hroudy písku

Na Zemi existují tři způsoby, jak může tekutina (ať už tímto termínem myslíme vzduch nebo vodu) transportovat úlomky hornin. Je to vlivem trakce, saltace nebo vznosu. Zatímco v případě trakce dochází k tlačení úlomku po povrchu, aniž by se úlomek dokázal nad povrch vznést (příkladem může být pohyb velkých kamenů v korytě řeky), v případě saltace a vznosu tomu tak není. Saltace totiž způsobuje po krátký čas poskakování částic nad povrchem (příkladem je třeba pohyb písečných dun), kdežto vznos naopak dokáže odnést malé částice daleko ze svého původního místa (příkladem je třeba prachová bouře). Předpokládali jsme, že tyto tři mechanismy budou hlavním způsobem transportu částic i na povrchu Marsu. Nicméně jak dokládá studie mezinárodního týmu vědců pod vedením Jana Raacka, značně jsme se spletli. Na jiných tělesech Sluneční soustavy na nás totiž mohou čekat značná překvapení, levitující úlomky hornin.

Jan Raack s kolegy se s využitím upravené vakuové komory snažili lépe prozkoumat mechanismus transportu horninových částic tekoucí vodou. Z toho důvodu umístili do komory zařízení umožňující vylévání vody z výšky 1,5 cm s konstantní rychlostí 11 ml/s na box vyplněný vrstvou písku. Účelem takového nastavení bylo imitovat výlev většího množství kapalné vody na povrch z podzemí. Tedy jevu, který je přisuzován jako možný mechanismus vzniku zvláštních stružek, tzv. *gullies*, vznikajících na úbočích kopců i impaktních kráterů v určitých oblastech Marsu. Atmosférický tlak byl v komoře snížen na 9 milibarů

a box s pískem byl nakloněn pod úhlem  $25^\circ$ . Oproti předchozímu experimentu vědci navíc nechali vodu vytékat na písek nejenom o pokojové teplotě ( $\sim 24^\circ\text{C}$ ), ale i na písek podchlazený na teplotu  $\sim 5^\circ\text{C}$ . Podobně jako v minulé studii, i zde současně probíhaly referenční experimenty za obvyklého pozemského tlaku.

U experimentů za pozemského tlaku nedocházelo k ničemu nečekanému. Voda se při vysoké rychlosti vylévání nestačila vsakovat do písku, a proto začala proudit i po povrchu, a tím unášet jednotlivá zrnka písku. Proudící voda začala vytvářet koryto, kterým voda dále proudila a odnášela za pomoci trakce a saltace zrnka písku do spodních partií boxu, kde byl tento materiál usazován. Ve výsledku vzniklo malé koryto podobné stružkám, které můžeme vidět na svazích čerstvě osetých polí po intenzivnější dešti. Překvapení nastalo až u pokusů probíhajících za sníženého tlaku. I v tomto případě se voda dopadající na písek, podobně jako v pokusech prováděných Marion Messé, začala vsakovat a současně okamžitě vřít. Relativně málo při kontaktu s podchlazeným pískem, ale výrazně při kontaktu s pískem o vyšší pokojové teplotě. Vření se projevilo řadou malých explozí vyvrhující zrnka písku do okolí a to po dobu přibližně 30 sekund, než písek v místě výlevu dosáhl saturace. Nicméně vědci si povšimli, že během prvních pár sekund experimentu se z místa kontaktu vody a písku oddělují 0,4 až 40 mm veliké hroudy, které se vysokou rychlostí dosahující až 46 cm/s pohybovaly po svahu dolů. A to aniž by za sebou zanechávaly v písečném podloží kontinuální stopu. To naznačilo, že hroudy nejsou v přímém kontaktu s podložím, ale že se nad ním vznášejí. Vědcům se podařilo v prostředí sníženého atmosférického tlaku pozorovat nový druh transportu materiálu – levitaci. Tedy proces, který nebyl na Zemi nikdy v přírodě pozorován.

Důvodem, proč k procesu levitace dochází, je potřeba opětně hledat v přítomnosti vody a její nestabilitě v prostředí sníženého tlaku. Vznášející se hroudy písku

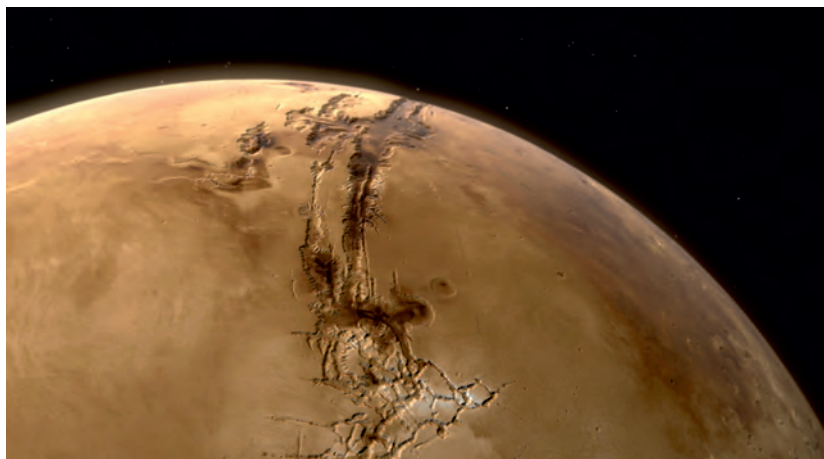
**Mars Express** – sonda k Marsu vypuštěná Evropskou kosmickou agenturou 2. 6. 2003. Sonda obsahovala orbitální a přistávací modul (Beagle 2). Přistání se nezdařilo, orbitální mise úspěšně probíhá (2022). Sondou vynesla do vesmíru nosná raketa Sojuz-FG/Fregat z evropského kosmodromu Bajkonur. Celková hmotnost sondy včetně modulu Beagle 2 byla 666 kg.

Umělecká vize evropské sondy Mars Express u Marsu.  
Zdroj: NASA, ESA.



**Valles Marineris** – více než 4 000 kilometrů dlouhý a 200 kilometrů široký systém kaňonů na Marsu pojmenovaný podle sondy Mariner 9, která ho objevila v roce 1971. Jde o největší soustavu kaňonů ve Sluneční soustavě. Původ není jasný, může jít o výsledek tektonické činnosti, v hlubokých částech jsou ale přítomná lávová pole, takže ani sopečný původ není vyloučený. Kaňony se zařezávají do hloubky až 10 kilometrů a táhnou se přes šestinu obvodu planety.

Valles Marineris, model obří soustavy kaňonů na Marsu.  
Zdroj: Kevin Gill, software Autodesk Maya.



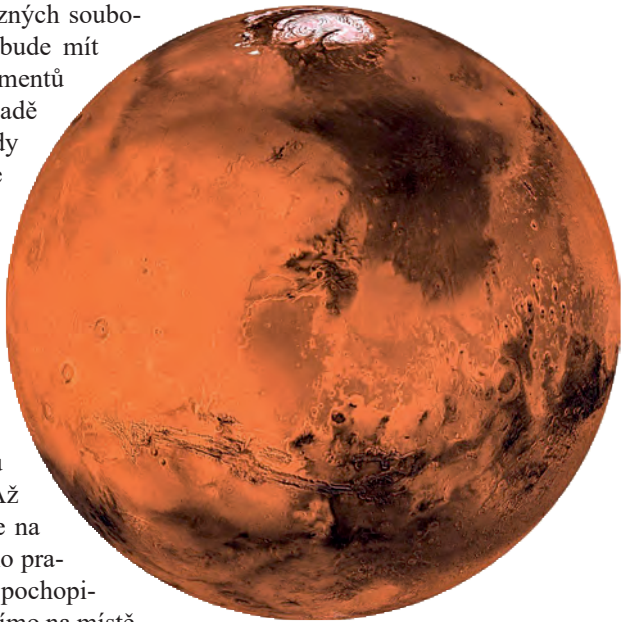
totiž byly saturovány vodou, která kvůli okolnímu nízkému tlaku vřela. Varem vznikal plyn, který z hroudy písku unikal do okolí. Síla unikajícího plynu byla po určitý čas větší než gravitační síla působící opačným směrem a tlačící hroudu písku k podloží. Vlivem toho došlo k nadzvednutí hroudy a tedy levitaci. S trochou nadsázky by se dalo říci, že levitace hroud písku funguje na podobném principu jako tryskový motor produkující proud spalín (plynu), jež je následně vysílán úzkou tryskou pryč. Jelikož experiment probíhal na nakloněném svahu, hrouda se následně rozjela po svahu dolů (podobně, jako se rozjede na Zemi po svahu kostka suchého ledu). Vědci byli v podstatě svědky obdoby Leidenfrostova jevu, ke kterému dochází při styku kapaliny s podložkou o teplotě značně převyšující teplotu kapaliny způsobující její vypařování.

Bohužel experimentální aparatura měla jen 90 cm na délku, takže vědci nemohli plně prozkoumat trvání tohoto jevu – během krátké chvíle se totiž rychle se pohybující hroudy dotkly okraje boxu, čímž se zastavily. Nicméně na základě teoretických výpočtů se vědci domnívají, že by hroudy mohly vydržet cestovat vlivem levitace nad povrchem od 2 do 50 sekund a to v závislosti na velikosti hroudy (počítáno pro hroudy o poloměru 1 cm a 0,1 cm). Tedy by mohly urazit vzdálenost v řádu metrů. Navíc pokud bychom vzali v úvahu rozdílné gravitační zrychlení Marsu, výpočty naznačují, že by částice mohly levitovat na Marsu dokonce 48× dále, než v případě Země. Navíc by nižší gravitační zrychlení dovolilo levitaci i mnohem větším a tedy těžším částicím. Na Marsu by se mohly teoreticky vznést až 7× těžší částice než v případě Země. Stejně množství unikajícího plynu by totiž bylo schopno zvednout těžší hroudu.

Vědcům se podařilo popsat proces, který do té doby nikdo nepředpokládal, že by se mohl na povrchu Marsu samovolně odehrávat. Díky tomu s ním nepočítala žádná z našich úvah či numerických modelů zabývajících se množstvím a vzdáleností transportovaného

materiálu na povrchu Marsu. Vědcům se tak dvojicí různých souborů experimentů podařilo prokázat, že nestabilní voda bude mít v případě Marsu mnohem větší schopnost transportu sedimentů než na povrchu Země. To mimo jiné znamená, že v případě Marsu bude nejspíše stačit menší množství kapalné vody pro vytvoření určitých povrchových útvarů, než jsme ze Země zvyklí. Zdá se proto, že jsme na prahu poznání, že případné množství kapalné vody na Marsu nebude potřeba tak velké pro vysvětlení některých pozorovaných útvarů, jak jsme si doposud mysleli. Navíc nám tento výzkum otevřel oči. V teoretické rovině totiž není proces levitace nutně vázán jen na prostředí Marsu. Mohlo by k němu potenciálně docházet i na řadě dalších těles Sluneční soustavy s vhodnými podmínkami. A co víc, tato dvojice publikací nám opětovně připomíná určitou omezenost v našem výzkumu těles Sluneční soustavy. Až příliš často jsme ve výzkumu procesů odehrávajících se na těchto světech vázání naší pozemskou zkušeností a z toho pramenící omezeností představivosti. Je to svým způsobem pochopitelné. Dokud nebudeme mít možnost zkoumat procesy přímo na místě, je planetologie vědní obor založený na porovnávání ostatních těles se Zemí. Snadno přitom můžeme zapomenout, že geologické procesy, které tak dobře známe ze Země, mohou na jiných tělesech nabývat nepředstavitelných podob. A to bychom měli mít neustále na paměti.

■ Petr Brož, 13. 4. 2018, AB 13/2018



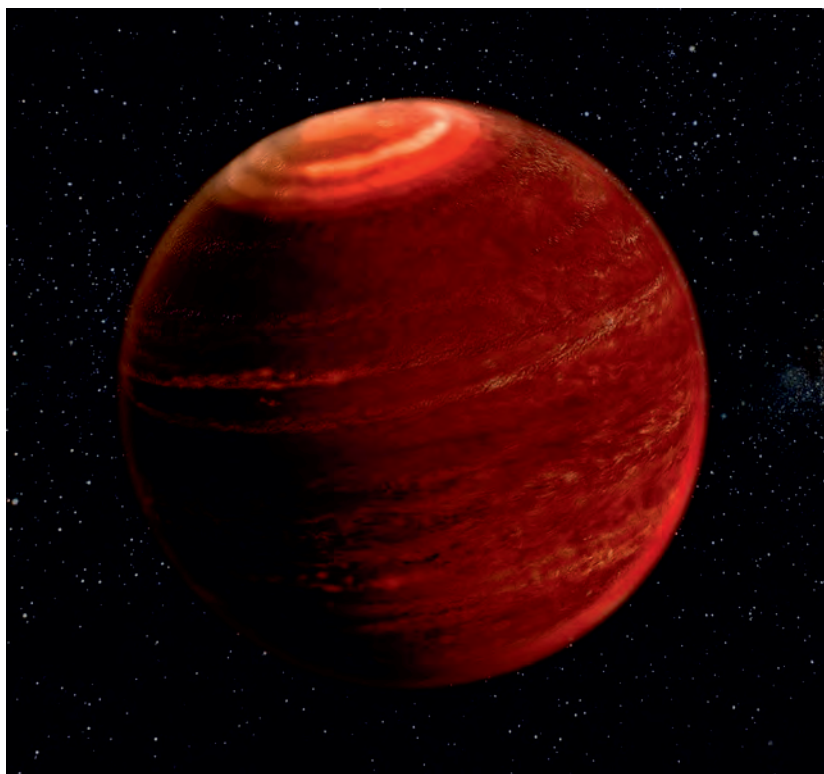
Ikonický snímek Marsu pořízený sondou Viking v roce 1998. Na fotografii je uprostřed vlevo dobře patrná oblast Tharsis se třemi vulkány. Vpravo od ní je Valles Marineris, největší soustava kaňonů ve Sluneční soustavě. V oblasti severního pólu je polární čepička složená převážně z vodního ledu pokrytého malou vrstvou zmrzlého oxidu uhličitého. Zdroj: NASA, JPL, USGS.



## Polární záře na Marsu

**Hnědý trpaslík** – hvězda s tak malou hmotností (13 až 80 Jupiterů), že teplota v nitru neumožňuje vzplanutí dostatečně energetických termojaderných reakcí. Po dobu několika miliard let emituje viditelné světlo (planety září dominantně v infračerveném oboru).

Umělecká vize polárních září na hnědém trpaslíku LSR J1835+3259. Zdroj: Caltech.



To se tak občas stane, že se termín nezvolí úplně nejšťastněji. Třeba takový atom. Záporku a-, případně an-, známe ze spousty oblíbených slovíček (asociál, analfabet, ateista), význam zbytku slůvka snadno dovodíme z všeobecně známých termínů, jako je tomografie (kde se můžeme podívat na řezy) či anatomie (kde se také řeže). Ano, atom označuje něco, co už je dál neřezatelné (nedělitelné). Není to tak úplně pravda, ale už jsme si na tento termín zvykli. A polární záře? Tak ta se vůbec nemusí tvořit převážně v polárních oblastech a být viditelná v optickém spektru. Pomoci si slůvkem aurora nikterak nepomůže, neboť toto slůvko značí úsvit či rozbřesk a aurora si může zářit po půlce planety, a to dokonce právě v poledne a na rovníku a nejsilněji v nad-

hlavníku namísto toho, aby imitovala svítání. Upustíme od tvorby novotvarů typu aurorální jevy a budeme používat termín polární záře, bez ohledu na jistou nelogičnost tohoto označení.

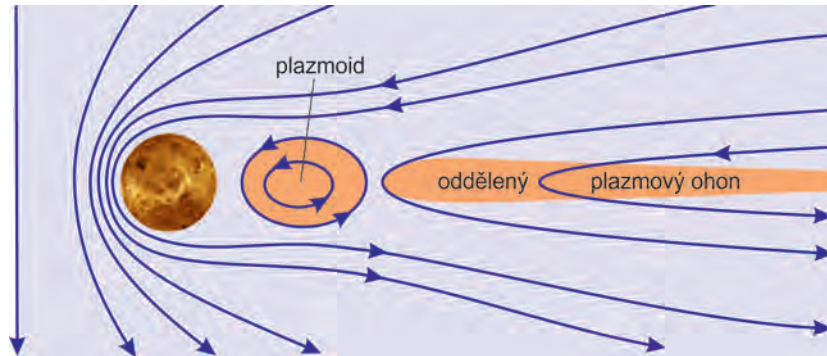
### Země, plynní obři a dál?

Vycházejí z poznání, že polární záře na Zemi souvisí s magnetickým polem, které funguje jako magnetický štít proti slunečnímu větru, se po polárních zářích pátralo u dalších planet Sluneční soustavy, které mají vlastní magnetické pole. Vzhledem k odlišnému složení jejich atmosféry byly pochopitelně polární záře hledány mimo optickou oblast. Dle očekávání byly v ultrafialové oblasti nalezeny poměrně efektní polární záře na Jupiteru, jehož magnetické pole je vedle vnitřních zdrojů posíleno unikátním zevním zdrojem v podobě plazmového toru syce-

ného vulkanickou aktivitou měsíce Io. Polární záře poté byly potvrzeny i na Saturnu, Uranu a Neptunu.

První polární záře tohoto typu mimo Sluneční soustavu byla pravděpodobně zjištěna na hnědém trpaslíku LSR J1835+3259, vzdáleném 18,5 světelného roku od Země. Objev byl spojen s emisí rádiových vln, což bylo překvapivým zjištěním, neboť vyzařování v této oblasti spektra je obvyklé pro aktivní hvězdy, na což však hmotnost tohoto tělesa nestačí. V roce 2008 se ukázalo, že LSR J1835+3259 vyzařuje rádiové vlny v pulzech. Pulzní emise rádiových vln jsou známé z pozorování polárních září, takže vysvětlení záhady ukazovalo na pozorování velice mohutné polární záře. Jedna poměrně zásadní odlišnost od polární záře Země a zevních planet zde však byla: trpaslík LSR J1835+3259 totiž neputuje vesmírem doprovázen aktivní hvězdou, která by dodávala tok nabitých částic. Jednou z možností, kde se bere plazma potřebné pro tvorbu polárních září, je přítomnost blízko obíhající exoplanety. Šlo by o podobný efekt, jaký známe u měsíce Io obíhajícího Jupiter, kde se působením slapových jevů chrlí z vulkánů plazma tak intenzivně, že přesahuje únikovou rychlost a je zachyceno magnetickým polem Jupiteru. Může se však jednat i o interakci s mezihvězdným prachem a plynem, nebo potřebný materiál do okolního prostoru dodává sám hnědý trpaslík.

A jak je to u planet podobných Zemi? Venuše své vlastní magnetické pole nemá. Přesto se již od druhé poloviny osmdesátých let uvažovalo o tom, že i na ní dochází k polárním zářím, neboť na noční straně byly pozorovány proměnlivé emise ultrafialového záření související se sluneční aktivitou. Planeta nejen že vlastní magnetické pole nevytváří, ale nemá dokonce ani zbytkové magnetické pole vázané na magnetické materiály v kůře, neboť její teplota překročila Curieovu teplotu, při níž se magnetický záznam smaže. To však neznamená, že by planeta byla zcela prostá magnetického pole. Prostor, ve kterém se pohybuje, je vyplněn meziplanetárním magnetickým polem. Díky přítomnosti plazmatu v ionosféře planety se meziplanetární magnetické pole deformuje – hovoříme o indukovaném magnetickém poli.



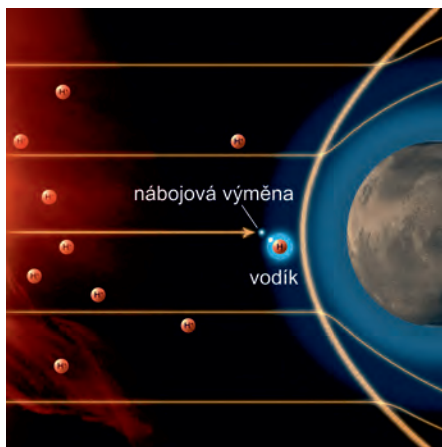
*Venuše – vytvoření plazmoidu v ohonu indukovaného magnetického pole. V důsledku rekonekce se vytvořily uzavřené siločáry kolem planety. Zdroj: Science.*

**Polární záře** – nepravidelné, proměnlivé elektromagnetické záření vytvářené v atmosféře tokem nabitých částic z okolního prostoru. Energetické částice pronikají do hlubších vrstev atmosféry, kde excitují neutrální atomy a molekuly. Typickým zdrojem nabitých částic z vnějšího prostředí je sluneční vítr. Na Zemi se polární záře typicky vytvářejí v polárních oblastech, kde podél uzavřených siločar vlastního magnetického pole planety pronikají do atmosféry nabitě částice. U planet bez vlastního magnetického se polární záře vyskytují také, avšak navzdory názvu již nejsou vázány na polární oblasti, protože tyto planety žádné magnetické póly nemají.

**Curieova teplota** – teplota fázového přechodu u magneticky aktivních materiálů. Nad touto teplotou jsou elementární magnety uspořádány chaoticky, pod touto teplotou se vytvářejí magnetické domény jednotně uspořádaných elementárních magnetů a materiál má magnetické vlastnosti.

**Rekonekce siločar** – přepojení magnetických siločar, při němž siločáry prudce změní svou dosavadní topologii do jiné, energeticky výhodnější podoby. Při tom dojde k uvolnění energie, která zahřeje okolní plazma. Někdy natolik, že plazma zazáří i v rentgenovém nebo v gama oboru. Na mikroskopické úrovni jsou za rekonekci zodpovědné pohybující se nabitě částice, které generují nová magnetická pole skládající se s polem původním.

*Nábojová výměna – mechanismus průniku energetických protonů slunečního větru do hlubších vrstev atmosféry Marsu. Zdroj: NASA.*



Jednoduchá představa tvorby indukovaného magnetického pole je následující: rychlost částic slunečního větru při styku s horními vrstvami atmosféry prudce klesá, na denní straně vzniká rázová vlna. Plocha, na které se vyrovnává dynamický tlak částic slunečního větru a termodynamický tlak částic atmosféry planety se nazývá *ionopauza*.

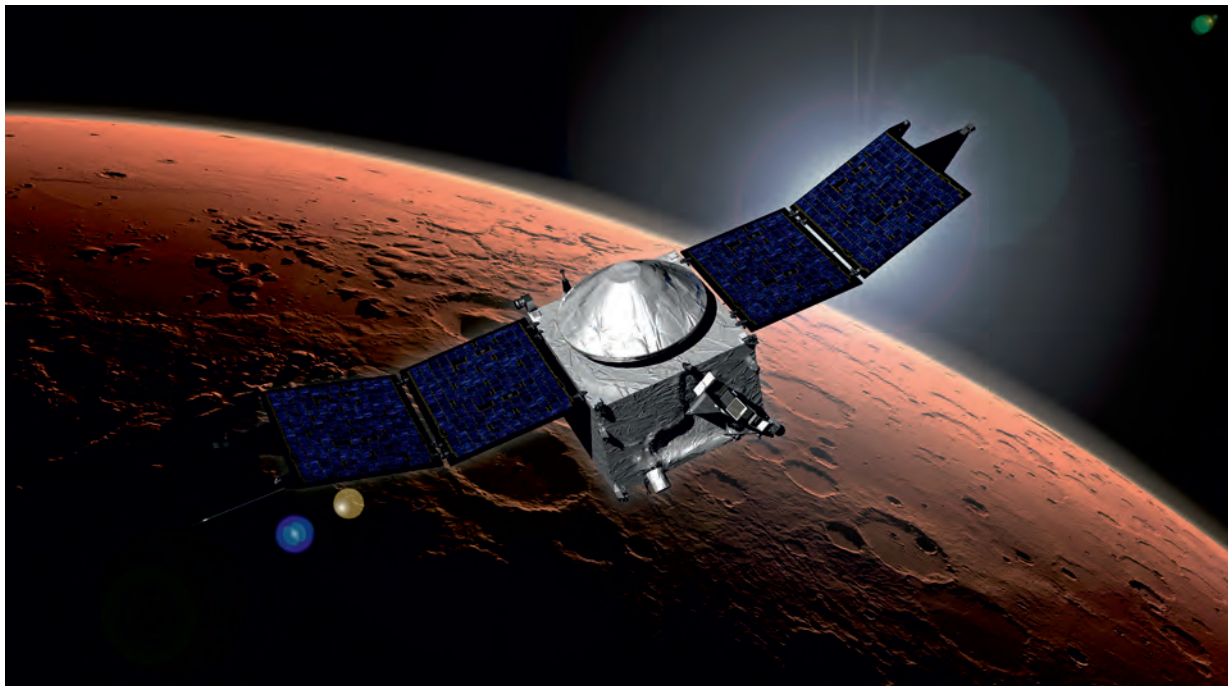
Spolu s pohybem planety v prostoru vyplněném slunečním větrem se pohybuje i rázová vlna, podobně jako se pohybuje vlna za kachnou plující po řece kolmo k silnějšímu proudu. Nyní si představme nebohého vodního ptáka v toku znečištěném v důsledku nešťastné kombinace lidské hrabivosti a hlouposti, pro lepší názornost v podobě pěny. Na náběžné hraně se bude pěna zahušťovat a pohybovat společně s plouvoucí kachnou, naopak po proudu bude za kachnou pěny méně.

Ionopauza představuje pro sluneční vítr překážku, kterou částice slunečního větru obtékají. Do plazmatu slunečního větru je však zahrnuté i meziplanetární magnetické pole, které se zahušťuje spolu s plazmatem obtékajícím planetu na denní straně a pochopitelně je zředěné na noční straně.

Evropská sonda Venus Express pozorovala v roce 2006 v indukovaném magnetickém ohonu planety Venuše rekonekci magnetických siločar s vytvořením plazmoidu obklopeného uzavřenými magnetickými plochami. Rekonekce je děj obvyklý na Slunci a v magnetosférách planet s vlastním magnetickým polem, nyní je však jasné, že probíhá i u těles bez vlastního magnetického pole – jak u planet, tak například i komet a možná i dalších těles.

## Mars a sonda MAVEN

Sonda MAVEN je určena k pochopení dějů, které vedly k postupné redukci atmosféry Marsu během vývoje planety. Sonda dlouhodobě zkoumá stav a děje ve vrchních vrstvách atmosféry, vzájemné působení ionosféry planety a slunečního větru, zjišťuje, jak nyní unikají neutrální částice a ionty do okolního prostoru a čím jsou tyto děje ovlivňovány, a jaké je stávající izotopové složení atmosféry. Tato sonda NASA pracuje od 22. září 2014 na silně excentrické oběžné dráze Marsu s pericentrem 150 kilometrů a apocentrem 6 200 kilometrů. Doba oběhu je 4,5 hodiny. Samotný název je zkratkou anglického názvu sondy *Mars Atmosphere and Volatile Evolution*, ovšem jedná se i o slovní hříčku, neboť termín „*maven*“ označuje i odborníka, specialistu v úzkém oboru vědecké činnosti.



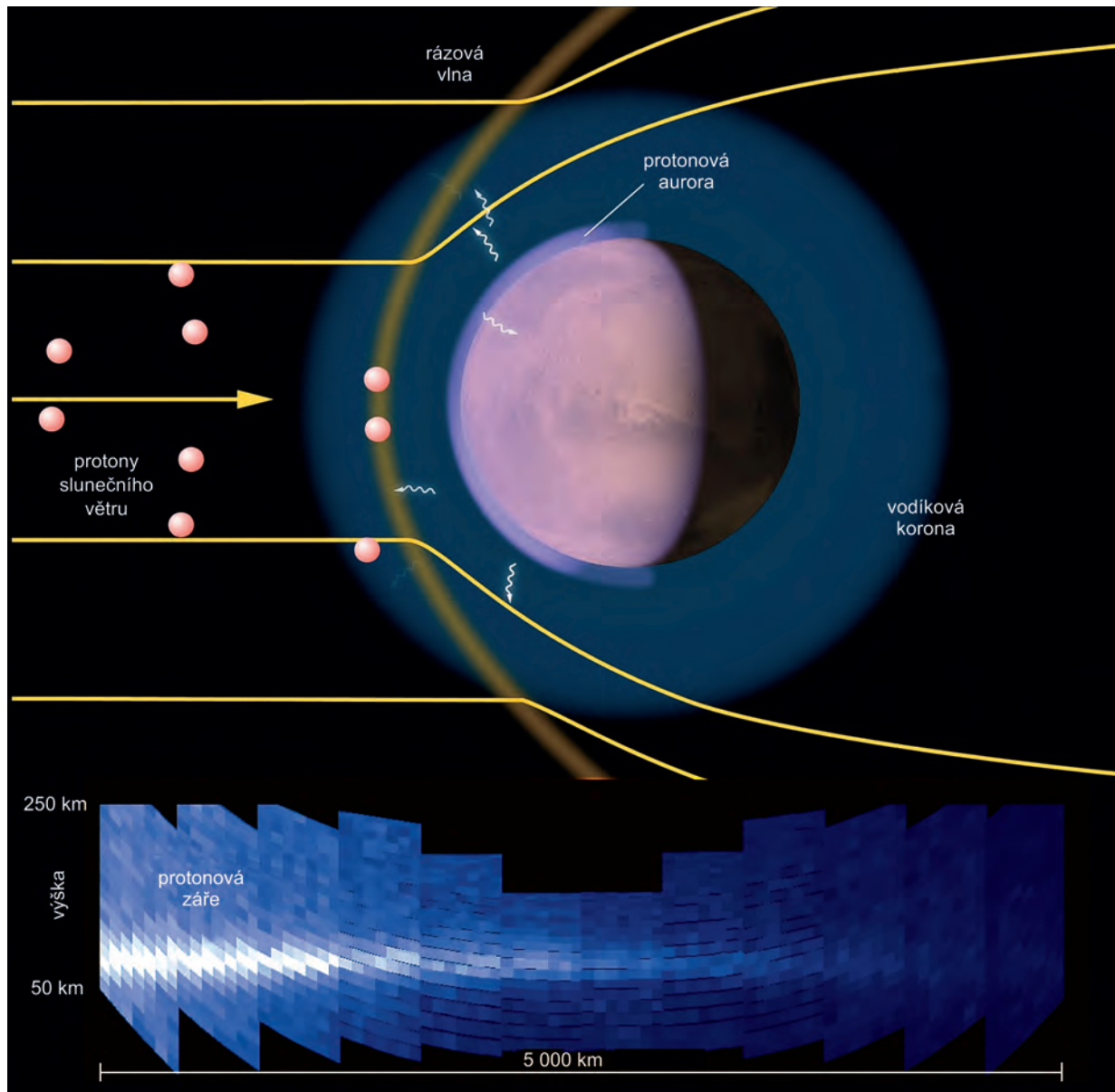
Umělecká vize sondy MAVEN. Zdroj NASA.

Vědecká výbava sondy sestává z částicových analyzátorů zaměřených na elektrony a ionty, jež měří nabitě částice slunečního větru a marsovské ionosféry. Spektrum detekce nabitých částic doplňuje systém zaměřený na tepelné a středně energetické ionty opouštějící atmosféru. Další systém je zaměřen na energetické částice pocházející ze Slunce. K měření polí je sonda osazena magnetometry a Langmuirovými sondami. Hmotnostní spektrometr sondy je schopen analyzovat složení včetně zastoupení izotopů – jak iontů, tak neutrálních částic.

Teleskopický spektrometr je schopen proměřovat profily ultrafialových spekter atmosféry ve vytyčeném směru. Je třeba mít na vědomí, že výsledné spektrum je detekováno plošným CCD čipem. Jeden ze směrů je použit na rozložení ultrafialového záření do spektra, takže poloze na čipu v tomto směru odpovídá určitá vlnová délka. Spektrum atmosféry je pozorováno úzkou štěrbinou, sonda si planetu prohlíží vždy ve velice úzkém obdélníkovém okně a měří profil spektra podél dlouhé strany tohoto obdélníku. Vstupní štěrbina má úhlové rozměry

**Langmuirova sonda** – jedna nebo více elektrod sloužících k určení teploty, koncentrace elektronů a elektrického potenciálu plazmatu. Na elektrody je přiveden konstantní nebo časově proměnný elektrický potenciál. Měřena je odezva mezi elektrodami a okolní nádobou. Naměřené proudy a potenciály v tomto systému umožňují stanovení fyzikálních vlastností plazmatu. Sonda je pojmenována podle amerického plazmového fyzika Irvinga Langmuira.





0,06°×11°. Při systematickém zkoumání planety je třeba pozorovat také mapu složení atmosféry při pohledu „dolů na planetu“, tedy ve směru nadiru (sonda se pohybuje, zároveň je možné pohybovat i samotným spektrometrem, takže mapu získáváme při přeletech postupně v jedenáctistupňových pásech). Zajímá nás však i to, jak se mění spektrum atmosféry s rostoucí výškou nad planetou. V tomto případě se sonda „dívá“ na atmosféru „z boku“, tečně, tedy studuje profil kolmo k povrchu těsně nad okrajem planety. Mezi oběma směry může spektrometr přepínat pomocí zrcadla, které zároveň může zpřesňovat směr pozorování v nadirové pozici v rozmezí 60° a v tečné pozici v rozmezí 24°.

### Tři typy polárních září na Marsu

Polární záře na Marsu jsou pochopitelně z principu odlišné od polárních září planet s vlastním dipólovým magnetickým polem, kde jsou nabitě částice podél magnetických siločar vtahovány do atmosféry v oblasti magnetických pólů. Mars, podobně jako Venuše, vlastní globální magnetické pole nemá. Podobně jako na Venuši mohou v indukovaném magnetickém poli při interakci s plazmatem proudícím ze Slunce vznikat rekonekce uzavřené magnetické siločáry, podél kterých mohou kroužit nabitě částice ionizující atmosféru. Tyto polární záře se nazývají *difúzní*, objevují se v obdobích zvýšené sluneční aktivity a vyskytují se zhruba ve výšce 70 km nad Marsem. Tento typ polární záře byl objeven teleskopickým spektrometrem sondy MAVEN.

Druhý typ polárních září je však vlastní pouze Marsu. Na rozdíl od Venuše si kůra Marsu „pamatuje zlaté časy“, kdy planeta ještě měla své vlastní magnetické pole. Jelikož kůra Marsu nepřekročila Curieovu teplotu, vlastní magnetické pole zanechalo stopy v magnetických materiálech kůry, které zůstaly trvale zmagnetizovány, jak poprvé objevila sonda Mars Global Surveyor. Mars tak má vlastní lokální magnetická pole vytvářená magnetizovaným materiálem v kůře planety. Takové pole nazýváme *korové magnetické pole*. Na rozhraní uzavřených a otevřených magnetických siločar korového pole se objevuje diskrétní polární záře, zhruba ve výškách 140 km. Tyto polární záře byly objeveny již sondou Mars Express, MAVEN jejich výskyt potvrdil.

Třetím zcela novým typem polární záře je *protonová polární záře*. Tato polární záře na Zemi nemá obdobu, protože díky vlastnímu magnetickému poli jsou protony v bezpečné vzdálenosti od Země odkláněny podél siločar magnetického pole Země. Nabitě energetické částice

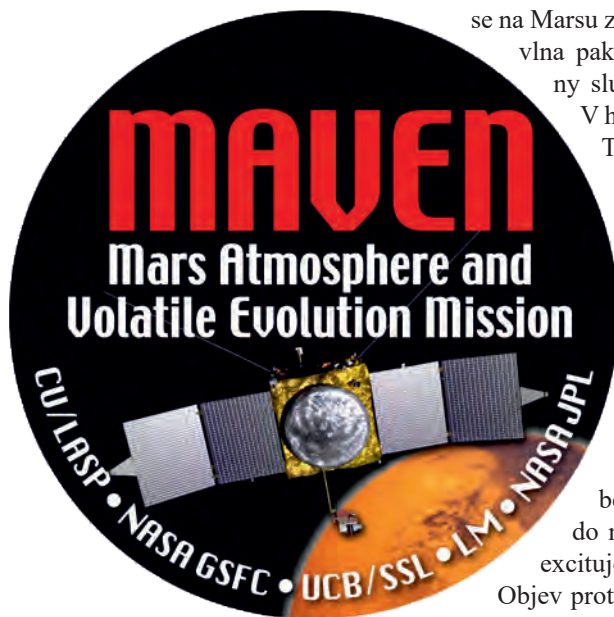
**Magnetometr** – zařízení měřící magnetické pole. Zpravidla jde o trojici různě orientovaných cívek vysunutých ze sondy na dlouhém rameni. Z proudu indukovaného v cívkách jsou potom určeny jednotlivé složky magnetického pole.

**Zenit a nadir** – základní dvě možnosti svislého směru. Zenit je nad hlavou, nadir pak nalezneme pod našima nohama.

**Pericentrum** – bod na eliptické dráze kolem centrálního tělesa, který je tomuto tělesu nejbližší. Pro Slunce se používá výraz perihélium, pro Zemi perigeum, pro Měsíc periluna, pro Jupiter perijovum, pro Saturn perikronum, pro Mars periareion a pro hvězdu periastrum.

**Apocentrum** – bod na eliptické dráze kolem centrálního tělesa, který je tomuto tělesu nejdále. Pro Slunce se používá výraz afélium, pro Zemi apogeum, pro Měsíc apoluna, pro Jupiter apojovum, pro Saturn apokronum, pro Mars apoareion a pro hvězdu apoastrum.

**Ionopauza** – místo, kde se vyrovná tlak slunečního větru s tlakem planetární atmosféry.



se na Marsu zastaví až v ionopauze, kde se formuje rázová vlna. Rázová vlna pak tvoří nepropustnou překážku pro nabitě částice. Protony slunečního větru však dokáží touto překážkou proniknout. V horních vrstvách ionosféry jsou k dispozici volné elektrony. Tyto elektrony s protony vytvoří neutrální atomární vodík, který přestává vnímat jak magnetické pole, tak plazma rázové vlny, a pokračuje přímočaře do hlubších vrstev atmosféry, kde díky své značné rychlosti má dostatek energie na excitaci nebo ionizaci neutrálních molekul plynu atmosféry. Tímto mechanismem paradoxně tentýž sluneční vítr, který Mars prakticky připravil o atmosféru, obohacuje nižší vrstvy atmosféry o atomární vodík. Existuje ještě jedna možnost, jak může energetický proton slunečního větru proniknout do hlubších vrstev atmosféry – *nábojová výměna*. Energetický proton odebere elektron neutrálnímu vodíku atmosféry a zamaskován do neutrálního hávu uletí i značnou vzdálenost do míst, kde excituje atmosféru stejně jako v předchozím případě.

Objev protonových září na Marsu byl značným překvapením a ukázal, že polární záře ve Sluneční soustavě mohou mít rozmanitý původ a stojí za nimi různé fyzikální jevy.

■ Vítězslav Kříha, 31. 8. 2018, AB 30/2018

## Pod Marsem, nad Marsem...

Planeta, která má asi nejméně důvodů ke stíznostem na nezájem, je Mars. Od roku 1960 odstartovaly k planetě již desítky sond. Ne všechny doletěly, některé pouze prolétly, některé selhaly až na místě. Těch, co uspěly, však není málo, a tak se servery utěšeně plní petabajty dat. Máme k dispozici mapy celé planety v takovém rozlišení, že na Zemi by ještě nedávno podléhaly utajení, máme informace o děních v atmosféře, podle kterých jsme schopni předpovídat počasí, po povrchu se prohání robotická vozítka a hledající to, co z orbity není vidět. Ve výsledku zjišťujeme, jak málo doopravdy víme. Dodnes nebyly vyvráceny ani potvrzeny spekulace o existenci primitivních forem života na Marsu. To je otázka důležitá pro astrobiologii. Okruhy zájmů astrofyziků jsou poněkud odlišné. Víme, že na Marsu bývala kdysi sopečná činnost, už ale nevíme, zda opravdu zcela vyhasla. Víme, že je na Marsu zbytkové magnetické pole, nejsme si však už jisti, zda je to opravdu pozůstatek činnosti tekutinového dynama, které se z neznámých příčin zastavilo. Jsou ještě dnes na Marsu zemětřesení, má Mars tekuté jádro, jak je velké, má ještě sílu k magmatickým výlevům...? Na tyto otázky se snaží od listopadu 2018 odpovědět sonda InSight s vrtnou soupravou, která zkoumá Mars pod jeho povrchem.

V roce 2021 k ní přibýly hned tři další sondy – Hope pocházející ze Spojených arabských emirátů, čínská mise Tianwen-1 a americká výprava Mars 2020 s vozítkem Perseverance a vrtulníkem Ingenuity. A tak se v roce 2021 poprvé stalo, že byla rudá planeta zkoumána na povrchu, pod povrchem, nad povrchem a navíc i z oběžné dráhy. Útok člověka na Mars začal být v roce 2021 doslova všesměrový.

### InSight

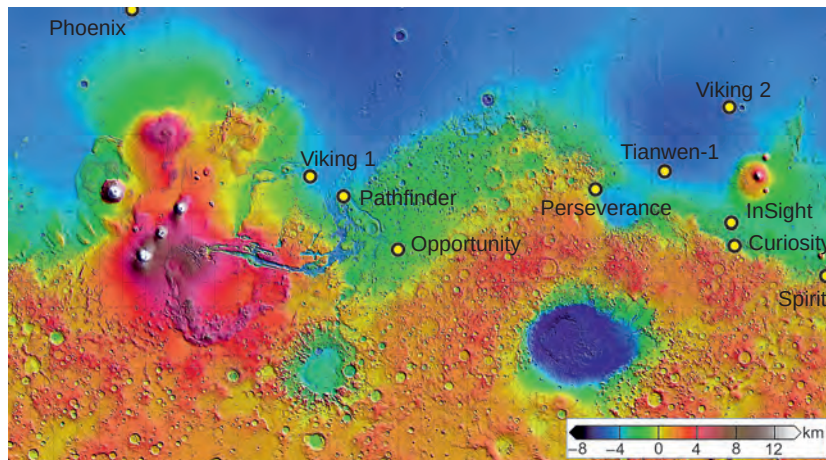
Americká sonda InSight odstartovala ze základny Vandenberg dne 5. května 2018 a přibližně po půl roce, 26. listopadu 2018, přistála v sopečné oblasti Elysium Planitia

**Elysium Planitia** – významná sopečná oblast na povrchu Marsu. Nachází se severně od rovníku, v okolí sopky Elysium Mons. Kromě této sopky je charakteristická velkým množstvím menších sopek. Jde o místo přistání americké mise InSight.

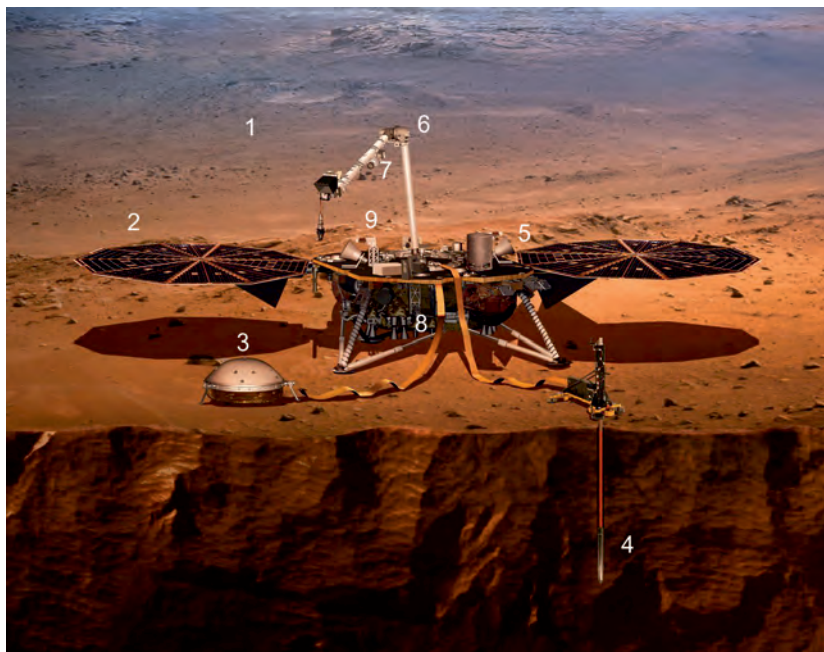
**Utopia Planitia** – rozsáhlá planina na severní polokouli Marsu s průměrem větším než 3000 kilometrů, pravděpodobně jde o impaktní pánev vzniklou po dopadu menší planetky. Jde o místo přistání čínské mise Tianwen-1.

**Jezero** – kráter na Marsu, který se nachází na okraji prolákliny Syrtis Major. Průměr je přibližně 49 kilometrů. Kráter byl pravděpodobně kdysi zalit vodou. Jde o místo přistání americké sondy MARS 2020 s vozítkem Perseverance.

Topografická mapa Marsu s místy přistání jednotlivých sond. Zdroj: NASA/MOLA.







Přístrojové vybavení sondy InSight: 1. přistávací modul; 2. sluneční panely; 3. seismometr; 4. podpovrchová tepelná sonda; 5. senzor vnitřní rotace; 6. robotické rameno; 7. kamera na robotickém rameni; 8. kamera na spodní plošině; 9. meteorologická stanice. Zdroj: NASA/JPL Caltech.

v okolí sopky Elysium Mons. Při přistání bylo využito v první fázi brzdění o atmosféru, odvod tepla zajišťoval tepelný štít. Od devíti kilometrů výšky probíhal sestup na padácích. Název sondy je zkratkou z anglického *Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport*, což česky znamená výzkum nitra prostřednictvím seismologie, geodézie a tepelného transportu.

Inženýrský návrh sondy nezapře příbuznost s předchozí sondou Phoenix. Nebylo by moudré nepoučit se z její úspěšné mise, a tím snížit náklady na vývoj nového zařízení. Přesto tu nalezneme nová, historicky originální, řešení. Všechny dosavadní sondy, které kdy pracovaly na povrchu cizího

vesmírného tělesa, nesly měřicí přístroje na své palubě, nebo jimi manipulovaly pomocí mechanické ruky. Tentokrát je ale nutné, aby část přístrojů pracovala samostatně a pokud možno nebyla se sondou v přímém fyzickém kontaktu. K rozmístění přístrojů bylo použito robotické rameno vyvinuté původně pro Mars 2001 Surveyor. Je vybaveno kamerou se zorným polem 45°, která se využívá hlavně ke kontrole přístrojů přistávacího modulu. Druhá kamera je umístěna ve spodní části modulu a se svým zorným polem 145° zprostředkovává kontrolu přístrojů pracujících mimo sondu.

Součástí měřicí techniky je především citlivý seismometr, který zjišťuje, zda je Mars ještě seismicky činné těleso. Analýza případných otřesů napoví mnohé o vnitřní struktuře planety. Největší výzvou pro konstruktéry byla eliminace rušivých vlivů, jako jsou třeba dopady meteoritů na povrch, ale také změny teplot, tlaku nebo i jen gravitační vliv měsíce Fobos. Proto je přístroj vybaven sadou pomocných meteorologických sond, jako jsou snímač směru větru, barometr, teploměr, ale také vektorový magnetometr.

Velké naděje se vkládaly do dalšího zařízení, do tepelné sondy nazývané Krtek. Podle původních představ se měl probít do hloubky až 5 metrů pod povrch planety. Z údajů tepelných čidel, která by za sebou zanechával, by bylo možné měřit tepelný tok v kůře Marsu. Přístroj se však ani po opětovných pokusech nedokázal zahrabat hlouběji než 30 cm, a tak 9. ledna 2021 na svou funkci nadobro rezignoval.

Sonda je dále vybavena přístrojem RISE, jehož radiolokátor je schopen pomocí Dopplerova jevu proměřit detaily rotace planety s přesností až 2 cm, a tím napovědět více o skutečné povaze jádra a snad i o způsobu formování terestrických planet. Samozřejmostí je nezávislá meteorologická stanice k měření povětrnostních podmínek v místě přistání a vše doplňuje pasivní laserový koutový odražeč. Pro svou činnost nepotřebuje žádné energetické zdroje a bude sloužit jako základ geofyzikální sítě Marsu i po skončení života sondy.

Sonda InSight je první sondou svého typu nejenom na Marsu, ale i v historii dobývání Sluneční soustavy. Slibujeme si od ní především lepší pochopení procesů formace Marsu a všech planet typu Země. Před startem sondy InSight zorganizovala americká NASA program na sběr jmen zájemců, kteří se chtěli zvětšit ve vesmíru. V prvním kole nastrádala 827 tisíc jmen, ve druhém pak 1,6 milionu, takže v úhrnu se na povrch Marsu dostaly dva čipy našlapané 2,4 miliony jmen. Tam pak jména setrvají tisíce let, dokud kosmická radiace zcela nezničí vnitřní strukturu čipů.

## Jak se třese Mars

S pátráním po podpovrchových strukturách máme letité zkušenosti ze Země. Seismologie rozlišuje především vlny objemové a povrchové. Objemové vlny se šíří buď podélně (P vlny), nebo příčně (tzv. střížné S vlny). P vlny jsou spojeny s kompresí a expanzí ve směru jejich šíření. Jsou detekovány před S vlnami, které vyvolá teprve střížná deformace materiálu prostředí. Střížná deformace je možná pouze u pevného materiálu, proto se v kapalném prostředí nešíří.

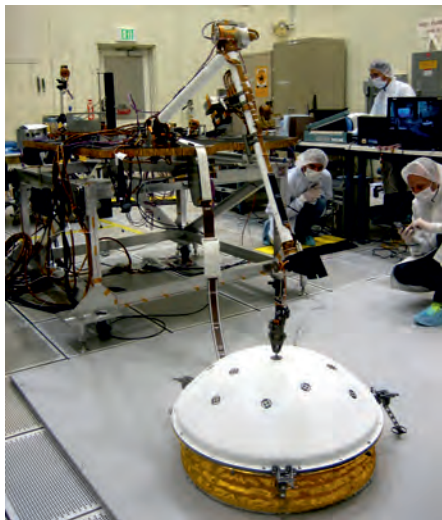
Když P vlny a svisle polarizované S vlny dorazí k povrchu planety, musí se přizpůsobit jejímu tvaru a vyvolají povrchovou vlnu. Tato vlna se nazývá Rayleighova, je spojena s malými kontrakcemi materiálu a šíří se po povrchu. Pod povrchem však může dojít k něčemu podobnému, pokud jsou tam přítomny vrstvy různého složení. Vodorovně polarizované S vlny pak vybudí tzv. Loveovu vlnu. Podpovrchové

**P vlny** – primární seismické vlny, které se šíří vlastním tělesem planety nebo jiného tělesa. Jedná se o podélné vlny zhuštění a zředění v pevném nebo kapalném prostředí, někdy tento typ vln označujeme jako kompresní vlny. Písmeno P pochází z anglického slova Primary.

**S vlny** – sekundární seismické vlny, které se šíří vlastním tělesem planety. Jedná se o příčné vlny v pevném prostředí. Kapalným prostředím se nešíří. Látka v této vlně vybočuje kolmo na směr šíření, a vytváří tak charakteristické zvlnění. Písmeno S pochází z anglického slova Secondary.

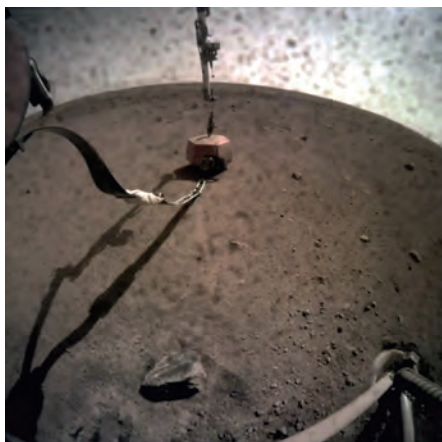
**Loveho vlny** – seismické vlny, které se šíří v kůře planety po jejím povrchu. Jedná se o příčné vlnění. Jde o typické střížné vlny, které byly pojmenovány podle anglického matematika Augusta Edwarda Hougha Loveho.





Pozemský test vyložení seismometru pomocí robotického ramene. Zdroj: NASA.

Vyložení seismometru robotickým ramenem přímo na povrchu Marsu. Zdroj: NASA.



vlny se sice šíří rychleji než povrchové, ale nedosahují tak velké amplitudy. Kromě povrchových a objemových vln se může planeta chvět i vlastními módy. Dochází k diskrétním oscilacím s amplitudami vázanými na jednu lokalitu. Jejich periody se typicky pohybují v řádu desítek minut. Na rozdíl od jiných vln, které odezní nejpozději do několika minut, dostatečně silné oscilace na vlastních módech jsme schopni zachytit i po měsíci.

První seismometry byly na Marsu součástí sond Viking. Seismometry byly umístěny na palubě sond, a tak podléhaly povětrnostním vlivům. Data přicházela zašuměná poryvy větru a nebylo možné z nich oddělit užitečný signál. Z této chyby se inženýři poučili dokonale. Seismometr sondy InSight byl po přistání přemístěn z paluby na samostatné místo, aby měl přímý kontakt s povrchem planety. Přístroj je velice nízký, navíc jeho čočkovitý kryt má velmi malý aerodynamický odpor, což v konečném důsledku snižuje povětrnostní vlivy na zanedbatelné minimum. Případné zašumění naměřených otřesů lze eliminovat pomocí signálu měřeného meteorologickou stanicí umístěnou na palubě sondy.

Již první měření ukázala, že Mars je stále tektonicky aktivní. Žádné otřesy sice nepřesáhly čtvrtý stupeň RichtEROVY stupnice, nicméně po dvou letech práce přístroje bylo k dispozici dostatečné množství dat, aby umožnila zhruba zmapovat nitro Marsu. Svou roli tu sehrály všechny možné druhy seismických vln, každé z nich přinesly důležité výsledky.

Simon Stähler z cyryšského ETH se svým týmem analyzoval nejslabší otřesy a dokázal, že se odrážejí od tekutého jádra. Závěry pozorování se poměrně dobře shodují s našimi původními představami, pouze se ukazuje, že tekuté jádro je větší, než se odhadovalo – zabírá asi polovinu průměru planety, teplota se odhaduje na 1 800 °C. Podobně jako u Země je jádro tvořeno železem a niklem, ale vzhledem k jeho nízké hustotě tu musí být příměsi lehčích prvků – předpokládá se hlavně síra.

Týmy vedené Amirem Khanem z cyryšského ETH a Brigitte Knappmeyer-Endrun z Univerzity v Kolíně nad Rýnem se zaměřily na seismické vlny, které migrovaly pláštěm a kůrou. Došli k překvapivému závěru, že materiál pod povrchem má menší hustotu než vrchní vrstvy. Nejspíš za tím stojí bouřlivá geologická minulost. Za zmínku také stojí vysoká koncentrace radioaktivních prvků, kterých je v kůře až dvacet-



krát více než v plášti. O čem to svědčí, je zatím předmětem výzkumu, ale již teď je jasné, že rozřešení hádanky nás významným způsobem posune v chápání martského vulkanizmu.

Bezprecedentní přesnost seismometru otevřela ještě další cestu ve studiu planety, tentokrát jejích podpovrchových vrstev. Manuel Hobbiger z curyšského ETH se se svým týmem zaměřil na velice slabé vibrace způsobené nárazy větru na terénní překážky. Takové otřesy se šíří jako povrchová vlna. Šíření vlny je samozřejmě silně závislé na druhu materiálu. Po analýze všech dat od počátku měření tým získal slušnou představu o geologii okolí sondy.

Svrchní tři metry jsou tvořeny regolitem. Pod ním pokračuje 15 m silná vrstva větších balvanů. Předpokládá se, že jde o památku po dopadu meteoritu. Následují dvě vrstvy lávy oddělené 45 m mocnou vrstvou sedimentů. Stáří horní vrstvy lávy se odhaduje na 1,7 miliardy let, spodní vrstva, která sahá až do hloubky 150 m, je stará 3,6 miliardy let.

V posledních letech jsme svědky dílčích objevů díky uplatňování nových výpočetních postupů na dříve naměřená data. S nástupem neuronových sítí dokážeme ne vždy zcela průhledným, nicméně prokazatelně správným způsobem vytěžit z naměřených veličin nečekané informace. Se seismometrem SEIS jsme poprvé získali klíč ke dveřím do martského podsvětí. Lze očekávat, že s pomocí umělé inteligence se s informacemi o nitru Marsu vbrzku protrhne pytel.

## Červencové okno 2020

Velmi výhodné startovací okno pro cestu na Mars nastalo v červenci roku 2020. Sondy vyslané v tomto období se dostaly k cíli již v únoru následujícího roku. Startovací okno využily hned tři mise. Jako první startovala 19. července sonda Spojených arabských emirátů nazvaná Hope. Sonda s hmotností přes půl tuny a rozměry 2,4×2,9 metru byla navedena na oběžnou dráhu Marsu dne 9. února 2021. Její činnost začínají dva sluneční panely s výkonem 1 800 wattů. Hlavním úkolem

**Rayleighovy vlny** – seismické vlny, které se šíří v kůře planety po jejím povrchu. Podobají se vlnění na vodě. Jedná se o složeninu příčného a podélného vlnění. Body vykonávají krouživé pohyby. Vlny byly pojmenovány podle anglického matematika a fyzika Johna Williama Strutta, třetího barona Rayleigha.

**Regolit** – vrstva nepevného materiálu, který pokrývá celistvé podloží. Zpravidla jde o drť vzniklou dopadem drobných těles nebo jinou erozivní činností. Vrstvu regolitu najdeme na Měsíci, v některých oblastech na Zemi i na jiných tělesech Sluneční soustavy, například na Marsu.

Vozítko Perseverance, umělecká představa. Zdroj: NASA







Vrtulníček Ingenuity před startem, mezi stopami vozítka.  
Grafika: NASA/JPL-Caltech.

sondy je výzkum atmosféry Marsu a sezónních jevů. Jde o výrazný úspěch arabského světa při dobývání vesmíru.

O čtyři dny později, 23. července 2020, se vydala na cestu první čínská mise k cizí planetě – Tianwen-1. Sonda má orbitální část, která byla navedena na oběžnou dráhu Marsu dne 10. února 2021. Kolos o hmotnosti přesahující tři tuny zkoumá povrch planety z výšky 265 kilometrů. Dne 15. května na povrchu Marsu, na planině Utopia, úspěšně přistál modul o hmotnosti 240 kilogramů. Hlavním cílem je studium geologických struktur

na Marsu, složení povrchových hornin. Samozřejmostí je ale i výzkum ionosféry a magnetického pole v horninách.

Jako poslední startovala dne 30. července 2020 na palubě nosné rakety Atlas V velká americká mise Mars 2000. Obří sonda přistála u kráteru Jezero dne 18. února 2021. Její součástí je tunové vozítko Perseverance a vrtulníček Ingenuity s hmotností 1,8 kilogramu. Pokud vám jméno přistávací oblasti zní česky, nejde o náhodu. Kráter byl pojmenován podle města Jezero, které se nachází v Bosně a Hercegovině. Slovo jezero je slovanského původu a ve většině slovanských jazyků znamená přirozenou vodní plochu. Předpokládá se, že takto pojmenovaný kráter na Marsu, o průměru 45 kilometrů, byl kdysi zaplněný vodou. Právě proto se stal cílem mise MARS 2000.

## Perseverance a Ingenuity

Vozítko Perseverance je opravdový macek. Jeho hmotnost je 1 025 kilogramů a rozměry  $2,9 \times 2,7 \times 2,2$  metru, takže by šlo vozítko připodobnit k velkému automobilu. Napájení zajišťují panely s výkonem 110 wattů. Hlavní cíle výzkumu jsou dva: hledání stop života (jde o evergreen většiny marsovských sond) a zkoumání geologických procesů na povrchu Marsu. Vozítko zanechává podél cesty malé kontejnery se vzorky pro případné vyždvižení některou z budoucích misí. Koncepce vozítka

**Umělá neuronová síť** – výpočetní struktura pro paralelní zpracování dat využívaná v umělé inteligenci. Jejím vzorem je skutečná neuronová síť v mozku. Umělé neurony mají libovolný počet vstupů a jediný výstup. Jsou propojeny a vzájemně si předávají signály, které jsou matematicky vhodně transformovány. Neuronové sítě se využívají například při zpracování obrazu.

**ETH** – prestižní švýcarská polytechnika, na které působil mj. Albert Einstein. Zkratka ETH znamená Eidgenössische Technische Hochschule (Spolková vysoká technická škola). Univerzita byla založena v roce 1855, nyní má dvě části: v Curychu (ETHC) a v Laussane (ETHL). S univerzitou je spojeno 26 nositelů Nobelových cen.

vychází z vozítka Curiosity, řada nástrojů zůstala beze změny. Celkově má Perseverance 19 kamer a dva mikrofony (zaznamenávají například zvuk letu vrtulníčku). Novinkou je dutý (tzv. jádrový) vrták umožňující z oblasti pod povrchem dopravit do sondy vzorky hornin ve tvaru válce. K prvním velkým úspěchům patří nalezení sedimentů, které podporují teorii, že kráter byl kdysi vodním jezerem.

Vrtulníček Ingenuity má rozpětí vrtulí 121 cm, výšku 49 cm a hmotnost 1,8 kilogramu. Jeho činnost zajišťují sluneční panely s výkonem 350 wattů (zhruba půl koňské síly). K prvnímu startu došlo 19. dubna 2021 a vozítko tento start zaznamenalo jak kamerami, tak mikrofony. Nešlo ale o první start člověkem vyrobeného tělesa na cizí planetě. Prvenství má Sovětský svaz, který v roce 1985 v rámci mise Vega úspěšně testoval start balónu z povrchu Venuše.

Ingenuity má na palubě umístěný malý vzorek z křídla letadla bratří Wrightů, kteří zkonstruovali letadlo s benzínovým motorem. Jejich aeroplán byl prvním strojem těžším než vzduch, kterému se podařilo vzlétnout. Stalo se tak 17. prosince 1903. Do konce roku 2021 urazilo vozítko Perseverance vzdálenost přibližně tři kilometry, zatímco vrtulníček Ingenuity nalétal čtyři kilometry.

Zvyšující se intenzita výzkumu Marsu souvisí jak s touhou po poznání této planety, tak nepochybně i s plánovanou misí člověka k našemu vesmírnému sousedu.

■ Rudolf Mentzl, Petr Kulháněk, 31. 1. 2022, AB 37/2018, 44/2021



Autentický černobílý snímek z prvního letu Ingenuity dne 19. dubna 2021. Kamera zachytila z výšky řádově metr vlastní stín vrtulníčku. Dobře patrné jsou stopy vozítka Perseverance. Zdroj: NASA.

## Vrstva heliového deště v obřích planetách

**Diamantová kovadlina** – zařízení, ve kterém je vzorek vystaven vysokému tlaku mezi dvěma diamantovými nástavci. Rovnoměrného rozložení tlaku na vzorek je dosaženo vyplněním prostoru kapalinou, například vodou, nebo dokonalým utěsněním prostoru. Tlak lze ještě zvýšit rázovými vlnami generovanými laserovými impulzy.

**LLNL** – Lawrence Livermore National Laboratory, Lawrencova národní laboratoř v Livermoru, slavná laboratoř patřící Kalifornské univerzitě. Založena byla v roce 1952. Jedním ze základních cílů bylo zajištění jaderné bezpečnosti USA. Dnes se podílí na experimentech z mnoha vědních oborů.

Laserové impulzy stlačují směs vodíku a helia v diamantové kovadlině a vytvářejí podmínky obdobné, jako jsou v nitrech planet Jupiter a Saturn. Zdroj: LLNL.



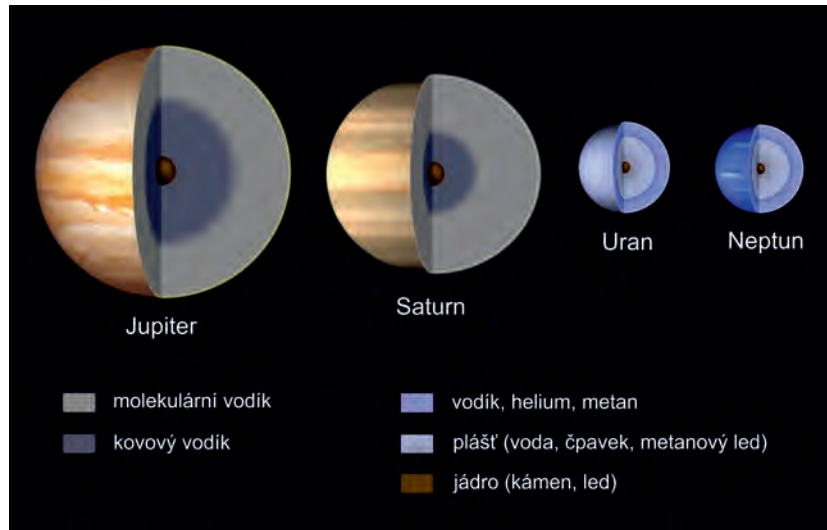
Sluneční soustava je, co se planet týče, rozdělena na dvě oblasti. Blíže ke Slunci se pohybuje čtveřice terestrických planet (Merkur, Venuše, Země a Mars). Společně jsou jim pevné povrchy, relativně malá velikost a malý počet měsíců. Dále od Slunce je čtveřice plyných obrů (Jupiter, Saturn, Uran a Neptun). Pro tuto skupinu jsou charakteristické obří rozměry, neexistence pevného povrchu, velké rodiny měsíců a přítomnost prstenců vytvořených z drobného materiálu. Poslední výzkumy naznačují, že ve dvou největších planetách Sluneční soustavy, Jupiteru a Saturnu, by měla být přítomna vrstva, v níž klesají heliové kapky v kapalině vytvořené z molekulárního vodíku. Pro tuto oblast se ujal název „vrstva heliového deště“. Na její existenci poukazují podrobná měření sond Galileo u Jupiteru a Cassini u Saturnu, numerické simulace prováděné na Univerzitě Johnse Hopkinse a skutečné experimenty prováděné v diamantové kovadlině v Lawrencově národní laboratoři v Livermooru (LLNL).

### Standardní model nitra velkých planet

První podrobný model nitra velkých planet, včetně výpočtů stavové rovnice a fázového diagramu směsi vodíku a helia za extrémních tlaků, předložil v rámci své disertační práce David John Stevenson (\*1948) v roce 1976 na Cornellově univerzitě. Výzkum prováděl pod vedením slavného astrofyzika Edwina Ernesta Sapltera (1924–2008). Jako článek vyšel v roce 1977 v prestižním časopise *Astrophysical Journal*. Model se stal základem dnešních představ o nitru velkých planet. Stevenson už v 70. letech 20. století uvažoval o možnosti existence vrstvy heliového deště, v níž se za vysokého tlaku začnou v původně homogenní

ní směsi molekulárního vodíku vytvářet heliové kapky. Tehdy šlo ale jen o zajímavou hypotézu, která v posledních letech získává silné podpůrné argumenty v různých experimentech. Dnes je Stevenson profesorem na Kalifornské technologii, kde pracuje v oddělení planetárního výzkumu.

Současný standardní model nitra plyných obrů předpokládá existenci malého kamenného jádra s přítomností ledu. Poslední výzkumy ze sondy Juno kroužící kolem Jupiteru ale ukazují, že ani tato představa nemusí být v detailech správná. Jádro Jupiteru by mohlo být větší, než se dosud předpokládalo, a nehomogenní s kapsami zaplněnými tekutým kovovým vodíkem. Kolem jádra by v případě Jupiteru a Saturnu, kde je dostatečný tlak, měla být vrstva kapalného molekulárního vodíku v kovové fázi. Taková vrstva zcela chybí u Uranu a Neptunu, kde pro její vytvoření není dostatečný tlak. Kapalný kovový vodík je natolik stlačen, že se elektronové orbitály molekul vodíku překrývají, což umožňuje volný pohyb elektronů. Takovou pro nás extravagantní fázi vodíku se podařilo v roce 1996 připravit i v pozemských podmínkách v Lawrenceově národní laboratoři v Livermooru. Samuel Weir, Arthur Mitchell a William Nellis uskutečnili tento fázový přechod pomocí rázových vln za tlaku 1 400 gigapascalů a teploty 3 000 kelvinů. Nová fáze sice existovala pouhých 100 nanosekund, ale první krok byl učiněn. Vrstva kapalného kovového vodíku umožňuje v nitru Jupiteru a Saturnu konvektivní proudění a je základem tekutinového dynama zodpovědného za extrémně silné magnetické pole těchto planet. Nad vrstvou kovového vodíku (u Uranu a Neptunu přímo nad jádrem) je nevodivá vrstva z vodíku, helia a metanu. Samotný „povrch“ obřích planet je tvořen tenkým pláštěm – oceánem z vody, čpavku a metanového ledu. Nad ním je turbulentní oblačnost dávající obřím planetám jejich charakteristický vzhled s dominantní strukturou pásů způsobených rychlou rotací obřích planet.



Standardní model nitra velkých planet navržený Davidem Stevensonem v roce 1976. Zdroj: Tristan Guillot.

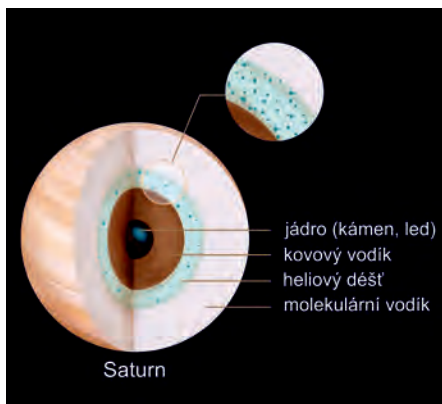
**Juno** – americká sonda určená k průzkumu polárních oblastí planety Jupiter. Odstartovala dne 5. srpna 2011, na oběžnou dráhu Jupiteru byla navedena v roce 2016. Sonda Juno zkoumá atmosféru a hledá v ní molekuly vody. Zaměřuje se i na rozsáhlou magnetosféru Jupiteru a její vliv na planetu.

**Galileo** – americká mise k Jupiteru, která startovala v roce 1989 a po několika prodlouženích trvala bez jednoho měsíce 14 let. Galileo byla první sondou umístěnou na oběžné dráze Jupiteru, odkud prováděla podrobný výzkum planety. Obsahovala sestupný modul, který byl použit v roce 1995. V roce 2003 ukončila sonda Galileo svou činnost řízeným pádem do atmosféry planety.



**Cassini** – meziplanetární sonda NASA, ESA a ASI (Italská kosmická agentura) určená k průzkumu Saturnu. Startovala z Cape Canaveral 15. října 1997, k Saturnu dorazila 30. června 2004. Celková hmotnost Cassini (včetně paliva a pouzdra Huygens) při startu byla 5 600 kg. Vyvrcholením mise bylo měkké přistání pouzdra Huygens na povrchu Saturnova měsíce Titanu dne 14. ledna 2005. Sonda byla pojmenována podle italského matematika a astronoma Giana Domenica Cassiniho (1625–1712). Podle tohoto vědce je pojmenována i část Saturnových prstenců, tzv. Cassiniho dělení. Mise byla ukončena 15. září 2017 řízeným pádem sondy do atmosféry planety.

Nový model nitra Saturnu získaný z experimentálních dat a numerických simulací prováděných na Univerzitě Johnse Hopkinse. Zdroj: Yi Zheng, HEMI/MICA EAP.



## Heliový dešť

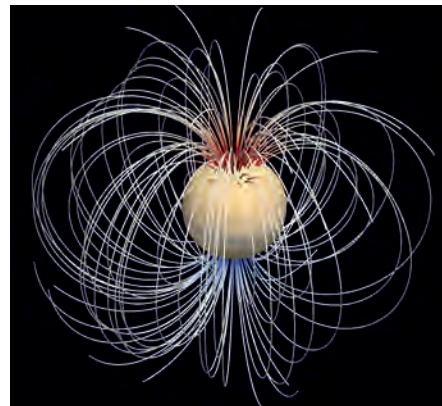
Jak jsme se již zmínili, vrstvu heliového deště v nitrech Jupiteru a Saturnu navrhl ve svém modelu v 70. letech 20. století americký planetární fyzik David Stevenson. Taková vrstva by měla být těsně nad konvektivní vrstvou z kovového vodíku, která je zodpovědná za genezi magnetického pole Jupiteru a Saturnu. Vzhledem k tomu, že vrstva heliového deště přímo obklopuje oblast zrodu magnetického pole, má na jeho tvar na povrchu velký vliv. Podle současných znalostí jsou podmínky pro vznik takové vrstvy jen ve dvou největších planetách, tedy Jupiteru a Saturnu. V Uranu a Neptunu se vzhledem k příliš nízkému tlaku vrstva nemůže vytvořit. Prvním velkým argumentem ve prospěch existence takové vrstvy bylo měření sondy Galileo, podle kterého je ve vnějších vrstvách nižší zastoupení helia a neonu, než by podle souborů modelů mělo být. Klesání heliových a případně neonových kapek vlivem gravitace ve vrstvě heliového deště může odsun helia a neonu z vnějších vrstev velmi jednoduše vysvětlit. Navíc, a to je druhý argument, při přesunu těžšího helia směrem do nitra planety dochází ke změně potenciální energie, která se mění na teplo vyzařované planetou. Vrstva heliového deště tak nejen vysvětluje měření sondy Galileo, ale i kladnou energetickou bilanci planety Jupiter (vyzařuje  $1,6\times$  více energie, než získává od Slunce). Původ této energie je v gravitační kontrakci, jejíž detaily souvisí s přesunem helia do vnitřních vrstev. Třetím velkým argumentem ve prospěch existence vrstvy heliového deště jsou měření sondy Cassini u Saturnu. Při závěrečných manévrech sondy (tzv. *Velké finále*) její dráha procházela těsně nad planetou Saturn a poslední oblet končil dne 15. září 2017 řízeným pádem do Saturnu. Detailní měření magnetického pole Saturnu jsou vysvětlitelná jen za předpokladu existence vrstvy heliového deště kolem oblasti kovového vodíku generujícího magnetické pole Saturnu.

V Lawrenceově národní laboratoři v Livermoru (LLNL) dokážou exotické stavy látky odpovídající podmínkám v nitru plyných obrů připravit experimentálně. Prvním triumfem byla příprava kapalného kovového vodíku v roce 1996, o níž jsme se již zmínili. Od roku 2000 zde probíhají experimenty s cílem připravit podmínky odpovídající vrstvě heliového deště. Mezi dva diamantové nástavce byla do malé utěsněné oblasti vstříknuta směs vodíku a helia v poměru odpovídajícímu nitru Jupiteru. Takové zařízení se nazývá diamantová kovadlina a lze v něm dosáhnout extrémních tlaků. V LLNL vytvářeli ve směsi

uvnitř kovadliny extrémní tlak za pomoci stovek laserových impulzů, které způsobily silné rázové vlny. Jako zdroj laserového světla bylo použito výkonné laserové zařízení Omega, z něhož je k diamantové kovadlině vedeno 12 laserových svazků. První předběžné výsledky se dostavily po pěti letech experimentů. Známký fázového přechodu byly hledány v rozsahu tlaků 30 až 300 gigapascalů a v intervalu teplot 3 000 až 20 000 kelvinů. Vytvoření heliových kapek v původně homogenní směsi molekulárního vodíku a helia se projeví ve skokové změně v odrazivosti směsi. Úspěšná detekce nové fáze se uskutečnila v roce 2015. Dalších šest let výzkumů vyústilo v podrobný článek v časopise Nature v roce 2021. Výsledkem je experimentální potvrzení, že podmínky pro vznik vrstvy heliového deště jsou v Jupiteru ve vzdálenosti 0,68 až 0,84 poloměru Jupiteru od jeho středu, tj. tato vrstva by měla tvořit cca 15 % poloměru planety. Tlak ve střední části vrstvy je 350 GPa. Při nižších tlacích je vrstva nevodivá, při vyšších se už projevuje disociace vodíkových molekul a částečná ionizace, která způsobuje vodivost vrstvy.

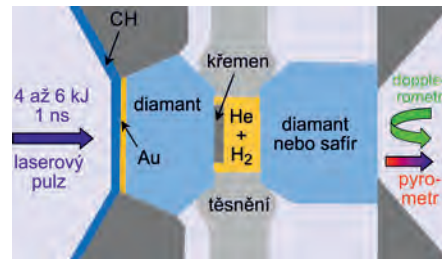
Na Univerzitě Johnse Hopkinse prováděla skupina vedená Chi Yarem podrobné numerické simulace vzniku magnetického pole v nitru Saturnu. Simulace prováděli v marylandském počítačovém centru MARCC (*Maryland Advanced Research Computing Center*). Jejich cílem bylo vytvořit v simulaci takové pole, jaké pozorovala při závěrečných obletech Saturnu sonda Cassini. Pole Saturnu je v těsné blízkosti planety téměř dokonale osově symetrické. Sonda přesto naměřila drobné odchylky od osové symetrie a další specifické charakteristiky Saturnova pole. V numerických simulacích zkoumali vliv přítomnosti vrstvy heliového deště na tvar pole. Ukázalo se, že přítomnost takové vrstvy je podstatná a pole měřené sondou Cassini je ve shodě s vrstvou rozprostírající se od oblasti kovového vodíku do 0,7 poloměru planety Saturn. I když nebyla existence vrstvy heliového deště v planetách Jupiter a Saturn zatím stoprocentně prokázána, měření přímo u planet, pozemské experimenty i numerické simulace jsou velmi silnými argumenty ve prospěch přítomnosti této vrstvy, která byla předpovězena již před 45 lety.

■ Petr Kulháněk, 4. 6. 2021, AB 21/2021



Numerická simulace magnetického pole v blízkosti Saturnu. Zdroj: Ankit Barik, Johns Hopkins University.

Schéma diamantové kovadliny v Lawrenceově národní laboratoři v Livermoru. Zdroj: LLNL/Nature.



## Prstencotřesení



Fotografie Saturnu pořízená Hubblovým vesmírným dalekohledem. Zdroj: NASA, ESA, Amy Simon (GSFC), Michael H. Wong (UCB), OPAL.

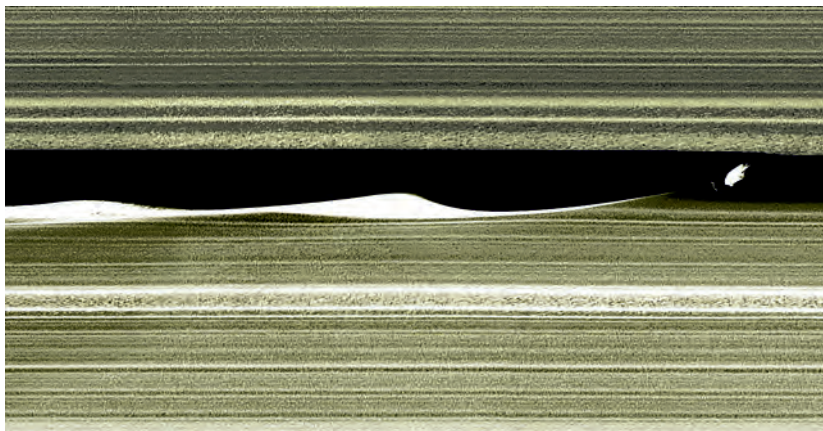
Populární články z konce dvacátého století nešetřily povzdechy a úvahami na téma, jak daleko vidíme do vesmíru a přitom netušíme, co se děje kilometr pod našima nohama. Není to pravda a nebyla to pravda ani v době zlaté éry zmíněných článků. Tam, kam nemůže slunce, dostanou se velmi snadno seizmické vlny. Dnes se již neomezuje na seizmické mapování Země, ale získáváme představy i o nitrech jiných kosmických těles. Od šedesátých let se vyvíjí nový vědní obor – helioseizmologie, který velmi úspěšně zkoumá nitro Slunce a dokáže nejen zobrazit sluneční skvrny na odvrácené straně Slunce, ale pozorovat i podpovrchové proudy plazmatu. Dlouho na sebe nenechala čekat astroseizmologie sledující projevy zvukových vln v nitrech vzdálených hvězd. Na Měsíci zanechali seismometry, které využíváme dodnes, výpravy Apollo už před půl stoletím. Na Marsu máme seismometry jak na trupech sond, tak umístěné přímo na povrchu planety. Nedávno jsme zjistili, že máme seizmograf i na Saturnu.

### Složení Saturnu

Saturn je charakteristický svou žlutou barvou. Ta je způsobena krystalky čpavku ve vrchních vrstvách atmosféry. Převažující látkou je ale vodík, kterého je tu 95 %, helia pouze necelá 4 %. Nízká koncentrace helia se vysvětluje jeho pomalým klesáním do nižších vrstev. Předpokládá se, že v hloubce asi 100 km kondenzuje, což ještě urychlí jeho pokles. Zároveň přichází o část své horizontální rychlosti dané rotací planety. Všechny tyto jevy přispívají k ohřevu, potažmo k celkové energetické bilanci Saturnu.

S rostoucí hloubkou roste i tlak. Někde mezi 500 a 1 000 kilometry je už tlak takový, že se o vodíku ani heliu nedá mluvit jako o plynu. Další významná změna přijde v hloubce 30 000 km. Kubický centimetr vodíku zde váží 5 kg. Atomy jsou tak blízko sebe, že ztrácí pojem o vlastnictví a bez zábran si

Rozvlnění prstence způsobené pastýřským měsícem Daphnis. Snímek pořídl v roce 2017 sonda Cassini. Zdroj: NASA, ESA, ISA.



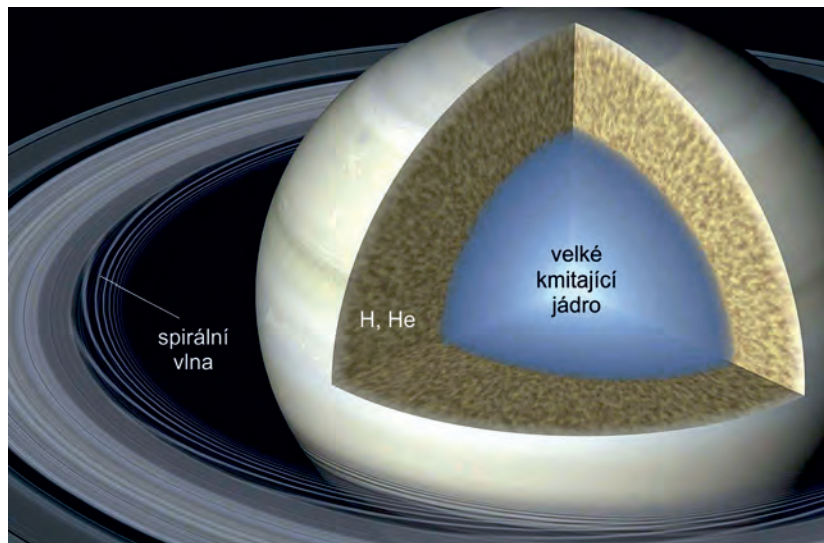
půjčují elektrony, které mezi nimi volně proplyouvají. Podobně, jako v kovu. Proto se této konfiguraci říká kovový vodík. Dobře vede elektrický proud, mechanicky však připomíná spíš kapalinu. Konfigurace jako stvořená pro vznik tekutinového dynama a následně magnetického pole.

Podle původních představ bychom ve vzdálenosti asi 25 000 km od středu planety narazili na vnitřní jádro Saturnu. To mělo být tvořeno silikáty a přibližně 22× těžší, než je naše Země. Nově zjištěná fakta však tento model nepodporují.

## Kosmický seismograf

Nejcharakterističtější prvek Saturnu se nachází ve vzdálenosti několika set tisíc kilometrů od jeho povrchu. Jedná se samozřejmě o prstenec. Není jen mediálně přitažlivý, má i nemalou výpovědní hodnotu. Při jeho bližším zkoumání v něm nacházíme struktury, jejichž vysvětlení mělo nejednou nečekané rozuzlení. Ukázalo se, že některé měsíce (říká se jim pastýřské) jsou při letu kolem planety gravitačně provázány s částmi prstenců a svým vlivem je doslova proplétají. Zajímavým úkazem také byly podivné radiální struktury, které dostaly název „loukotě“. Po počátečním váhání se ukázalo, že za ně odpovídá elektrické a částečně i magnetické pole. Poslední vědecký přínos prstence je spojený se spirálovitými obrazy v prstenci C.

Již v devadesátých letech minulého století se objevila myšlenka, že změny tvaru jádra Saturnu by se mohly gravitační vazbou projevit i v jeho prstenci. V roce 2013 tato zvlnění objevila sonda Cassini. Podobná zvlnění bývají důsledkem gravitačního rušení měsíců, ale v tomto případě se ukázalo, že tomu tak není. Hypotézu, že jsou na vině oscilace Saturnu, se podařilo prokázat až nyní. Prstenec se v tomto smyslu chová jako obří seismograf, pouze vazbu mezi zkoumaným tělesem a zapisovacím zařízením nezprostředkovává mechanické, nýbrž gravitační pouto.



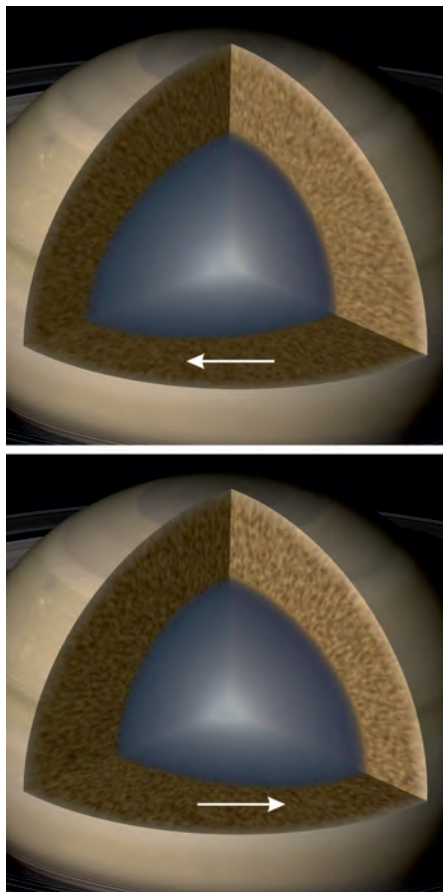
Nové představy o Saturnu. Zdroj: R. Hurt, IPAC, Caltech.

**Vodík** – Hydrogenium, je nejjednodušší plynný chemický prvek, tvořící převážnou část hmoty ve vesmíru. Má široké praktické využití jako zdroj energie, redukční činidlo při chemické syntéze a v metalurgii nebo jako náplň balonů a vzducholoď. Vodík objevil roku 1766 Henry Cavendish.

**Kovový vodík** – forma vodíku, která vzniká za vysokých tlaků, kdy se elektronové orbitály překrývají a elektrony volně putují látkou. Existenci kovového vodíku navrhl americký fyzik maďarského původu Eugene Wigner v roce 1935. Kovový vodík byl poprvé připraven v roce 1996 v Lawrenceově národní laboratoři za tlaku 140 GPa a teploty 3 000 K. Předpokládá se, že může být součástí nitra některých obřích planet.

**Orbital** – oblast v atomárním či molekulárním obalu, kde se vyskytuje elektron. Pravděpodobnost výskytu elektronu v orbitalu je rovna druhé mocnině velikosti komplexní vlnové funkce.





Kmitající jádro Saturnu. Zdroj: Caltech.

## Jádro

Podle modelu vytvořeného Christopherem Mankovichem a Jimem Fullerem z Kalifornského institutu technologií lze spirální struktury pozorované v prstenci C nejlépe vysvětlit jako důsledek chvění Saturnu. Povrch planety by se měl pohybovat rychlostí v řádu desítek centimetrů za hodinu. To by mělo stačit, aby gravitační vazba rozkývala i jemné částičky prstence.

Ukazuje se, že dříve předpokládané malé křemičitanové jádro nejspíš vůbec chybí. Jádro by mělo mít tzv. *fuzzy konzistenci* (polotekutá směs vodíku, helia, ledu, hornin a roztaveného kovu) a zabírat alespoň 60 % průměru planety. Celková hmotnost by měla odpovídat asi 55 Zemím. Na vodík a helium by mělo připadat asi 70 hmotnostních procent.

Nová práce bude mít asi zásadní dopad na vývoj další planetologie. Nastoluje se přirozená otázka, zda podobné fuzzy jádro mají i ostatní planety. Měření sondy Juno naznačují, že u Jupiteru by tomu tak mohlo být. Pokud to tak opravdu je a potvrdí-li se to i u ostatních plyných obrů, bude zřejmé, že tyto planety obsahovaly tekavé složky již v době svého vzniku a budeme muset poopravit své představy o vzniku Sluneční soustavy.

■ Rudolf Mentzl, 24. 9. 2021, AB 34/2021

## Polární záře na kometě

Polární záře byly pozorovány na nejrůznějších tělesech Sluneční soustavy. Především na planetách, ale i na měsících a kometách. Ne každý světelný úkaz v atmosféře tělesa lze ale považovat za auroru (polární záři). O polárních zářích hovoříme tehdy, pokud nejde o lokální jev, ale světelný úkaz je vyprovokován tokem částic slunečního větru. Název polární záře je příhodný na naší Zemi, kde k úkazu dochází v polárních oblastech. U ostatních těles je asi vhodnější termín aurora, neboť světelné úkazy nemusí souviset s magnetickými póly tělesa, většina komet dokonce ani magnetické pole nemá. Sonda Rosetta, která v letech 2014 až 2016 operovala v blízkosti komety 67P Čurjumov-Gerasimenko, pořídila obrovské množství dat, jejichž zpracování probíhá dodnes. Skupina osmnácti vědců z Anglie, Francie, Spojených států, Itálie, Švédska a Švýcarska analyzovala na sklonku roku 2020 dvě události, které jsou prokazatelně aurorami vyvolanými energetickými elektrony slunečního větru. Zajímavý je nejen mechanismus vzniku záře, ale i fakt, že jedna ze spektrálních čar může být velmi dobrým indikátorem množství elektronů ve slunečním větru.

### Výsledky měření Rosetty

Sonda Rosetta Evropské kosmické agentury zkoumala velmi podrobně kometu 67P Čurjumov-Gerasimenko a její přistávací modul Philae dokonce na kometě přistál. Sonda byla vybavena velkým množstvím přístrojů schopných detekovat veškeré fáze vzniku polárních září na kometě 67P. Elektronový spektrometr detekoval energetické spektrum elektronů přilétajících ze Slunce. Přítomnost vodních molekul, které v blízkosti Slunce vytvářejí kolem jádra komety typickou komu, byla detekována hned třemi přístroji. Přímou lokálně v místě sondy Rosetta vodní molekuly zachytával molekulární spektrometr ROSINA. Vzdáleně byly schopny vodní molekuly detekovat mikrovlnný přístroj MIRO a vizuální a infračervený spektrometr VIRTIS. Vlastní aurální emise ve vzdálené ultrafialové oblasti byly doménou

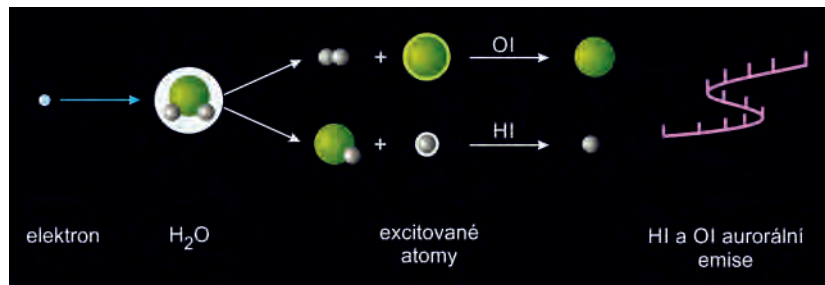
**Kometa** – těleso malých rozměrů obíhající kolem Slunce s periodou od několika let po tisíce roků. Při přiblížení ke Slunci se vypařuje část materiálu jádra a kometa vytváří komu a eventuálně ohon. Jde o pozůstatky materiálu z doby tvorby Sluneční soustavy.

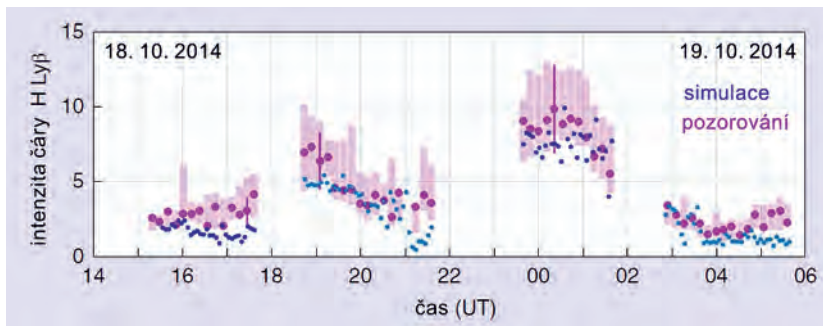
**Koma** – plynný obal jádra komety, vzniká při přiblížení komety ke Slunci. Koma může mít rozměry stovek až tisíců kilometrů.

**Sluneční vítr** – proud nabitých částic ze Slunce, které zaplavují celou Sluneční soustavu. Zejména jde o protony, elektrony a alfa částice (jádra hélia). Sluneční vítr objevil anglický astronom Richard Carrington v roce 1859. Pojmenování sluneční vítr pochází od amerického astronoma Eugena Parkera.

**Rosetta** – sonda ESA z roku 2004, která byla navedena na oběžnou dráhu kolem jádra komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko dne 6. srpna 2014. Přistávací modul Philae na kometě přistál 12. listopadu 2014. Mise byla ukončena dne 30. září 2016 řízeným pádem na povrch komety.

Mechanismus vzniku polárních září na kometách způsobený disociací vodních molekul energetickými elektrony slunečního větru. Zdroj: Nature Astronomy, 2020.





Porovnání měření se simulacemi ve dvou vybraných intervalech. Zdroj: *Nature Astronomy*, 2020.

Záběr jádra komety 67P / Čurjumov-Gerasimenko pořízený kamerou na sondě Rosetta dne 31. ledna 2015. Zdroj: ESA/Rosetta.



ultrafialového spektrografu Alice (pojmenovaného podle postavy z amerického televizního seriálu *The Honeymooners*).

Přímá měření aurorálních emisí byla doplněna numerickými simulacemi disociace vodních molekul a následné atomární emise excitovaných atomů. Jako vstupní data numerické simulace posloužila energetická spektra přítomných elek-

tronů slunečního větru, která měřil elektronový spektrometr. Data z numerických simulací jsou ve velmi dobrém souladu s měřeními emisemi, což poukazuje na to, že mechanismus vzniku polárních září je dobře chápán. Ověřování probíhalo na vybraných datech ze dvou dvoudenních úseků z října 2014 (viz příložený graf).

## Opožděné výsledky

Opět se ukázalo, že současná vědecká zařízení chrlí velké množství dat, z nichž většina zůstane nepracována. Jen malá část naměřených dat projde skutečnou vědeckou analýzou, a to mnohdy i řadu let po jejich zaznamenání. Sonda Rosetta potvrdila jeden z důležitých mechanismů vzniku polárních září na kometách – disociaci vodních molekul energetickými elektrony slunečního větru a následnou emisi excitovaného vodíku a kyslíku ve vzdálené ultrafialové oblasti. Nejde ale jen o polární záře. Kyslíková čára s vlnovou délkou 135,6 nanometru je důležitým indikátorem přítomnosti energetických elektronů slunečního větru a mohla by v budoucnu posloužit ke vzdálenému měření koncentrace elektronů slunečního větru v blízkosti aktivních komet.

■ Petr Kulhánek, 25. 12. 2020, AB 50/2020

## Výpravy k ledovým měsícům

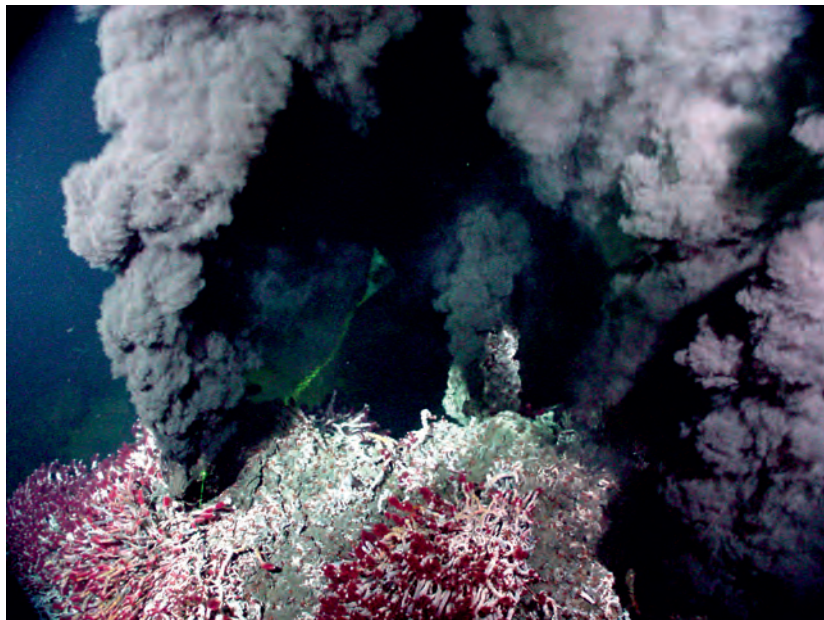
Ledové měsíce Jupiteru a Saturnu jsou prazvláštními světy, které jítí obrazovnost člověka od okamžiku, kdy jsme získali jejich první podrobnější snímky. U Saturnu jde zejména o Enceladus s gejzíry tryskajícími ze zmrzlých plání. U Jupiteru má obdobné gejzíry Europa. Předpokládá se, že u Europy, Callista a Ganymedu jsou podpovrchové oceány s vodou pravděpodobně staršího původu, než je Slunce. Měsíc Ganymed navíc udivuje svým vlastním, nezvykle silným magnetickým polem. Atraktivita prostředí a teoretická možnost existence primitivních životních forem dělá z ledových měsíců lákavý cíl vesmírných posílů člověka. Není proto divu, že jak evropská kosmická agentura ESA, tak americká NASA připravily mise, které budou ledové světy Jupiterových měsíců pozorovat do nejmenších detailů. Evropský JUICE by měl odstartovat v dubnu 2023 a k Jupiteru přiletí v roce 2031. Americká sonda Europa Clipper vyletí v roce 2024 a u Jupiteru bude operovat od roku 2030. Hlavním cílem evropské mise je Ganymed (sonda bude dokonce navedena na jeho oběžnou dráhu), zatímco americká sonda bude zkoumat zejména Europu. Obě sondy měly mít původně přistávací moduly, ale u obou z původního plánu sešlo. JUICE a Clipper budou ve stejném období zkoumat světy, jež jsou naprosto odlišné od všeho, co jsme dosud poznali u nás na Zemi i v blízkém okolí.

### JUICE

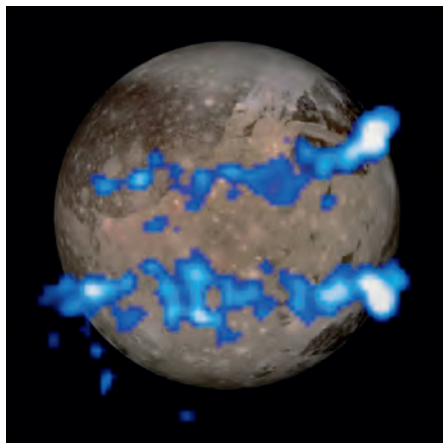
JUICE (*JU*pter *IC*y moons *Ex*plorer) patří k tzv. velkým projektům Evropské kosmické agentury. V roce 2012 byl vybrán k realizaci ze tří návrhů. Ke konkurenčním návrhům patřil obří vesmírný interferometr LISA určený k měření gravitačních vln a projekt velkého detektoru kosmického záření.

**JUICE** – *JU*pter *IC*y moons *Ex*plorer, průzkumník jupiterových ledových měsíců. Projekt evropské kosmické agentury ESA, který má za cíl studium ledových měsíců Jupiteru, zejména měsíce Ganymedu, a i planety samotné. Start je plánován na duben 2023, délka základní mise se odhaduje na 11 let. Projekt byl schválen k realizaci v květnu 2012. Sonda bude navedena na oběžnou dráhu kolem Ganymedu, největšího měsíce Sluneční soustavy.

Život na Zemi existuje i za extrémních podmínek. V okolí tzv. černých kuřáků (podmořských sopek) žijí v hlubinách oceánů, do kterých nepronikne sluneční světlo, uzavřené ekosystémy organizmů, jimž říkáme extremofilové. Není vyloučeno, že v podpovrchových oceánech ledových měsíců by mohly být některé jednoduché formy života. Zdroj: NOAA.







Polární záře v ionosféře Ganymedu jsou pozorovatelné v ultrafialovém oboru. Zdroj: NASA, ESA, J. Saur (Kolínská univerzita, Německo).

**Ganymed** – největší Jupiterův měsíc. S průměrem 5 262 km je vůbec největším měsícem Sluneční soustavy (přibližně dvakrát větší než náš Měsíc). Má vzhledem k Jupiteru vázanou rotaci. Povrch je pokryt křemičitany a vodním ledem. Zhruba 200 kilometrů pod povrchem by měl být podpovrchový slaný oceán. Jeho existenci prozradily změny v magnetickém poli Jupiteru. Ganymed má vlastní magnetické pole, což znamená, že by měl mít žhavé tekuté a vodivé jádro. Ganymed bude cílem evropské mise JUICE.

LISA nakonec své místo pod Sluncem našla – v roce 2017, dva roky po objevu gravitačních vln, byl projekt LISA opětovně zařazen do programu ESA a ke startu by mělo dojít v roce 2034.

Sonda JUICE by po několika odkladech měla startovat v dubnu 2023. Výzkum bude zaměřen na strukturu ledových měsíců planety Jupiter. Především budou pořízeny přesné topografické a geologické mapy povrchu. Dále budou zkoumány fyzikální charakteristiky ledové kůry, jakož i detekce a složení případných vnitřních oceánů. Vědci chtějí přesně změřit vnitřní magnetické pole Ganymedu, jeho interakci s magnetosférou Jupiteru a prozkoumat vliv okolního prostředí. Samozřejmě je hledání podpisů života v jakékoli podobě.

Projekt si však bere za cíl nejen zmíněné měsíce, ale i samotný Jupiter. Rozsáhlá magnetosféra Jupiteru má významný vliv na vnitřní prostředí měsíců. Její podrobné zmapování umožní lépe pochopit stav podpovrchových oceánů. Dále bude sonda zkoumat atmosféru ve výškovém rozsahu od vrcholů mraků až po termosféru. Důraz je kladen především na dlouhodobé procesy, chemické složení a přenášení energie a hybnosti mezi jednotlivými vrstvami. Je vidět, že zařazení projektu do třídy L (*Large*) si mise plně zaslouží. Pro nás je zajímavá také česká účast na projektu.

**Ganymed.** Primárním cílem mise je zkoumání měsíce Ganymed. Dnes víme téměř s jistotou, že se pod ledovým krunýřem měsíce nachází oceán kapalné vody. To by byl sám o sobě důvod, proč měsíc zkoumat. Pozornost planetologů však přitahuje především jeho magnetické pole. Již mise Galileo zjistila, že ledové měsíce interagují s magnetosférou Jupiteru. Tento jev přičítají sekundárnímu magnetickému poli, které se indukuje v jejich slaných oceánech. U Ganymedu je situace poněkud odlišná. Kromě indukovaného pole má také vlastní magnetické pole dipólového charakteru. Kolem měsíce byly v ultrafialovém oboru vyfotografovány dva pásy polární záře. Sonda si klade za úkol prozkoumat, jak částice kosmického záření interagují nejen se slabou atmosférou, ale i jak ovlivňují složení povrchu a jak se magnetická pole měsíce, planety a Slunce vzájemně ovlivňují.

Dnes již sice máme přesvědčivé důkazy, že se pod ledovým povrchem nachází tekutý oceán, ale stále nevíme, jak silná ledová kůra je a jak hluboko oceán sahá. Také není zřejmé, jak se rozhraní mezi jednotlivými vrstvami chovají. Po důkladném proměření magnetického

pole bude možné lokalizovat indukované elektrické proudy ve slaném oceánu, a tím vymezit jeho rozsah. Tato metoda bude doplněna nezávislými měřeními rychlosti otáčení měsíce a přesným mapováním jeho gravitačního pole.

Na palubě sondy bude také přítomen radar, který by měl „proniknout“ do hloubky až 9 km pod ledový povrch. Tato měření přinesou údaje o tektonických rysech a geologickém vývoji. Při troše štěstí dosáhnou až na rozhraní vody a ledu, čímž zjistíme minimální tloušťku kůry. Mapování samotného povrchu pomůže k určení mineralogického složení a k objasnění geologických procesů, které formovaly poměrně komplikovaný povrch. Pozorování povrchu v různých vlnových délkách zpřístupní studium rozmístění různých materiálů, což povede k lepšímu pochopení distribuce prvků nezbytných pro život.

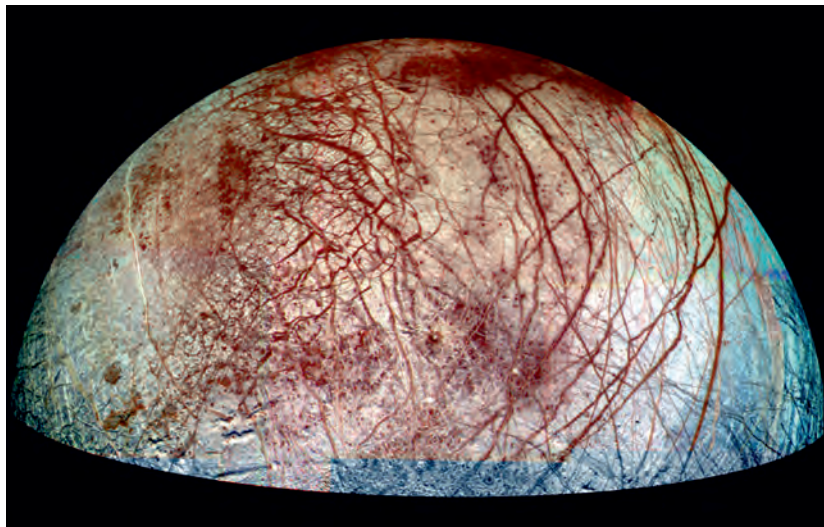
**Europa.** Na rozdíl od Ganymedu, který bude JUICE zkoumat přímo z jeho oběžné dráhy, bude nad Europou pouze prolétat. Na vině je Jupiterův pás zvýšené radiace (obdoba Van Allenových radiačních pásů v blízkosti Země), ve kterém se Europa nachází a který je schopný relativně rychle zničit elektronické vybavení sondy. Měření jsou však rozplánována tak, aby je sonda zvládla i během krátkých přiblížení. Bude to především „ochutnávka“ vody z vrcholků evropských gejzírů.

Tyto gejzíry byly objeveny teprve v nedávné době a nemáme zatím k dispozici přesné údaje o jejich chemickém složení. Naskytá se zde možnost prozkoumat složení materiálu z nitra měsíce. Zda je zdroj těchto gejzírů v podpovrchovém oceánu, nebo v lokálních kapsách ledové kůry, není zatím známo. Uvidíme, kam nás měření posunou.

Hladký povrch Europy, pokrytý sítí prasklin a trhlin, svádí k podložené domněnce, že na tomto měsíci existuje jakási obdoba deskové tektoniky. Některé útvary připomínají pozemské oceánské hřebenby a jiné naopak místa subdukce, kde

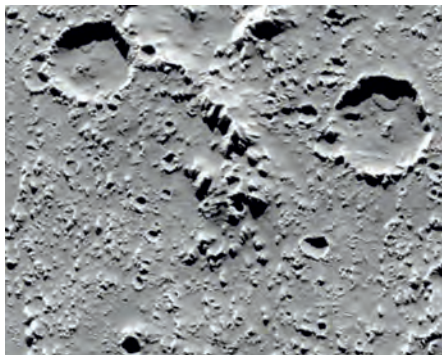
**Europa** – přirozená družice Jupiteru. Patří mezi tzv. galileovské měsíce, které lze pozorovat již malým dalekohledem. Při průměru 3 100 km je jen o málo menší než náš Měsíc. Předpokládá se malé křemičitanové jádro pokryté oceánem kapalné vody. Kůru tvoří několikakilometrová ledová krusta, z níž tu a tam tryskají kryogenní gejzíry. Často se spekuluje, že by v podpovrchovém oceánu mohly být stopy primitivního života. Europa bude cílem americké mise Europa Clipper.

Trhliny v ledu na Europě naznačují přítomnost deskové tektoniky. Zdroj: NASA, JPL, Arizonská univerzita.



**Callisto** – druhý největší Jupiterův měsíc, průměr má 4 820 km. Je přibližně stejně veliký jako planeta Merkur (hmotnost je ale jen třetinová). Podobnost s Merkurem není jen ve velikosti, ale i v povrchu hustě pokrytém krátery. Na povrchu jsou křemičitany, vodní led a oxid uhličitý. Je možné, že se v hloubce okolo 100 km pod povrchem nachází slanný vodní oceán. Měsíc nevykazuje ani stopy deskové tektoniky, ani vulkanizmu. Pravděpodobně jde o geologicky mrtvé těleso.

Povrch Callista je posetý krátery. Sonda Galileo vyfotografovala pravděpodobný sesuv horniny v jednom z kráterů (velký kráter vpravo nahoře). Vlna prachu cestovala po povrchu podezřele dlouho, což naznačuje jeho velice jemnou strukturu a možné načechrání elektrostatickými silami. Zdroj: NASA, JPL, ASU.



se jedna kra zasunuje pod druhou. Zdroje gejzírů sledují tektonické linie, podobně jako pozemské sopky sledují rozhraní pevninských ker. Planetology to jen v domněnce o kontinentálním driftu utvrzuje. Pokud radarová pozorování tyto představy potvrdí, vnese se tím jasno do záhady, jakým způsobem je povrch Europy neustále omlazován.

**Callisto.** Průzkum posledního měsíce – Callista – můžeme chápat jako sběr srovnávacího materiálu. I u tohoto měsíce planetologové připouštějí, že by mohl skrývat tekutý oceán, důkazy však chybí. Není ani jisté, zda jsou zde slapové jevy natolik intenzivní, aby mohly udržet vodu v tekutém stavu. Také samotný povrch vykazuje jen velice malé stopy eroze, a je proto možné, že jde o geologicky mrtvé těleso. V tom případě bychom ho mohli považovat za zakonzervovaný etalon nesoucí údaje o svém vzniku v období formování ostatních galileovských měsíců. Pokud tomu tak je, bude nás zajímat, jakým způsobem se na měsíci usazuje prach z okolí a jak je rozmístován po povrchu.

Callisto je obklopeno řídkou atmosférou zakončenou ionosférou. Přístroje sondy Galileo v 90. letech 20. století zaznamenaly v okolí měsíce mírnou deformaci magnetického pole Jupiteru. Dosud není jisté, zda ji měla na svědomí zmíněná ionosféra nebo šlo o projev podpovrchového oceánu. Od sondy JUICE se očekávají přesnější měření, která rozhodnou, zda je Callisto zcela mrtvým tělesem, nebo se přece jen mezi ledovým povrchem a skalnatým jádrem nějaký oceán skrývá. Ani u tohoto měsíce se sonda neusadí na oběžné dráze, spokojí se pouze s dvanácti průlety ve výškách 400 a 200 km.

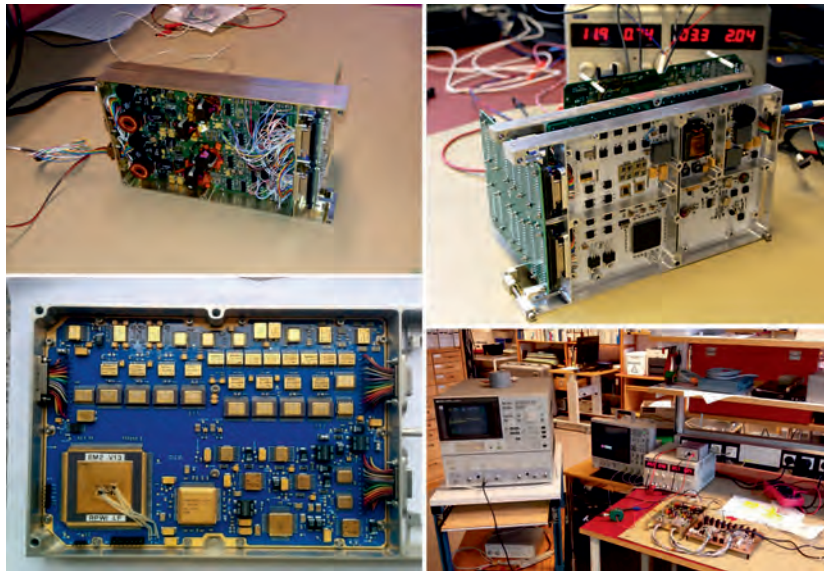
**Napájení.** Zvláštní kapitolou vesmírných misí do odlehlých koutů Sluneční soustavy je napájení elektrickou energií, které se buď řeší klasicky slunečními bateriemi, nebo radioizotopovými zdroji. Jupiter se nachází ve vzdálenosti, ve které přichází v úvahu oba způsoby. V počátcích projektu se rýsovala možnost, že by součástí mise byl ruský přistávací modul Laplace-P a diskutovala se možnost, že by se jeho radioizotopový generátor mohl podílet na celkové energetické bilanci. Laplace-P však na palubě nebude, od radioizotopového generátoru bylo tedy upuštěno. Intenzita slunečního záření je u Jupiteru 25× slabší než u Země. Uvážíme-li ještě účinnost článků a nutnou rezervu způsobenou degradací polovodičů v prostředí zvýšené radiace, nezdá se plocha slunečních panelů 60 až 75 m<sup>2</sup> předimenzovaná.



**Česká stopa.** Vývoj a konstrukce napájecí soustavy připadla Astronomickému ústavu Akademie věd ČR, který ke spolupráci přizval švédský Institut kosmické fyziky v Uppsale. Činnost zdroje je komplikována sedmiletou příletovou fází a dvouletou dobou práce v prostředí zvýšené radiace. Nároky na spolehlivost a vysokou energetickou účinnost zdroje si vyžádaly zdvojení některých komponent a použití špičkových součástek. U nás bohužel nemáme montážní pracoviště, které by mělo od ESA certifikaci pro práci s těmito součástkami. Přesto byly všechny komponenty řádně odzkoušeny a prošly na výbornou. Dalším českým přístrojem na palubě bude detektor plazmových a rádiových vln, který vyvíjí Ústav fyziky atmosféry Akademie věd České republiky. Modul nese název RPWI (*Radio and Plasma Wave Investigation*) a bude měřit vlastnosti plazmatu a rádiových emisí v bezprostředním okolí sondy. Experiment obsahuje čtyři Langmuirovy sondy citlivé až do 1,6 MHz, které budou měřit charakteristiky plazmatu a dále přijímače rádiových vln v rozsahu 80 kHz až 45 MHz.

## Europa Clipper

Psal se rok 1997, když sonda Galileo při průletu kolem Evropy zjistila anomálii magnetického pole, kterou tenkrát nikdo nedokázal správně vysvětlit. Teprve po patnácti letech, tedy celých devět let po zániku sondy, Hubblův dalekohled objevil na Europě vulkanickou aktivitu projevující se ledovými gejzíry. V době, kdy sonda Galileo naměřila zmíněnou anomálii, míjela Evropu necelých dvě stě kilometrů nad jejím povrchem. Zdálo se tedy pravděpodobné, že zároveň prolétla i materiálem gejzíru. Když už bylo jasné co hledat, nebyl problém vyvinout speciální software, který dokázal naměřené hodnoty správně interpretovat a doplnit optická pozorování dalšími hodnotami. Na řadu přišlo



Česká republika je zodpovědná za dva přístroje sondy. Nalevo je detektor plazmových a rádiových vln RPWI, napravo je napájecí zdroj vyvinutý u nás při testování v Uppsale. Zdroj: Akademie věd České republiky.

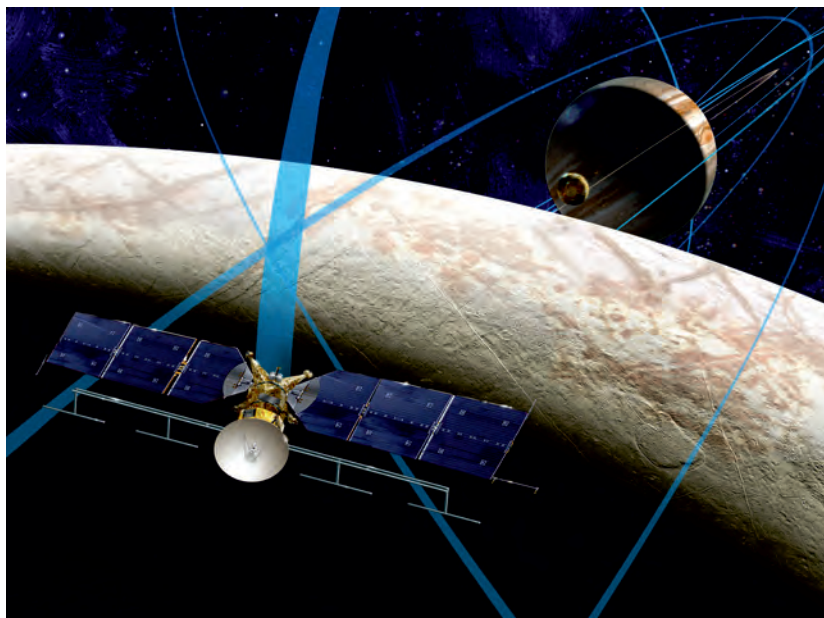
**Europa Clipper** – sonda NASA připravovaná k průzkumu Jupiterova ledového měsíce Europa. Start je plánovaný na rok 2024, nosnou raketou bude Falcon Heavy (původně mělo jít o novou americkou superraketu SLS). Sonda nebude navedena přímo na oběžnou dráhu kolem Evropy, kde by ji zničila zvýšená radiace, ale na oběžnou dráhu kolem Jupiteru. K Europě se opakovaně přiblíží při 40 až 45 průletech. Jedním z úkolů by měl být sběr a chemická analýza materiálu z ledových gejzírů.

**Europa Lander** – sonda NASA, která by měla navázat na práci jiné sondy – Europa Clipperu. Jejím cílem je přistání na povrchu Evropy a provrtání se ledovým příkrovem do podpovrchového oceánu. Sonda je zatím ve stadiu návrhů, o jejím letu zdaleka ještě nebylo rozhodnuto.



**Jupiterovy radiační pásy** – oblast nabitých částic zachycených v Jupiterově silném magnetickém poli, která září v rádiovém oboru. Rádiový signál z těchto pásů objevili v roce 1955 američtí astronomové Bernard Burke a Kenneth Franklin. Signál je natolik intenzivní, že slouží jako referenční zdroj pro nastavování přístrojů na mikrovlnných sondách. Záření radiačních pásů zasahuje až k Europě, proto nebude mise Europa Clipper pozorovat z oběžné dráhy tohoto měsíce.

Umělecké ztvárnění mise Europa Clipper s vyznačením dráhy, na které se bude přibližovat k Europě. Zdroj: NASA, JPL-Caltech.



hlavně důkladné zpracování dat z plazmového vlnového spektrometru. Veškeré naměřené jevy bezesbýtku korespondují s představou, že sonda prolétla vrcholem gejízu. Tím se však možnosti výzkumu fenoménu vyčerpaly. Galileo byla sonda mnoha cílů, na zkoumání gejízů však pochopitelně konstruktéři nemysleli.

Přitom právě chemická analýza vyvrženého materiálu by nám mohla o vnitřku měsíce vydat nejedno zajímavé svědectví, možná i nějakou indicii o případném životě. Zatím nevíme, zda vyvržený materiál pochází z nějaké podpovrchové vodní kapsy nebo přímo z vnitřního oceánu. Dokonce si nejsme ani jisti tloušťkou ledové kůry, která se odhaduje mezi dvěma a třiceti kilometry. Přesto se objev gejízů stal jedním z motorů, které udržují v chodu přípravu mise Europa Clipper.

**Historie mise.** První návrhy mise pocházejí z roku 2011. Název prošel mnoha peripetiemi, nakonec se americká NASA rozhodla jako finální název využít původně neoficiální pracovní název Europa Clipper. Klipr je pojmenování pro rychlé plachetnice se třemi sěžni, které brázdlly pozemské oceány v 19. století. Využívali je zejména obchodníci pro rychlou dopravu zboží. Trojstěžník se stal i součástí loga mise.

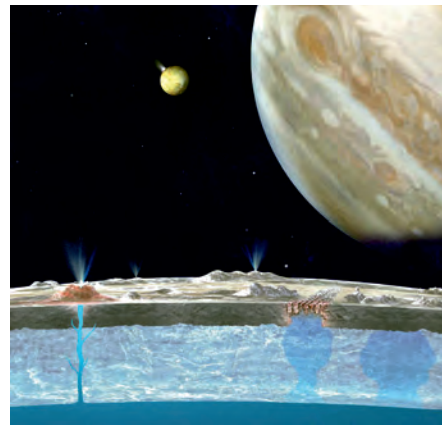
Původní plán počítal s misí, která by se podobala americko-evropské sondě Cassini-Huygens. Ta zkoumala 13 let planetu Saturn a její součástí bylo přistávací pouzdro Huygens (z produkce Evropské kosmické agentury), které úspěšně přistálo na největším Saturnově měsíci Titanu. Plán byl obdobný. Americká NASA se postará o sondu, která bude navedena na oběžnou dráhu kolem Jupiteru, a Evropská kosmická agentura vyrobí modul, který přistane na Jupiterově měsíci Europa a provede zde základní výzkum včetně pokusných vrtů. Vývoj se ale nakonec ubíral jiným směrem, a tak

americká NASA rozhodla, že k Jupiteru vypraví dvě sondy: Europa Clipper bude zkoumat Europu z protáhlé oběžné dráhy kolem Jupiteru a teprve další mise s názvem Europa Lander na měsíci Europa přistane.

Europa Clipper nebude obíhat Europu ze stejných důvodů jako evropský JUICE. Na vině jsou průlety Europy Jupiterovými radiačními pásy, které by sondu zničily. Stane se proto oběžnicí Jupiteru a Europu navštíví při zhruba čtyřiceti průletech. Zdroje však uvádějí, že objem nasbíraných dat bude více než dostatečný k vytvoření komplexního obrazu satelitu. Některé průlety počítají s přiblížením až na 25 km, kde by měla být hustota materiálu geizirů ještě dostatečně velká pro přímou chemickou analýzu.

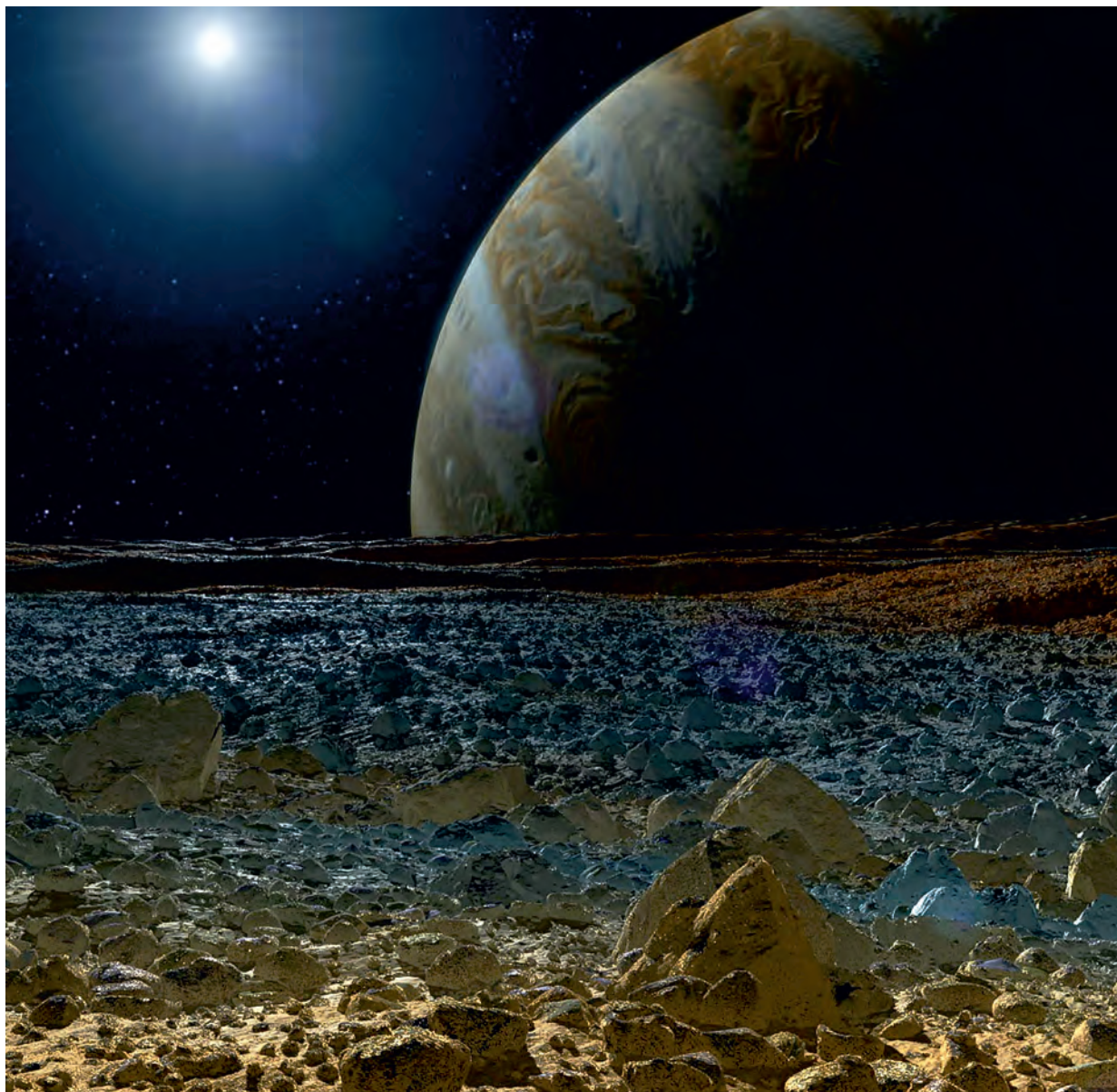
**Aktuální stav.** Projekt Europa Clipper dostal definitivně zelenou na konci první poloviny roku 2019. Sonda by měla být komplet připravena do roku 2023 a start by měl proběhnout v roce 2024. Let k Jupiteru by podle vybraného letového okna měl trvat tři až sedm let. Příprava sondy Europa Clipper běží na plné obrátky. V Langleyově výzkumném středisku NASA (LaRC) probíhaly od roku 2019 testy prototypu vysokoziskové antény, která je vysoká tři metry a bude zodpovědná za přenos veškerých vědeckých dat. Testy prováděla řada odborníků z NASA JPL, Hopkinsovy univerzity i samotného LaRC. Letový exemplář byl testován v roce 2020. Intenzivně také probíhá konstrukce jednotlivých komponent a přístrojů sondy.

**Nosná raketa.** Původně bylo plánováno, že sondu Europa Clipper do vesmíru vynese nosná raketa SLS, kterou USA intenzivně vyvíjí. Konkrétně mělo jít o třetí vyrobenou raketu, ale plány poněkud zhatila snaha současného vedení USA o obnovení letů člověka na Měsíc. Cíl je nemalý: do pěti let od padesátiletého výročí přistání prvního člověka na Měsíci, tj. v roce 2024, by měla na Měsíci opět přistát lidská posádka a začít tam budovat měsíční základnu. Za tímto účelem je vyvíjena kosmická loď Orion, která by měla, podobně jako kdysi Apollo, dopravit člověka na Měsíc. K vynesení lodi Orion na oběžnou dráhu je ale nutná právě nosná raketa SLS. Vzhledem k šibeničnímu termínu (v plánu je oblet Měsíce člověkem v roce 2023 a přistání v roce 2024), nebude k dispozici raketa SLS pro start sondy Europa Clipper a bude ji muset nahradit komerční nosič. V době psaní této knihy je nejpravděpodobnější variantou Falcon Heavy společnosti SpaceX.



Umělecké ztvárnění geizirů stříkajících z podvrchového oceánu na zmrzlém povrchu Europy. V pozadí je měsíc Io s typickou činnou sopkou a samozřejmě také planeta Jupiter. Zdroj: NASA, JPL-Caltech.

**SLS – Space Launch System.** Raketa vesmírné agentury NASA, která by měla do kosmického prostoru vynášet materiál i kosmonauty a nahradit raketoplány, jejichž provoz byl zastaven v roce 2011. První verze by měla mít nosnost 70 tun, později 105 tun a nakonec 130 tun. Počítá se s ní při dopravě astronautů k Měsíci v rámci mise Artemis a při budování měsíční vesmírné stanice Gateway. V současnosti probíhají intenzivní testy raketového motoru. První verze nové rakety by měla být vyzkoušena v první polovině roku 2022.





Sonda Europa Clipper je velmi často označována zkratkou EC (*Europa Clipper*). Našinci by mohla tato zkratka připomenout vlaky Eurocity. Doufejme, že podobnost je čistě náhodná a sonda Europa Clipper k Jupiteru dorazí bez zpoždění.

## Europa Lander

O zdárném dokončení amerického projektu Europa Clipper nikdo nepochybuje a začíná se přetřásat otázka, co potom. Na práci sondy by měla navázat další sonda, Europa Lander, jejímž cílem je přistání na Europě a uskutečnění vrtů do jejího ledového příkrovu.

Podle některých představ by se na Europě měl nacházet až dvojnásobek objemu tekuté vody, než je v pozemských oceánech. Přidáme-li zdroj tepla a křemičitanové jádro, získáme prostředí, o kterém si můžeme myslet, že je vhodné pro udržení a možná i pro vznik života. Kdyby se něco takového podařilo prokázat, znamenalo by to takový zlom v myšlení napříč všemi intelektuálními obory, od chemie přes filozofii až po náboženství, že o plánovaném rozpočtu mise by se pak mluvilo jako o pouhých třech miliardách dolarů. Thomas Zurbuchen z vědeckého ředitelství NASA v polovině roku 2018 prostřednictvím Twitteru oznámil, že NASA přijímá návrhy na přístroje Landeru a celkovou koncepci výzkumu. Je sice vidět, že vše je zatím ve fázi příprav a leccos se ještě může změnit a patrně také změni, nicméně hrubý pohled se již rýsuje.

Lander by měl na povrchu pracovat dvacet dní. Jakkoli se to zdá málo, je to technická výzva, protože právě v místech, ve kterých se pohybuje Europa, zachytává Jupiter svým magnetickým polem částice slunečního větru a způsobuje silnou radiaci, která poškozuje elektroniku. Proto se ani Clipper, ani evropský JUICE neodvážejí pracovat na stabilní orbitě, a ani Lander na povrchu nevydrží pracovat neomezeně. Hmotnost přístrojového vybavení by neměla překročit 33 kg. To je také velice omezující

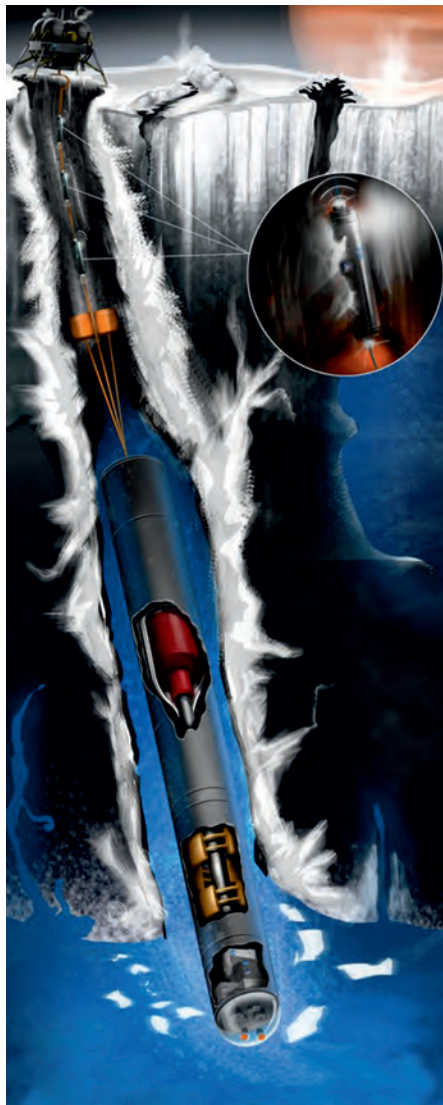
**Io** – Jupiterův měsíc, průměr má 3 630 km, obíhá ve vzdálenosti 422 000 km. Objeven byl Galileem v roce 1610. Na Io je aktivní sopečná činnost, nitro je ohříváno slapovým působením a elektrickými proudy. Tyto proudy tečou podél siločar Jupiteru a uzavírají se přes Io. Io se nachází na vnitřní straně plazmového toru, který obklopuje Jupiter. I když nebude hlavním cílem mise Juice a Europa Clipper, rozhodně nebude stát zcela stranou aktivit obou misí.

← Umělecká vize Jupiteru pozorovaného z povrchu měsíce Europa. V pozadí je vzdálené Slunce. Zdroj: NASA.

Testy vysokoziskové antény pro misi Europa Clipper v Langleyově výzkumném středisku. Zdroj: NASA, LaRC.







Umělecká představa tunelbotu zanořujícího se do ledové kůry měsíce Europa. Zdroj: Alexander Pawlusik, NASA Glenn Research Center.

faktor, když uvážíme hlavní pracovní náplň modulu. Podle smělých představ NASA by měla sonda prorazit tunel několik kilometrů silným ledovým příkrovem a dostat se až k tekutému oceánu. Autonomní robotické zařízení, které by tunel vytvořilo, je v člancích označováno složeninou dvou slov, která netřeba překládat, protože první se v češtině uchytilo tak sebevědomě, že se do světa rozlétlo s novým významem a druhé je ryze českého původu: *tunnelbot*.

**Mechanismus vrtání.** Nejnadějnějšího kandidáta zatím představili dne 14. prosince 2018 na zasedání Americké geofyzikální unie. Princip je jednoduchý. Nevrtat, protavit. Rozpouštět led pod sebou a zbytek nechat na gravitaci. Technické problémy, které koncept nese, jsou zřejmé. Kde brát energii na ohřívání ledu, jak zajistit komunikaci s Landerem a jak to všechno stihnout za dvacet dní, než radiace rozežere retranslační zařízení na povrchu. Co se energie týče, připadá v úvahu pokročilý jaderný reaktor. V úvahu jsou brány také radioaktivní bloky, se kterými má již NASA zkušenosti. Používá je jako zdroj tepla v radioizotopových termoelektrických generátorech. Řešení jednoduché, bohužel zase přináší další problémy s radiací.

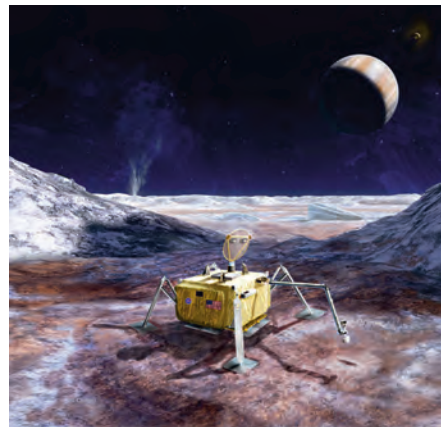
Komunikaci s povrchem bude zajišťovat optické vlákno osazené zesilovačem na každém třetím kilometru. Předložený návrh vůbec neřeší odčerpávání vody během ražení tunelu, což staví použitelnost do nelichotivého světla. Odčerpávání vody na kilometrové vzdálenosti, při tak nízkých teplotách, bez možnosti zásahu servisní jednotky je více než jen technickou výzvou. Pokud by se voda průběžně neodčerpávala, musel by být naviják s optickým vláknem nesen přímo tunnelbotem, protože zamrzající voda v komínu jakýkoli pohyb vlákna znemožní. I když se ukazuje řada problémů, nejsou nepřekonatelné, jak dokazují vrty v antarktickém ledu pro neutrinový detektor IceCube.

**Hledání života.** Nad technickým řešením se vznáší celá řada otázek. V neposlední řadě je tu problém sterilizace sondy, která bude muset být mnohem důkladnější, než je u jiných sond. Možnost kontaminace v teplém vodním prostředí je reálnější než třeba v řídké, vymražené atmosféře Marsu. Za nejhorší scénář nález života se pokládá nález mikrobů podobných pozemským. Nikdy bychom se nedozvěděli, zda jde o kontaminaci, nebo existuje přírodní zákonitost, která vytváří podobné struktury na Zemi jako u Jupiteru.

Stopy života budou hledány nejen ve vzorcích z velké hloubky, ale primárně v materiálu nabraném z hloubky pouhých 10 centimetrů pod povrchem. Vzorky budou analyzovány v miniaturní laboratoři přímo na povrchu Europy.

Další větší setkání vědců věnované sondě Europa Lander proběhlo 14. května 2020. Vzhledem k pandemii covidu šlo o virtuální setkání, ovšem s rekordním počtem 400 účastníků.

Zda se Europa Landeru a tunelbotu opravdu dočkáme, je v tuto chvíli těžko předvídat. Na jednu stranu je vidět, že do konkrétního řešení mají tyto návrhy ještě velmi daleko a v živé paměti máme spousty projektů, které navzdory vyšší rozpracovanosti nikdy neopustily papír. Tentokrát je to však trochu jiné. Kolem projektu panuje velké nadšení a ochota investovat. Držme palce, aby obojí vydrželo co nejdéle.

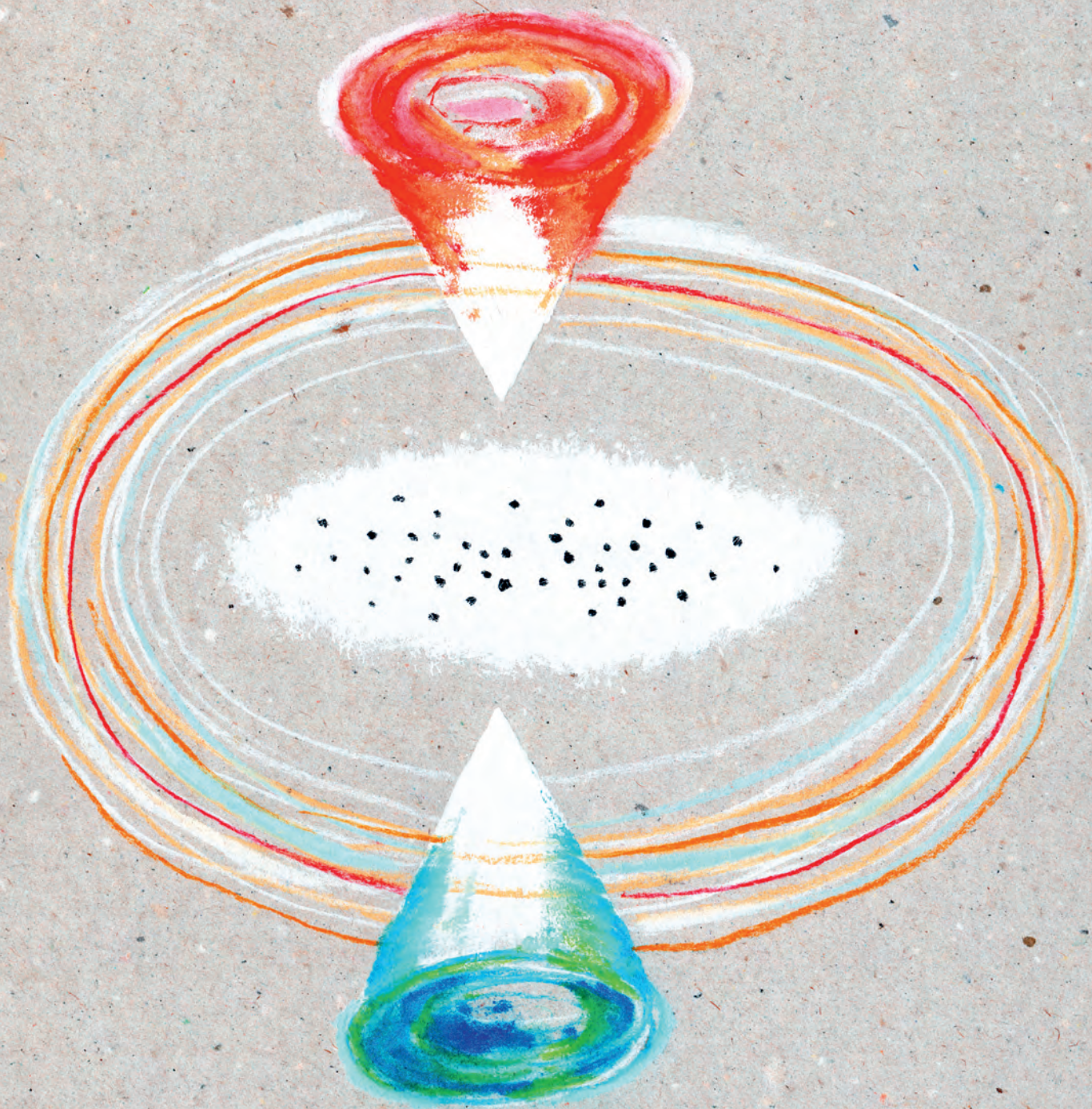


Umělecká představa přistání Europa Landeru na povrchu měsíce Europa. Zdroj: NASA JPL.

■ Rudolf Mentzl, Petr Kulhánek, aktualizováno 2022,  
AB 5, 15, 37/2019







## II. VZDÁLENÝ VESMÍR



## Kolik váží Mléčná dráha?

**Trpasličí galaxie** – menší galaxie, často nepravidelného tvaru, tvořené hvězdami a mezihvězdnou látkou. Jsou v nich zastoupeny hvězdy ve všech fázích hvězdného vývoje, tedy objekty nejrůznějšího stáří. Proto je lze spektroskopicky odlišit od obřích kulových hvězdokup, ve kterých se nachází jen velmi staré hvězdy. Nicméně některé trpasličí galaxie kulové hvězdokupy obsahují. Dnes známé trpasličí galaxie jsou gravitačně vázány na velké spirální galaxie a jejich hmotnost dosahuje až setiny hmotnosti mateřské galaxie, zpravidla je v rozmezí 1 až 10 miliard Sluncí. Jde o celkovou hmotnost, tj. atomární látku i temnou hmotu. Poměr obou složek se liší případ od případu.

Mléčná dráha s dvěma největšími satelity, Magellanovými oblacemi, vévodí jižní obloze. Zdroj: ESO.



Mléčná dráha je za jasných nocí snadno patrná jako zřetelný světlejší pruh na obloze mezi souhvězdími. Teprve Galileovi se podařilo v moderní době díky dalekohledu rozlišit, že jde ve skutečnosti o oblast méně jasných hvězd. Na naší obloze Mléčná dráha v létě vychází od Štřelce přes Orla, Labuť, Kasiopēju, Persea a pokračuje do zimní oblohy mezi Orionem, Jednorožcem a Velkým psem. Prostorově jde o obrovitý hvězdný ostrov, naší Galaxii, o níž dnes víme, že není tvořena jen hvězdami. Mezi hvězdami je mnohem více látky, která nesvítí, nebo i takové, kterou prozatím neumíme příliš dobře detekovat – temné hmoty. Tohle vše ale působí gravitačně na vzdálenější hvězdné ostrovy a také na své drobnější satelity – tzv. *trpasličí galaxie*. Astronomové se od okamžiku, kdy poznali prostorovou strukturu Mléčné dráhy, což se podařilo teprve až na počátku minulého století, pokoušejí určit její základní charakteristiky. Jde zejména o určení velikosti a hmotnosti celé soustavy. Na Mléčnou dráhu se díváme zevnitř, Sluneční soustava je usazena v rovině galaktického disku a pohybuje se spolu se svým hvězdným okolím jedním ze spirálních ramen Galaxie. Znamená to,

že velké množství galaktické materie je zakrýváno blízkými hustými oblastmi Mléčné dráhy plnými mezihvězdného prachu a plynu. Dohlédnout takovým prostředím někam „na okraj“ bylo možné až teprve s rozvojem rádiové astronomie, ve viditelném světle je to prakticky neproveditelné. Hmotnost se u hvězdných soustav, které pozorujeme zvenku, dá dopočítat z jejich dynamických charakteristik podle Keplerových zákonů nebo přímo z Newtonova gravitačního zákona či ze statistického chování jednotlivých členů. Bylo by ale možné něco takového i u celé galaxie čítající stovky miliard hvězd, na kterou pohlížíme zevnitř?

## Trpasličí satelity

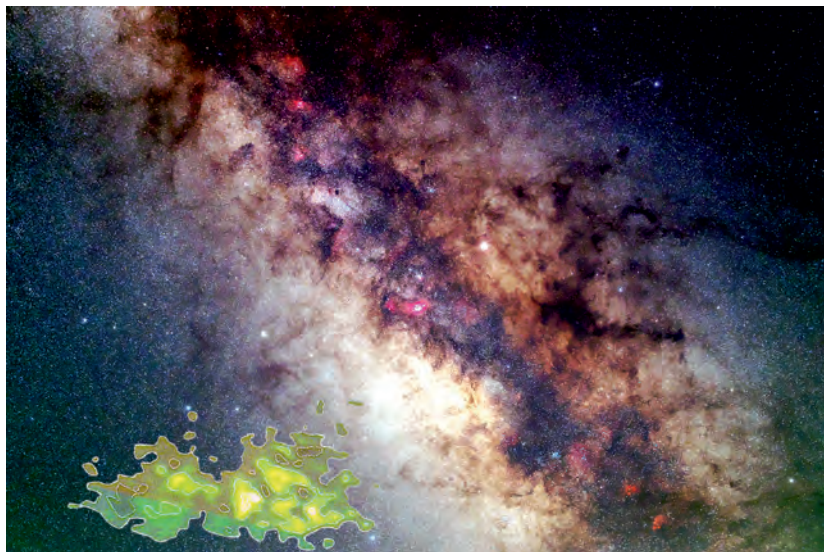
U celých hvězdných soustav je zjišťování jejich dynamických charakteristik mnohem obtížnější. Potíž spočívá v určení hranic mezi jednotlivými hvězdnými ostrovy. Kolem velkých galaxií se pohybuje velké množství drobnějších, satelitních trpasličích galaxií. Většina z nich je ale velmi obtížně detekovatelná, satelity obsahují spíše nesvítící mezihvězdnou látku než výrazně rozlišitelné hvězdy. Navíc velké množství látky z nich bývá postupně „vytahováno“ slapovým působením, strháváno okolním mezigalaktickým prostředím obdobně jako chvosty komet ve Sluneční soustavě a tyto plynné a prachové stopy pak mají jiné dynamické charakteristiky než jádro trpasličího satelitu pokračující na oběžné dráze kolem společného těžiště mateřské galaxie a jejích satelitů. Jelikož mnohé trpasličí satelity jsou často snáze detekovatelné na delších vlnových délkách než ve viditelném světle, nebo nám jsou skryty za hustou Mléčnou dráhou, nelze vždy snadno a jednoznačně určit, co se podařilo zaznamenat a na co se zrovna díváme.

Mléčnou dráhu podle dnešních znalostí obkružuje šest desítek satelitních trpasličích galaxií. Místní skupinu galaxií, jejímiž nejhmotnějšími členy jsou tři olbrímí spirální galaxie (Mléčná dráha, Andromeda M31 a Trojúhelník M33), tvoří 82 členů. Galaxie Mléčná dráha obsahuje 500 až 580 miliard hvězd. Odhady hmotnosti celku vypočítávané z dynamických charakteristik nejbližších satelitních trpaslíků se dodávna pohybovaly v rozmezí dosti širokého intervalu s dolní hranicí kolem 850 miliard Sluncí a horní mez přesahovala 3 biliony hmotností slunečních. Dnes je ale oproti dřívějším výsledkům získaným metodou proměřování dynamických charakteristik trpasličích galaxií možné využít obrovských souborů dat pořízených observatoří Gaia. Navíc vše probíhá novými a mnohem účinnějšími matematickými postupy.



*Eliptická trpasličí galaxie Leo I v souhvězdí Lva. Nachází se ve vzdálenosti 820 000 světelných roků a je považována za jednu z nejvzdálenějších soustav gravitačně vázaných k Mléčné dráze. Byla objevena při Palomarské fotografické přehlídce oblohy v roce 1950 Albertem Georgem Wilsonem. Nejzářivější hvězda nahoře uprostřed je Regulus. Zdroj: Chris Cook, APOD.*

**Galaxie** – kompaktní seskupení hvězd, hvězdných asociací, otevřených a kulových hvězdokup, mezihvězdné látky a temné hmoty. Galaxie se liší svou strukturou (spirální, eliptické, nepravidelné...), vyzařováním výkonem (neaktivní, aktivní, rádiové, Seyfertovy...) a zejména svojí hmotností. Hmotnost je udávána v miliardách až stovkách miliard hmotností Slunce. Galaxie jsou obvykle součástmi vyšších celků, jako jsou kupy, nadkupy, vlákna a stěny.



Poloha trpasličí galaxie Sgr dSph (Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy) v souhvězdí Štřelce, kde byla náhodně objevena v roce 1994. Její tvar je vykreslen podle záznamu přebytku intenzity červených obrů, kteří nepatří do galaktického disku. Její součástí jsou kulové hvězdokupy Arp 2, Ter 7 a Ter 8 a M54. Zdroj: MNRAS.

**Místní skupina galaxií** – gravitačně vázaná soustava tří velkých spirálních galaxií: galaxie v Trojúhelníku M33, Velké galaxie v Andromedě M31 a naší Galaxie – Mléčné dráhy. Místní skupina zaujímá v prostoru oblast o průměru 10 milionů světelných roků. Krom zmíněných velkých galaxií je členy Místní skupiny také osm desítek trpasličích galaxií tvořících satelity velkých spirál.

## Nová měření hmotnosti

Skupina astronomky Ekty Patel z Arizonské univerzity v Tucsonu pomocí jednoho z nejkomplikovanějších kosmologických matematických modelů současnosti, simulace Illustris, vypočítala hmotnosti jak Mléčné dráhy, tak i galaxie v Andromedě a ještě několika jiných velkých členů Místní skupiny. Vědci přitom využili nejnovějších velmi přesných astrometrických výsledků z Hubbleova dalekohledu a z vesmírné observatoře Gaia. Následně vyvinuli statistickou metodu, díky níž lze z mnoha desítek tisíc možností určit hmotnostní a dynamické parametry, které nej-

lépe odpovídají pozorování. Matematickým základem je tzv. *virialový teorém*, který dává do souvislosti množství pohybu v soustavě mnoha jedinců s potenciální energií jejich vazby. První variantu teorému použil Rudolf Clausius v termodynamice už v roce 1870. Přístroje HST a Gaia dnes dosahují přesnosti při měření vlastních pohybů satelitních galaxií, kulových hvězdokup, hvězdných proudů v hodnotách tisícín úhlových vteřin za rok. V roce 2017 se tímto způsobem podařilo určit hmotnost Mléčné dráhy jako 1,02 bilionu ( $10^{12}$ ) Sluncí a hmotnost galaxie M31 v Andromedě stanovit na 1,37 bilionu Sluncí. Hodnoty byly získány měřením parametrů pohybu Velkého Magellanova oblaku (LMC) a galaxie v Trojúhelníku M33. Současně se podařilo využít měření matérie roztroušené po oběžné dráze Trpasličí eliptické galaxie v souhvězdí Štřelce s označením Sgr dSph (*Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy*) a výsledkem simulace pak byla hmotnost Mléčné dráhy bilion Sluncí.

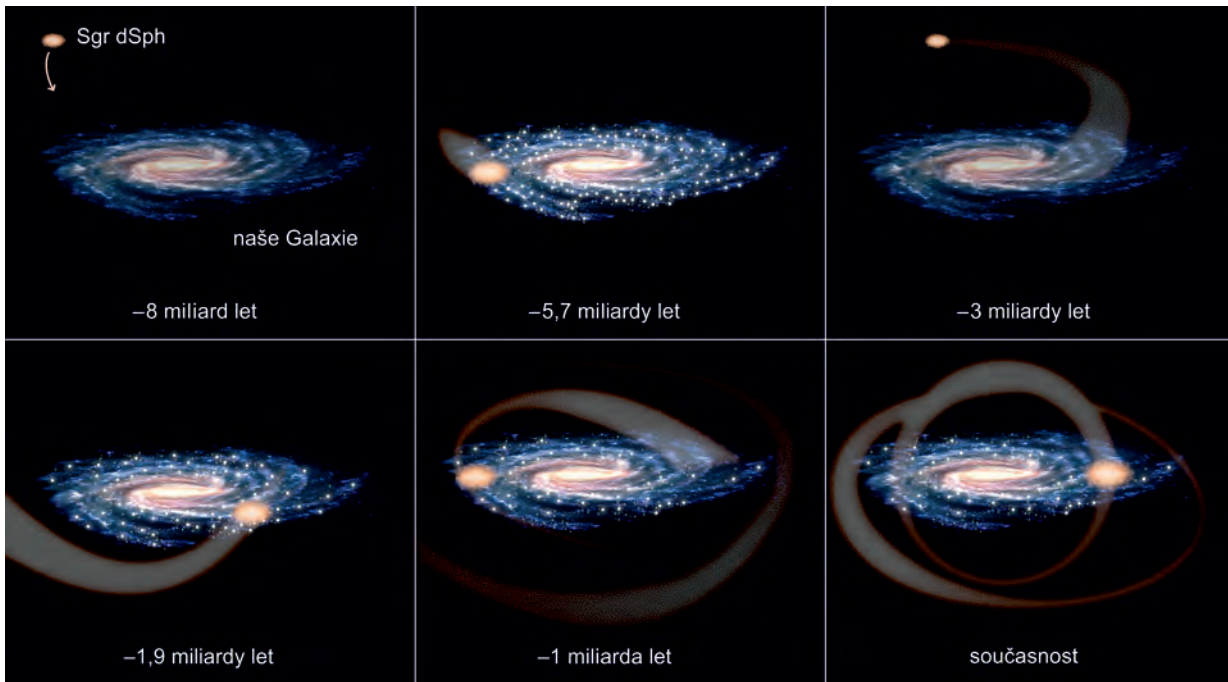
V březnu 2018 publikovala skupina Ekty Patel nové výsledky, které do simulace zahrnuly dynamické parametry dalších devíti satelitních trpasličích galaxií Mléčné dráhy s cílem dopočítat přesněji její hmotnost. Simulacemi bylo zjištěno, že satelity s vysokou hustotou momentu hybnosti vymezují horní hranici hmotnosti mateřské galaxie,



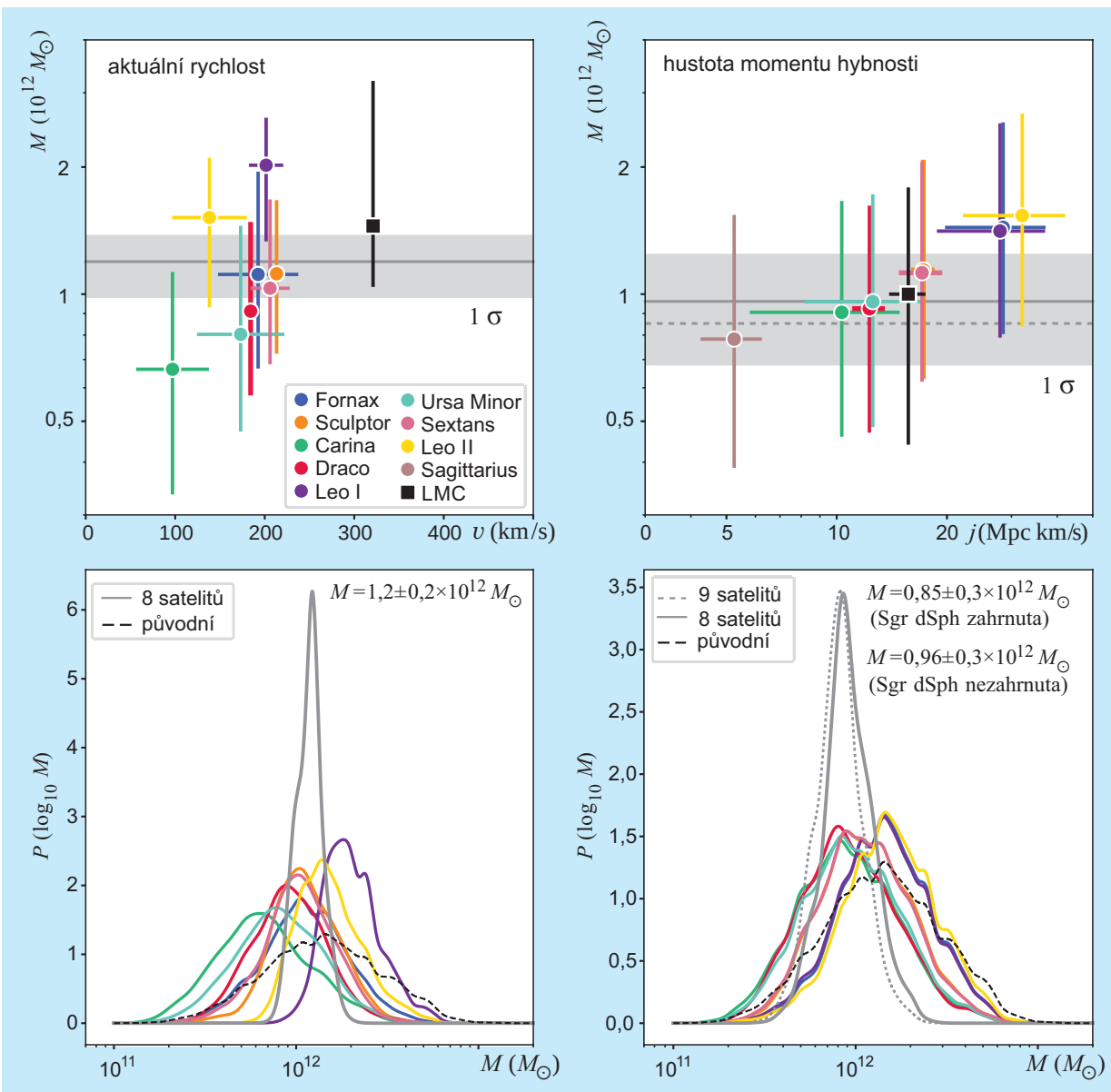
kolem níž obíhají, a naopak podle satelitů s malou hustotou momentu hybnosti lze dopočítat spodní hranici její hmotnosti. Do simulace byla zahrnuta data trpasličích galaxií LMC, Leo II, Fornax, Leo I, Sculptor, Sextans, Ursa Minor, Draco, Carina a Sagittarius dSph. Vlastní pohyby jsou s dostatečnou přesností dnes určeny jen u několika satelitů Mléčné dráhy, pro zbývající trpaslíky nejsou data použitelná k takovému výpočtu dosud k dispozici. Trpasličí galaxie Sagittarius dSph má ve srovnání s ostatními trpaslíky velmi nízkou hustotu momentu hybnosti a současně se od zbývajících satelitů dost liší i v jiných charakteristikách. Není jasné, jak s tímto parametrem naložit, a proto byla hmotnost Mléčné dráhy určována jak se zahrnutím satelitu Sgr dSph, tak i bez něj. Mléčná dráha by podle těchto nových výsledků měla mít hmotnost v intervalu mezi 0,85 a 0,96 bilionů Sluncí. Jde o poměrně výrazné zpřesnění jedné ze základních charakteristik našeho hvězdného ostrova. Shrnutí pravděpodobnostního výpočtu hmotnosti Mléčné dráhy při započtení charakteristik devíti trpasličích galaxií a LMC je na grafu

**Slapová síla** – rozdíl gravitačních sil působících na různé části tělesa. Například Země působí na naše nohy větší gravitační silou než na hlavu, rozdíl je ale zanedbatelný. Slapové síly Měsíce působí na Zemi jsou příčinou přílivu a odlivu a také příčinou výměny momentu hybnosti mezi Měsícem a Zemí, která vede k postupnému vzdalování Měsíce. Obdobná slapová vazba existuje mezi Zemí a Sluncem. Ve větších měřítkách působí slapové síly například při prolínání dvou galaxií.

Trpasličí galaxie Sgr dSph zanechává na své pouti kolem Galaxie dohledatelné stopy mezihvězdné látky. Bylo odhadnuto, že při každých 2 až 4 obletech kolem Galaxie Sgr dSph takto ztratí zhruba polovinu své hmotnosti. Opakované srážky s Galaxií jsou zdrojem překotné tvorby hvězd. Zdroj: ESA, Nature Astronomy.





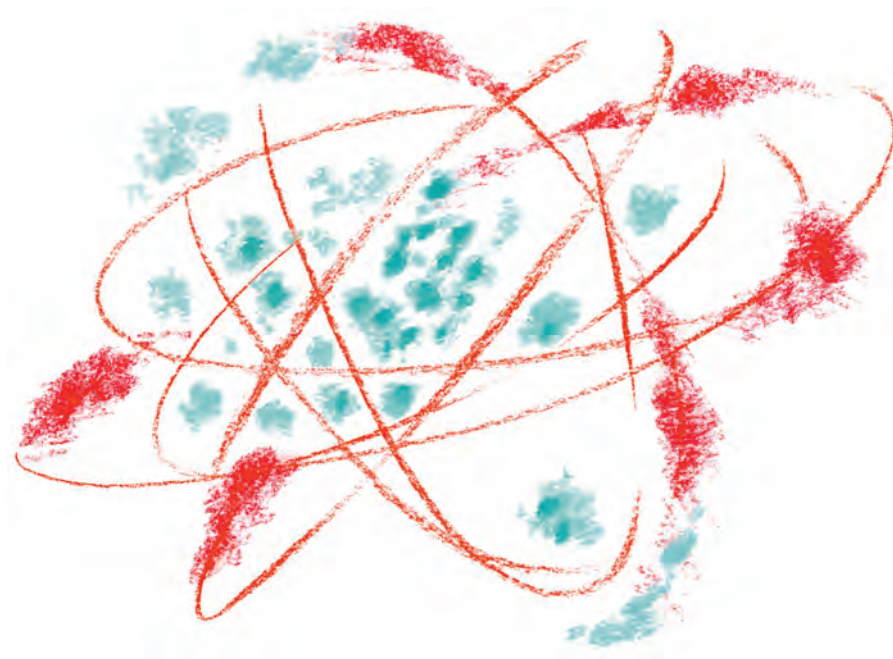


(*Astrophysical Journal*) na protistraně. Vlevo nahoře jsou výsledky při započtení aktuálních poloh a rychlostí, vpravo totéž pro moment hybnosti. Výpočet pomocí momentu hybnosti vykazuje mnohem nižší rozptýl výsledných hodnot. Spodní dva grafy ukazují pravděpodobnou hodnotu hmotnosti Mléčné dráhy získanou z každého trpasličího satelitu (barevně) a jejich výslednou kombinaci šedou barvou.

Díky očekávaným výsledkům projektu Gaia v nadcházejících letech bude možné do výpočtu i charakteristiky dalších objektů pohybujících se v okolí Mléčné dráhy. Nejspíše se tak dozvíme mnohem přesněji, kam až sahá Mléčná dráha a jak je velká.

**Gaia** – sonda Evropské kosmické agentury mající za úkol zpřesnit polohu zhruba miliardy hvězd naší Galaxie. Byla vypuštěna 19. 12. 2013 z kosmodromu v Kourou ve Francouzské Guyaně. Měření provádí v libračním bodě L2 soustavy Slunce-Země. Životnost sondy by měla končit v roce 2025, je ale pravděpodobné, že mise bude prodloužena. V průběhu prvních pěti let mise proměří Gaia každou ze sledovaných hvězd 70×. Kromě rutinního mapování také Gaia detekuje velké množství nových exoplanet.

■ Ivan Havlíček, 21. 9. 2018, AB 33/2018

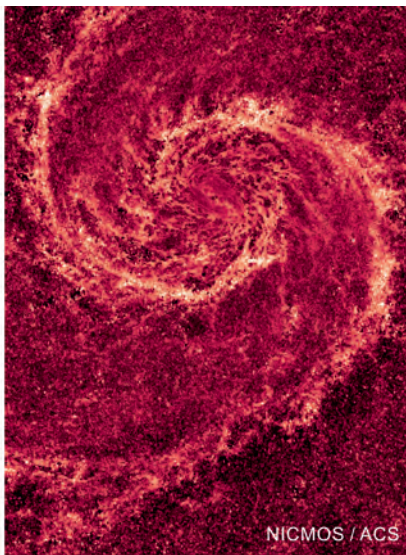


## Jemná struktura ve Střelci

**Sklon ramene** – anglicky *pitch angle*, je úhel tečný k rameni vzhledem ke kolmici k radiále vycházející z jádra galaxie, měřený v rovině galaktického disku. Určuje rozvřenost ramen.

**Hubblovo hluboké pole** – Hubble Ultra Deep Field, HUDF, snímek 11,5 čtverečných úhlových minut v souhvězdí Pece pořízený Hubblovým dalekohledem mezi 24. 9. 2003 a 16. 1. 2004, na němž je zachyceno zhruba 10 000 galaxií v nejrůznějších vývojových stádiích.

Spirální galaxie Messier 51 v Honicích psech. Ve viditelném světle (nalevo) bílé září hvězdy v ramenech, v růžových oblastech se rodí hvězdy a modré skvrny prozrazují mladé hvězdokupy galaktické roviny. V infračerveném oboru (napravo) se naopak světlými oblastmi projevují prachové páteřní struktury spirál – oblast je tím světlejší, čím je v ní prach koncentrovanější. V jádru galaxie zřetelně převažují hvězdy a prachových oblastí je zde zanedbatelné. Zdroj: HST/ACS/NICMOS, 2005.



Velké spirální galaxie jsou si nápadně podobné. Obvykle mívají dvě výrazná ramena vycházející z centrální oblasti, která jsou nápadná ve viditelném oboru – jsou plná hvězd. Takto znají astronomové spirální galaxie od dob, kdy je uviděli poprvé a kdy jim ještě říkali spirální mlhoviny. Naopak prostor mezi hvězdnými rameny našim očím nesvítí. Je však zřetelný na delších vlnových délkách, nachází se zde mezi-hvězdná látka, kterou prozradí infračervené nebo rádiové záření. Pečlivým pozorováním se postupně podařilo i ve strukturách hvězdných ramen a jejich mezilehlých oblastech nalézt určité pravidelné útvary. Astronomové se proto pokoušejí už od sedmdesátých let minulého století vysvětlit, co se při utváření spirální struktury odehrává, jak se nejen vizuální tvar ramen, ale i jejich další vlastnosti v čase proměňují a jak je možné, že velké spirály v blízkém okolí jsou si tak podobné.

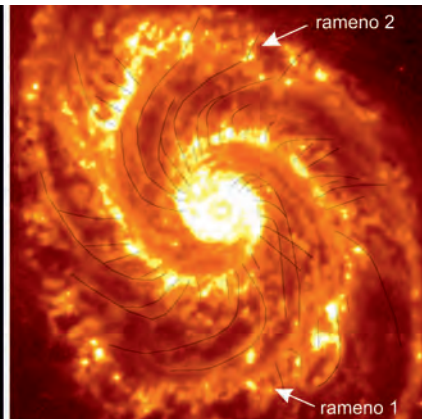
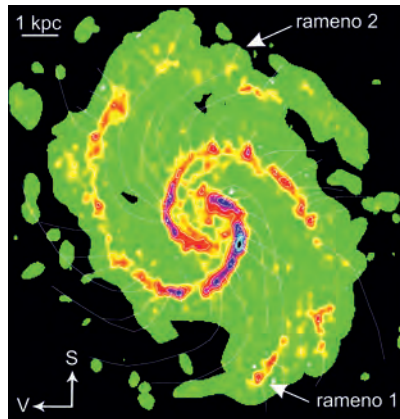
### Původ spirálních struktur – pohledy do minulosti

Pátrání po původu spirálních tvarů galaxií probíhá od doby, kdy si astronomové uvědomili, že jde o typický znak velkých hvězdných soustav. Ve druhé polovině minulého století při vysvětlování vývoje galaxií výrazně pomohly velké přehlídkové projekty a v posledních několika desetiletích také počítačové simulace. Vznik spirálních struktur v galaxiích pozorujeme v intervalu určeném hodnotou červeného kosmologického posuvu 1,8 až 1,4, což odpovídá období před 10,2 až 9,3 miliardami roků. V mladých galaxiích začíná po nějaké době převládat rotace nad turbulentními pohyby plynu, v disku se vyvíjí chladná hvězdná složka, postupně mizí obrovité hmotné shluky a rozložení látky se stává rovnoměrnější. Při přechodu od chomáčovitých struktur ke spirálním galaxiím byly v Hubblově hlubokém poli také

nalezeny dva poměrně vzácné typy galaxií. Jde jednak o „chundelaté“ struktury, často i nepravidelné, a to v šíři celého disku, které jsou výrazně jasnější než galaxie ve stejné vzdálenosti. V HUDF se nacházejí i spirály podobné spíše svým vývojovým následovníkům. Oholené spirály mají mnohočetná nepravidelná ramena s uzlíky hvězdných formací, výrazně od sebe vzdálená. Jejich tvar není tak pravidelný, jako mají dnešní spirály.

Pro potřeby klasifikace tvaru spirálních ramen byl zaveden pojem sklon. Sklon se může měnit v závislosti na vzdálenosti od jádra a zjednodušeně je jím charakterizována těsnost, či sevřenost sousedících spirálních ramen. Galaxie s nízkým sklonem mají ramena sevřenější a jejich struktura tak tvoří kompaktnější disk, naopak při velkém sklonu mají ramena mezi sebou mnohem více „prázdného“ prostoru a jde o rozvolněnější strukturu připomínající třeba volné lopatky větrného mlýna. V galaxiích s nízkým sklonem, tedy se sevřenějšími rameny, převažují staré, červené hvězdy. Naproti tomu galaxie s převažujícími modrými, tedy mladými hvězdami, mají sklon poměrně vysoký, jsou rozevlátější a jejich ramena jsou od sebe vzdálenější. Výše zmíněné oholené spirály mají také vysoký sklon spirálních ramen.

Běžné typy spirálních galaxií, jaké známe z našeho blízkého okolí, se objevují před zhruba osmi miliardami roků, tedy při červeném posuvu  $z \sim 1$ . Tyto mají většinou dvě symetrická, výrazná ramena. Soustavy s vícero rameny jsou v centrální části přísně symetrické, vně pak vybíhá méně tenkých ramen. Také se objevují „vločkovité“ struktury s krátkými nepravidelnými a flekatými rameny tvořenými téměř výhradně hvězdnými formacemi. Normální galaxie s mnoha rameny se neobjevují v poli HUDF dříve než před šesti miliardami roků ( $z \sim 0,6$ ), naopak velké spirály se dvěma výraznými rameny lze vysledovat už před deseti miliardami roků ( $z \sim 1,8$ ). Důvodem jsou pravděpodobně interakce v rotujícím disku, které vedou častěji na strukturu dvou symetrických ramen a nepravidelnosti postupně odstraňují.



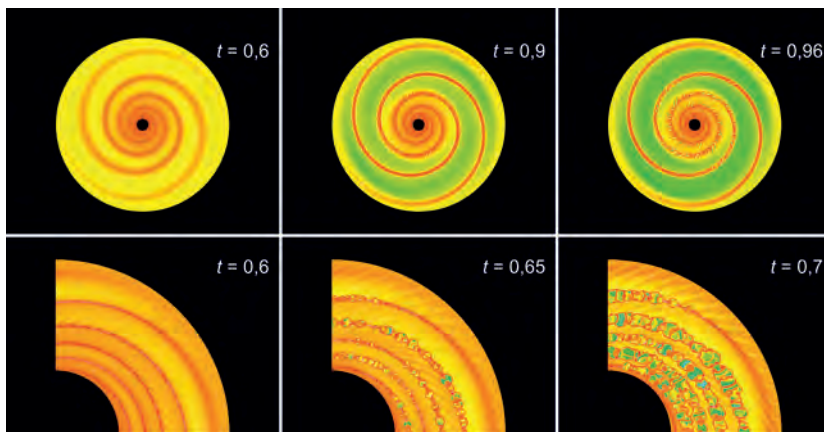
Dva pohledy na galaxii NGC 5194 s liniemi vyznačujícími vějířovité struktury výběžků z hlavních spirálních ramen. Vlevo je snímek ze Spitzerova dalekohledu na  $8 \mu\text{m}$ , snímek vpravo byl pořízen při přehlídce 44 blízkých spirálních galaxií BIMA SONG (Berkeley-Illinois-Maryland Array Survey of Nearby Galaxies) na vlnové délce 3 mm molekulární emise CO J=1-0. Zdroj: M. La Vigne, University of Maryland.

**Kosmologický posuv** – posuv spektrálních čar k červenému konci spektra způsobený rozpínáním vesmíru. Při rozpínání dochází nejen ke vzájemnému vzdalování galaxií, ale i k prodloužení vlnových délek záření. Spektrum vzdálených objektů ve vesmíru se tak jeví posunuté směrem k červené až infračervené oblasti. Kosmologický červený posuv je definován předpisem  $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ , kde  $\lambda_0$  je vlnová délka spektrální čáry v okamžiku vyslání paprsku,  $\lambda$  je vlnová délka téže spektrální čáry v okamžiku zachycení paprsku. Malé kosmologické červené posuvy lze interpretovat pomocí Dopplerova jevu. U velkých posuvů závisí vzdálenost objektu na parametrech expanze vesmíru (Hubblevě konstantě, křivosti, procentuálním zastoupení temné energie atd.) a není jednoduché z naměřeného kosmologického posuvu vzdálenost přesně určit.



**Plazma** – kvazineutrální soubor nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Lidsky to znamená, že se v dané látce nachází elektricky nabitě částice. Kladné a záporné náboje se navzájem kompenzují, takže celek je elektricky neutrální. Částice jsou schopné reagovat na elektrická a magnetická pole jako celek. Plazma vzniká odtržením elektronů z elektrického obalu atomárního plynu nebo ionizací molekul. S plazmatem se můžeme setkat v elektrických výbojích (blesky, jiskry, zářivky), v polárních zářích, ve hvězdách, ve slunečním větru, v mlhovinách, v galaxiích i v mezigalaktickém prostoru. Pro plazma jsou typické silné nelineární jevy a nestability. Přes 99 % atomární látky ve vesmíru je v plazmatickém skupenství.

Numerická simulace růstu výběžků mezi hlavními spirálními rameny. Kolaps a následná fragmentace difúzního plynu vytváří hustější izolované oblasti, v nichž dochází následně ke vzniku nových hvězd. Do hvězd se promění jen cca 5 % plynu, zbytek množství je rozptýleno jejich světlem do okolí a celý tento cyklus se mnohokrát opakuje. Zdroj: R. Shetty, E. Ostriker, University of Maryland.

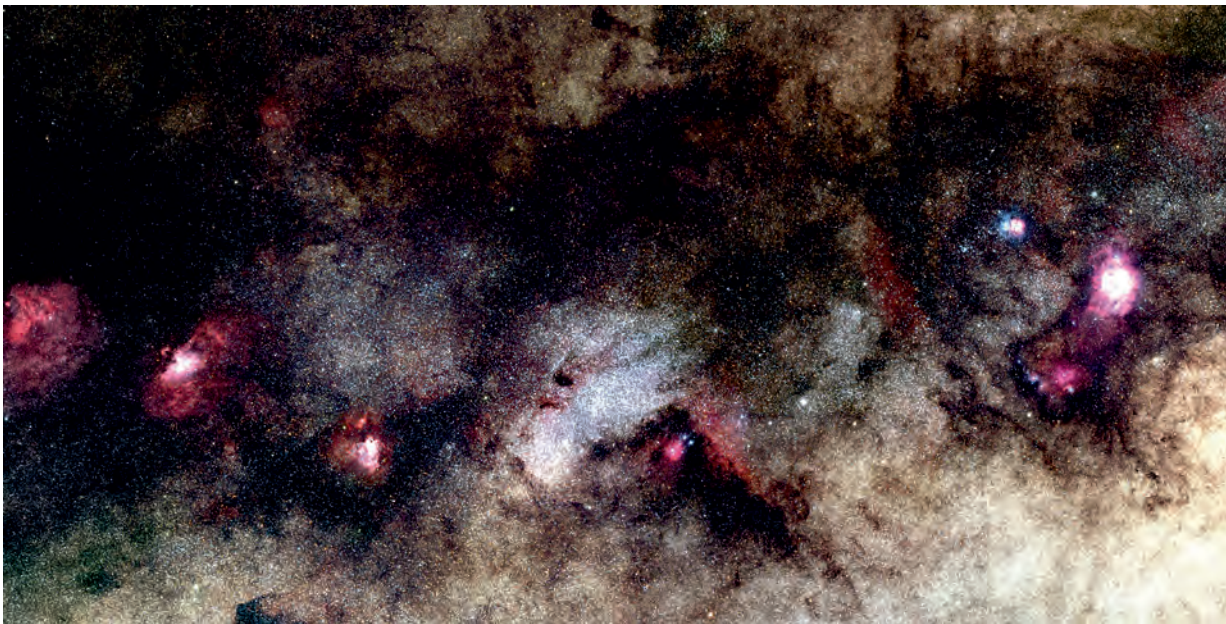


## Detailní struktury mezi rameny

V průběhu osmdesátých let 20. století se podařilo nalézt souvislosti mezi rotačními křivkami spirálních galaxií a strukturami, které se mezi hvězdnými rameny objevují. Spirální ramena jsou tvořena hvězdami a mezihvězdnou látkou, které se vzájemně gravitačně ovlivňují, jde tedy o nesouvislé prostředí, v němž se jednotlivé komponenty pohybují rozdílnými rychlostmi. Hustší oblasti ovlivňují své okolí intenzivněji než oblasti s nižší koncentrací, a to nejen gravitačně, ale i magneticky. Součástí galaktické látky je nezanedbatelné množství plazmatu, které je ovlivňováno lokálními magnetickými poli a současně také svými dynamickými projevy změny magnetického pole generuje. V globálním měřítku je výsledkem diferenciální rotace galaktického disku a pozorovaná spirální ramena jsou tvořena hustotními vlnami galaktické látky. Tvar hustotních vln rozvíjejících se z centra pak závisí na charakteru látky a změnách rychlosti rotace v závislosti na vzdálenosti od centra. Mezi jednotlivými hlavními hustými rameny jsou často pozorovány zřetelné vějířovitě vystupující výběžky (anglicky *spurs*), jejichž velikost a orientace by měla souviset s dynamikou celé soustavy. Délka výběžků, jejich četnost a úhel odklonění od ramene tvořeného nejhustší látkou jsou klíčové parametry, které lze určit a studovat. Stupeň vývoje spirální galaxie lze pak charakterizovat také například prostřednictvím rozvinutí těchto detailních struktur.

Prostřednictvím magnetohydrodynamických simulací plazmatu, při zahrnutí gravitačních vlivů plynu, se podařilo prokázat, že kombinace gravitace a magnetického pole

v galaktickém disku má za následek rychlý nárůst hustoty ve spirálních ramenech. Následně se při diferenciální rotaci v uvolňujícím se prostoru mezi zhušťujícími se rameny začnou vytvářet vějířovitě se rozpadající vláknité struktury. Podobné struktury jsou u mnoha spirálních galaxií také skutečně pozorovány, a to jak ve viditelném, tak i v infračerveném oboru. V případě, že v disku jsou takové podmínky, že se udrží jako celek stabilní,



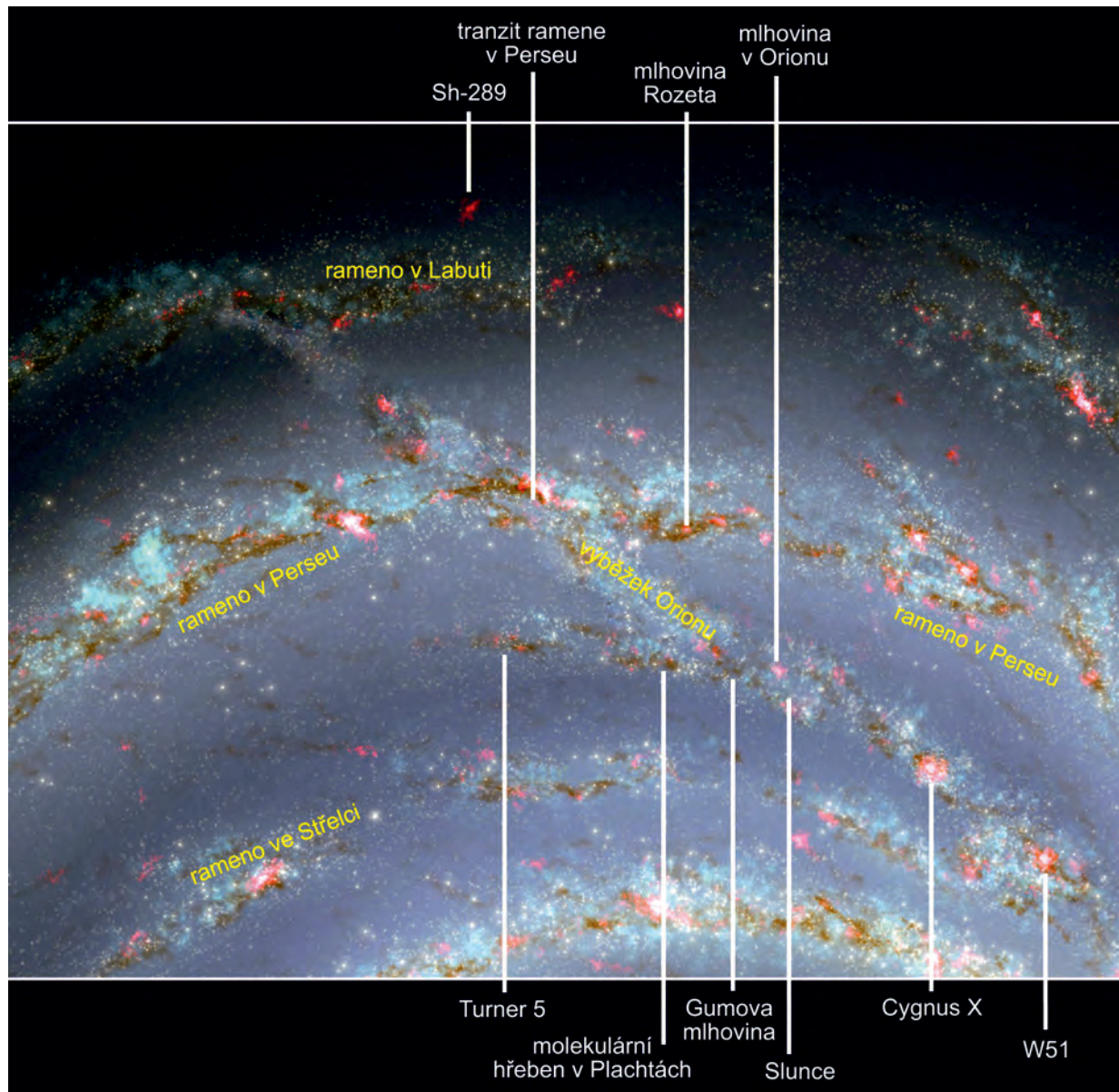
má diferenciální rotace a vlastní gravitace plynu za následek vytvoření vláknitých struktur oddělených od sebe v měřítku kiloparseků bez ohledu na přítomnost či vliv hvězdné složky. Růst vláken a výběžků v prostoru mezi hlavními rameny závisí na mnoha faktorech, nicméně se zdá být pravidlem, že hmotnější a hustší výběžky se vytvářejí spíše v centrální oblasti a rozpad látky do tenkých vláken probíhá naopak v okrajových částech spirální struktury. Orientace výběžků závisí také na vzdálenosti od jádra, tedy na poloze v galaxii. V případě modelování téhož děje bez zahrnutí gravitace plynu se podařilo prokázat, že k potlačení hydrodynamických nestabilit a k růstu výběžků mezi rameny dostačuje magnetické pole samotné. Gravitace, které se dříve připisoval hlavní vliv při růstu a vývoji spirálních struktur, hraje poměrně podružnou úlohu a klíčovou příčinou se zdá být magnetické pole.

V posledních dvou desetiletích se v různých oblastech astrofyziky ukazuje, že magnetické pole má na vesmírné struktury velký vliv. Obecně platí, že většina lineárních útvarů je formována magnetickými poli, zatímco kulové struktury jsou formovány gravitací. Je to dáno odlišnými vlastnostmi elektromagnetické a gravitační interakce.

*Téměř přesně na opačné straně, než na obloze leží Orion, jsou jedny z nejkrásnějších mlhovin a hvězdokup v souhvězdí Střelce a v jeho okolí. Na tomto snímku jsou nejjasnějšími objekty zleva (od severovýchodu) Orlí mlhovina M16, mlhovina Omega – Labuť M17, mlhovina Trifid M20 a mlhovina Laguna M8. Všechny tyto oblasti jsou známy jako hvězdné porodnice, v nichž dochází k tvorbě nových hvězd. Foto: Jason Jennings.*

**Magnetohydrodynamika** – teoretický popis plazmatu jakožto nabitě vodivé tekutiny. Tento popis poprvé zavedl v roce 1942 Hannes Alfvén a získal za něj Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1970. Z magnetohydrodynamiky přirozeně vyplývá možnost magnetického pole vmrznutého do plazmatu. Magnetohydrodynamika skvěle popisuje vznik a šíření nejrůznějších vln v plazmatu, vznik nestabilit a celou řadu nelineárních jevů.



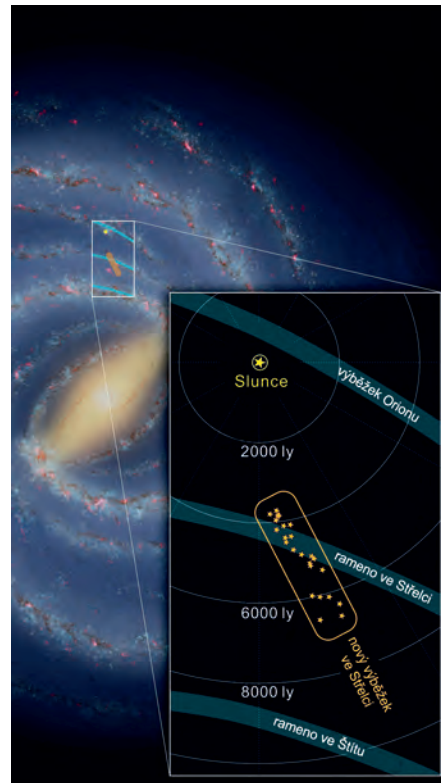


## Místo Sluneční soustavy v Mléčné dráze

V naší Galaxii je situace nejspíš obdobná jako v cizích galaxiích. Problém je, že na Mléčnou dráhu nahlížíme zevnitř a podobné struktury mezi spirálními rameny lze objevit jen velmi obtížně. Na Mléčnou dráhu se neumíme podívat „zvenku“, a proto jsme omezeni na prostorové mapování, při němž je podmínkou určování přesných vzdáleností a vzájemných rychlostí, aby mohl být výsledkem prostorový model odpovídající skutečnosti. Sluneční soustava se nachází ve výběžku mezi ramenem ve Střelci a ramenem v Perseovi. Jde o oblast s vyšší koncentrací galaktické látky směřující do souhvězdí Orionu, která obě tato spirální ramena propojuje. Z našeho pozorovacího stanoviště směřuje větší část tohoto výběžku směrem vně od galaktického jádra. Díky moderním astrometrickým observatořím, jako například Gaia, lze ale dřívejší prostorové mapy stále upřesňovat.

Od Sluneční soustavy směrem k jádru Galaxie se nejbližší nachází rameno ve Střelci, jehož sklon je v tomto místě  $12^\circ$ . Na základě dat z katalogu SPICY (*SPItzer/IRAC Candidate Young stellar objects*) a astrometrických údajů z katalogu Gaia EDR3 byly vytvořeny prostorové mapy, z nichž je zřetelné rozložení těchto mladých hvězdných soustav v nejbližším galaktickém okolí, tedy vlastně „tvar“ nejbližších struktur spirálních ramen. K vytvoření prostorové mapy bylo nutno zahrnout také vzájemné rychlosti jednotlivých soustav a prostorově související molekulová oblaka zmapovaná v rádiovém oboru. Tímto způsobem se podařilo objevit protáhlý útvar sestávající z nejméně 25 hvězdných formací v intervalu galaktické délky  $4,0^\circ$  až  $18,5^\circ$ , jehož sklon je  $56^\circ$  a poměr délky vůči průměru je zhruba 7:1. Tato obří struktura zahrnuje již výše zmíněné Messierovy objekty M8, M16, M17 a M20. Pohyb celého útvaru je znatelně rovnoměrný ve směru rotace Galaxie s rychlostí 240 km/s (nepatrně více než je v tomto místě obvyklé). Pozorovaný sklon  $56^\circ$  je evidentně velmi vysoký a jde nejspíše o samostatný výběžek ze spirálního ramene ve Střelci směrem do centrální části Galaxie. Jelikož je observatoř Gaia schopná mapovat s obdobnou přesností veškeré objekty v kouli o poloměru zhruba do vzdálenosti galaktického jádra, je možné, že obdobných útvarů bude objeveno ještě mnohem více.

■ Ivan Havlíček, 3. 9. 2021, AB 31/2021



Nově objevený výběžek galaktické látky sestávající z mladých hvězdných formací a mlhovin, který vybíhá směrem od Sluneční soustavy do vnitřní části Mléčné dráhy se sklonem  $56^\circ$ . Zdroj: NASA.

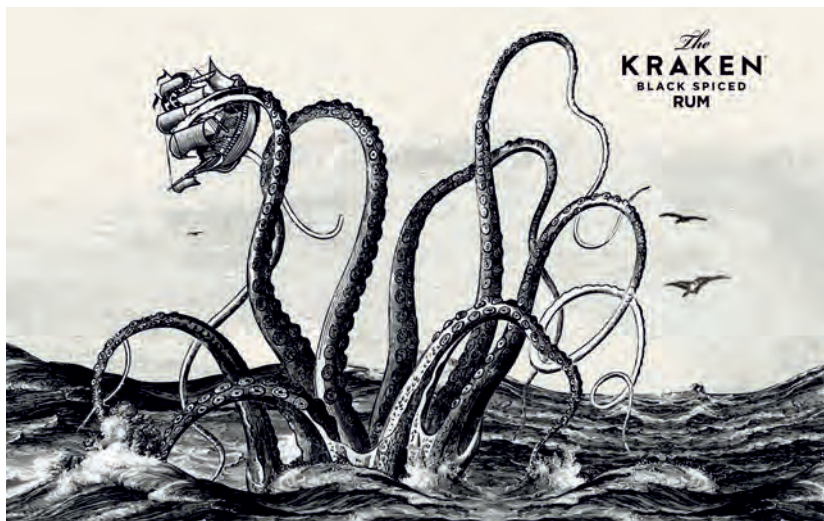


## Jak si Kraken se Sequoiou udělali kulové hvězdokupy

**Metalicita** – poměr zastoupení všech těžších prvků vůči vodíku vztažený k téměř poměru ve Slunci v logaritmické škále. Metalicita Slunce je tedy z definice rovna nule. Hvězdy, které mají těžších prvků desetkrát více než Slunce, mají metalicitu 1, naopak desetkrát menší množství nevodíkových prvků indikuje hodnotu  $-1$  atd. Analogicky metalicita vyšší než u Slunce bude označena kladnou hodnotou, záporných hodnot dosahují hvězdy s metalicitou nižší.

*Kraken, mořská příšera vynořující se z hlubin fantazie a dávno zapomenutých příběhů. Bylo setkání s galaktickým Krakenem podobně obudnou událostí v dávné minulosti Mléčné dráhy? Zdroj: Krakenbyte.*

Zhruba sto roků víme, že galaxie jsou osamocené obří hvězdné ostrovy plující ve vesmírné prázdnotě. Postupně jsme galaxie roztříbili podle tvaru a podle velikosti a podařilo se také určit, že některé jsou mnohem starší než jiné. Obecně čím větší a symetričtější útvar, tím je v porovnání se sousedy ve svém okolí také starší. Mnoho galaxií pozorujeme při vzájemném splývání, prolínání a proměnách, které ale vzhledem k jejich velikosti probíhají velmi dlouhou dobu. Řádově se dynamické procesy, které v měřítku celých galaxií pozorujeme, odehrávají v miliardách roků. Galaxie se vyskytují ve velkých skupinách, které jsou vzájemně gravitačně spjaty a jejichž členové se ovlivňují navzájem. V těchto galaktických kupách nacházíme ty největší soustavy obvykle poblíž jádra, tedy těžiště kupy, a drobnější skupiny, kterých bývá mnohem více, tančí kdesi na periferii. Vývoj galaktické kupy lze zjednodušeně očekávat jako postupnou redukci jednotlivých členů díky jejich splývání v centrální oblasti a stabilizaci mezigalaktického prostředí. Následkem tohoto galaktického kanibalismu je růst několika velkých eliptických členů poblíž těžiště kupy a stabilizace menších, trpasličích členů na periferních oběžných drahách. Galaktické kupy je pak možno třídit podle výše popsané struktury. Ty mladé mají většinu členů srovnatelně velkých a převažují v nich typy, které dosud nebyly příliš ovlivněny vzájemným splýváním a prolínáním, tedy galaxie spirální a nepravidelné. Naopak v galaktických kupách, jejichž galaxie již absolvovaly mnoho srážek a prolínání, převažují galaxie eliptické, ty největší jsou nakupeny v centrální oblasti. V takových kupách jsou nepravidelné a spirální galaxie v menšině a vyskytují se převážně na periferii soustavy.

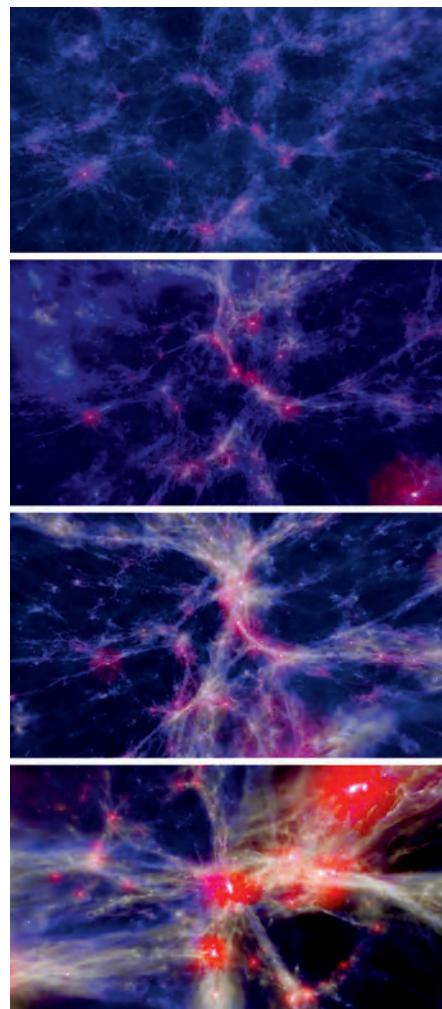


Mladé soustavy mívají obvykle mnohem méně členů než kupy s mnohem delší historií. Vysvětlení se nabízí v čase, ve kterém kupa postupně narůstala a přibírala ze svého okolí nové hvězdné ostrovy. Tento děj lze také chápat jako období, kdy zvětšující se kupa vysávala okolní látku z dříve homogenního prostředí plného drobných mladých galaxií. Bylo by ale možné podobný scénář vysledovat také u jednotlivých hvězdných ostrovů, při růstu samotných galaxií?

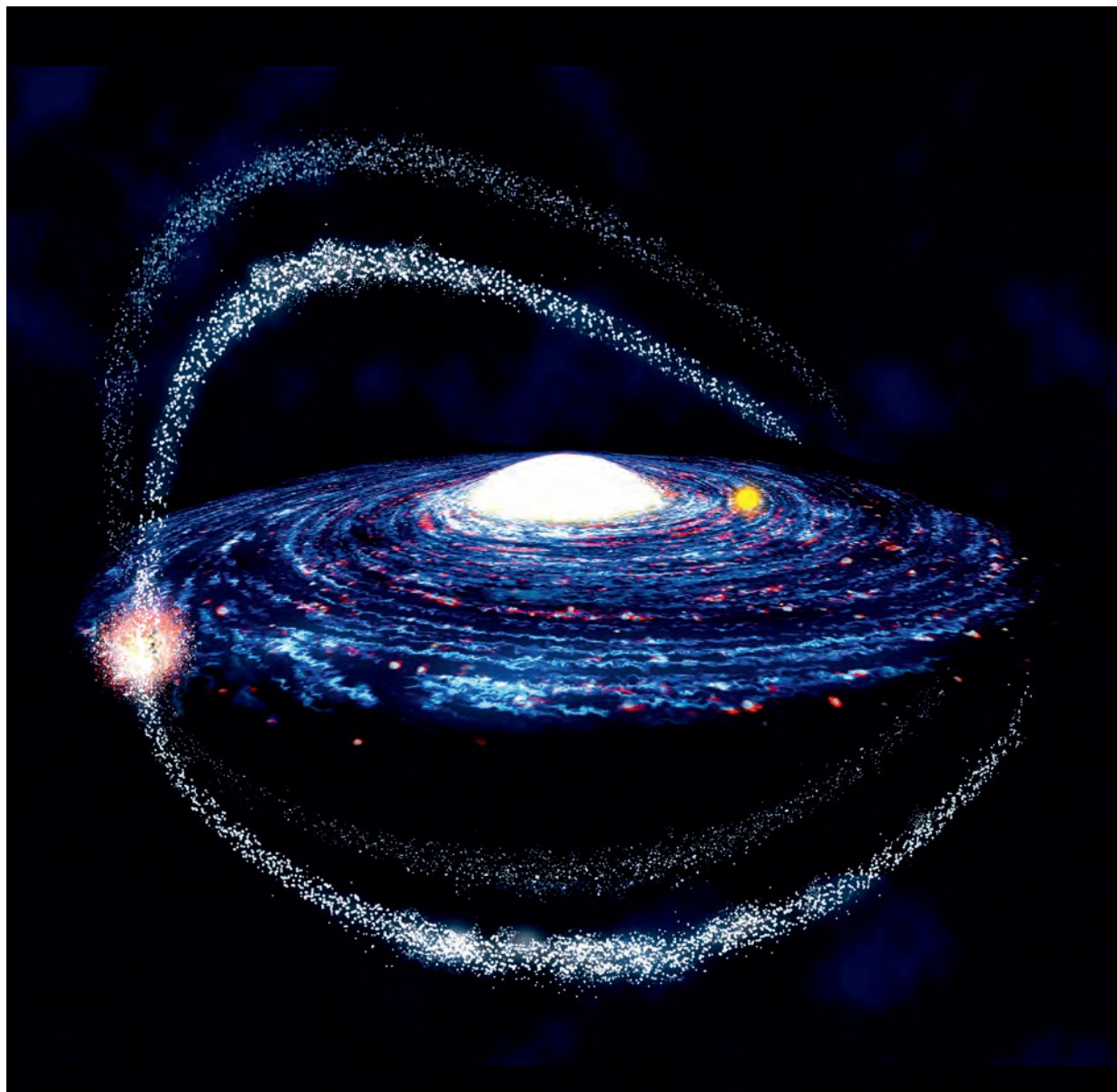
## Hvězdy a struktura Mléčné dráhy

Hvězdy jsou složeny převážně z vodíku a helia. Velmi malé množství jejich hmotnosti ale mohou tvořit i další prvky. V průběhu dvacátého století byl tento jev vysvětlen vývojem mezihvězdné látky v měřítku historie pozorovatelného vesmíru. Hvězdy se, obdobně jako všechny vesmírné struktury, v čase vyvíjejí, vzniknou, nějakou dobu svítí, a pak zaniknou. Původ chemického složení hvězd se podařilo najít v mezihvězdné látce, z níž hvězdy vznikají. V mladém vesmíru, kdy převážná část látky byla utvořena při jeho vzniku, rostly hvězdy jen z vodíku a helia, protože žádné jiné prvky k dispozici nebyly. Prvopočáteční látka využitelná při tvorbě prvních hvězd obsahovala  $\frac{3}{4}$  vodíku a  $\frac{1}{4}$  helia. Složitější atomy, jako třeba uhlík, dusík, kyslík a další, vznikaly až později při explozích těchto prvních hvězd, čímž obohacovaly mezihvězdnou látku, z níž pak vznikaly hvězdy pozdější. V neustálém koloběhu mezihvězdné látky v oblastech s vyšší koncentrací, a tedy i hojnější tvorbou a zánikem hvězd, s rostoucím časem poměr těžších prvků vůči vodíku a heliu vzrůstal. Nejde o nic dramatického, zastoupení těžších prvků se u převážné většiny hvězd pohybuje okolo procenta a spíše mnohem méně. Jelikož se ve hvězdách až do jejich zániku utvářejí prvky až po železo a železo se současně dá ve spektru poměrně slušně odhalit, ujal se pro chemickou charakteristiku hvězd pojem *metalicitu*. Užitečné na tom je, že změříme-li takto ze spektra hvězdy metalicitu, lze s poměrně stejnou mírou přesnosti určit, v jakých podmínkách vznikla a z jaké mezihvězdné látky pochází. Předpokládáme-li, že s vývojem mezihvězdné látky v ní rostlo zastoupení těžších prvků, lze tak odhadovat s přihlédnutím k místním podmínkám i poměrné stáří hvězd přímo z jejich chemického složení.

Prvotní rozdělení hvězd v Galaxii podle výše uvedených charakteristik provedl Jan Hendrik Oort v roce 1926, když ve spirálních ramenech našel spíše hvězdy modré s vyšší metalicitou a hvězdy oranžové



Simulace z projektu EAGLE (Evolution and Assembly of Galaxies and their Environments), jehož cílem je porozumět galaktickému vývoji. Z poměrně homogenního prostředí se nejprve utvářejí vlákna s vyšší koncentrací látky a v jejich uzlech vyrůstají zárodky hvězdných ostrovů. Počáteční parametry vycházejí z měření sondy Planck. Zdroj: EAGLE.



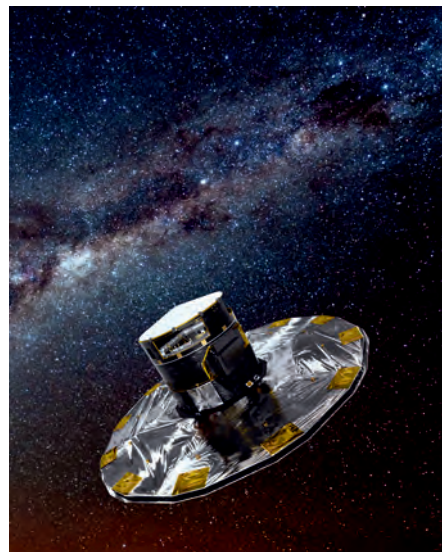


s nižší metalicitou objevoval poblíž galaktického jádra a v kulových hvězdokupách. Tuto klasifikaci upřesnil Walter Baade v roce 1944, když rozdělil hvězdy do dvou skupin: mladé hvězdy disku zařadil do Populace I (dnes zkráceně Pop I) a staré hvězdy kulových hvězdokup a galaktického jádra označil jako Populaci II. Později, v roce 1978, tuto klasifikaci doplnil Martin Rees ještě o kategorii Populace III, která by měla teoreticky zahrnovat úplně první hvězdy vznikající z látky vytvořené při vzniku vesmíru, po jejichž zániku se teprve mohly začít utvářet hvězdy Populace II. Interval od Pop III až k Pop I, ve kterém by se mělo odlišovat poměrné zastoupení prvků těžších než helium, by měl přesahovat nejméně sedm řádů.

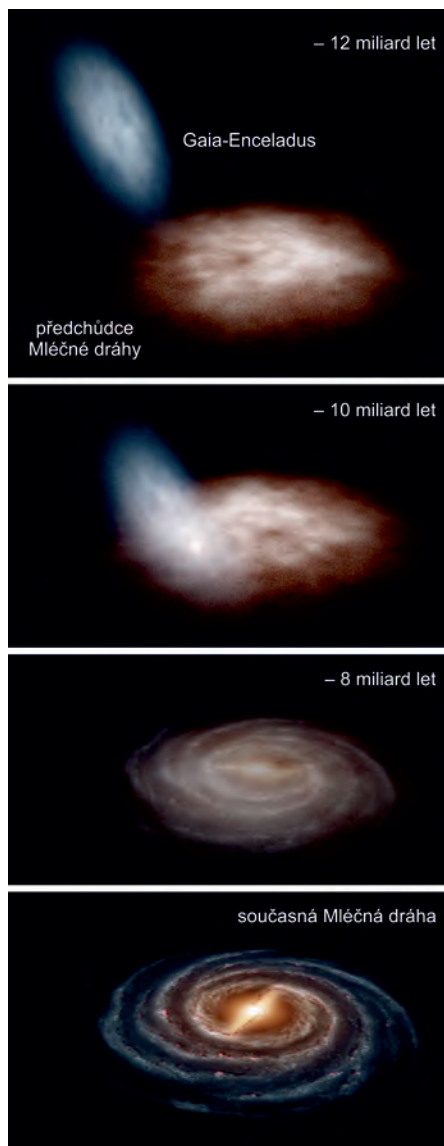
Chceme-li zmapovat utváření Galaxie – Mléčné dráhy, bude užitečné pokusit se vypátrat cokoli, co lze do takto hluboké minulosti zařadit. Ideální by mohly být hvězdy nebo hvězdné soustavy s velmi nízkou metalicitou, tedy hvězdy s nesrovnatelně nižším obsahem těžších prvků než mají běžné, mladé tuctovky galaktického disku v našem okolí. Odhadujeme, že Galaxie se mohla začít formovat někdy před dvanácti miliardami roků. Disk se utvářel v době mezi 11 až 8 miliardami roků. Dnešní Mléčná dráha má dvě výrazná spirální ramena plná hvězd a mezihvězdné látky, ve zbývajících ramenech převažuje galaktický plyn. Hvězdná spirální ramena vyrůstají z příčky vycházející z galaktického jádra. Jádro tvoří zhruba kulovou oblast a je zde nejvyšší koncentrace hvězd a mezihvězdné látky v Galaxii vůbec. Jádro je středem galaktického disku, nad nímž se na obě strany rozprostírá hvězdné a plynné haló. V galaktickém haló se nacházejí kulové hvězdokupy, některé trpasličí satelitní galaxie a byly zde také objeveny výrazné hvězdné proudy, které s pohybem těchto drobných hvězdných soustav okolo jádra snad i souvisejí. Hmotnost Galaxie včetně haló je dnes  $9 \times 10^{11}$  hmotností Slunce. V průběhu posledních zhruba dvaceti roků se podařilo rozpoznat některé události, o nichž věříme, že mohly mít při formování Galaxie výrazný vliv. Jde o velmi náročný výzkum, který byl možný až teprve prostřednictvím analýzy obrovského množství astrometrických dat obsáhlých katalogů Gaia DR2, Pan-STARRS1 DR1, GALEX GUVcat, 2MASS, AllWISE, SkyMapper Southern Survey a také spektrálních přehledů jako jsou 2MRS, GALAH, 6dFGS a 2dFLENs. Analýzy pracují se stovkami tisíc astrofyzikálních objektů, v nichž jsou vyhledávány skupiny s podobnými vlastnostmi. Jako svědci dávných galaktických srážek se v současné době popisují

← Umělecká představa čtyř chvostů látky táhnoucích se za trpasličí galaxii Sgr dSph (oranžový shluk vlevo). Slunce představuje (nikoli v měřítku) žlutá kulička vpravo od jádra. Zdroj: Amanda Smith, Institute of Astronomy, University of Cambridge.

Sonda Gaia Evropské kosmické agentury, která z Lagrangeova bodu L2 mapuje Galaxii s dosud nejvyšší přesností. Od roku 2014 monitoruje polohy, vzdálenosti a pohyby více než miliardy hvězd. Zdroj: ESA.







Simulace prolinání předchůdce naší Galaxie s galaxií Gaia-Enceladus. Zdroj: Inst. de Astrofísica de Canarias.

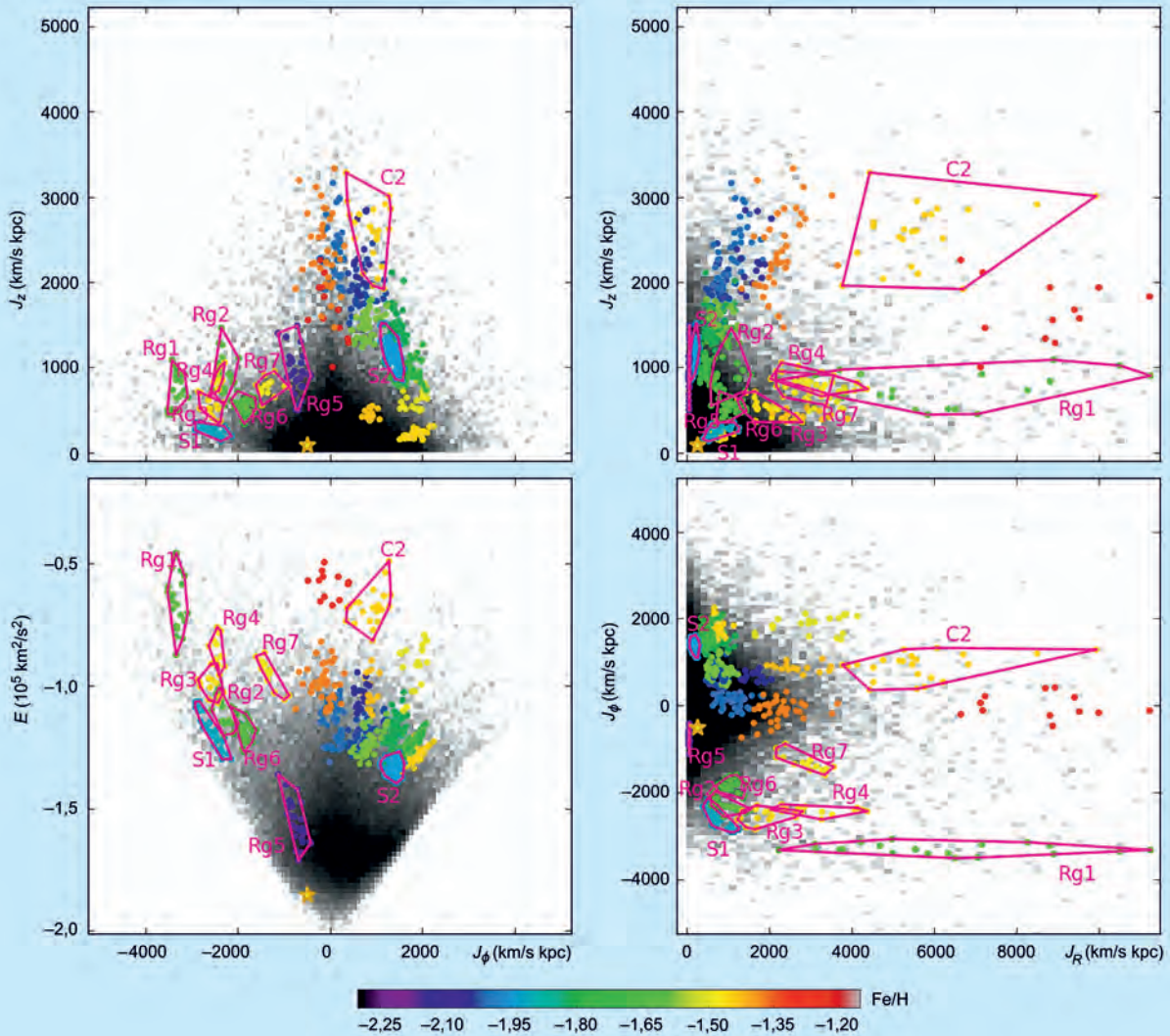
kompaktní hvězdokupy (*Nuclear Star Clusters* – NSC). Jde o oblasti s nejvyšší koncentrací hvězd v galaxiích vůbec, původně šlo o jádra trpasličích satelitů, která se ale pozdějšími srážkami v průběhu vývoje velkých galaxií dostala do oblasti haló, a zpětně lze odhadovat, jak k tomu mohlo dojít. Mnohé objekty, dnes popisované jako NSC, byly v dřívějších katalozích často zařazovány jako kulové hvězdokupy a tato terminologie je stále dosti nejednoznačná.

## Eliptická galaxie ve Střelci

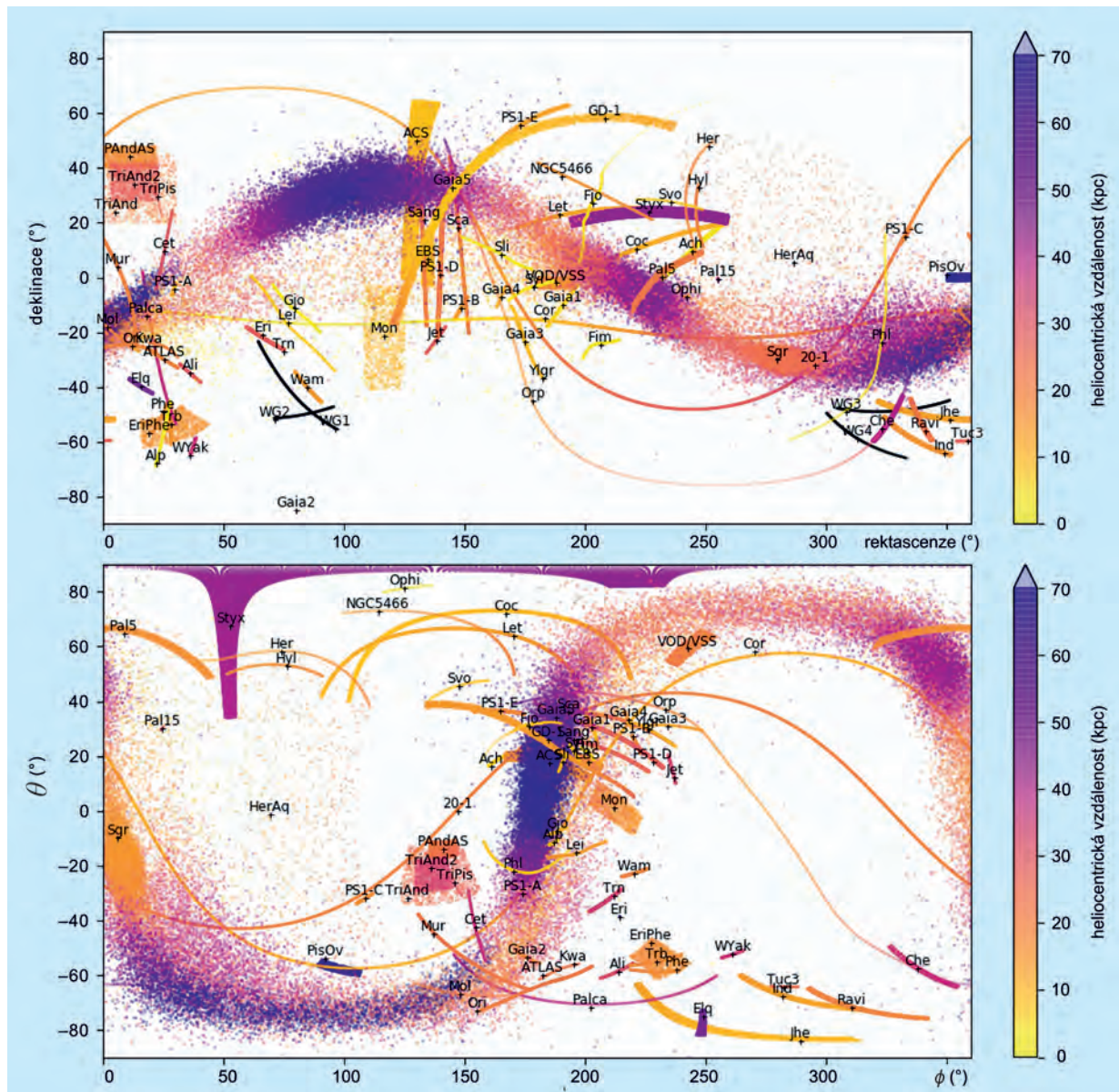
Trpasličí eliptická galaxie ve Střelci (Sgr dSph) byla objevena v roce 1994. V současnosti jde o druhou nejbližší trpasličí galaxii. Tuto galaxii můžeme pozorovat za téměř nejhustšími oblastmi jižně od jádra Galaxie, její součástí je šest kulových hvězdokup M 54, Terzan 7, Terzan 8, Arp 2, Palomar 12 a Whiting 1. Hvězdokupa Messier 54 byla patrně jádrem původní hvězdné soustavy. Hmotnost Sgr dSph činí  $4 \times 10^8$  Sluncí. Sgr dSph byla prvním objeveným objektem, jehož splývání s Galaxií právě probíhá. Sgr dSph proplová okolo Galaxie již více než miliardu roků, oběžná doba byla určena mezi 550 a 750 miliony roků a původní celková hmotnost před tím, než se Sgr dSph dostala do gravitačního vlivu Galaxie, byla odhadnuta na  $10^{11}$  Sluncí. Numerické simulace provedené v roce 2011 ukázaly, že současná spirální struktura Galaxie by mohla být způsobena právě periodickým obíháním Sgr dSph kolem těžiště soustavy. V roce 2018 se podařilo prokázat díky projektu Gaia, že přiblížení Sgr dSph k jádru Galaxie před 300 a 900 miliony roků mělo za následek rozkmitání tamních hvězd. Studie z roku 2020 určují pohyb Sgr dSph v nedávné historii jako jeden z hlavních dějů, které ovlivnily tvorbu nových hvězd v Galaxii.

## Gaia-Enceladus-Sausage

Gaia-Enceladus-Sausage je pozůstatek trpasličí galaxie, která se s předchůdcem Mléčné dráhy prolula v době před 10 až 8 miliardami roků. Střední věk hvězd trpasličí galaxie Enceladus byl určen na  $12,3 \pm 1,4$  miliard roků a v době, kdy ke spojení obou galaxií došlo, měl Enceladus hmotnost odpovídající  $5 \times 10^9$  Sluncí. V téže době měl galaktický předchůdce Mléčné dráhy celkovou hmotnost „jen“ zhruba dvojnásobnou  $8 \times 10^9$  Sluncí. S galaxií Enceladus jsou prokazatelně spojitelné kulové hvězdokupy Messier 2, Messier 56, Messier 75, Messier 79, NGC 1851, NGC 2298 a NGC 5286, jejichž charakteristiky odpovídají



Rozčlenění hvězd v galaktickém haló podle pohybových charakteristik a vyznačení jednotlivých pohybově příbuzných skupin také podle shodné metallicity. Sedm nalezených retrográdních skupin označených Rg 1 až 7 nejspíše souvisí s událostí, při níž byla Mléčná dráha také obohacena o obří kulovou hvězdokupu  $\omega$  Centauri (v grafech je označena hvězdičkou), tedy s galaxií Sequoia. Zdroj: G. C. Myeong, University of Cambridge.





hvězdám Enceladu. Hvězdokupa NGC 2808 se těmito parametry částečně vymyká tím, že obsahuje hvězdy tří rozdílných generací, všechny ale vznikly v téže době v rozmezí zhruba 200 milionů roků. Navíc NGC 2808 je jednou ze sedmi známých kulových hvězdokup, v nichž je nahloučeno milion hvězd a více. Je proto velmi pravděpodobné, že by mohlo jít o dřívější jádro Enceladu. Hvězdy Enceladu se vyznačují vysokou excentricitou 0,9 a mají metalicitu  $-1,3$ . Splynutí předchůdce Mléčné dráhy s Enceladem mělo za následek změnu struktury galaktického disku, oddělil se tenký a tlustý disk. Z dřívě tenkého a hustého disku byla vytažena prachová oblaka a mezihvězdná látka a došlo opět k překotné tvorbě nových hvězd. Produkty této galaktické srážky obohatily haló o většinu látky s vysokou metalicitou.

Detailním studiem hvězd v galaktickém haló se podařilo rozlišit dvě skupiny hvězd – zjednodušeně modřejší a červenější, jejichž původ lze nalézt ve dvou různých objektech. Barva zde znamená ve skutečnosti rozdílnou metalicitu. Modré hvězdy mají výrazně nižší metalicitu než hvězdy červené a obě skupiny jsou prokazatelně starší než většina hvězd v současném galaktickém disku. Modré hvězdy patřily menší galaxii Enceladus, červené hvězdy byly součástí větší soustavy, předchůdce Mléčné dráhy. Splynutím těchto objektů sice došlo k vytvoření současné Galaxie s hmotností rovnou součtu obou předchůdců, ale ve hvězdách galaktického haló, které se z té doby dochovaly až dodnes, je možné jejich původ stále přelízt. Na obrázku na str. 88 je simulace z Astrofyzikálního ústavu Kanárských ostrovů (ICA).

## Galaxie Sequoia a $\omega$ Centauri

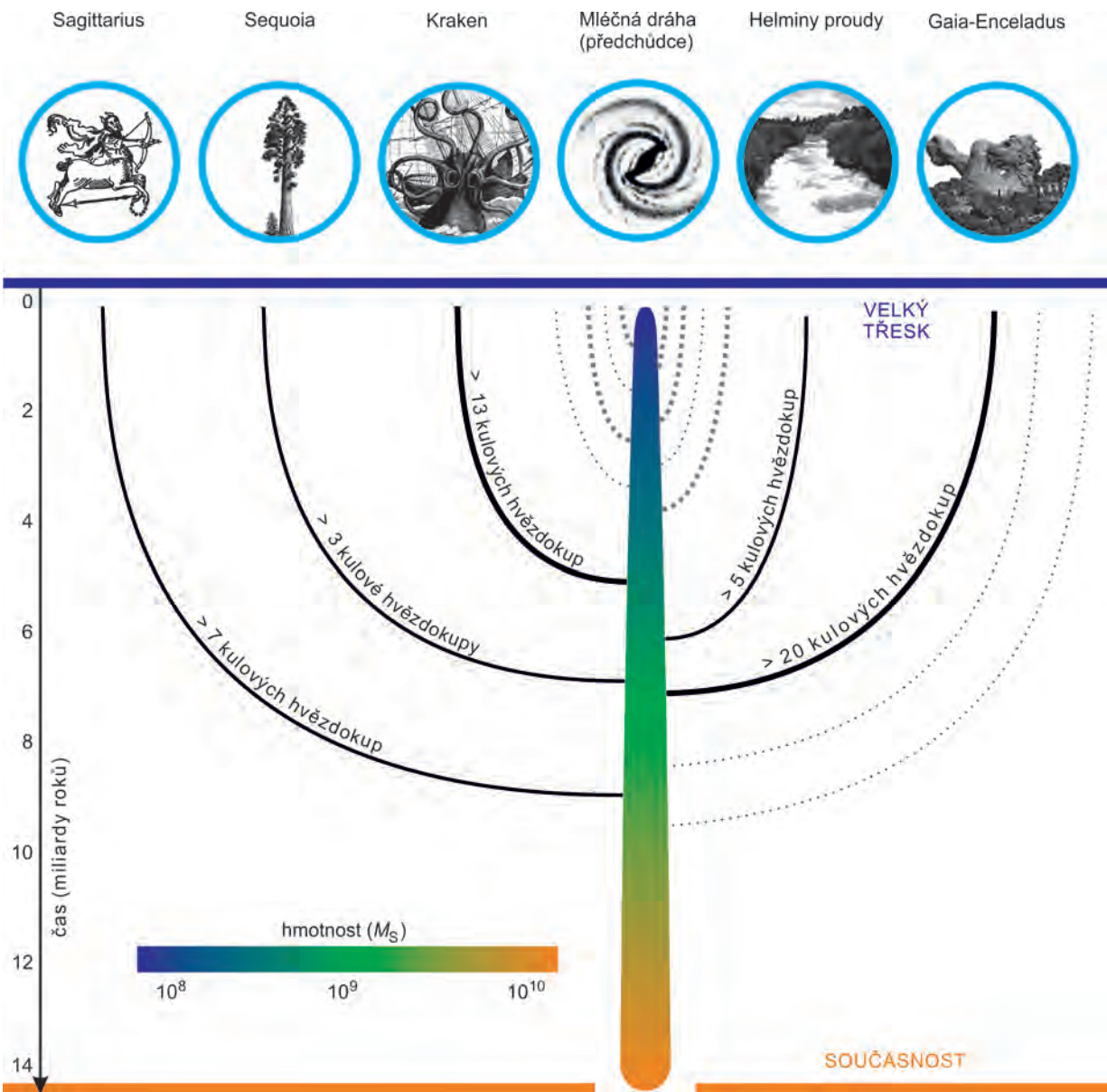
Splynutí Mléčné dráhy s galaxií Sequoia vneslo do galaktického haló velké množství retrográdně se pohybujících hvězd, zhruba stejně jako nedávno objevená kulová hvězdokupa FSR 1758. Podobných hvězdokup bylo celkem nalezeno šest (ještě NGC 3201, NGC 6101, NGC 5635 a NGC 6388) včetně  $\omega$  Centauri a stejně tak i mnoho jiných retrográdních struktur, které by mohly mít původ v trpasličí galaxii Sequoia. Hmotnost samotných hvězd galaxie Sequoia byla  $5 \times 10^7$  Sluncí, zatímco celková hmotnost včetně haló mohla činit až  $10^{10}$  Sluncí, což lze odvodit z výsledného stavu nebo také z celkové hmotnosti kulových hvězdokup. Třebaže byla Sequoia méně hmotná než Enceladus, Sequoia má jasně odlišitelný chemodynamický podpis. Hvězdy pocházející ze Sequoie se pohybují silně retrográdně s excentricitou

**Srážka galaxií** – velmi častý jev, při němž dojde k prolnutí dvou galaxií a později často k jejich splynutí. V minulosti, kdy byly vzdálenosti mezi galaxiemi menší, docházelo k srážkám častěji. Při srážce nedochází k čelním srážkám hvězd, to je vzhledem k jejich vzdálenostem velmi nepravděpodobné. Dochází k prolínání a gravitačnímu ovlivňování rozsáhlých oblastí plynu a prachu. V mlhovinách vznikají nestability, které jsou příčinou překotné tvorby hvězd. Velké galaxie vznikaly postupným pohlcováním menších galaxií.

**Kulová hvězdokupa** – systém obsahující statisíce až miliony hvězd, držený pohromadě gravitací. Hvězdy v kulových hvězdokupách neobsahují prakticky žádné těžší prvky, a jsou proto velmi staré, nejvíce 12 až 13 miliard roků. Vznikly z prvotního plynu – vodíku a hélia v zárodcích budoucích galaxií. Do naší Galaxie se také dostávaly spolu s pohlcovanými trpasličími galaxiemi. Většina kulových hvězdokup, které pozorujeme, je součástí naší Galaxie. Nejsou vázány na plochý podsystém, ale na celé galaktické haló.

← Zobrazení známých hvězdných proudů v celooblohové projekci. Horní graf je zobrazen v rovníkových heliocentrických souřadnicích, tedy obvyklých pro pohled na vesmír ze sluneční soustavy. Při studiu Galaxie je ale výhodnější - názornější - zobrazení v souřadnicích galaktocentrických, při nichž je počátek souřadnic umístěn do středu Galaxie. Spodní zobrazení v galaktocentrické soustavě tak názorněji ukazuje vztahy v geometrii systému s těžištěm umístěným poblíž galaktického jádra. Zdroj: Galstreams, Cecilia Mateau.





0,6, zatímco hvězdy Enceladu se pohybují spolu s hlavním proudem na kruhových orbitách. Metalicita hvězd Sequoie je oproti Enceladu nižší. U rychle se retrográdně pohybujících hvězd převažuje hodnota  $-1,6$  a také je nápadný jejich poměrně vyšší výskyt.

## Helminy hvězdné proudy

Hvězdné proudy (*Helmi Streams*) začaly být hojně objevovány v poslední dekádě dvacátého století jako pozůstatky hvězdných soustav pohybujících se ve vnějším galaktickém haló. Nejčastěji mohlo jít o trpasličí satelitní galaxie nebo kulové hvězdokupy. Proud pojmenovaný po Amině Helmi, profesorce Kapteynova astronomického institutu na Univerzitě v Groningenu, byl popsán jako jeden z prvních v roce 1999. Dříve známé byly jen hvězdné proudy kopírující trajektorie Magellanových oblaků okolo Mléčné dráhy a proud vyvolaný pohybem eliptické galaxie ve Střelci Sgr dSph. Helminy hvězdné proudy by měly být pozůstatkem splynutí trpasličí galaxie o hmotnosti 10 až 100 milionů Sluncí v období před 9 až 6 miliardami letů. Evidenci této události jsou opět hvězdy s nízkou metalicitou velmi podobných charakteristik. Důsledkem akrece trpaslíka do Galaxie by mohla být kulová hvězdokupa NGC 6934 v souhvězdí Delfina, která zbyla z jeho jádra po pohlcení veškeré jeho ostatní galaktické látky vnějším haló Mléčné dráhy.

## Vývojový strom, Kraken a kulové hvězdokupy

Grafické zobrazení toho, jak Mléčná dráha nabývá na hmotnosti v důsledku pohlcování trpasličích galaxií se nazývá vývojový strom Mléčné dráhy. Naleznete ho na obrázku vlevo. Jako kmen stromu je zobrazen růst hlavní galaxie, z níž postupně vzešla dnešní podoba Mléčné dráhy. Zvětšování Galaxie akrecí menších satelitů je patrné podle barevné stupnice při spodní hraně grafu. Pět nejmohutnějších událostí je zobrazeno a přiřazeno postupně, jak se v čase galaxie slučovaly. Podle dynamických vlastností jednotlivých účastníků událostí a dopočítaných trajektorií byly dohledány kulové hvězdokupy, které by s nimi mohly souviset. Jejich počty jsou uvedeny u jednotlivých větví.

V souhrnném a velmi podrobném článku z roku 2020 se z mnoha dosud provedených analýz a nových numerických simulací vynořil dosud největší objevený satelit, který se v období před 12 až 10 miliardami letů spojil s předchůdcem Mléčné dráhy. Jeho hmotnost činila  $1,9 \times 10^8$  Sluncí. Kraken, jak byl v roce 2018 příznačně pojmenován



Hvězdokupa Palomar 12 nevznikla v místě, kde ji pozorujeme dnes. Její hvězdy jsou mnohem mladší, zhruba 6,5 miliardy let, než hvězdy v jiných kulových hvězdokupách Mléčné dráhy. Z dynamických parametrů hvězdokupy Palomar 12 lze dopočítat, že jejím původcem je trpasličí eliptická galaxie ve Střelci, Sgr dSph. Hvězdokupa Palomar 12 se jako samostatný útvar vydělila někdy před 1,7 miliardou let. Palomar 12 je poměrně obtížně pozorovatelným objektem, objevili ji až při Palomarské přehlídce oblohy v roce 1955 Robert George Harrington a Fritz Zwicky. Palomar 12 měří v průměru 60 světelných let a pluje ve vzdálenosti 60 000 světelných let v souhvězdí Kozoroha. Zdroj: NASA

← Vývojový strom nárůstu hmotnosti Mléčné dráhy. Zdroj: J. M. D. Kruijssen, MNRAS.



*Kulová hvězdokupa Omega Centauri, známá též jako NGC 5139, je od nás vzdálená 15 000 světelných roků. Hvězdokupa obsahuje kolem 10 milionů hvězd, prostorově vyplňuje oblast zhruba 150 světelných roků v průměru. Je největší a nejzářivější kulovou hvězdokupou Mléčné dráhy a je výrazným objektem jižní oblohy. Zdroj: NASA*

po hrůzu nahánějící hlubinné potvoře, byl první z velkých satelitů, se kterým předchůdce Galaxie splynul. Jelikož v té době šlo o mnohem menší soustavu než dnes, výpočtový poměr jejich vzájemných hmotností hvězd obou soustav byl 1:31. V době, kdy se připojil Enceladus a Mléčná dráha již měla za sebou podobných kolizí více, už byl tento poměr „jen“ 1:67, neboť v tomto pozdějším období byla Mléčná dráha již zhruba třikrát hmotnější. V období pozdějším se tento poměr již výrazně měnil: Helminy proudy 1:110, Sequoia 1:191 a eliptická galaxie ve Střelci 1:104. Všechny tyto hodnoty jsou ale jen středy velmi širokých intervalů nejistot v rozmezí několika desítek procent na obě strany. Studium dynamických vlastností a metalicity kulových hvězdokup bylo nalezeno přibližně 15 událostí – odlišitelných sloučení – předchůdce Mléčné dráhy s nějakou trpasličí galaxií. Trpasličí, kteří byli takto odhaleni, by měli mít hmotnost nejméně  $4,5 \times 10^6$  Sluncí. Celkem bylo postupně nalezeno 96 kulových hvězdokup, které jsou prokazatelně důsledkem těchto minulých událostí. Mnohé akrece satelitních galaxií s předchůdcem Mléčné dráhy se prolínají v čase a díky tomu také mnohé kulové hvězdokupy jsou výsledkem několika kolizí, které na sebe v minulosti navazovaly.

Dnes je evidentní, že kulové hvězdokupy jsou důsledkem pohlcování menších galaxií velkými soustavami a bez dřívějších srážek Mléčné dráhy s jejími satelitními trpaslíky bychom na nebi žádné kulové pozorovat nemohli.

■ Ivan Havlíček, 4. 12. 2020, AB 47/2020

## Oblaka nejsilnější kyseliny

O Edisonovi koluje mnoho doložených i nedoložených legend. Některé jsou pravdivé, jiné přežívají přes jistou nevěrohodnost jen pro svůj půvab. Podle jedné z nich navštívil Edisona vynálezce se vzorcem kyseliny, která rozpustí každou hmotu. Praktický Edison ho odbyl dotazem: „A v čem byste ji skladoval?“ Nevíme, do které kategorie tato legenda patří, ani zda je pravdivá, či nepravdivá. Známe na ni však odpověď: „Ve vesmíru. Funguje to.“

### Sloučniny helia

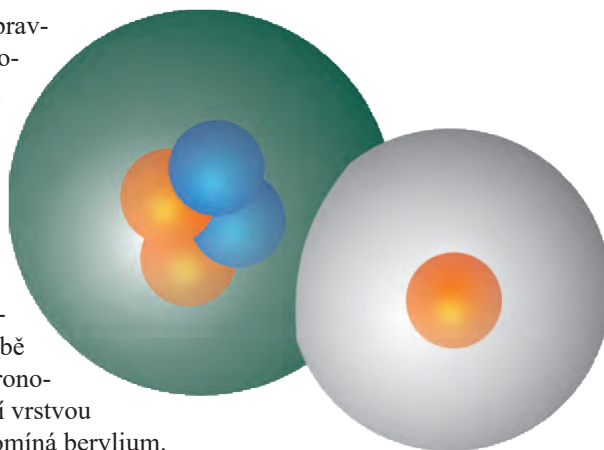
Chemický vzorec této látky ( $\text{HeH}^+$ ) budí na první pohled nedůvěru. Helium a vzácné plyny obecně jen neochotně tvoří sloučeniny. Na vině je plně obsazená valenční sféra helia. Vazební elektrony jsou plně spárovány a atom nemá na první pohled šanci, jak vytvořit s jinými atomy sloučeninu. Přesto tu nějaké možnosti jsou. Někdy jde o trik, někdy o skutečnou molekulu. Jako molekula helia se někdy uvádí  $\text{He}@C_{60}$  a  $\text{He}_2@C_{60}$ . Otázka je, zda molekulu, která má ve vzorci znak @ můžeme považovat za opravdovou sloučeninu. Ve skutečnosti se jedná o uhlíkovou kličku fullerenu 60, ve které je uvězněna jedna nebo dvě molekuly helia. Nedávno byla odladěna metoda přípravy této struktury, kdy jsou jádra helia explozí urychlena natolik, že proniknou stěnou fullerenu a tam již zůstanou. Podobným postupem byly vytvořeny fullereny obsahující neon, dusík a argon.

Molekuly  $\text{HgHe}$ ,  $\text{HgHe}_2$  a  $\text{HgHe}_{10}$  již vypadají jako opravdové molekuly, ale opět jde spíš o trik. Tentokrát trik spočívá v tom, že je celý atom helia natlačen do vnějších elektronových slupek rtuti. Za plnohodnotnou molekulu je považován helid sodný  $\text{Na}_2\text{He}$ , jehož existence byla nejprve předpovězena počítačovými simulacemi. Vývojový algoritmus USPEX ukázal, že příprava musí proběhnout za tlaků vyšších než 100 GPa. První experimentální úspěch se dostavil v roce 2013, kdy byl helid sodný připraven na diamantové kovadlině v Carnegieho vědeckém institutu ve Washingtonu. Při tlaku 113 GPa jsou obě molekuly přitlačeny tak blízko, že se zcela přeskupí elektronové obaly a helium se pak chová, jako by nad jeho valenční vrstvou začala vznikat další vrstva, takže nakonec chemicky připomíná berylium.

**Hydrid helia** – sloučenina vodíku a helia  $\text{HeH}$ . Ačkoli se tato molekula rychle rozpadá, její kationt  $\text{HeH}^+$  je stabilní. Poprvé byl připraven již v roce 1925, v roce 2019 byla jeho přítomnost potvrzena v planetární mlhovině NGC 7027. Předpokládá se, že sloučenina byla hojná v raném vesmíru, v době tvorby prvních atomárních obalů.

**SOFIA** – Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy, observatoř pro infračervená pozorování instalovaná na palubě Boeingu 747 SP-21. Mezi její úspěchy patří objev iontu hydridu helia v planetární mlhovině NGC 7027 nebo pozorování zákrytu hvězdy trpasličí planetou Pluto. Letadlo bylo pokřtěno v roce 1977 vdovou po Charlesi Lindberghovi. V roce 1997 letadlo odkoupila NASA. Bylo přestavěno na observatoř a v roce 2007 pokřtěno na Clipper Lindbergh jeho vnukem.

Molekula hydridu helia. Zdroj: AGA.

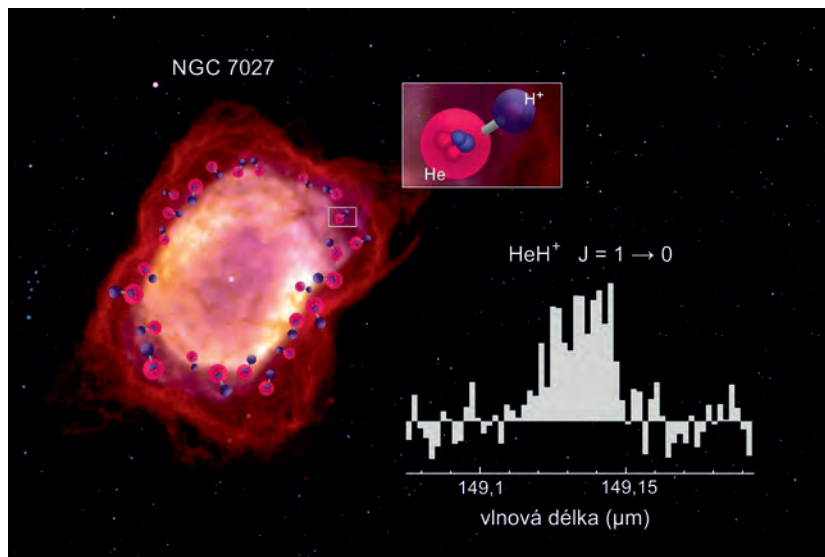




**GREAT** – German REceiver for Astronomy at Terahertz Frequencies, spektrometr pro infračervený obor v rozsahu 60 až 600  $\mu\text{m}$ . V tomto pásmu je zemská atmosféra neprůhledná, proto je přístroj instalován na palubě létající observatoře SOFIA.

**Fullereny** – sférické struktury tvořené atomy uhlíku, rozměr této obří molekuly je kolem 0,7 nm. Nejdůležitější z fullerénů jsou  $\text{C}_{60}$ ,  $\text{C}_{50}$  a  $\text{C}_{70}$  obsahujících 60, 50 a 70 atomů uhlíku. Fullereny za normálních podmínek sublimují při teplotách nad 500  $^{\circ}\text{C}$ . Fullereny jsou pojmenovány po americkém architektu Buckminsterovi Fullerovi, který stavěl kopule podobného tvaru.

Planetární mlhovina NGC 7027 v Labuti. Energetické záření bílého trpaslíka v jejím centru stojí za vznikem iontu  $\text{HeH}^+$ . Zdroj: NIESYTO, William B. Latter.



## Kyselina kyselin

A přece existuje sloučenina helia, která šokuje spíše svou jednoduchostí, než exotickými druhy vazeb. Dle pravidel českého názvosloví bychom mohli vymýšlet její přesné pojmenování, ale protože nehrozí zmatení pojmů, běžně se používá méně konkrétní označení hydrid helia. Tato látka se samovolně rychle rozpadá, nicméně její kationt  $\text{HeH}^+$  je již stabilní. To ovšem neznamená, že ho lze snadno zkoumat. Vazba mezi vodíkem a heliem je velice křehká a molekula se protonu velice ráda zbaví. Dárcovství protonu je vlastnost, kterou se vyznačují kyseliny a  $\text{HeH}^+$  se také tak chová. Ačkoli byl kationt uměle připraven již v roce 1925, doposud nemohl být zkoumán jinak, než bezprostředně po výrobě, protože by okamžitě reagoval ve styku s jiným materiálem.

Jediný způsob, jak hydrid helia uchovat, je izolace od ostatní látky. Vesmírný prostor se nabízí sám od sebe. Astronomové výskyt hydridu ve vesmíru očekávali delší dobu. První molekuly by podle představ kosmologů měly vznikat již počátkem temného věku, kdy energie vesmíru poklesla natolik, aby atomy dokázaly udržet elektronové obaly. Dalším zdrojem molekul by mohla být interakce energetického záření s materiálem planetárních mlhovin. Přesto molekula dlouho unikala našim spektroskopům. Na vině je její nejvýznamnější spektrální čára 149,14  $\mu\text{m}$ . Nachází se v té části infračervené oblasti, kterou dokonale pohlcuje naše atmosféra. Navíc se shoduje s dubletem spektrálních čar radikálu CH, takže je k potvrzení třeba sáhnout i po dalších méně výrazných čarách.

## SOFIA nad oblaky

Při pátrání po hydridu helia sáhl tým Rolfa Güstena z německého MPIfR (Max Planck Institut für Radioastronomie) po spektrometru GREAT, se kterým lze pořizovat spektra v rozsahu 60 až 600  $\mu\text{m}$ . Rušivý vliv atmosféry eliminovali umístěním aparatury v létající observatoři SOFIA, pohybující se

ve výšce kolem čtrnácti kilometrů, tedy nad absorpčními vrstvami nižší atmosféry. První úspěch zaznamenali při rozboru spektra z 3 000 světelných roků vzdálené planetární mlhoviny NGC 7027 v souhvězdí Labutě. Před šesti sty roky zde vybuchla hvězda, jejíž pozůstatky dnes pozorujeme ve formě stále expandující plynné obálky o celkové hmotnosti odpovídající trojnásobku hmotnosti našeho Slunce. Bílý trpaslík, který zbyl po hvězdě, je dnes rozpálený na teplotu 190 000 °C. Ultrafialové záření produkované při této teplotě je schopno v mlhovině ionizovat atomy vodíku i helia a ty pak vytvářejí detekované ionty hydridu helia.



Létající observatoř SOFIA je unikátní zařízení, které již několik let uniká škrtům v rozpočtu. Objev iontu hydridu helia jistě zajistí pár dalších plodných let provozu. Technicky jde o upravený Boeing provozovaný NASA a Německým střediskem pro letectví a kosmonautiku (DLR, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*). Protože je zemská atmosféra pro některá pásma infračerveného záření neprostupná, je třeba vydat se za ním do velké výšky. Létající observatoř SOFIA poskytuje pro taková pozorování výhodnější platformu než automatická vesmírná stanice, a to nejen po ekonomické stránce. Výška téměř 15 km nad zemským povrchem je téměř prostá vodních par a poskytuje souměřitelné pozorovací podmínky jako orbitální dráha. Navíc zde odpadá problematický koncept bezporuchovosti. Na zařízeních v letadle je možné kdykoli provést revizi, doplnit chladicí médium nebo v případě potřeby vyměnit přímo celý experiment. Vlastní teleskop sleduje oblohu z otvoru nad levým křídlem. Obsluhu letadla zajišťuje tříčlenná posádka, na palubu se vejde až patnáct astronomů. Objev v roce 2019 přišel právě včas. Poslední větší zářez do pažby měla observatoř SOFIA v roce 2015 při zákrytu hvězdy trpasličí planetou Pluto. Zdá se, že o finanční krytí je zase na několik let postaráno.

*Detail radioteleskopu umístěného nad levým křídlem létající observatoře SOFIA. Zdroj: Carla Thomas, NASA.*

**Temný věk** – období mezi vznikem atomárních obalů (400 000 let po Velkém třesku) a reionizaci plynu v důsledku vzniku prvních megahvězd (550 milionů let po Velkém třesku). V tomto období látka ve vesmíru nezářila a byla tmavá.

**Planetární mlhovina** – odhozená obálka hvězdy v jejím závěrečném stádiu vývoje. Za rozdílné tvary planetárních mlhovin může přítomné magnetické pole. Planetární mlhoviny nemají nic společného s planetami, název vznikl na základě podobnosti mlhoviny s kotoučkem planety v malých dalekohledech prvních pozorovatelů.



## Rozumíme velkému třesku?

Očekává se, že objev spektrální čáry hydridu helia ve vesmírném prostoru pobídne kosmology k hledání primordiálních iontů. To jsou ty ionty, které by podle současných teorií měly vznikat v raných dobách vesmíru. Jejich absenci či přítomnost musí současné kosmologické modely zohledňovat. Tentokrát nebudou zahálet ani pozemní přístroje. Vlivem kosmologického posuvu by se měla vlnová délka spektrálních čar primordiálních iontů roztáhnout asi na desetinásobek. Tím se dostáváme do frekvencí, pro které je zemská atmosféra průhledná. Současné modely vývoje vesmíru počítají s tím, že by v raném vesmíru hydrid helia vznikat měl. O tom, jak pátrání po molekule dopadne a k jakým závěrům povede, můžeme zatím pouze spekulovat.

■ Dana a Rudolf Mentzlovi, 10. 5. 2019, AB 19/2019

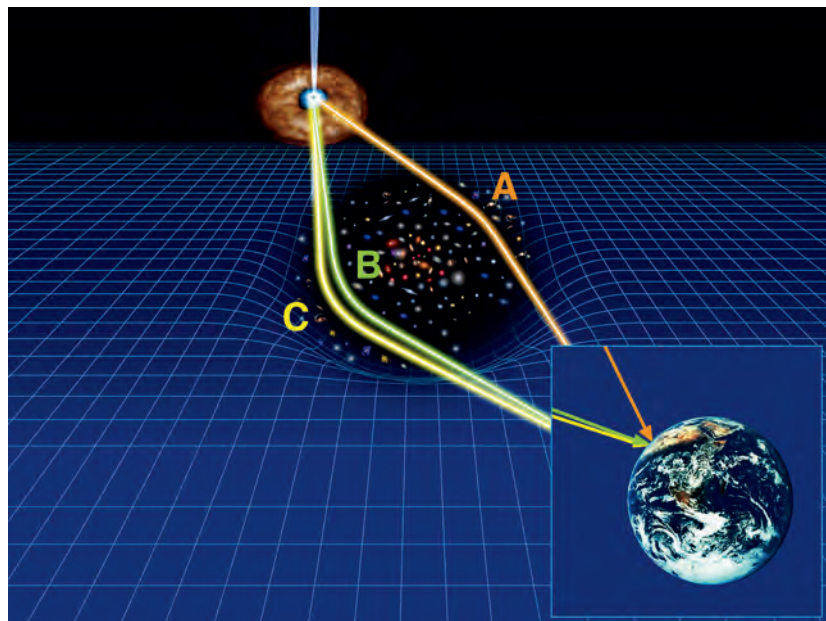


## Bájný Ikaros a gravitační superčočka

O gravitačním čočkování uvažoval Albert Einstein už v roce 1912, jeho výpočty se dochovaly v Einsteinově pracovním deníku. Usoudil ale, že půjde o jev natolik nevýrazný, že nebude lidskými prostředky měřitelný a celou věcí se dále nezabýval, ani ji nepublikoval. Podobné úvahy publikoval až anglický astronom Arthur Eddington v roce 1920. Víze gravitačních čoček učarovala i ruskému fyzikovi Orestu Chvolsonovi (1852–1934), který se jimi zabýval po roce 1924 a českému elektroinženýrovi Rudi Mandlovi (1894–1948), který emigroval do USA, kde dokonce v roce 1936 přiměl Alberta Einsteina k sepsání zmínky o gravitačních čočkách v článku pro časopis Science. Einstein ale nadále považoval tento jev za zanedbatelný a neměřitelný. V tom samém roce se gravitačními čočkami zabýval i český astronom a pedagog František Link (1906–1984). V roce 1937 ukázal švýcarsko-americký astronom Fritz Zwicky (1898–1974), že by efekt nemusel být malý, pokud by čočkujícím objektem nebyla hvězda, ale celá galaxie. První gravitační čočka byla objevena až po Einsteinově smrti, v roce 1979. Dnes jsou gravitační čočky běžnou záležitostí, z deformit obrazů vzdálených objektů dokážeme rekonstruovat prostorové rozložení mezilehlé látky včetně temné hmoty a gravitační čočky se využívají i k zobrazování velmi vzdálených objektů. Gravitační čočka se může například stát vzdáleným objektivem Hubbleova teleskopu. Jedna taková „superčočka“ dokázala vzdálenou hvězdu zjasnit faktorem 2 000 a umožnila tak spatřit nejvzdálenější hvězdu, která byla pojmenována Ikaros (na počest bájného letce Íkara).

**Gravitační čočka** – efekt gravitační čočky předpověděl v roce 1924 ruský fyzik Orest Chvolson a v roce 1936 Albert Einstein. Hmotný objekt ležící mezi zdrojem záření a pozorovatelem zakřivuje světelné paprsky podobně jako skleněná čočka v laboratoři. Jsou-li objekty dokonale na přímce, vznikne jako obraz vzdálené galaxie tzv. Einsteinův prstenec. Jsou-li objekty mimo osu, vznikne buď oblouk, několikanásobný obraz nebo zdeformovaný obraz vzdálené galaxie či kvazaru. První gravitační čočka byla objevena v roce 1979.

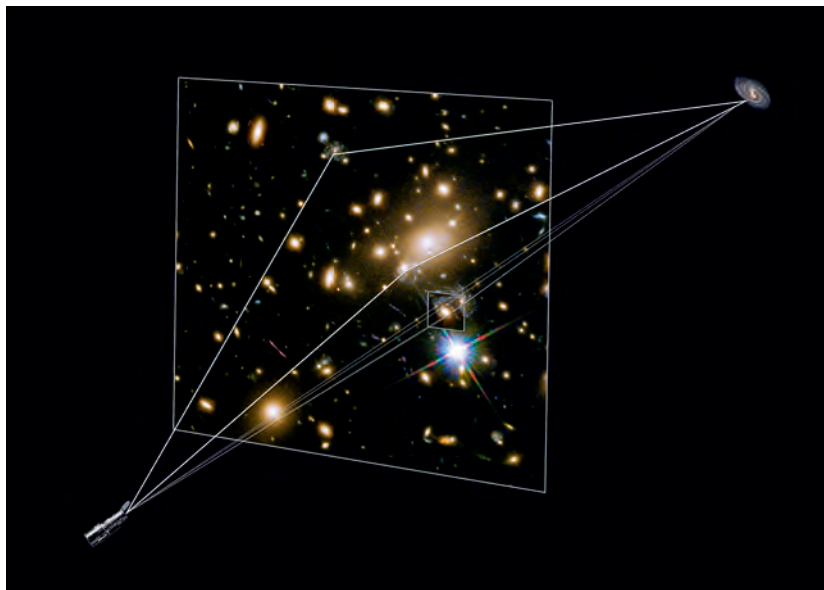
Princip gravitační čočky. Mezilehlá kupa galaxií zesiluje světlo vzdáleného objektu. Zobrazeny jsou tři paprsky procházející různými oblastmi kupy. Zdroj: Subaru.





**Kupy galaxií** – největší gravitačně vázané objekty ve vesmíru tvořené třemi hlavními složkami: 1) stovkami galaxií obsahujícími hvězdy, prach a plyn; 2) obrovskými oblaky horkých plynů; 3) temnou hmotou zatím neznámé povahy. Větší kupy označujeme jako nadkupy. Naše Galaxie je součástí nadkupy Laniakea, kterou identifikoval v roce 2014 Bret Tully z Havajské univerzity. Název Laniakea znamená v havajštině „nezměrná nebesa“.

Hubblův dalekohled pozoruje trojnásobný obraz vzdálené spirální galaxie za pomoci gravitační čočky (kupa MACS J1149+2223) v popředí. Zdroj: HST/NASA/ESA.



## Kupa galaxií MACS J1149+2223

Oficiální název této kupy galaxií ze souhvězdí Lva zní poněkud odtažitě: MACS J1149+2223. Kupa byla objevena rentgenovou družicí ROSAT při přehlídkovém projektu MACS (*Massive Cluster Survey*). Podobných kup našla na konci 20. století družice ROSAT přes stovku. Kupa se nachází ve vzdálenosti přibližně 5 miliard světelných roků a funguje jako skvělá gravitační čočka pro pozorování vzdálenějších objektů. Proto je pravidelně sledována Hubblovým vesmírným dalekohledem, Spitzerovým vesmírným dalekohledem i mnoha pozemskými přístroji, například arizonským dalekohledem LBT (*Large Binocular Telescope*) i dalšími zařízeními. Poprvé se tato kupa – superčočka – proslavila v roce 2012, kdy se Hubblovu i Spitzerovu dalekohledu podařilo nalézt patnáctkrát zesílený obraz velmi vzdálené galaxie, jejíž světlo se vydalo na cestu k nám pouhou půl miliardu roků po velkém třesku. Bez gravitační čočky by tak vzdálená galaxie z období 3,5 procent stáří vesmíru nebyla vůbec viditelná. Tím éra fascinujících objevů objektů zesílených touto superčočkou teprve začala.

Dalším zajímavým objektem byla bezejmenná spirální galaxie, kterou superčočka MACS J1149+2223 zobrazila hned třikrát. To je docela běžné, že gravitační čočky vytvářejí vícenásobné obrazy vzdálených objektů, v tomto případě spirální galaxie, jejíž světlo k nám putovalo devět miliard roků – vidíme ji tedy v období pouhé třetiny života vesmíru. A právě v této spirální galaxii byly později objeveny dva významné objekty: supernova Refsdal a modrý veleobr Ikaros.

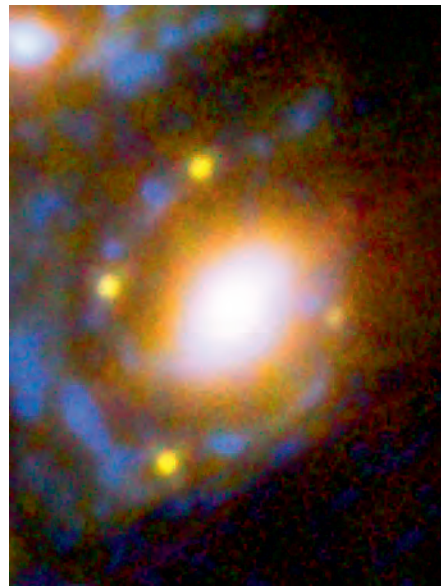
## Supernova Refsdal

Mezinárodní tým vědců z Jihokaliifornské univerzity, Minnesotské univerzity, Arizonské univerzity a Fyzikálního institutu ve španělské Cantabrii, který byl veden Patrickem Kellym, objevil v jednom z obrazů výše zmíněné spirální ga-

laxie, zesílené gravitační čočkou, v listopadu 2014 supernovu. Její obraz zesílila jedna konkrétní galaxie superčočky MACS J1149+2223. Souhrou náhod byly objekty téměř na přímce a vznikl čtyřnásobný obraz supernovy, tzv. Einsteinův kříž. Teoretici vypočetli, že zhruba o rok později by se měl obraz této supernovy objevit znovu, a to v dalším ze tří známých obrazů mateřské spirální galaxie, tedy jakési vesmírné dějá vu. Proto byl tento úsek oblohy pečlivě sledován a dne 11. prosince 2015 se opravdu podařilo pozorovat supernovu ještě jednou. Splnilo se to, co předpověděl norský teoretik Sjur Refsdal už v roce 1964: exploze supernov je možné díky gravitačnímu čočkování pozorovat opakovaně a z časových posunů mezi pozorovanými obrazy supernov studovat expanzi vesmíru. Proto byla supernova, u níž se to podařilo poprvé, pojmenována podle jeho jména, tedy Refsdal.

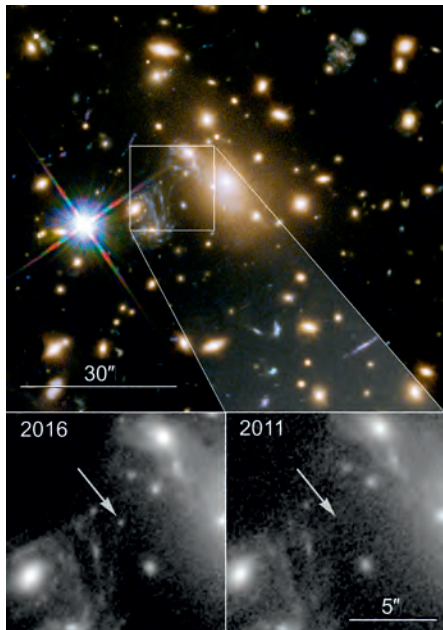
## Veleobr Ikaros

Okolí supernovy Refsdal bylo pečlivě sledováno mnoha přístroji po celý další rok. K velkému překvapení astronomů se v těsné blízkosti objevil v dubnu 2016 další zářící bod. Jeho intenzita se postupně zvyšovala několik týdnů, poté dosáhla maxima a objekt začal opět slábnout. Skupina vedená Kellym se nejprve domnívala, že jde o další obraz jimi objevené supernovy. Pořízené spektrum to ale vyloučilo, šlo o spektrum modrého veleobra s povrchovou teplotou někde mezi 11 až 14 tisíci kelviny. Ve spirální galaxii, v níž explodovala supernova Refsdal se podařilo zobrazit obyčejnou hvězdu. To by ale mělo být naprosto vyloučené, neboť se díváme na galaxii, jejíž světlo k nám putovalo 9 miliard roků, a je tedy v obrovské vzdálenosti. Následující analýza ukázala, že pravděpodobně došlo k tomu, že se do zákrytu dostal veleobr ze vzdálené spirální galaxie a hvězda podobná Slunci z čočkující kupy galaxií MACS J1149+2223 v popředí. Gravitační kupa zesiluje světlo hvězdy přibližně šestsetkrát, další zesílení jednou z hvězd kupy způsobilo, že se intenzita veleobra ze vzdálené spirální galaxie zvýšila 2000krát, a bylo tak možné ho přímo pozorovat. Jde o nejvzdálenější hvězdu, kterou se podařilo díky mikročočkování jinou hvězdou přímo zobrazit. Hvězda dostala název MACS J1149+2223 LS1. Písmena LS znamenají Lensing Star (první hvězda zobrazená čočkou MACS J1149+2223). Neosobní katalogové číslo bylo doplněno poetičtějším názvem Ikaros. Světelná křivka Ikara v sobě nese informace o rozložení hmoty v čočkující kupě. Podrobná analýza vyloučila, že by temná



Čtyřnásobný obraz supernovy Refsdal pozorovaný v listopadu 2014. Zdroj: HST, NASA, ESA.

**Obecná relativita** – teorie gravitace publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1916. Její základní myšlenkou je tvrzení, že každé těleso svou přítomností zakřivuje prostor a čas ve svém okolí. Ostatní tělesa se v tomto pokriveném světě pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách.



Fotografie modrého veleobra Ikaros pořízená v dubnu 2016 Hubbleovým dalekohledem. Zdroj: HST, ESA/NASA.

hmota v galaxiích kupy MACS J1149+2223 byla tvořena soustavou mnoha černých děr středních hmotností, jak předpokládaly některé dřívější modely. Je vidět, že pozorování gravitačního čočkování přináší důležité výsledky z nejrůznějších oborů astrofyziky.

### Další možnosti

Jediná gravitační kupa dokázala fokusovat objekty nejrůznějšího charakteru a v jistém smyslu funguje jako opravdový obří vesmírný dalekohled. Abychom ale mohli jím zobrazované objekty pozorovat, musíme dnes využívat Hubbleův dalekohled a jiné špičkové přístroje. Dalekohled Jamese Webba, který začíná fungovat právě v období přípravy této knihy, umožní gravitační čočkování vzdálených supernov a hvězd pozorovat jak na běžícím pásu. Představte si například zákryt vzdáleného objektu hvězdokupou nacházející se v mezilehlé kupě galaxií. Výrazné zesilování obrazu bude probíhat jak na úrovni celé kupy galaxií, tak opakovaně na jednotlivých hvězdách hvězdokupy (tzv. mikročočkování). Množství měření bude značné, což umožní zjistit řadu údajů o pozorovaném objektu, například jeho rotaci a další fyzikální charakteristiky. Einsteinem opomíjené gravitační čočky se pomalu ale jistě stávají rutinním pozorovacím nástrojem současné astronomie.

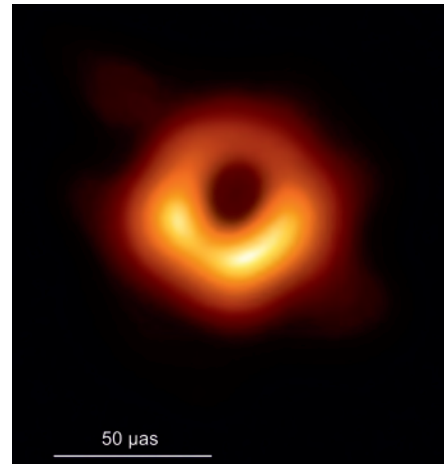
■ Petr Kulháněk, 17. 8. 2018, AB 50/2018

## První snímek černé díry

Jedním z milníků v poznávání struktury a fungování vesmíru byl bezesporu rok 1916, kdy Albert Einstein publikoval finální verzi své obecné teorie relativity. Ta, mimo jiné, předpovídala existenci komprimovaných objektů, které by ve svém okolí významným způsobem zakřivovaly prostoročas a vykazovaly mnoho vlastností, na tu dobu nepředstavitelných. Těmto objektům se později začalo říkat černé díry a trvalo více než 100 let, než se jejich existenci podařilo v roce 2019 prokázat přímým pozorováním bezprostředního okolí. Tohoto přelomového úspěchu dosáhli vědci z projektu *Event Horizon Telescope* (EHT), kteří během celosvětové videokonference dne 10. dubna 2019 zveřejnili první snímek blízkého okolí obří černé díry ve středu galaxie M89. Nejdůležitější výstupy projektu EHT je možno najít v sérii šesti článků, které vyšly ve stejný den, jako byl snímek zveřejněn.

### Černé díry

Černé díry jsou považovány za jedny z nejmysterióznějších vesmírných objektů. Jedná se o tělesa s natolik koncentrovanou hmotou, že jejich gravitační pole neumožní žádnému objektu, který se přiblíží příliš blízko, opustit prostor vymezený černou dírou. To se týká nejen hmotných těles, ale i světla, což dalo impuls ke vzniku označení těchto vesmírných objektů – černá díra. Rozsah oblasti kolem středu černé díry, ze které již není úniku, je dán Schwarzschildovým poloměrem. Této hranici se také říká *horizont událostí*. Velikost Schwarzschildova poloměru roste s hmotností černé díry. Přestože samotná černá díra je na vesmírná měřítka velmi malým a dokonale černým objektem, spolu se svým okolím tvoří černé díry jedny z nejsvítivějších objektů ve vesmíru, což umožňuje určit jejich polohu. Snímek nejbližšího okolí černé díry je na obrázku vpravo. Kromě již zmíněného temného středu zde můžeme vidět především akreční disk rotující kolem černé díry a výtrysky. Akreční disk je tvořen rychle rotující směsicí prachu a plynu, která je strhávána gravitační silou černé díry. Látka akrečního disku se díky vnitřnímu tření plynů silně zahřívá, což vede ke vzniku plazmatu. Vnitřní část disku také silně emituje elektromagnetické záření, jehož frekvence sahají od rádiových vln až po gama záření. Díky přítomnosti velkého množství rotujících nabitých částic je akreční disk zdrojem silného magnetického pole, které je zodpovědné za již zmíněné výtrysky.



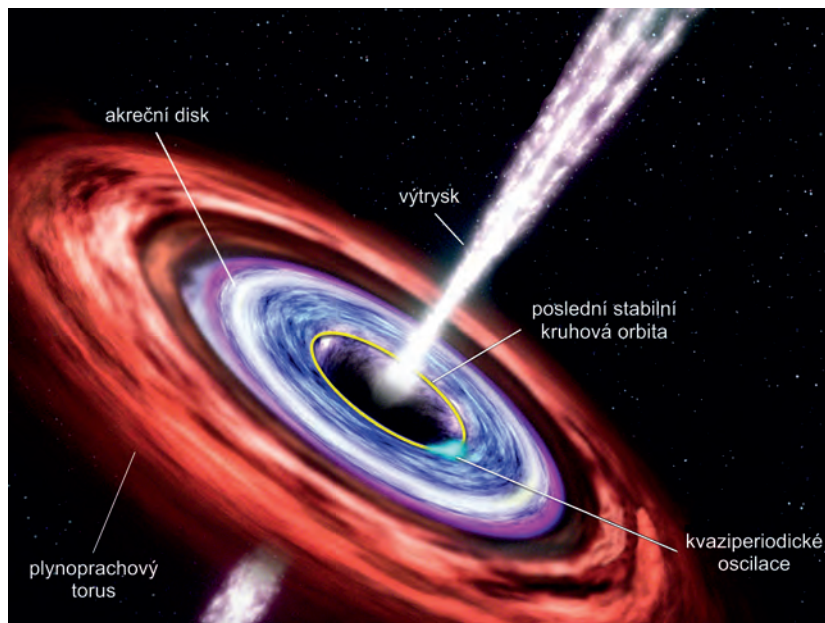
Snímek blízkého okolí černé díry v centru galaxie M87 ze souhvězdí Panny zrekonstruovaný z dat naměřených v dubnu 2017. Zdroj: *Astrophysical Journal Letters*, 2019.

**Horizont událostí** – rozhraní u černé díry, po jehož překročení již není možné vyslat jakýkoli signál vnějšímu pozorovateli. Rozměr horizontu událostí určil z obecné relativity německý teoretik Karl Schwarzschild v roce 1916, proto často hovoříme o tzv. Schwarzschildovu poloměru černé díry. U rotující černé díry spočítal tvar horizontu událostí novozélandský matematik Roy Kerr v roce 1963.



**EHT** – Event Horizon Telescope, spojení osmi radioteleskopů a jejich polí do celosvětového přístroje. Projekt pochází z roku 2012 a v roce 2019 poprvé vyfotografoval bezprostřední okolí černé díry v centru galaxie M87. Součástí jsou tyto přístroje: ALMA (Atacama Large Millimeter Array), APEX (Atacama Pathfinder EXperiment), SPT (South Pole Telescope), JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), SMA (Submillimeter Array), SMT (Submillimeter Telescope), LMT (Large Millimeter Telescope) a třicetimetrový radioteleskop IRAM (Institute for Radio Astronomy in the Millimeter Range) na Pico Veleta.

Portrét očekávané struktury nejbližšího okolí černé díry.  
Zdroj: Aldebaran.



Jedná se o proud nabitých částic, které směřovaly do středu černé díry, ale byly na poslední chvíli strženy jejím magnetickým polem a vymrštěny do vesmíru. Původ menších černých děr (několikrát hmotnějších než naše Slunce) je spojen s kolapsem vyhaslých hvězd. Za jakých podmínek vznikaly obří černé díry (i miliardkrát hmotnější než Slunce), které můžeme pozorovat ve středech galaxií, je však stále záhadou.

## Teleskop pro pozorování horizontu událostí

Projekt EHT (*Event Horizon Telescope*, volně přeloženo teleskop pro pozorování horizontu událostí), vedený profesorem Sheperdem Doelmanem, byl oficiálně zahájen v roce 2012 a měl ambiciózní cíl – dosažení přímého pozorování bezprostředního okolí horizontu černé díry. Pozorování těchto objektů mělo být uskutečněno na vlnové délce 1,3 mm (rádiové vlny), které vydává akreční disk černých děr. Rádiové záření, na rozdíl od viditelného, vykazuje dobrou prostupnost galaktickým prachem a je tedy vhodné pro pozorování velmi vzdálených objektů. Jako vhodní kandidáti byly vybrány dva objekty. Prvním byla relativně blízká (~26 000 světelných roků), ale v rámci obřích černých

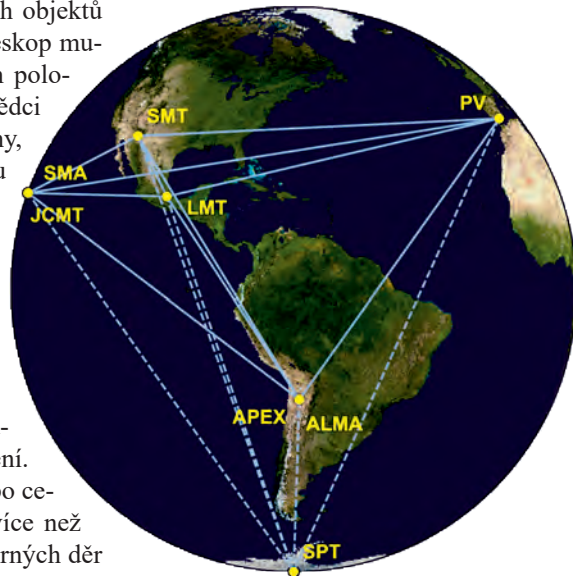
děr malá (hmotnost přibližně čtyři miliony Sluncí) černá díra spojená s rádiovým zdrojem Sagittarius A\*, která se nachází ve středu Mléčné dráhy. Druhým adeptem byla černá díra ve středu galaxie Messier 87 v souhvězdí Panny. Tato černá díra je sice od Země vzdálená 55 milionů světelných roků, je však jednou z největších doposud pozorovaných černých děr s hmotností přibližně sedm a půl miliardy Sluncí. Akrece materiálu z okolí je odhadována na jednu hmotnost Slunce za deset let. Výtrysky z této černé díry začínají ve vzdálenosti 5,5 Schwarzschildova poloměru a jsou dlouhé 5000 světelných roků. Okolí černé díry a je také intenzivním zdrojem rádiového signálu.

Zásadní překážkou pro přímé pozorování těchto vesmírných objektů ze Země je fakt, že poloměr „čochy“, kterou by vhodný teleskop musel mít, by řádově odpovídal poloměru Země (s rostoucím poloměrem mísy radioteleskopu roste rozlišení detekce). Sami vědci daný problém přirovnali ke snaze číst z New Yorku noviny, které drží člověk sedící v pařížské kavárně. Tuto překážku se rozhodli v rámci projektu EHT vyřešit pomocí detekční techniky známé jako VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Zjednodušeně se dá říct, že pokud jste schopni na různých místech Země provést časově synchronizované měření elektromagnetického signálu z určitého místa vesmíru a tyto signály následně vhodně poskládat, je výsledek ekvivalentní měření pomocí jediného „extrémně drahavého“ teleskopu o poloměru Země (tzv. *virtuální teleskop*). Výsledkem je tedy velmi nedokonalý signál o požadovaném rozlišení.

Do projektu EHT se postupně zapojilo osm observatoří po celém světě včetně jedné na jižním pólu a pracuje na něm více než 200 vědců. Výše popsané měření rádiových signálů obou černých děr proběhlo během deseti nocí v dubnu roku 2017 a objem získaných dat naplnil přes tisíc osmisterabajtových disků. Objem dat byl tak veliký, že musela být k vyhodnocení do MIT (Massachusettský technologický institut) přepravena fyzicky. Jednalo se o půl tuny přenosných disků. Vyhodnocení získaných dat představovalo stejně velkou výzvu, jako jejich získání. Vědci museli být nejen schopni efektivně zpracovat tak velké množství dat, ale i provést korekci zpoždění signálu v atmosféře na různých místech Země a především najít vhodný algoritmus, který by byl schopný správně hledat střípky informací z velmi nekvalitních dat, aby je bylo možno správně seskládat do výsledné mozaiky. Výsledný snímek byl porovnán s teoretickými simulacemi, v nichž bylo plazma v okolí černé díry modelováno jako obecně relativistická tekutina. Tato numerická metoda má zkratku GRMHD (*General Relativistic Magneto-Hydro-Dynamics*). Získaný snímek byl v dobrém souladu s provedenou numerickou simulací.

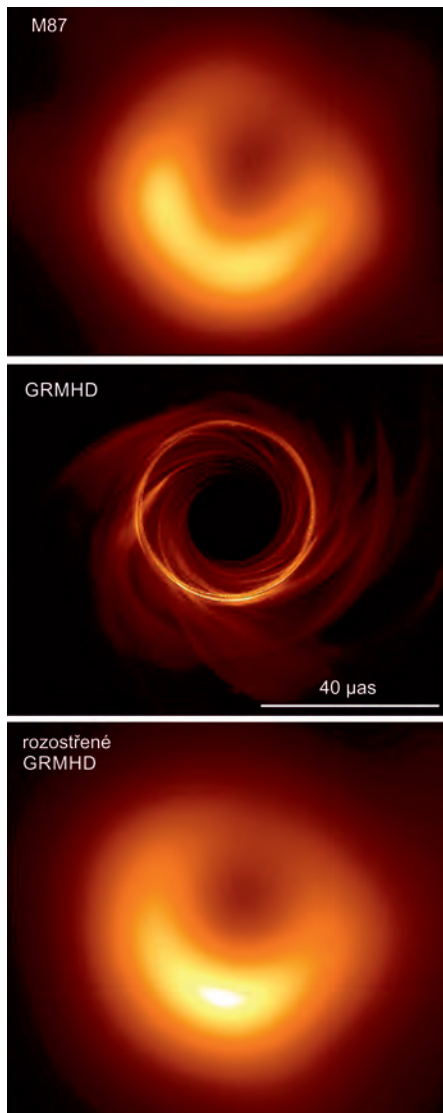
## Výsledná fotografie

Na pořízeném snímku je zřetelně vidět tmavý střed, který má zachycovat oblast pod horizontem událostí. Ve skutečnosti má tmavý střed velikost 2,6 Schwarzschildova poloměru, což je dáno zakřivením chodu



Systém osmi teleskopů a radioteleskopických polí, které byly použity pro získávání rádiového signálu v rámci projektu EHT. Zdroj: *Astrophysical Journal Letters*.

**VLBI** – *Very Long Baseline Interferometry*, radioastronomická metoda přesného měření polohy velmi vzdálených rádiových zdrojů. Metoda spočívá v měření časových korelací zaznamenaných šumových signálů třemi a více radioteleskopy, umístěnými na zemském povrchu ve velké vzdálenosti od sebe. Nejcitlivější síť je evropská EVN, nejznámější je americká VLBA s 10 radioteleskopy o základně 8 600 km. Pomocí této metody je definován souřadnicový systém pro nebeská tělesa ICRS (*International Celestial Reference System*).



Snímek centra galaxie M87 (projekt EHT), očekávaný výsledek pozorování (model GRMHD), rozostřený teoretický snímek. Zdroj: *Astrophysical Journal Letters*.

detekovaných rádiových vln gravitačním polem černé díry. Jasný prstenec kolem něj je dán emisí záření z akrečního disku kolem černé díry. Za rozostření snímku může především rozptýl rádiových vln na nabitých částicích ve vesmíru. Na fotografii stojí za pozornost také následující dva efekty. Za prvé, na snímku je vidět celý akreční disk, který má téměř kruhový profil. To by znamenalo, že je rovina disku natočena k Zemi přesně na kolmo, což je nepravděpodobné. Za druhé, je zřetelně vidět, že spodní část disku je jasnější než horní. První efekt je způsobem gravitačním zakřivením rádiových vln dopadajících na Zemi z části akrečního disku nacházejícího se v zákrytu černé díry. Rádiové vlny, které vychází z disku na odvrácené straně černé díry, mohou být gravitační silou černé díry ohnuty tak, že obkrouží černou díru a následně pokračují směrem k Zemi. Jelikož tyto paprsky mohou obejít černou díru z libovolného směru, z našeho pohledu budou vytvářet kruhové haló kolem černé díry. Druhý efekt je dán relativistickým Dopplerovým jevem. Intenzita rádiového záření pocházející z části akrečního disku, který se pohybuje směrem od Země, bude zeslabena a naopak jako intenzivnější budeme pozorovat záření pocházející z části disku rotujícího směrem k Zemi. Všechny pozorované efekty jsou v souladu s očekávaným pozorováním založeným na Einsteinově teorii relativity.

Přestože prezentované zobrazení černé díry a jejího okolí nenese žádnou informaci o vlastnostech černých děr pod horizontem událostí, jeho význam tkví v relativně přímém potvrzení existence a chování černých děr. Po pozorování gravitačních vln ze sloučení dvou černých děr středních hmotností, ke kterému došlo v září 2015, jde o další silný argument ve prospěch existence objektů demonstrujících správnost již více než 100 let staré Einsteinovy teorie obecné relativity.

Na závěr se zastavme i nad dnes již proslulou fotografií Dr. Katie Bouman. Tato fotografie, kde vědkyně nadšeně sleduje první snímek černé díry na svém počítači, byla umístěna na její facebookový profil v den oficiálního zveřejnění fotografie. Fotografie se začala rychle šířit přes sociální sítě, a to nejen díky významnému vědeckému výsledku projektu, ale i příběhu, který kolem Dr. Bouman vznikl. Příběh mladé vědkyně, která díky algoritmu vytvořeného během svých studií dokázala zásadním způsobem pomoci k vytvoření přelomového vědeckého snímku, byl pravděpodobně příliš lákavý. Dr. Bouman se tak téměř přes noc stala tváří celého projektu a hrdinkou mladé STEM komunity.

Nic na tom nezměnil ani fakt, že na projektu spolupracovalo 200 lidí a finální algoritmus, který byl použit pro přípravu výsledného snímku, se významně lišil od původního návrhu paní doktorky.

Nezanedbatelný je také samotný fakt spojení řady radioteleskopů do jednoho celku, které umožnilo dosáhnout v rádiové oblasti zatím bezprecedentního rozlišení 40 miliontin obloukové vteřiny. Vznik obřích radioteleskopických sítí přináší astronomům zcela nové pozorovací možnosti. V současné době se například staví radioteleskopické pole SKA (*Square Kilometer Array*), jehož jedna část bude v Austrálii a druhá v Jižní Africe. Už nyní dává rozestavěné pole zajímavé výsledky a podařilo se vyfotografovat centrum naší Galaxie s dosud nejvyšším rozlišením.

■ Pavel Galář, 19. 4. 2019, AB 16/2019



Snímek Dr. Katie Bouman, který se brzy po svém zveřejnění stal virální záležitostí. Zdroj: Facebookový profil Dr. Bowman.

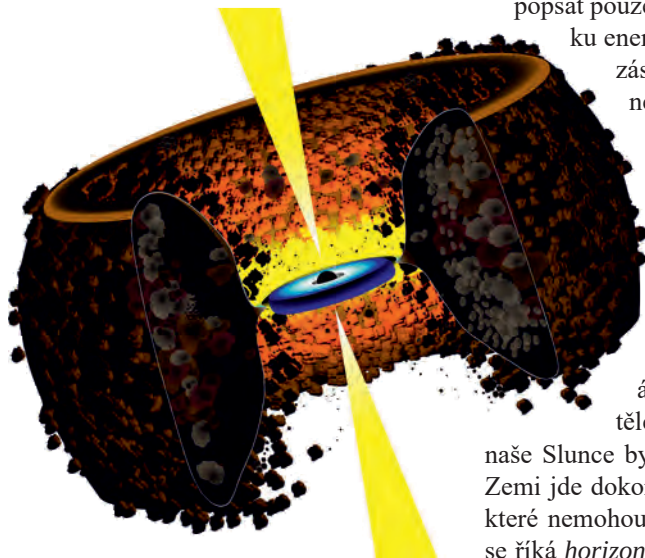




## Procesy v okolí černých děr

**Statická mez** – rozhraní u rotující černé díry, po jehož překročení je částice strhávána rotací černé díry natolik, že se nemůže pohybovat proti směru rotace. Statická mez je vně horizontu událostí, takže částice mezi statickou mezí a horizontem událostí mohou uniknout od černé díry v radiálním směru pryč. Tuto oblast nazýváme ergosféra.

Umělecká představa okolí černé díry Cyg X1 ztvárněná na základě přímých pozorování radioteleskopické sítě VLA. Modrý torus představuje plazmový akreční disk, žluté jsou zobrazeny výtrysky urychlených nabitých částic a hnědý prachový torus vyplněný shluky prachových zrn. Zdroj: Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF.



Černé díry rozhodně nejsou oblasti, které by byly uzavřené do sebe a nijak nekomunikovaly s okolím. Černá díra především nadále své okolí ovlivňuje gravitačně a od trojnásobku Schwarzschildova poloměru dokonce existují stabilní orbity, na nichž mohou černou díru relativně dlouho obíhat jakékoli objekty bez nebezpečí pohlcení. Z dlouhodobého hlediska samozřejmě dochází k vyzařování gravitačních vln, a tím ztrátě energie soustavy, a blízký obíhající objekt v černé díře nakonec přece jen po určité době skončí. U vzdálených objektů je ale vyzařování gravitačních vln zanedbatelné a jejich dráhy jsou trvalé. Kolem černých děr se zpravidla nacházejí plynoprachové a akreční disky, které intenzivně září, v rotační ose bývají výtrysky částic ovládané magnetickým polem, které emitují synchrotronní záření. Okolí černé díry se tak paradoxně stává oblastí extrémně svítící v nejrůznějších oborech spektra, mnohdy jde o nejenergetičtější procesy ve vesmíru vůbec. Elektromagnetické jevy spolu s kvantovými jevy umožňují dokonce extrakci energie ze samotné černé díry, jde ale mnohdy o procesy za hranicemi obecné relativity, která je pouze teorií gravitační interakce, zatímco ostatní tři interakce umíme naopak popsat pouze kvantovou teorií. Zaměříme se na možné způsoby úniku energie z černých děr včetně vzniku obřích výtrysků, které zásobí energií široké daleké okolí černé díry, která vůbec není mrtvou oblastí, jak by se z jejího názvu mohlo zdát, ale čile žijícím organizmem.

### Morfologie černé díry

Způsob, jakým je zakřivený časoprostor kolem sféricky symetrického nerotujícího tělesa poprvé popsal německý fyzik a astronom Karl Schwarzschild v roce 1916. V dosti velké vzdálenosti od tělesa je časoprostor plochý a dráhy těles lze počítat ze speciální relativity nebo newtonovské mechaniky. Pokud má těleso hmotnost soustředěnou ve velmi malé oblasti (pro naše Slunce by to muselo být v kouli o poloměru tři kilometry, pro Zemi jde dokonce o devět milimetrů), objeví se kolem něj oblast, ze které nemohou uniknout žádné částice, tedy ani fotony. Této oblasti se říká *horizont událostí* a vnější pozorovatel pod tento horizont žád-

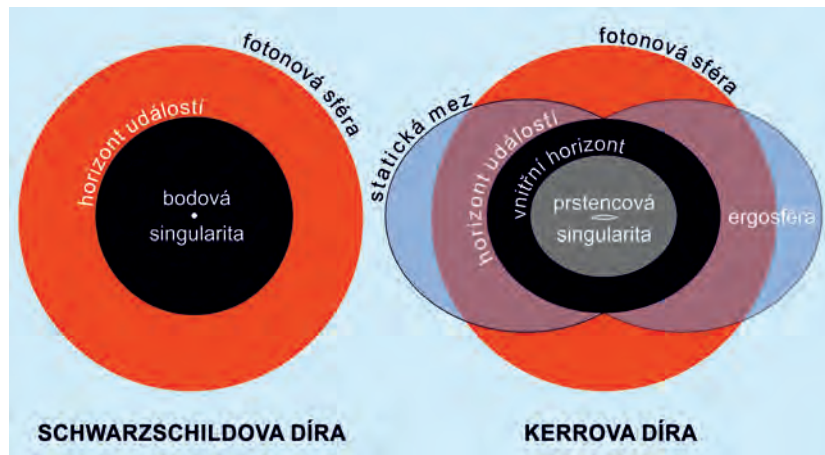
ným způsobem nemůže nahlédnout. Poloměr horizontu událostí nazýváme Schwarzschildův poloměr. Na 1,5 násobku Schwarzschildova poloměru obíhají fotony černou dírou po kruhových drahách. Ty jsou ale nestabilní, takže fotony dříve nebo později dráhu opustí, a buď poletí k vnějším pozorovatelům, nebo skončí v černé díře. Tuto oblast nazýváme *fotonová sféra*. Díky fotonové sféře může vnější pozorovatel nahlédnout i do prostoru za černou dírou – kroužící fotony, které nakonec odletí k vnějšímu pozorovateli, přináší například informace o rozložení látky akrečního disku v oblasti za černou dírou. Posledním charakteristickým rysem Schwarzschildova řešení je singularita v centru černé díry – místo s nekonečnou hustotou látky. Zjevně jde o selhání obecné relativity, vzniku singularity by zabránily kvantové procesy, se kterými obecná relativita nemůže počítat. Nemusí nás to ale trápit, protože je singularita skrytá pod horizontem černé díry a tak jako tak ji nevidíme.

Skutečné černé díry rotují a jejich morfologie je poněkud složitější. Tvar časoprostoru kolem rotujícího sféricky symetrického tělesa našel novozélandský matematik Roy Patrick Kerr až v roce 1963. Všechny pozorované černé díry jsou Kerrovy černé díry. Rotace objektu způsobuje, že horizont událostí už není dokonale sféricky symetrický, ale je poněkud zploštělý – podobně jako rotující kulička z kapaliny. To ale není ten hlavní rozdíl. Vně horizontu událostí se vytvoří velmi zajímavá oblast, tzv. *statická mez*. Uvnitř statické meze nemohou částice obíhat těleso proti směru rotace. Časoprostor je rotací natolik strháván, že pohyb proti „proudu“ už není možný. Oblast mezi statickou mezí a horizontem událostí se nazývá *ergosféra*. Částice prolétající ergosférou ve správném směru nemusí nutně skončit v černé díře, může z ergosféry vylétnout. Je nad horizontem událostí a pohyb v radiálním směru je pro ni možný oběma směry. Za určitých okolností (ukážeme si to u Penroseova mechanismu a u Blanfordova-Znajekova mechanismu) může

**Ergosféra** – oblast u rotující černé díry, která se nachází mezi statickou mezí a horizontem událostí. Částice se v této oblasti nemohou pohybovat proti směru rotace, ale v radiální směru mohou jak spadnout do černé díry, tak uniknout ven. Za určitých okolností mohou vylétnout s vyšší energií, než do ergosféry vletěly. Rozdíl jde na úkor rotační energie černé díry.

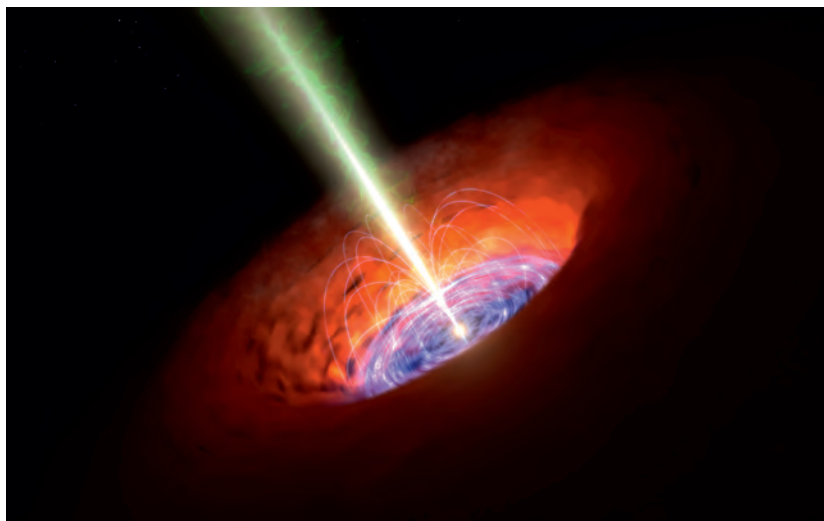
**Fotonová sféra** – plocha ve vzdálenosti 1,5 Schwarzschildova poloměru od černé díry. Na této ploše mohou fotony obíhat černou dírou, dráhy jsou ale nestabilní. Pro pomalu rotující černou díru je fotonová sféra vně statické meze. U rychle rotujících černých děr ji protíná a fotony se v určité oblasti mohou pohybovat jen ve směru rotace.

Morfologie Schwarzschildovy a Kerrovy černé díry.



**Synchrotronní záření** – záření generované relativistickými elektrony rotujícími kolem magnetických siločar nebo elektrony kmitajícími v měnícím se magnetickém poli. Jde o záření s výraznou polarizací, ze které je možné určit směr magnetického pole. Záření je polarizováno v rovině dráhy elektronu, soustředěno do úzkého kužele, vyzařováno v původním směru pohybující se částice a má, na rozdíl od cyklotronního záření, spojité spektrum.

Umělecká vize galaktické černé díry. Černá díra je obklopena horkým prachovým torem, který je zobrazen červeně. V těsném okolí díry je fialový akreční disk. Zeleně jsou znázorněny výtrysky. Zdroj: Harvard University.



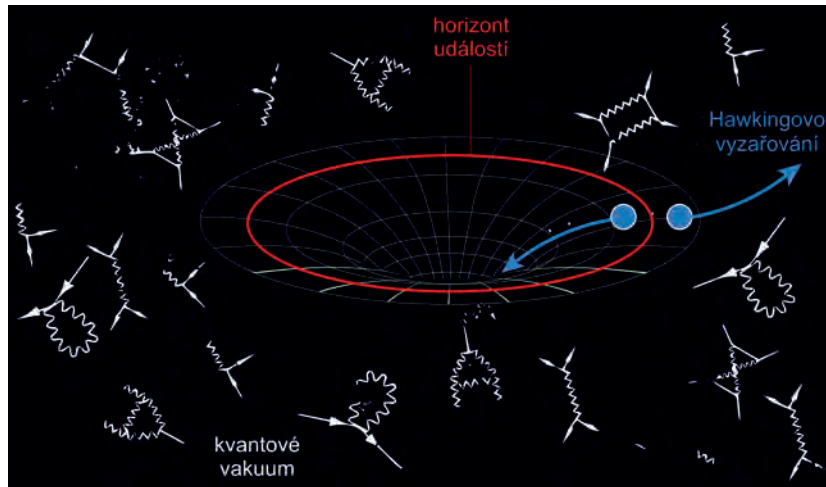
částice dokonce opustit ergosféru s vyšší energií, než s jakou do ergosféry vletla. Nadbytečnou energii odčerpá z rotační energie černé díry. Fotonová sféra je stále ve vzdálenosti 1,5 násobku Schwarzschildova poloměru, proto je pro pomalu rotující černé díry vně ergosféry. Pro rychle rotující černé díry ergosféra zasahuje do větších vzdáleností a fotonová sféra ji protíná. Složitější je i stavba Kerrovy díry pod horizontem událostí. Jednak se tam vyskytuje ještě jeden horizont, tzv. *vnitřní horizont*, který mění charakter času a prostoru, a jednak singularita už není bodová, ale tvoří prstýnek.

## Hawkingovo vypařování

Izraelský teoretický fyzik Jacob Beckenstein ukázal v roce 1973, že by černé díry mohly mít některé termodynamické vlastnosti. Jedním z výsledků jeho úvah bylo přiřazení velmi nízké teploty povrchu černé díry. Této teplotě říkáme *Beckensteinova teplota*. Šlo víceméně pouze o nadhozený koncept. Detailně ho propočítal z kvantové teorie pole anglický teoretik Stephen Hawking. V roce 1975 ho to přivedlo k myšlence kvantového vyzařování černých děr. Podle kvantové teorie musí ve vakuu vznikat fluktuace elektromagnetického pole. Plyne to z relací neurčitosti, které neumožňují, aby současně byla nulová jak hodnota pole, tak jeho hybnost. Tyto fluktuace vedou ke vzniku virtuálních

(nezachytitelných) elektronových-pozitronových párů. Jakoby z ničeho se vynoří dvojice částic – elektron a pozitron, aby po krátké chvíli zase zanikly. Jejich energie nás nemusí trápit, tyto částice nikdy nemohou skončit v registračním přístroji, tj. jejich energii nemůžeme žádným způsobem měřit a otázka je jen akademická. Zákon zachování energie nebyl narušen. Virtuální páry samotné polapit sice nemůžeme, ale projevy jejich existence jsou dnes dobře měřitelné – Lambův posuv spektrálních čar, polarizace vakua, stínění nábojů, Casimirova síla atd.

Jiná situace je ale v blízkosti horizontu černé díry, kde tyto páry vznikají v energeticky příznivých podmínkách velmi hojně. Co se stane, pokud jeden člen páru, ať už elektron či pozitron, skončí pod horizontem? Pokud k tomu dojde, přestává být částice vně černé díry virtuální částicí. Může totiž odlétnout k vnějšímu pozorovateli a ten může změřit její energii. Z virtuální částice se stala reálná částice z masa a kostí. Její energie je nepochybně kladná, a protože musí platit zákon zachování energie pro celý pár, prostým dopočtem zjistíme, že její virtuální partner, který skončil v černé díře, musel mít zápornou energii a hmotnost (vzhledem ke vzdálenému pozorovateli). Kdykoli se v okolí černé díry vynoří reálný pozitron nebo elektron, skončí v černé díře jeho bývalý partner se zápornou energií a hmotností a černá díra přijde právě o tu energii resp. hmotnost, kterou si odlétávající částice odnáší. Z bezprostředního okolí horizontu černé díry tak odlétá množství elektronů a pozitronů (někdy hovoříme o vypařování). Tyto částice spolu mohou anihilovat a dát vzniknout elektromagnetickému záření (pak už hovoříme o vyzařování). Hawking ukázal, že toto elektromagnetické záření opouštějící černou díru má charakter záření černého tělesa o Beckensteinově teplotě. Černá díra by tedy neměla do sebe uzavřít hmotu a energii navěky, Hawkingovým mechanismem by se černé díry měly postupně vypařovat a nakonec zcela zmizet. Jak pro hvězdné, tak pro galaktické černé díry jde ale o časy neporovnatelně delší, než je existence vesmíru. Například pro černou díru o hmotnosti Slunce je Beckensteinova teplota  $10^{-7}$  kelvinu a doba vypaření  $10^{62}$  let, u galaktické černé díry o hmotnosti  $10^8$  Sluncí jde o  $10^{-14}$  kelvinu a  $10^{86}$  let. V současnosti jde tedy o zajímavou hypotézu, jejíž potvrzení nebo vyvrácení není v možnostech soudobé experimentální techniky. Jedno ale jisté je: obecná relativita k popisu černé díry nestačí, v okolí černých děr nelze opomíjet kvantové jevy, které s sebou přinášejí zajímavé úkazy za hranicí obecné teorie relativity.



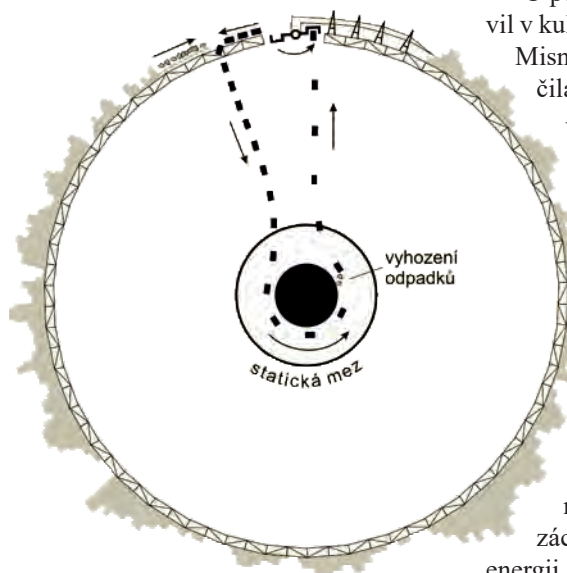
V blízkosti horizontu vznikají páry fotonů Hawkingova záření. Černá díra se chová, jakoby měla na povrchu Beckensteinovu teplotu. Zdroj: Alexander Kruckov.

**Lorentzova síla** – síla, kterou působí magnetické pole na pohybující se nabitě částice. Je úměrná náboji částice a vektorovému součinu rychlosti částice a působícího magnetického pole. Směr má kolmý na rychlost částice i na aplikované magnetické pole. Síla je nulová pro částici pohybující se ve směru magnetických siločar.



**Pinč efekt** – plazmová trubice nebo vlákno protékané elektrickým proudem generuje magnetické pole, které působí Lorentzovou silou na plazma a snaží se ho stlačit k ose. Stlačit se anglicky řekne „pinch“, odtud název jevu. Po čase se ustaví rovnováha mezi gradientem tlaku plazmatu, který se snaží plyn rozepnout, a Lorentzovou silou, která pinč komprimuje. Tato rovnováha je nestabilní a pinč tohoto typu se rychle rozpadá. Stabilnější jsou helikální pinče, které mají nenulovou jak azimutální tak osovou složku pole i proudu.

Penroseův mechanismus v praxi v knize „Gravitation“.  
Zdroj: Princeton University Press.



## Penroseův mechanismus

Na konci 60. let 20. století řešil problematiku úniku energie z rotující černé díry anglický matematik Roger Penrose. V roce 1971 předložil zajímavý mechanismus. Pokud vletí do ergosféry ve směru rotace elementární částice, může vyletět s vyšší energií, než měla. V ergosféře ale musí dojít k jejímu rozpadu na dvě částice ( $A \rightarrow A' + B$ ). Pokud jsou parametry rozštěpení vhodně nastaveny, vyletí částice  $A'$  z ergosféry s vyšší energií, než měla částice  $A$  při vstupu do ergosféry. Částice  $B$  je virtuální částice, která nemůže skončit v registračním přístroji a která může mít zápornou energii/hmotnost vzhledem k pozorovateli v nekonečnu. Jaký je výsledek takového procesu?  $A$  vletí do ergosféry, vyletí z ní  $A'$  s vyšší energií, než měla  $A$ , a částice  $B$  spadne do černé díry a odebere jí odpovídající množství momentu hybnosti. Pokud by nedošlo k rozpadu částice v ergosféře, dojde k opačnému procesu: částice předá část své energie rotující černé díře a vyletí ven s nižší energií. Závěr je tedy jednoduchý: částice, která se v ergosféře rozpadne a její dceřiná částice vyletí ven, může získat energii a zpomalit rotaci černé díry. Naopak částice, která se nerozdělí a pouze prolétne ergosférou, zrychlí rotaci černé díry.

O pouhé dva roky později, v roce 1973, se Penroseův proces objevil v kultovní učebnici obecné teorie relativity *Gravitation* (autory byli Misner, Thorne a Wheeler). Je zde popsána civilizace, která si zotročila rotující černou díru. Kolem ní postavila konstrukci, na níž žije – má zde postavena obydlí, továrny i další civilizační výtěžky. Jako každá civilizace se i tato potýká s odpadky. A protože jde o inteligentní civilizaci, využije Penroseův mechanismus. Odpadky nacepe do kontejneru, který vystřelí pod vhodným úhlem do ergosféry černé díry. Kontejner představuje částici  $A$  z Penroseova mechanismu. V ergosféře se otevře záklópka a z kontejneru se vysypou odpadky do černé díry. Prázdný kontejner odpovídá částici  $A'$ , která vyletí ven s vyšší energií, a odpadky letící do černé díry odpovídají částici  $B$ , která má vzhledem ke vzdálenému pozorovateli zápornou hmotu/energií. Kontejner se po téměř balistické dráze vrátí k civilizaci, ale prázdný a přitom s vyšší energií, než měl. Nadbytečnou energii použije civilizace k roztočení zachytného kola, a to pak vyrábí energii. Civilizace tak získává energii na úkor rotace černé díry. Nemůže to dělat navěky, s každým

kontejnerem se zmenšuje moment hybnosti černé díry, až jednou jejich černá díra zcela ztratí rotaci a stane se Schwarzschildovou černou dírou bez ergosféry a dotyčná civilizace bude mít po žížalkách.

Účinnost Penroseova procesu má svá omezení. Při optimálním nastavení parametrů může mít částice vylétávající z ergosféry maximálně o 20,7 % vyšší energii než částice, která do ní vlétla. V případě, že se civilizaci podaří černou díru zcela zastavit, mohla z ní získat maximálně 29 % energie odpovídající celkové hmotnosti černé díry. Penroseův proces je zajímavou mechanickou úlohou a byl odrazovým můstkem k dalším procesům čerpajícím energii z rotace černé díry. Ty jsou zodpovědné za vznik výtrysků vysávajících energii černé díry za pomoci magnetického pole. Jde zejména o dva mechanismy: *Blanfordův-Znajekův* a *Blanfordův-Payneův*.

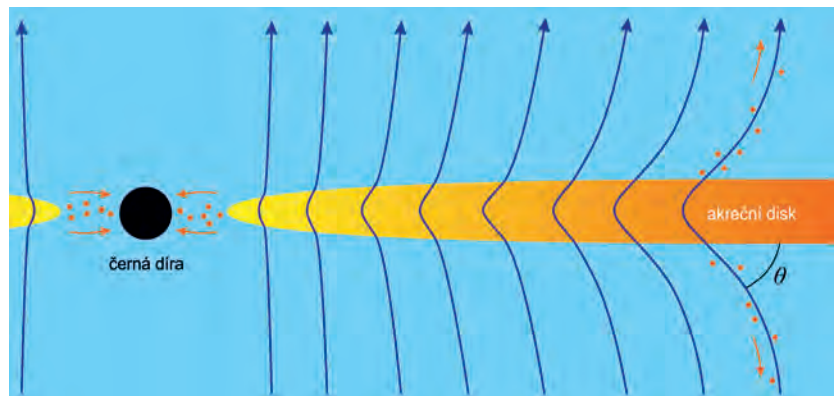
### Blanfordův-Payneův mechanismus (BP)

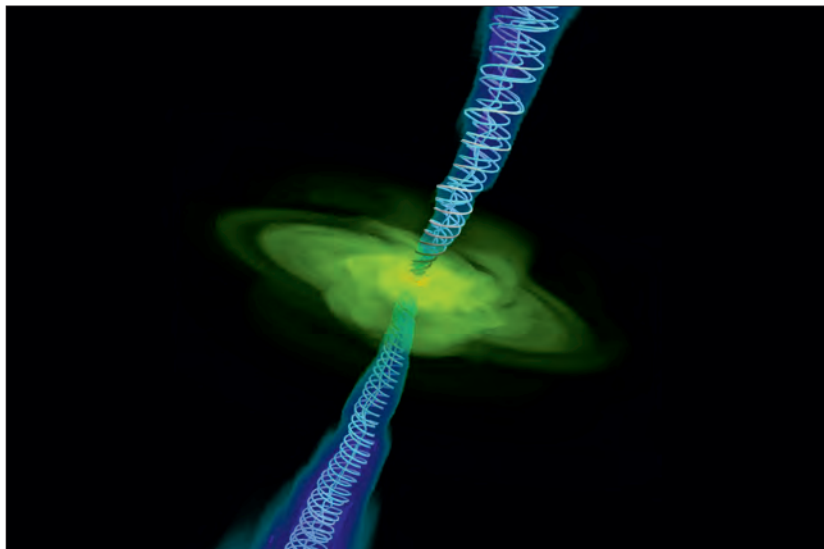
Jeden z mechanismů vzniku výtrysků u černých děr navrhli britský teoretik Roger Blandford a americký astrofyzik David Payne z Kalifornského technologického institutu v roce 1982. Předpokládali, že černá díra kolem sebe má akreční disk ponořený do slabého magnetického pole. Zdrojem tohoto pole může, ale nemusí být sám akreční disk. Existenci takových polí dokazuje měření synchrotronní emise z akrečních disků černých děr. Magnetické pole je vmrznuté do plazmatu akrečního disku, tj. siločáry magnetického pole sledují pohyb látky (jak rotační, tak radiální) akrečního disku. Magnetické pole rotuje spolu s akrečním diskem a siločáry jsou charakteristicky deformovány. Z akrečního disku nevystupují kolmo, ale svírají s povrchem disku úhel  $\theta$ . Blandford s Paynem ukázali, že pokud je tlak látky v akrečním disku větší než tlak odpovídající magnetickému poli a siločáry vystupují z disku pod úhlem  $\theta$  větším než  $60^\circ$ , dojde k zajímavému jevu. Gradient tlaku látky vytlačí z plazmatu akrečního disku nabitě částice, a ty se začnou pohybovat podél siločar magnetického pole. Nepůsobí na ně Lorentzova síla, protože



Výsledky numerické simulace výtrysků unikajících z velmi hmotné (galaktické) černé díry. Magnetické pole způsobuje typickou smyčkovou nestabilitu (vyhnutí do boku). Šroubovice na obrázku představuje dráhu nabitých částic. Zdroj: Berkeley Lab, Purdue University, NASA.

*Blanfordův-Payneův mechanismus. Plazma padá z akrečního disku po spirálách do černé díry a navíc je vytlačováno podél siločar magnetického pole, pokud svírají s povrchem akrečního disku úhel větší než  $60^\circ$ .*





Výsledek počítačové simulace pádu látky do černé díry (žlutě). Část látky nespadne do černé díry, ale klouže podél siločar magnetického pole kolmo na akreční disk (oblast je příliš malá na to, aby byla vidět). Ve velké vzdálenosti od černé díry má pole tvar šroubovice a vytváří charakteristickou magnetickou trubici urychlující částice na značné rychlosti. Simulace: A. Tchekhovskoy/LBNL.

jejich rychlost má stejný směr jako magnetické pole (jde o tzv. bezsilovou konfiguraci). Vznikne ustálený tok částic podél siločar – tedy výtrysk z černé díry. Ve větších vzdálenostech od akrečního disku magnetické pole už nerotuje spolu s diskem, proto vzniká charakteristická šroubovicová struktura magnetického pole, které vytvoří magnetickou trubici. Magnetické pole jednak tlačí nabitě částice k ose (tzv. *pinč efekt*) a jednak je vypuzuje do velkých vzdáleností od černé díry. Jde o podobný jev, jako když po ránu stisknete zubní pastu, a ona vystříkne kolmo na směr stisku. U výtrysku je za stisk

odpovědné magnetické pole, které změní směr pohybu nabitých částic.

Blanfordův-Payneův mechanismus potřebuje existenci akrečního disku, ideální je tenký disk, u něhož je úhel výstupu siločar z disku velký. Materiál, který se dostává do výtrysku, pochází z akrečního disku (byl zachráněn před pádem do černé díry), převážně jde o hadrony, tj. částice tvořené kvarky. Tím se Blanfordův-Payneův mechanismus vzniku výtrysku výrazně odlišuje od Blanfordova-Znajekova mechanismu, kde jde především o leptony. V blízké budoucnosti bude možné oba mechanismy experimentálně odlišit. V současnosti jsou k dispozici celoplanetární radioteleskopické sítě, například EHT (*Event Horizon Telescope*), které dokážou fotografovat těsné okolí černých děr. Právě taková zařízení by v budoucnosti mohla rozhodnout, který z obou mechanismů se u dané černé díry uplatňuje. Mohou samozřejmě existovat i mechanismy další, které dosud neznáme.

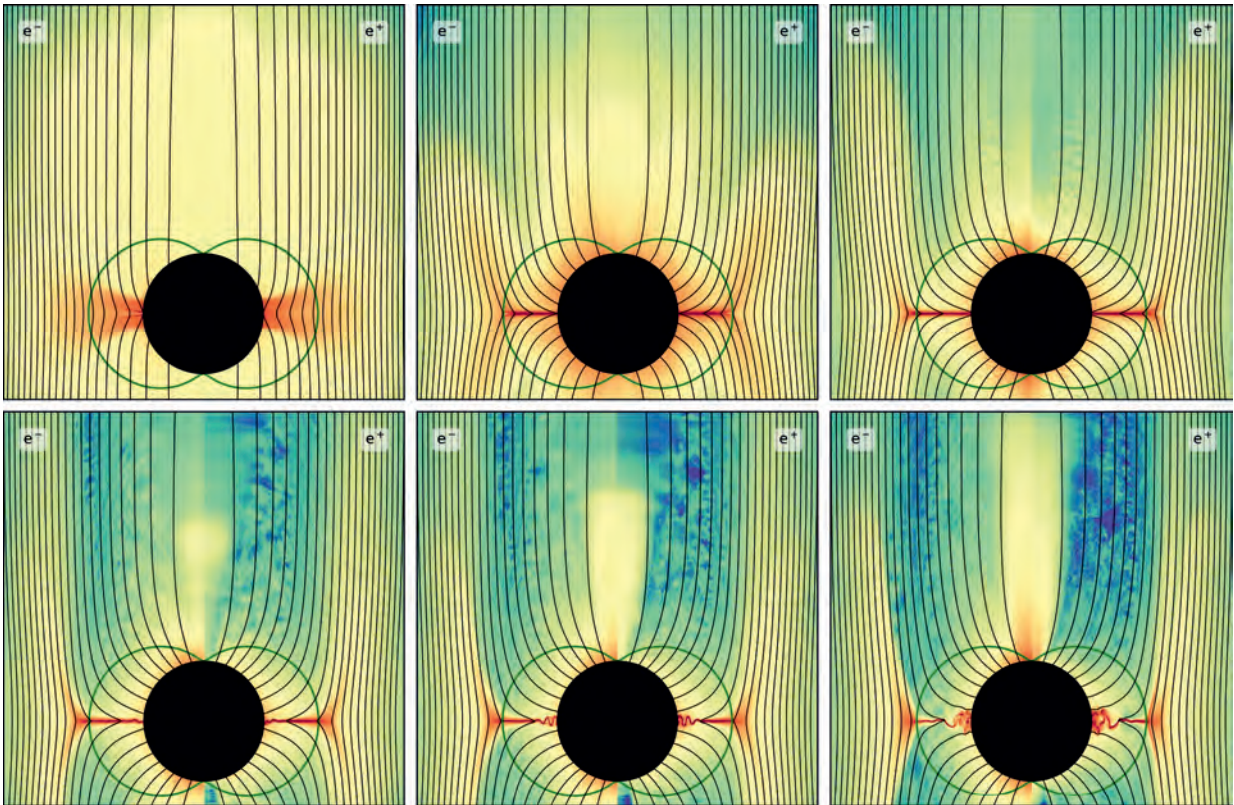
### Blanfordův-Znajekův mechanismus (BZ)

Jiný mechanismus navrhl už v roce 1977 britští teoretici Roger Blanford a Roman Znajek. Není bez zajímavosti, že rodiče Romana Znajeka emigrovali po druhé světové válce z Polska do Británie, kde Znajek vystudoval teoretickou astrofyziku v Cambridgi. Později se dal na

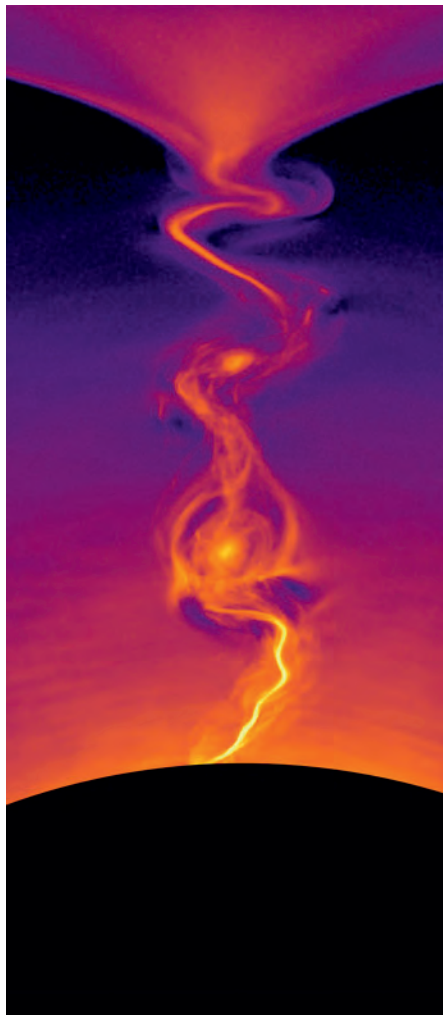


politickou dráhu a stal se dlouholetým členem zastupitelstva Londýna. Vraťme se ale zpět ke vzniku výtrysku u černé díry. Tentokrát výtrysk nevzniká z materiálu disku, ale z elektronových-pozitronových párů objevujících se v blízkosti černé díry. Kolem černé díry je magnetické pole, které je buď generováno akrečním diskem, nebo jde o vnější magnetické pole. V blízkosti černé díry vzniká také silné elektrické pole. Jednou z možností jeho geneze je proměnné magnetické pole, druhou separace náboje nabitých částic. Oba mechanismy mohou být provázané. V silném elektrickém poli jsou nabitě částice urychlovány a září. Vzniklé fotony se rozpadají na elektronové-pozitronové páry. Elektrony a pozitrony z páru jsou opět urychlovány a vytvářejí další páry, až dojde k lavinovému efektu. Pokud rotuje černá díra rychleji

Počítačová simulace vzniku Blanfordova-Znajekova výtrysku (na obrázku je svisle vzhůru). V levé polovině jsou simulovány elektrony, v pravé polovině pozitrony. Barva odpovídá koncentraci částic (červená nejvyšší, modrá nejnižší). Černé čáry jsou povrchy magnetických trubic. Zelená křivka je statická mez (vnější obal ergosféry). V rovníkové oblasti je dobře vidět látka akrečního disku padající do černé díry (tmavě červená barva). Zdroj: Kyle Parfrey, LBNL, NASA GSFC.







Detail numerické simulace pádu látky z akrečního disku do černé díry. Zdroj: Kyle Parfrey, LBNL, NASA GSFC.

než magnetické pole, dojde ke vzniku dvou kolimovaných, opačně orientovaných výtrysků ve směru osy rotace černé díry. Elektrony a pozitrony jsou (podobně jako při Blanfordově-Paynově mechanismu) vedeny magnetickým polem do magnetické trubice vytvořené ve větší vzdálenosti od černé díry.

Jaké jsou základní rozdíly obou mechanismů? BP mechanismus získává energii z akrečního disku, BZ mechanismus z rotační energie černé díry (obdobně jako při Penroseově mechanismu). U BP mechanismu jsou výtrysky kolmé na rovinu akrečního disku, u BZ mechanismu jsou rovnoběžné s rotační osou černé díry (oba směry mohou být totožné). BP mechanismus vede na husté hadronové výtrysky, které čerpají částice z akrečního disku. BZ mechanismus vede na řídké leptonové výtrysky tvořené elektrony a pozitrony vznikajícími reakcí párů v blízkosti černé díry. Ve výtrysku jsou samozřejmě přítomny také fotony, ať už primární nebo sekundární (vznikající synchrotronním zářením). Nabité leptony mohou strhávat hadrony z mezihvězdného či galaktického prostředí, a tak může BZ výtrysk obsahovat ve větší vzdálenosti od černé díry i hadronovou složku. Aby mohl BZ výtrysk čerpat energii z rotující černé díry, měly by v její ergosféře také vznikat leptony se zápornou energií vzhledem k vnějšímu pozorovateli (například jeden z členů páru), které po pádu do černé díry sníží její moment hybnosti. Je to stejné jako u Penroseova jevu. Právě takové částice vznikají v současných numerických simulacích a dokazují, že BZ mechanismus je životaschopný. Numerické simulace ukázaly, že u tlustých akrečních disků je BP proces nemožný, silně skloněné siločáry vedou k nestabilitě magnetického pole. Zdá se tedy, že u tenkých disků převažuje BP mechanismus a u tlustých naopak BZ mechanismus, který potřebuje disk jen jako zdroj magnetického pole. U disků střední tloušťky budou pravděpodobně probíhat současně oba mechanismy, nicméně nejasnosti kolem geneze výtrysků definitivně vyřeší až přímá pozorování těsného okolí černých děr a detailní numerické simulace umožňující sledovat pohyby jednotlivých částic.

■ Petr Kulhánek, 19. 7. 2019, AB 27, 28/2019

## Na lovu gravitačních vln

První záblesk gravitačních vln byl zachycen dne 14. září 2015, právě sto let od představení Einsteinovy obecné teorie relativity. Byla to velká sláva, neboť první zachycený signál nejenom, že ukázal, že gravitační vlny existují, ale potvrdil do té doby jen teoretickou možnost sloučení dvou černých děr a vysvětlil, jak vznikají černé díry středních hmotností. Ke zveřejnění došlo až na tiskové konferenci dne 11. února 2016. K takové prodlevě byl podstatný důvod: bylo třeba vše mnohonásobně ověřit a ohlásit objev až tehdy, kdy bude zcela jasné, že nejde o blamáž. Vznešeně se sice hovořilo o otevření nového gravitačního okna do vesmíru, ale v tu chvíli nebylo vůbec jasné, zda je naděje na zachycení nějakého dalšího záblesku. Dnes už víme, že slova o novém okně do vesmíru nebyla nadnesená.

### Gravitační vlny u Země

Gravitační vlny jsou záhyby prostoru a času šířící se rychlostí světla. Naše přístroje zachytí jen ty nejsilnější signály, které vznikají například při sloučení dvou černých děr, což byl právě první případ detekce.

A i takový signál je neskutečně slabý. Relativní změna vzdálenosti je pouhých  $10^{-21}$ , tedy průchodem gravitační vlny se změní délka metrové tyče o  $10^{-21}$  metru. To odpovídá změně vzdálenosti Země od Slunce o rozměr jediného vodíkového atomu! A přesto jsme nyní schopni rutinně takové změny pozorovat novou generací interferometrických detektorů a dokonce signály vyhodnocovat. Při závěrečném sloučení dvou černých děr se zkracuje perioda oběhu obou těles, což s sebou nese nárůst frekvence gravitačních vln. Z pozorované změny frekvence lze odhadnout hmotnost objektů, z té zase uvolněnou energii a z pozorované intenzity

**Gravitační vlna** – periodicky se šířící zakřivení času a prostoru. Může vzniknout v okolí těles s nenulovým kvadrupólovým momentem, například kolem dvojice rotujících kompaktních hvězd. Právě tyto vlny by měly být nejběžnější a mít frekvenci od 0,1 mHz do 10 kHz. K první přímé detekci gravitačních vln došlo dne 14. září 2015. Gravitační záblesk ze splynutí dvou černých děr středních hmotností ve vzdálenosti 1,3 miliardy světelných roků zachytily dva americké přístroje LIGO.

Počítačová simulace a vizualizace gravitačních vln vznikajících při sloučení dvou černých děr. Zdroj: Mark Garlick, Science Photo, Getty Images.





Současné (kroužky) a budoucí (hvězdičky) detektory gravitačních vln. Podkladová mapa: Wikipedia, STyx.

**LIGO** – Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory, největší světový interferometr pro hledání gravitačních vln s délkou ramen 4 km. Postaveny jsou dva velké detektory stejného typu, jeden v Livingstonu a druhý v Hanfordu (USA). Oba velké přístroje doplňuje dvoukilometrový interferometr v Hanfordu. Uvažuje se o stavbě dalšího stroje v Indii. Frekvenční rozsah detektoru je od 10 Hz do 10 kHz. Detektor byl uveden do provozu v roce 2002. Od roku 2010 do roku 2015 probíhala kompletní rekonstrukce, jejímž cílem bylo výrazné zvýšení citlivosti přístroje. První přímá detekce gravitačních vln se podařila 14. září 2015. Do konce roku 2021 bylo zachyceno 90 průkazných signálů.

záblesku vzdálenost objektu. Nejproblematictější je určit, ze kterého směru k nám gravitační signál doputoval. Ke zjištění orientace vlnoplochy se využívá vzájemné zpoždění signálu v různých detektorech. Čelo vlnoplochy totiž přichází k různým detektorům v různý čas. Rozdíly nejsou veliké, jde řádově o deset milisekund, ale jsou měřitelné. Z časů příchodu gravitačního záblesku k jednotlivým detektorům lze určit orientaci čelní vlnoplochy, a tím směr ke zdroji signálu. Každý další detektor umožní nejen pozorování větší části oblohy, ale především zpřesní odhad polohy zdroje. Proto se počítá s vybudováním detektoru LIGO v Indii, neboť v této oblasti světa detektor chybí. Evropa má v plánu vybudovat na pomezí severu kontinentu podzemní detektor Einstein. Pokud se plány vydaří, měla by mít síť velkých pozemských detektorů v budoucnosti šest členů.

Děje ve vesmíru tak už nesledujeme jen v tradičním elektromagnetickém oboru, ale využíváme kosmické záření, neutrína a v poslední době i gravitační vlny. Počet „oken do vesmíru“ se postupně rozrůstá, což nám umožňuje sledovat děje, o jejichž pozorování snily generace astronomů a fyziků před námi.

## Současný stav

Od roku 2015, kdy byly gravitační vlny polapeny poprvé, se hovoří o tzv. *pozorovacích kampaních*. Doposud proběhly tři. Mezi nimi se nastavují přístroje a provádějí nutné výměny některých komponent. První kampaň, označovaná O1, se uskutečnila od 12. září 2015 do 19. ledna 2016. Byla doménou nově zrekonstruovaných přístrojů LIGO nacházejících se v americkém Hanfordu a v Livingstonu. Druhá pozorovací kampaň probíhala od 30. listopadu 2016 do 25. srpna 2017. Do pozorování se dne 1. srpna 2017 zapojil evropský detektor Virgo a 14. srpna detekoval první záblesk. Dne 17. 8. všechny tři přístroje zachytily první sloučení dvou neutronových hvězd, tzv. jev *kilonovy*. Dosud poslední pozorovací kampaň O3 začala 1. dubna 2019 a byla násilně přerušena 27. března 2020 pandemií covidu. Měření neprobíhala v říjnu 2019, kdy došlo k odstraňování vzniklých závad. Do měření se poprvé zapojil zbrusu nový japonský podzemní detektor KAGRA, zatím jen v testovacím režimu a offline, výsledky tedy nemohly být průběžně porovnávány. Další pozorovací kampaň je plánována na prosinec 2022, její spuštění je ale závislé na průběhu pandemie. V pozorovací kampani O4 by měla být KAGRA již plnohodnotným členem.

Za tři proběhlé kampaně bylo prokazatelně detekováno přesně 90 gravitačních záblesků. Ve většině případů šlo o sloučení dvou černých děr, ve čtyřech případech a sloučení dvou neutronových hvězd (zde je k dispozici i elektromagnetický signál) a ve dvou případech o sloučení černé díry a obíhající neutronové hvězdy. Existuje celá řada dalších „podezřelých“ událostí, které nebyly statisticky průkazné. Ze zachycených záblesků lze udělat už jakous takous statistiku a řádově vychází, že v oblasti jednoho megaparseku krychlového dochází k 0,1 události za rok. Mnoho záblesků má průběh „jako přes kopírák“, což nás ujišťuje o dobrém pochopení procesů při závěrečném sloučení dvou černých děr. Některé záblesky jsou ale atypické a o to cennější. Přinášejí totiž svědectví o procesech na hranici našeho poznání a motivují nás k dalšímu přemýšlení o vesmíru.

**Virgo** – největší evropský interferometr pro hledání gravitačních vln s délkou ramen 3 km. Je umístěn u vesničky Cascina, 10 km od italské Pisy proslulé svou šikmou věží. Detektor byl uveden do provozu v roce 2007. Od roku 2010 do roku 2017 probíhala rekonstrukce, jejímž cílem bylo podstatně zvýšení citlivosti. První experimentální běh po rekonstrukci proběhl v srpnu 2017 (společné pozorování s americkým LIGO) a 14. srpna se podařilo zachytit první gravitační signál. Detektor Virgo je součástí observatoře EGO (European Gravitational Observatory). Pro přístroj po rekonstrukci se také často používá zkratka Adv (Advanced Virgo).

Jedno z ramen japonského podzemního a kryogenního detektoru KAGRA. Zdroj: KAGRA, Tokijská univerzita.





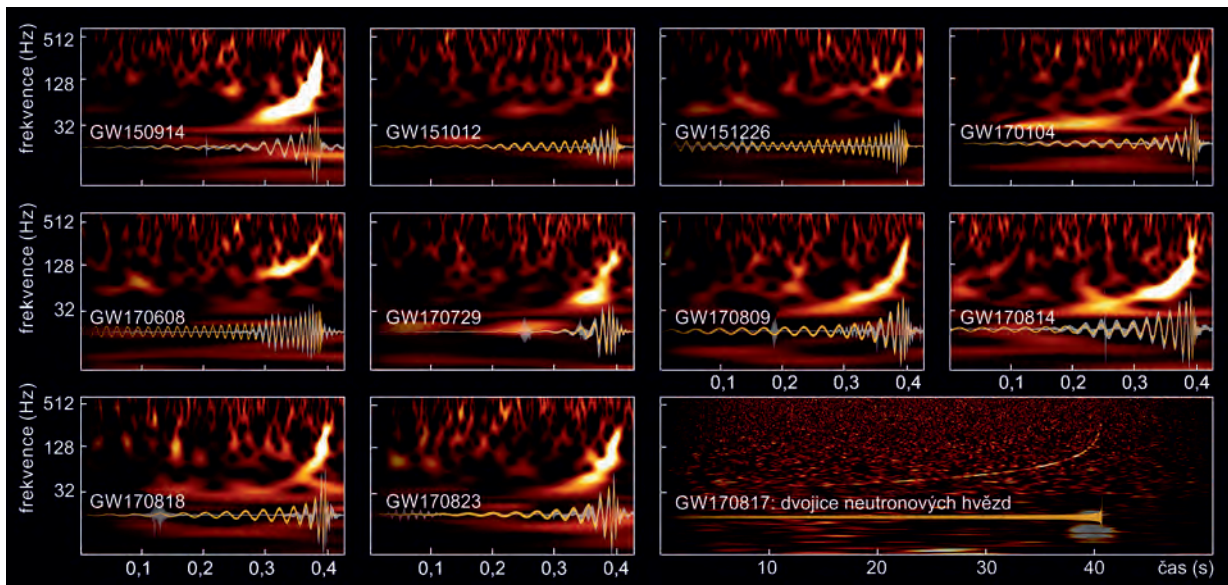
**KAGRA** – Kamioka Gravitational Wave Detector, tříkilometrový podzemní interferometrický detektor gravitačních vln, který byl vybudován v Japonsku v blízkosti slavného neutrinového detektoru Super-Kamiokande. Jako první detektor na světě má chlazená koncová zrcadla. Po zprovoznění v únoru 2020 doplnil stávající detektory LIGO (USA) a Virgo (Itálie). Větší síť detektorů umožňuje vyšší přesnost lokalizace zdrojů gravitačních vln. Původní název detektoru byl LSGT (Large Scale Gravitational Wave Telescope).

Průběh některých typických gravitačních záblesků. Jejich frekvenční spektrum je znázorněné intenzitou barvy na pozadí. Dobře patrné je typické narůstání frekvence před splynutím objektů. Splynutí neutronových hvězd trvá podstatně déle než splynutí černých děr. Zdroj: LIGO, Virgo, Georgia Tech, S. Ghonge, K. Jani.

## Benjamínek KAGRA

Detektor KAGRA (zkratka z *Kamioka Gravitational Wave Detector*) byl vybudován v Japonsku, v blízkosti detektorů Super-Kamiokande a XMASS. V oblasti je ještě jeden detektor temné hmoty – NEWAGE. Detektory se nacházejí se v hloubce 1 000 metrů pod horou Ikeno. Celá skupina všech těchto detektorů se nazývá Observatoř Kamioka. Detektor KAGRA byl vybudován Výzkumným ústavem kosmického záření (ICRR) při Tokijské univerzitě. Počátky projektu sahají až do sedmdesátých let 20. století, vážněji byl projekt brán od roku 2010. Původní název projektu byl LCGT (*Large Scale Gravitational Wave Telescope*). Projektu předcházelo zprovoznění malých prototypů TAMA 300 (přímo v Tokiu, v letech 1998 až 2008) a CLIO (v plánované oblasti, od roku 2006), u něhož se testovaly kryogenní technologie. Chlazení zrcadel je naprostou novinkou, od níž si fyzikální komunita hodně slibuje. Potlačení šumu by mělo umožnit zvýšení citlivosti detektoru. Ta by měla být ve finále buď srovnatelná s LIGO, nebo dokonce lepší, přestože jsou ramena detektoru KAGRA o kilometr kratší.

Tunel pro budoucí detektor byl hlouben v letech 2012 až 2014. Od roku 2014 byl sestavován samotný detektor, který patří k interfero-



metrickým detektorům. Laserový paprsek je rozdělen do dvou ramen a po odrazu od koncových zrcadel se z interferenčního obrazce vyhodnocuje poloha koncových zrcadel zavěšených na speciálním závěsu. Zrcadla jsou vyrobena ze safíru (odráda korundu, oxidu hlinitého) a chlazená na teplotu 20 K. Původně měla být stavba detektoru dokončena v roce 2018, ale nakonec se o dva roky protáhla. K největším problémům patřilo zatopení už dokončené a částečně osazené laserové haly podzemní vodou v dubnu 2015. Stavaři museli vybudovat speciální odvodňovací systém, který sice zajišťuje, aby se incident neopakoval, ale proudění podzemní vody s sebou přináší zcela nový druh šumu, s nímž se v projektu nepočítalo. Nakonec se detektor podařilo zprovoznit dne 25. února 2020, samozřejmě v testovacím režimu. K první detekci gravitačního záblesku došlo 11. listopadu 2021. Jako plnohodnotný člen sítě gravitačních detektorů by KAGRA měla fungovat v roce 2023.

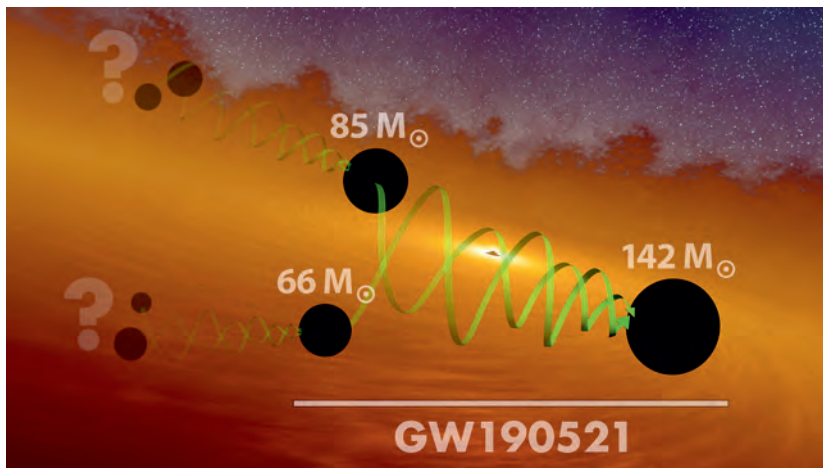


Mapa umístění detektoru KAGRA. Zdroj: KAGRA, ICRR, Tokijská univerzita.

## Nejzajímavější záblesky

**Největší záblesk (GW190521).** Dosud nejintenzivnější záblesk byl detekován při třetí pozorovací kampani dne 21. května 2019. Označení má GW190521. Šlo o sloučení dvou černých děr s hmotnostmi 85 Sluncí a 66 Sluncí. Výsledná černá díra nemá hmotnost rovnou prostému součtu, ale má „jen“ 142 Sluncí. Zhruba osm Sluncí se vyzářilo v podobě gravitačních vln. Určení hmotností je ale značně nepřesné, chyba se pohybuje kolem dvaceti Sluncí. Jde zatím o největší pozorovanou černou díru, která vznikla sloučením dvou menších černých děr a vyplňuje mezeru mezi hvězdnými černými děrami (hmotnost přibližně deset Sluncí) a galaktickými černými děrami (milióny až miliardy Sluncí). Určení polohy zdroje je značně nepřesné (stovky stupňů čtverečních), takže jen odhadujeme, že signál přišel odkudsi z oblasti souhvězdí Vlasy Bereniky, Honící psi či Fénix. Analýza signálu ukázala, že osy rotace černých děr nebyly totožné. To by mohlo znamenat nestabilitu dráhy, která mohla přispět ke zkrácení doby, po níž se díry

**LISA** – Laser Interferometry Satellite Antenna, původně společný projekt ESA a NASA tří sond obíhajících kolem Slunce. Jejich cílem mělo být interferometrické měření gravitačních vln. Ramena interferometru (vzájemná vzdálenost sond) měla být dlouhá pět milionů kilometrů. Realizace se postupně odsouvala, v roce 2011 NASA konstatovala, že projekt nemůže z finančních důvodů uskutečnit. ESA v projektu pokračovala pod názvem NGO (New Gravitational Observatory), v roce 2012 ale byla dána přednost jinému velkému projektu JUICE (mise k Jupiteru). Poté byl projekt vzkříšen pod názvem eLISA (evolved LISA) s rameny interferometru dlouhými „jen“ milion kilometrů. V roce 2017 se opětovně přepracovaný projekt dostal do výběru velkých (L3, Large) misí Evropské kosmické agentury pod původním názvem LISA. Finální délka ramen interferometru bude 2,5 milionu kilometrů. Start je plánován na rok 2034.



Představa hierarchické tvorby černých děr středních hmotností. Zdroj: LIGO, Caltech, MIT, R. Painting (IPAC).

k sobě přibližovaly. Předpokládá se, že každý z předchůdců vznikl sloučením dvou černých děr kdysi v minulosti, neboť jejich hmotnost je příliš vysoká na to, aby vznikli jako závěrečné fáze hvězdného vývoje. Velmi zajímavá je skutečnost, že z oblasti byl ve stejné době také detekován optický záblesk. Vzhledem k nepřesnosti určení polohy gravitačního záblesku je ale souvislost obou událostí velmi nejasná. Sloučení dvou černých děr je obvykle elektromagneticky tiché. K optickému záblesku by mohlo

dojít například tak, že by nově vzniklá černá díra prošla akrečním diskem další černé díry nacházející se v blízkém okolí. Takový scénář, i když v souvislosti s GW190521 občas zmiňovaný, je ale spíše ze světa sci-fi než z oblasti reálných fyzikálních úvah.

**První kilonova (GW170817).** Rekonstrukce evropského detektoru Virgo se značně protáhla, a tak se k americkým detektorům LIGO připojil až v závěru druhé pozorovací kampaně v srpnu 2017, a to na pouhých 25 dní. V jejich průběhu byly detekovány hned dva záblesky. Druhý z nich, označovaný GW170817, byl zcela výjimečný. Dne 17. srpna 2017 bylo totiž poprvé sledováno sloučení dvou neutronových hvězd. Astronom polského původu Bohdan Paczyński navrhl již v roce 1998 v Princetonu, že bude sloučení dvou neutronových hvězd doprovázeno extrémně silným elektromagnetickým zábleskem, pro který se ujal název kilonova (tisíc nov). Pozorování záblesku GW170817 bylo nejen potvrzením Paczyňského teorie, ale také prvním multioborovým pozorováním (v gravitačních vlnách a v elektromagnetickém spektru). Neutronové hvězdy měly hmotnost v intervalu 1,17 až 1,6 Slunce a výsledný objekt, pravděpodobně černá díra, získal hmotnost 2,74 Slunce. Při sloučení se v gravitačních vlnách vyzářila energie odpovídající hmotnosti 0,025 Slunce. Pozorovatelná část gravitačního záblesku byla dlouhá 40 sekund. Z dat bylo možné odhadnout přibližnou vzdálenost na 130 milionů světelných roků. Elektromagnetický signál byl detekován

**Kilonova** – sloučení dvou neutronových hvězd. První scénář navrhl v roce 1998 v Princetonu polský astronom Bohdan Paczyński. Při spojování neutronových hvězd dochází k překotné tvorbě těžkých prvků s jádry většími než železo. Do vytvořených jader jsou natlačovány další neutrony. Těžké izotopy se rychle rozpadají a vytvoří typický gama záblesk. V další fázi oblast opouští horký materiál bohatý na neutrony, který svítí od infračerveného oboru až po ultrafialové záření. Vyzářovaný výkon je tisíckrát vyšší než u běžných nov, proto se události začalo říkat kilonova. Název poprvé použil Brian Metzger z Princetonu v roce 2010.



od infračervené po ultrafialovou oblast a přicházel z eliptické galaxie NGC 4993 ze souhvězdí Hydry. Souvislost gravitačního a elektromagnetického pozorování je v tomto případě vysoce pravděpodobná.

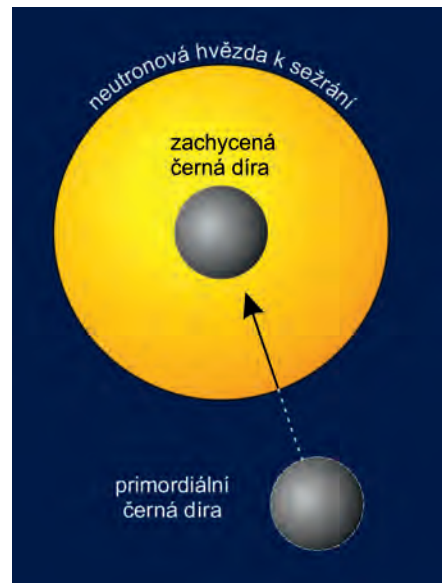
**Černé díry slunečních hmotností (GW190814).** Další zcela atypický záblesk byl pozorován dne 14. srpna 2019. Záblesk přilétl ze směru souhvězdí Velryby a Sochaře a neměl žádný optický protějšek. Jedním z objektů byla černá díra o hmotnosti přibližně 23 Sluncí. Druhý objekt měl hmotnost 2,5 až 2,67 Sluncí. A právě druhý objekt se zcela vymyká dosavadním pozorováním. Pokud by šlo o neutronovou hvězdu, byla by její hmotnost enormní a pravděpodobně nad mezí stability. Pokud by šlo o černou díru, je její hmotnost naopak extrémně malá. Hvězdné černé díry mají typicky hmotnosti kolem deseti Sluncí. Černá díra se zdá jako pravděpodobnější kandidát, ale pak se okamžitě vynoří otázka, jak tak lehká černá díra mohla vzniknout. Tým vědců z japonského Kavliho institutu pod vedením Volodymyra Takhistova navrhl zajímavé řešení. Pokud by existovaly malé (primordiální) černé díry, mohly by tu a tam být zachyceny neutronovou hvězdou. Primordiální černá díra by poté „sežrala“ mateřskou neutronovou hvězdu zevnitř a její hmotnost by ve finále byla srovnatelná s hmotností právě zblajznuté neutronové hvězdy. Úvaha je to sice zajímavá (k publikaci ji přijal věhlasný časopis *Physical Review Letters*), ale zcela nepřehlédnutelný je fakt, že jedna záhada – existence černé díry řádově sluneční hmotnosti – je pouze nahrazena záhadou jinou, a to existencí primordiálních černých děr. Takhistovovu teorii by proto bylo lépe zatím nazývat spíše hypotézou nebo vizí. Ale právě takové vize občas posouvají hranice našeho poznání...

## Otevřené otázky

Ve fyzice gravitačních vln je řada otevřených otázek a výzev. Jednou z nich je možnost zachytit gravitační vlny primordiálních černých děr, které by podle některých teorií mohly vznikat v průběhu velkého třesku. Pokud k tomu skutečně došlo, mohly by takové objekty tvořit podstatnou část temné hmoty, o níž se dosud předpokládá, že je tvořena neznámým typem částic, které se nedaří polapit. Další výzvou je zachycení reliktních gravitačních vln ze samotného velkého třesku. V reliktních gravitačních vlnách je pravděpodobně skryta informace o vzniku vesmíru, takže záchyt těchto vln by znamenal první experimentální

**Neutronová hvězda** – těleso tvořené degenerovaným neutronovým plynem o hmotnosti menší než přibližně  $2,2 M_{\odot}$  (Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez). Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu desítek kilometrů, průměrná hustota  $10^{11} \text{ kg m}^{-3}$  dosahuje hodnot hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobrá, při výbuchu supernovy typu II. Obrovský tlak způsobuje „vtlačení“ elektronů do protonů za vzniku neutronů a neutrín. Neutronové hvězdy byly teoreticky předpovězeny ve 30. letech 20. století.

Takhistovova vize vzniku černých děr slunečních hmotností. Kresba: Aldebaran.





**PTA** – Pulsar Timing Array, metoda detekce gravitačních vln za pomoci vybraných pulzarů z naší Galaxie, jejichž signál je cestou k nám ovlivněn pohupováním na gravitačních vlnách. Signál je sledován sítí radioteleskopů. Tato metoda je testována od roku 2005 na australských radioteleskopech Parkers (Parkers PTA). Existuje i Evropské pole EPTA (European PTA) zahrnující radioteleskopy Lovell, Effelsberg, Westerbork a Nançay a do kolapsu Areciba fungovala severoamerická nanohertzová observatoř NanoGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) složená z radioteleskopů Arecibo a Green Bank. Průlom se očekává po dostavbě obřího pole radioteleskopů SKA (Square Kilometer Array) a spojení všech sítí do jediného celosvětového přístroje.

**SKA** – Square Kilometer Array. Plánovaná síť radioteleskopů, která by měla fungovat jako jediný gigantický přístroj o ploše 1 km<sup>2</sup>. K vybudování bude potřeba území o průměru 6 000 km, předpokládaná cena je dvě miliardy euro. Mělo by jít o tisíce antén třech typů. Jako místo výstavby byla vybrána západní Austrálie a Jižní Afrika. Antény se intenzivně staví od roku 2018. V roce 2021 byl pořízen snímek centra Galaxie, který naleznete na obálce této knihy. V současnosti fungují stovky antén.

data, která by mohla minimálně vyloučit některé z mnoha hypotéz o původu vesmíru. Zajímavá je také fyzika neutronových hvězd, při jejichž splynutí je generován jak elektromagnetický, tak gravitační signál. Dosavadní počet zachycených gravitačních záblesků z těchto událostí je statisticky nižší než radioastronomicky detekované události. Proč tomu tak je, zatím nikdo neví. Možná nám unikají některé mechanismy závěrečného ohňostroje (efektu kilonovy) při splynutí dvou neutronových hvězd. LIGO, Virgo a KAGRA představují počátek budoucí sítě gravitačních detektorů.

Současná technika je schopná detekovat jen gravitační záblesky, tedy přechodné jevy. Soustavná detekce gravitačních vln ze vzájemně se obíhajících kompaktních objektů zatím možná není. Veškeré detekce probíhají jen na vysokých frekvencích, tedy v oblasti stovek hertzů. Gravitační vlny středních frekvencí (desetiny milihertzů až hertze) by měl být schopen detekovat plánovaný vesmírný interferometr LISA – tři kosmické sondy vzdálené 2,5 milionu kilometrů, které budou pomocí laserů zjišťovat polohu testovacích krychlí umístěných v sondách. Na nízkých frekvencích (nanohertze až mikrohertze) by měla fungovat pole radioteleskopů sledující signály z pulzarů rozmístěných v naší Galaxii. Signál by měl být při setkání s gravitační vlnou charakteristicky fázově posunut. Tato metoda detekce se označuje PTA (Pulsar Timing Array) a předpovídá se jí velká budoucnost.

■ Petr Kulháněk, aktualizováno 2022, AB 14, 46/2021

# Nekončící příběh Hubbleovy konstanty

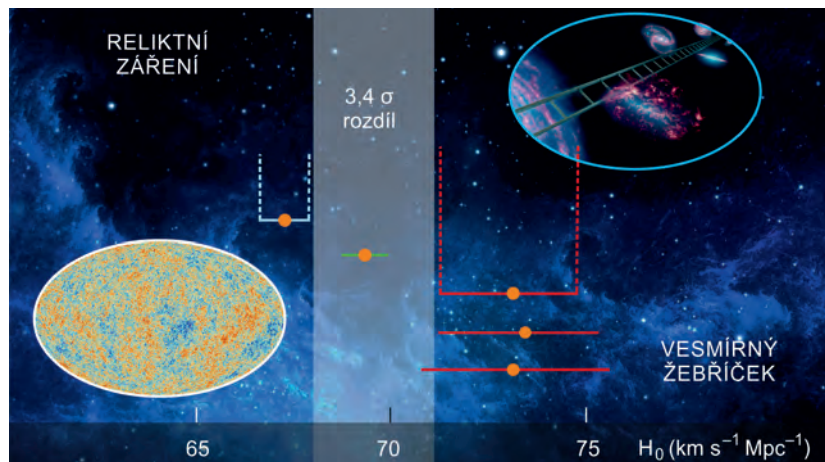
Od roku 2018 se opakovaně vynořují pochybnosti o správnosti našeho chápání expanze vesmíru. Na vině je odlišný výsledek měření Hubbleovy konstanty, která expanzi popisuje, z vlastností reliktního záření a z měření červeného posuvu supernov typu Ia. První metoda dává hodnotu  $67,4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  s nejistotou 1 %, druhá  $73,2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  s nejistotou cca 2,4 %. Obě metody nemají průnik, což někteří vědci za halasného přizvukování senzacechtivých médií interpretují jako průlom v kosmologii a zjevný neúspěch standardního kosmologického modelu. Nejen v astronomii, ale i v jiných oblastech lidských aktivit jsou bohužel na první pohled vždy vidět křiklouni, ať už vykřikují cokoliv. Pojďme se seznámit s měřením Hubbleovy konstanty v širších souvislostech, s možnými systematickými chybami jednotlivých metod, abychom zjistili, že měření jsou ve skutečnosti ve skvělém souladu a naopak poukazují na vysokou míru důvěryhodnosti současného popisu expanze vesmíru.

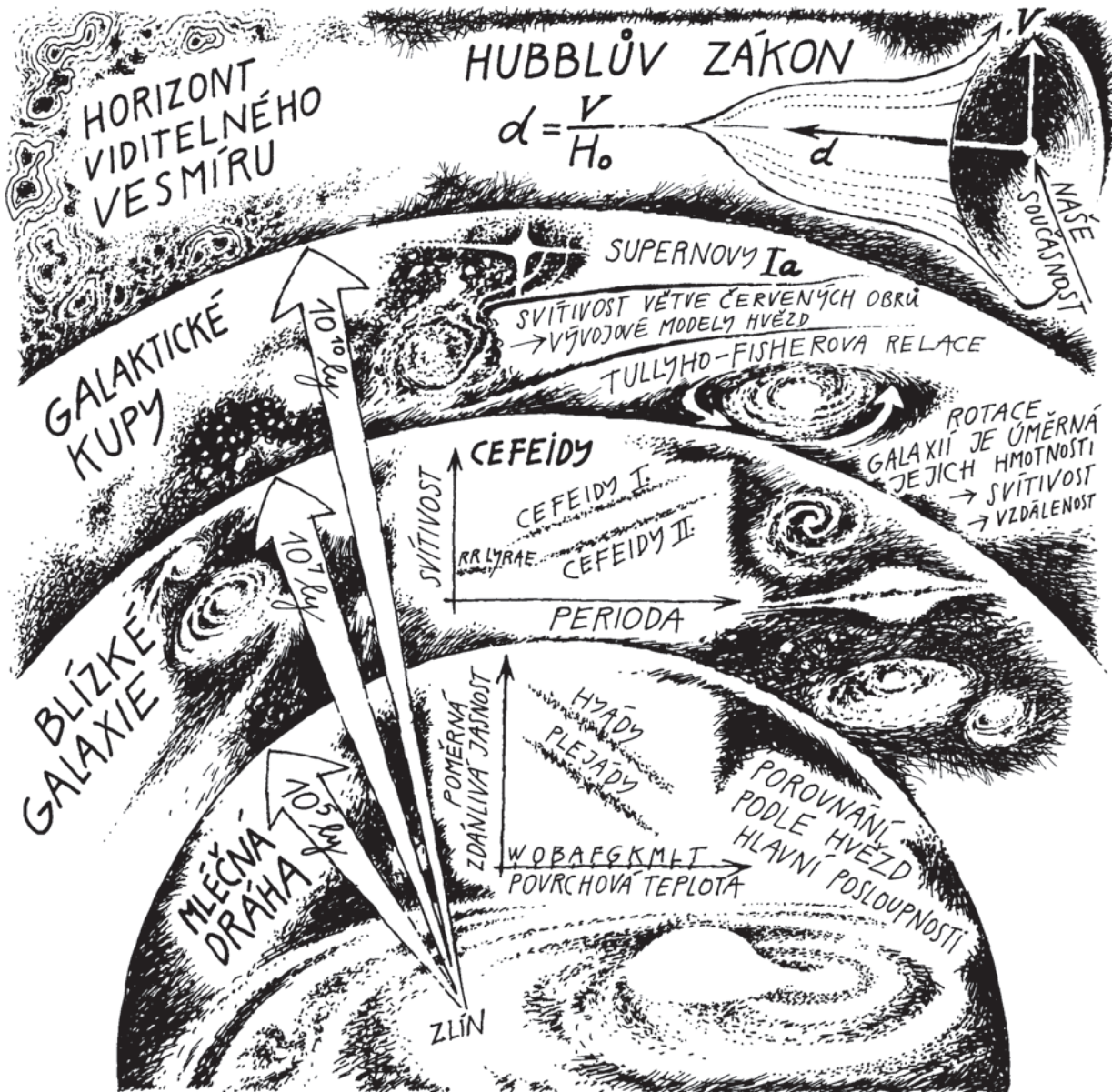
## Temná prehistorie

Základem objevu expanze vesmíru byla měření posuvů spektrálních čar mlhovin, která prováděl Vesto Slipher na Lowellově observatoři v americkém Flagstaffu od roku 1912. Tehdy se ještě hovořilo o mlhovinách, později opatrně o extragalaktických mlhovinách, které se nakonec ukázaly být vzdálenými hvězdnými ostrovy – galaxiemi. Andromeda vykazovala modrý posuv (přibližuje se k nám), ostatní objekty měly vesměs červený posuv. Tento posuv poprvé interpretoval jako expanzi vesmíru belgický kněz Georges Lemaître už v roce 1927. V roce 1929 publikoval stejný výsledek americký astronom Edwin Hubble, který Slipherova

**Hubbleova konstanta** – koeficient úměrnosti mezi rychlostí vzdalování a vzdáleností objektů při expanzi vesmíru. Přesnější definice je dána přes expanzní funkci vystupující v řešeních rovnic obecné relativity. Dnes se hodnota Hubbleovy konstanty odhaduje na přibližně  $70 \text{ km/s}$  na megaparsek. Různé metody dávají poněkud odlišné výsledky, což je nejspíše způsobeno systematickými chybami v odhadu vzdáleností. Hodnotu Hubbleovy konstanty v současné epoše vesmíru označujeme  $H_0$ .

Porovnání hodnot Hubbleovy konstanty naměřených analýzou reliktního záření a metodou standardních svíček.  
Zdroj: Physical Society.





měření doplnil několika dalšími měřeními provedenými na observatoři Mt. Wilson, kde byl ředitelem. Oba pánové dospěli k závěru, že rychlost expanze je úměrná vzdálenosti objektů (čím vzdálenější galaxie, tím rychleji se od nás pohybuje) a oba odhadli koeficient úměrnosti na cca  $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , což znamenalo, že se dvě galaxie vzdálené jeden megaparsek od sebe vzdalují rychlostí 500 km/s. Tento koeficient se dnes nazývá Hubbleova konstanta a faktu, že rychlost je úměrná vzdálenosti objektů se říká Hubbleův-Lemaîtreův zákon. Uvedený výsledek znamenal objev expanze vesmíru.

Není divu, že Lemaîtreovi i Hubbleovi vyšlo pro Hubbleovu konstantu stejné číslo, vycházeli ze stejné sady měření a z tehdejších představ o vzdálenostech ve vesmíru. Hodnota byla chybná a se zpřesňováním vzdáleností ve vesmíru postupně klesala až na dnešních přibližně  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Hubbleova konstanta je konstantní ve smyslu prostoro-rovém, tedy v dané etapě vývoje vesmíru by měla být stejná ve všech jeho místech. Nejde ale o konstantu časovou, v průběhu expanze vesmíru se rychlost expanze mění, a proto se s časem mění i Hubbleova konstanta. Současná hodnota se někdy označuje  $H_0$ .

## Dvě klíčová měření

Jak už bylo řečeno, současná měření Hubbleovy konstanty se opírají zejména o dvě metody. První z nich je analýza fluktuací reliktního záření, z níž plyne řada parametrů raného vesmíru, na základě nichž usuzujeme na vlastnosti současného vesmíru. Z rozboru fluktuací teploty reliktního záření z konce velkého třesku se dá určit stáří vesmíru, podíl atomární látky, temné hmoty, temné energie i charakter expanze. Interpretace výsledků ale závisí na volbě kosmologického modelu. Dnešní model se označuje  $\Lambda$ CDM. Písmeno  $\Lambda$  připomíná zrychlenou expanzi vesmíru popisovanou pomocí kosmologické konstanty  $\Lambda$ . CDM je zkratka pro chladnou temnou hmotu (*Cold Dark Matter*), která je dominantě zodpovědná za dynamiku vesmíru.

První taková analýza byla provedena na základě měření americké sondy WMAP v roce 2003. Dnes nejpreciznější měření pochází ze sondy Planck – poslední výsledky byly zveřejněny v roce 2018. Z těchto měření vychází hodnota Hubbleovy konstanty  $(67,4 \pm 0,7) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Udávaná relativní nejistota je pod jedním procentem.

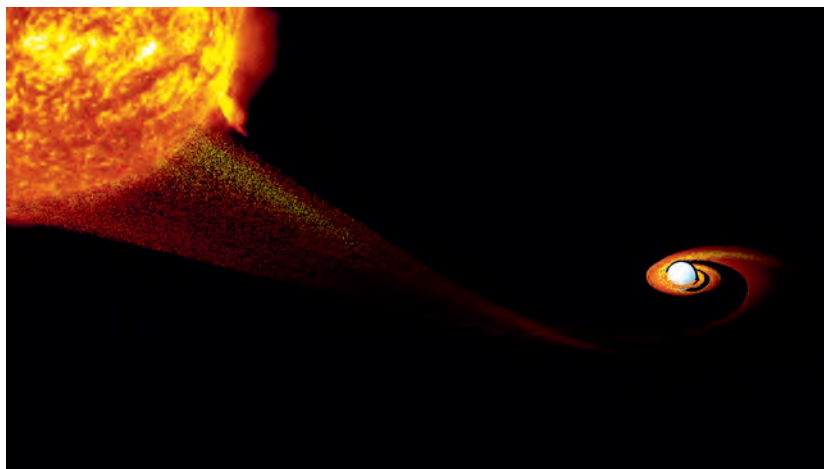
Druhý směr se opírá o měření vzdáleností pomocí tzv. „vesmírného žebříčku“. Na různých vzdálenostech využíváme různé objekty jako

← Různé způsoby měření vzdáleností nás postupně posouvají od blízkých galaxií k objektům v extrémních vzdálenostech. Hovoříme o tzv. kosmologickém (vesmírném) žebříčku měření vzdáleností. Čím dále, tím horší náš odhad je. Kresba Ivan Havlíček.

**Hubbleův-Lemaîtreův zákon** – čím vzdálenější galaxie, tím vyšší rychlostí se od nás díky expanzi vesmíru vzdaluje. Tento vztah experimentálně objevil v roce 1927 belgický kněz Georges Lemaître (využíval měření amerického astronoma Vesto Sliphera). Edwin Hubble vztah nezávisle našel v roce 1929. Koeficient úměrnosti se nazývá Hubbleova konstanta. Vztah samozřejmě platí jen pro velmi vzdálené galaxie, pro blízké galaxie je rychlost expanze malá a převládají vzájemné pohyby galaxií.

**$\Lambda$ CDM model** – všeobecně uznávaný model vesmíru obsahující temnou energii popisovanou v Einsteinových rovnicích kosmologickou konstantou ( $\Lambda$ ), chladnou temnou hmotu (CDM – Cold Dark Matter) a atomární látku. Model  $\Lambda$ CDM věrně popisuje náš vesmír, a proto je často nazýván standardním kosmologickým modelem.





Supernova typu Ia je soustava hvězdného obra a bílého trpaslíka, který svému sousedovi odčerpává atmosféru. Ve chvíli, kdy koncentrace nakradeného materiálu dosáhne kritické úrovně, zažehne se v celém objemu termonukleární reakce. Zdroj: NASA, ESA.

**Supernovy Ia** – závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy složené z bílého trpaslíka a obra (veleobra) nebo hvězdy hlavní posloupnosti. V těsné dvojhvězdě může docházet k přenosu látky na bílého trpaslíka, který tak zvětšuje svoji hmotnost. Po překročení Chandrasekharovy meze ( $1,4 M_{\odot}$ ) se bílý trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy, dojde k explozivnímu termonukleárnímu hoření C a O na  $^{56}\text{Ni}$  v celém objemu trpaslíka a uvolněná potenciální energie se projeví jako supernova typu Ia. Množství energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy.

standardní svíčky, pomocí nichž měříme vzdálenosti. U blízkých galaxií se využívají cefeidy, jejichž skutečnou svítivost známe. Ve větších vzdálenostech (na další příčce žebříčku) se používají supernovy typu Ia, které explodují vždy podobným způsobem. Různá měření za pomoci různých standardních svíček se potom „sešívají“ – vytváří se postupný žebříček, na němž jedna metoda spojitě přechází v další. Na základě měření vzdáleností galaxií za pomoci supernov Ia došly dvě skupiny astronomů

(Riessova a Perlmutterova) nezávisle na sobě v roce 1998 k objevu zrychlené expanze vesmíru. Adam Riess je v současnosti vedoucím projektu SH0ES (*Supernova  $H_0$  for the Equation of State*), který probíhá na Hubblově dalekohledu a jehož cílem je určení Hubblových konstanty přímou metodou. V průměrné galaxii dochází ke dvěma explozím SN Ia za století, což umožňuje nacházet v přehlídkových projektech řadu takových událostí. Supernovy Ia mají při explozi zhruba stejný zářivý výkon a z toho je možné odhadnout vzdálenost mateřské galaxie. Z červeného posuvu je poté snadné určit rychlost vzdalování v dané vzdálenosti, tedy Hubblovu konstantu. Riessova skupina kalibrovala metodu u relativně blízkých galaxií, kde je možné odhadnout vzdálenost i jinou nezávislou metodou – za pomoci cefeid. Výsledkem projektu je hodnota Hubblové konstanty  $(73,2 \pm 1,7) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  s relativní nejistotou 2,4

## Rozpory v určení Hubblové konstanty

Optimista by obě hodnoty označil za fantastický úspěch. Dvě zcela odlišné metody vedou k řádovému souhlasu, což nebývá v astronomii obvyklé, a je to i poněkud nečekané, pokud si vzpomeneme na řádově odlišné počáteční odhady velikosti Hubblové konstanty. Pesimista, nedůvěřivec či člověk, který na sebe chce strhnout pozornost, označí rozdíl hodnot za fatální a začne vydávat médiím prohlášení o konci současné kosmologie. Tuto druhou cestu zvolila v roce 2019 napří-

klad mladička doktorka Sherry H. Suyu z Ústavu astrofyziky Institutu Maxe Plancka. Jaká jsou ale fakta? Ani v rámci měření Hubbleovy konstanty jedinou metodou (z fluktuací reliktního záření) nedošlo u dvou různých sond WMAP a Planck ke shodě na výsledné hodnotě – systematické chyby dané jak měřením samotným, tak metodami zpracování výsledků, které nejsou zahrnuty do udávané nejistoty měření, jsou zde zjevné. Dokonce se výsledky z Plancku lišily i v jednotlivých balíčcích výsledků publikovaných v letech 2013, 2015 a 2018.

Druhá z metod je založena na odhadu vzdálenosti za pomoci supernov Ia. I když Riessova skupina uskutečnila kalibraci pomocí cefeid (ani u nich si nejsme vypočtenou vzdáleností stoprocentně jisti), není výsledek dokonalý. V různých vzdálenostech se mohou vyskytovat různé vývojové varianty supernov Ia, jasnost cefeid závisí na jejich metalicitě (zastoupení těžších prvků), vliv mohou mít systematické odchylky od Hubbleova-Lemaitrova zákona způsobené gravitačním přitahováním členů nadkup galaxií, velký vliv může mít přítomnost prachu v naší Galaxii i v mezigalaktickém prostoru. To vše poukazuje na to, že udávaná relativní nejistota 2,4 % je založena jen na některých zahrnutých jevech, rozhodně ne na všech. Navíc byla měření prováděna pro jednu konkrétní vzdálenost, které odpovídá červený kosmologický posuv  $z = 1,5$ . Pokud se tedy budeme zabývat i nezahrnutými systematickými chybami obou metod, je soulad jejich výsledků více než skvělý.

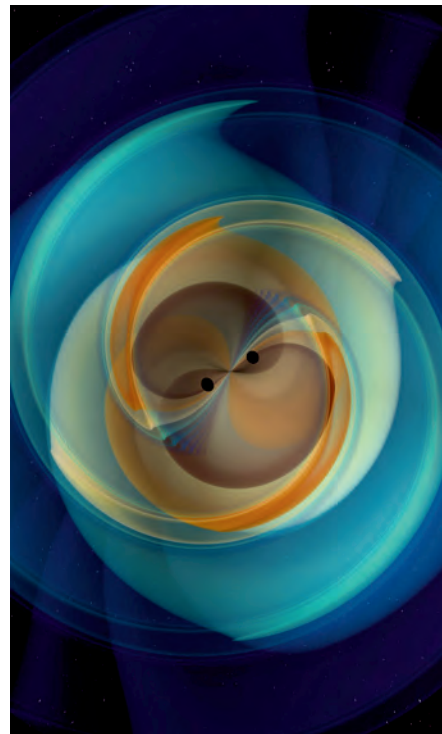
## Možné zdroje chyb

Zdrojů systematických chyb může být celá řada, zmíníme jen některé z nich. Předně je možné, že nemáme správně oškálované vzdálenosti ve vesmíru. Přesnost metody standardní svíčky (vesmírného žebříčku) stojí a padá se znalostí skutečné vzdálenosti cefeid a supernov typu Ia. Většina astronomů doufá, že právě probíhající mise astrometrické sondy Gaia, opírající se o spolehlivé metody trigonometrie, vnese do problému jasno a problém se vyřeší, aniž by bylo třeba měnit soudobé názory na to, jak a čím drží vesmír pohromadě.

Španělský doktorand José Luis Bernal z Barcelonské univerzity a uznávaný kosmolog John A. Peacock z Edimburské univerzity spatřují nedostatek ve způsobu vyhodnocování informací o reliktním mikrovlnném pozadí a volají po nových bayesovských technikách zpracování statistických údajů. Užitím metody BACCUS (*BAYesian Conservative Constraints and Unknown Systematics*), kterou vyvinuli,

**Cefeidy** – proměnné hvězdy se známou závislostí perioda/svitost, využívají se při odhadech vzdáleností. Pojmenovány jsou podle hvězdy  $\delta$  Cephei, jejíž proměnnost objevil John Goodricke (1764–1786). K určování vzdáleností využila tento typ proměnných hvězd poprvé Henrietta Swan Leavittová (1868–1921) v roce 1912.

Kilonova – splynutí dvou neutronových hvězd by mohlo posloužit jako standardní svíčka pro určování vzdáleností. Zdroj: Max Planck Institute for Gravitational Physics, Simulation eXtreme Spacetimes Collaboration.



**Kosmologie** – nauka o vesmíru jako celku, o jeho struktuře, minulosti a budoucnosti. Slovní základ této vědecké disciplíny pochází z řečtiny. Slovo „kosmos“ v tomto jazyku znamená svět, ale také řád, eleganci a krásu. Stejný slovní základ má kosmetika. Současné pozorovací možnosti posunuly kosmologii do nejbouřlivěji se rozvíjejících vědeckých disciplín. K největším problémům současné kosmologie patří nejasnosti kolem podstaty temné hmoty a temné energie, které by měly být největší součástí vesmíru. Naopak jsou relativně dobře prozkoumány poslední fáze velkého třesku.

vychází najevo, že problémy kolem Hubbleovy konstanty by mohly mít původ v systematických chybách, které dosud nebyly zohledňovány.

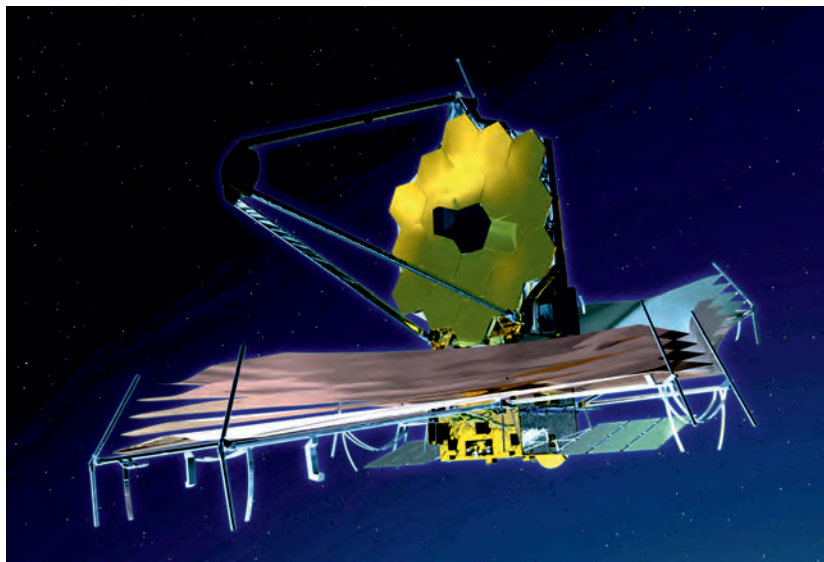
Další neznámou je samotný používaný kosmologický model  $\Lambda$ CDM. Neznáme přesně rozložení temné hmoty, podíl hmotných neutronů a další faktory, které mají na vývoj vesmíru vliv a tedy i na interpretaci analýzy struktur v reliktním záření.

## Další možnosti měření

Je-li něco nejasné, většinou mohou pomoci další nezávislá měření. Sherry Suyu, která hovořila o tom, že nepatrný nesoulad obou hodnot je „tak zásadní“, že povede k nové kosmologii, se stala vedoucím skupiny, jež měřila Hubbleovu konstantu na základě gravitačního čočkování, v němž figurují namísto vzdáleností úhlové rozměry čočkových galaxií. Výsledek její skupiny dal v roce 2019 další hodnotu Hubbleovy konstanty:  $(82,4 \pm 8) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Nejistota tohoto měření je deset procent, což je zatím nejhorší ze všech výsledků, a striktně počítáno nezahrnuje ani jednu z předchozích hodnot, což k důvěře měření nepřidá. Další pokus pochází od skupiny z Chicagské univerzity, kterou vede Wendy Freedman, zkušená matadorka na poli observační astronomie. Skupina vsadila na měření vzdáleností galaxií za pomoci

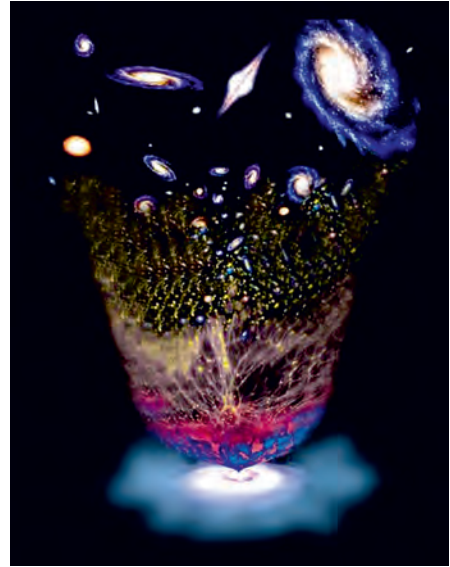
svítivosti červených obrů. A výsledek? Slovy optimisty: skvělý. Hodnota Hubbleovy konstanty vyšla  $(70 \pm 1) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , což je někde mezi hodnotami ze sondy Planck (reliktní záření) a Hubbleova dalekohledu (supernovy Ia). Dobře je patrné, že co metoda, to jiný výsledek, což je ale pro zkušené astronomy zcela pochopitelné. Pomíne-li výsledky Sherry Suyu, jsou všechna zbývající měření ve velmi slušné shodě a nový výsledek skupiny Wendy Freedman rozpor nezvětšil, ale tím, že leží mezi oběma hodnotami, poukázal spíše na vliv nezahrnutých systematických chyb jednotlivých měření.

Dalekohled Jamese Webba. Zdroj: NASA, ESA, CSA.



Reliktní záření, supernovy Ia, gravitační čočky a červení obři nejsou jedinými metodami, jimiž disponuje současná astronomie. Další z možností určení vzdálenosti jsou kilonovy – gigantické gravitační a optické záblesky způsobené splynutím dvou neutronových hvězd. První taková událost byla sledována v roce 2017. Jinou metodou je pozorování vícenásobných obrazů supernov způsobených gravitačním čočkováním. Z měření zpoždění explozí v jednotlivých obrazech je možné počítat parametry expanze vesmíru. Jev předpověděl a metodu navrhl už v roce 1964 mladičký norský teoretik Sjur Refsdal. Zesílené vícenásobné obrazy vzdálené supernovy byly poprvé pozorovány v letech 2014 a 2015. Další možností jsou gravitační záblesky ze splynutí dvou černých děr, jejichž lov byl odstartován v roce 2015. Ke zpřesnění měření hodnoty Hubbleovy konstanty také mohou přispět nové observatoře, například Observatoř Very Rubinové nebo právě zprovožňovaný vesmírný dalekohled Jamese Webba. V každém případě se nejasnosti v hodnotě Hubbleovy konstanty staly hnacím motorem jak pro nové metody určování vzdáleností ve vesmíru, tak pro změny ve statistickém vyhodnocování charakteru reliktního záření.

■ **Rudolf Mentzl, Jakub Kast, Petr Kulhánek,**  
aktualizováno 2022, AB 21/2018, 31/2020, 4/2021, 33/2021



Vznik a následná expanze vesmíru jsou předmětem mnoha diskuzí a vizí. Zdroj: Gabriela Secara, Perimeter Institute for Theoretical Physics.

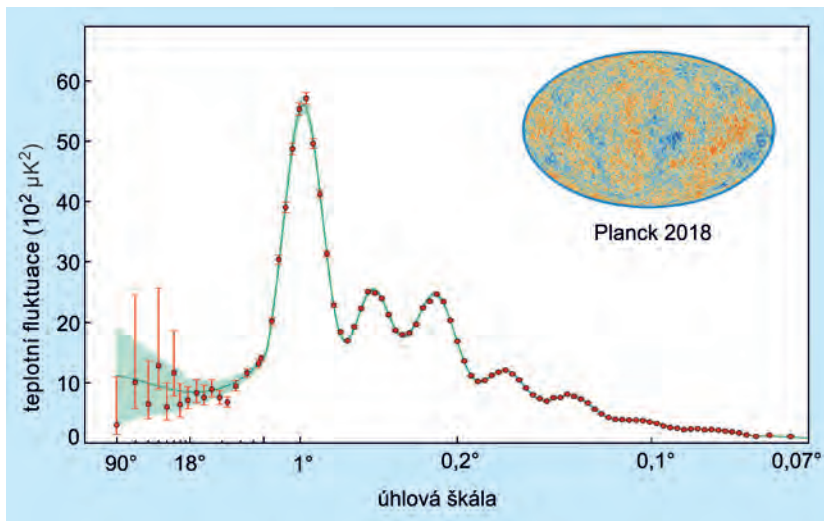


## Může být vesmír konečný?

**Reliktní záření** – záření, které se od látky oddělilo přibližně 400 000 let po vzniku vesmíru, v době, kdy se vytvářely atomární obaly prvků a končilo plazmatické období vesmíru. Počáteční horkou (plazmatickou) fázi existence vesmíru nazýváme velký třesk a reliktní záření tedy pochází z období konce velkého třesku. Dnes má teplotu 2,73 K a vlnovou délku v milimetrové oblasti. Je jedním ze základních zdrojů informací pro naše poznání raného vesmíru. V anglické literatuře se označuje zkratkou CMB (Cosmic Microwave Background, mikrovlnné záření pozadí).

Je vesmír konečný, nebo nekonečný? To je otázka, která zajímá generace astronomů a fyziků a je velmi častým zdrojem sofistikovaných diskuzí. Reliktní záření se uvolnilo na konci velkého třesku a nese v sobě mnoho informací o raném vesmíru. Zvláště cenné jsou nevelké teplotní fluktuace, jejichž zatím nejpodrobnější mapu pořídila evropská sonda Planck. Rozdíly teplot jsou nevelké, maximálně v řádu sta mikrokkelvinů (samotná teplota reliktního záření je dnes 2,73 K). Mapa teplotních fluktuací se zpracovává statistickými metodami, zejména je cenný frekvenční rozvoj do tzv. kulových funkcí (na sféře jde o analogii sinů a kosinů). Rozvoj se provádí ve dvou úhlech a sleduje se početní zastoupení fluktuací s různou úhlovou velikostí. Nejčastěji jsou zastoupeny přibližně jednostupňové „flíčky“. Ve spektru chybí fluktuace s rozměry nad  $60^\circ$ . Jedním z důvodů by mohla být konečnost vesmíru. Konečný vesmír totiž nemá dostatečnou velikost na to, aby se v něm vytvořily fluktuace libovolné velikosti. Ale pozor, uvedené tvrzení je pouze implikací jedním směrem: Pokud je vesmír konečný, budou v něm chybět velkorozměrové fluktuace. Opačné tvrzení neplatí. Neexistence velkých fluktuací může mít původ nejen v konečném vesmíru, ale může být způsobena i jinými, dosud nepoznanými jevy.

Frekvenční spektrum fluktuací reliktního mikrovlnného záření pozadí. Zdroj: ESA/Planck.

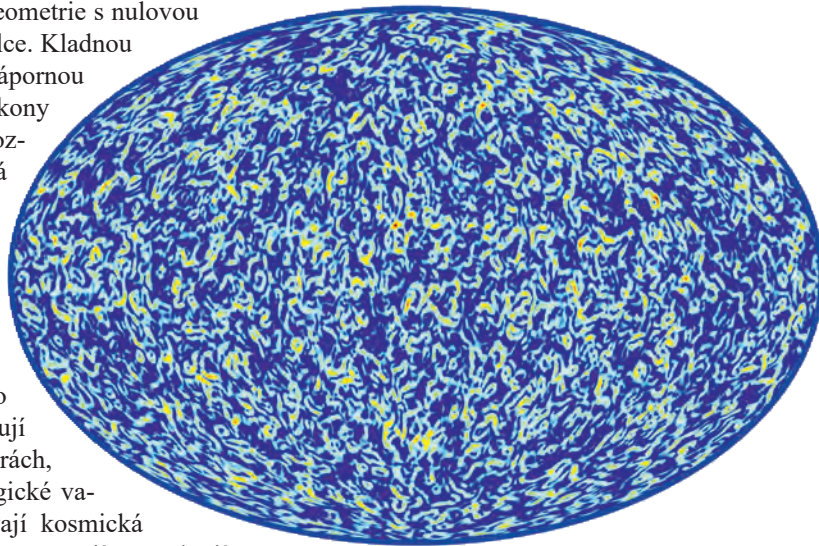


### Geometrie a topologie

Geometrie vesmíru je určována rozložením hmoty ve vesmíru. Hmota a energie zakřivují prostor a čas kolem sebe a v tomto pokriveném světě se pohybují tělesa po nejrovnějších možných drahách – geodetikách. Míru zakřivení časoprostoru je možné určit z obecné relativity navržené Albertem Einsteinem v roce 1915. Nejjednodušší charakteristikou geometrie je Gaussova křivost. Je-li nulová, vesmír je geometricky plochý a platí v něm Euklidovy zákony, tj. součet úhlů v trojúhelníku je  $180^\circ$ ,

obvod kruhu je  $2\pi r$  atd. Příkladem geometrie s nulovou křivostí je list papíru nebo povrch válce. Kladnou křivost má například povrch koule, zápornou horské sedlo – zde už Euklidovy zákony neplatí. Samozřejmě jde jen o dvojrozměrnou analogii, skutečný vesmír má minimálně tři prostorové dimenze. Obecná relativita pomáhá určit lokální vlastnosti vesmíru, ale neřeší, jak vesmír vypadá jako celek. Vesmírná topologie je oborem, který se rozvíjí v posledních desetiletích a snaží se určit celkový vzhled našeho vesmíru. Podobně jako nerosty existují v několika krystalografických strukturách, může mít vesmír jen některé topologické varianty. Někdy se tyto úvahy nazývají kosmická krystalografie. Pojďme si rozdíl mezi geometrií a topologií ukázat na obyčejném listu papíru. Pokud list stočíme a slepíme obě protilehlé hrany, získáme válcovou plochu. Geometrie se nezmění, na obou útvarech platí Euklidovy zákony, změní se ale topologie. Na válcové ploše zmizely dvě hrany a ne každou uzavřenou křivku lze spojitou deformací stáhnout do bodu. Existuje jedna skupina uzavřených křivek (obtočených kolem válce), které do bodu stáhnout nelze.

Bude-li náš válec pružný a dlouhý, můžeme ho svinout do tvaru plaveckého kruhu a protilehlé hrany opět slepit. Získaný útvar se nazývá toroid. Tentokrát se změnila geometrie i topologie. Na povrchu toroidu neplatí Euklidovy zákony, navíc zmizely všechny hrany. Máme konečný dvojrozměrný svět bez hranic. Na toroidu existují dokonce dvě skupiny křivek, které nelze stáhnout do bodu. První z nich je natažena kolem původního válce. Druhá skupina obíhá podél toroidu, například po obvodu plaveckého kruhu. Genus topologie je roven jedné. Vidíme, že mezi topologií a geometrií útvarů může být značný rozdíl. Nenulový genus topologie vypovídá o tom, že daná množina není jednoduše souvislá, že při pohledu „zvenku“ má díry jako ementál. Obyvatelé množiny mohou žít v konečném světě bez hranic a vůbec netuší, že je jejich vesmír podobný plaveckému kruhu či složitějším útvarům (dvojtoroidu, Kleinově láhvi atd.)



Mapa velikosti gradientu teplotních fluktuací reliktního záření. Zdroj: Class. Quantum Grav., Ralf Aurich.

**Geometrie vesmíru** – je lokálně určována obecnou relativitou, čas a prostor jsou zakřiveny přítomností těles a v tomto zakřiveném časoprostoru se tělesa pohybují po geodetikách. Geometrie může mít nulovou, kladnou, nebo zápornou křivost. V geometrii s nulovou křivostí platí Euklidovy zákony (například součet úhlů v trojúhelníku je  $180^\circ$ ).

**Topologie** – nauka o globálních vlastnostech a struktuře množin. Za topologicky ekvivalentní považujeme množiny, které lze spojitě deformovat jednu na druhou. Topologicky ekvivalentní nejsou množiny, lišící se přítomností „díry“, „slepením“ některých hraničních částí atd. Topologie vesmíru jako celku není známa. Einsteinovy rovnice obecné teorie relativity nám umožňují jen sledování lokálních geometrických vlastností.

**Genus topologie** – číslo, které charakterizuje danou topologii z hlediska počtu „děr“ nebo „držadel“. Genus se určuje pomocí skupin křivek, které nelze stáhnout do bodu (jsou natažené kolem díry či držadla), ale není totožný s jejich počtem.

**Jednoduše souvislá množina** – množina, která nevypadá jako „ementál“. Nemá žádné díry ani držadla. Je pro ni charakteristické, že každou uzavřenou křivku lze stáhnout do bodu.

## Toroidální vesmír

Vesmír nevidíme celý, můžeme pozorovat jen tu část, z níž k nám stihlo za dobu jeho existence doletět světlo. Hovoříme o tzv. horizontu vesmíru. Za horizontem vesmír pokračuje, jsou tam další hvězdy a galaxie, možná i civilizace, ale my je nemůžeme spatřit. Jak velká je ona část, kterou nevidíme, nevíme. Dříve šlo jen o akademické diskuze, ale objevem fluktuací v reliktním záření se vše změnilo. První frekvenční analýza (zjištění zastoupení fluktuací různých úhlových škál) byla provedena na základě měření sondy WMAP v roce 2003. Neexistence velkorozměrových fluktuací vedla některé fyziky k názoru, že by vesmír mohl být konečný, a proto se v něm fluktuace velkých rozměrů nemohly vytvořit. Jak jsme se již zmínili, neexistence velkorozměrových fluktuací by ale v principu mohla mít i jiné, zatím neznámé příčiny.

V roce 2021 do diskuzí o konečnosti či nekonečnosti vesmíru a o jeho topologii výrazně zasáhla skupina čtyř vědců z Ulmské univerzity a z Lyonské univerzity (Ralf Aurich, Thomas Buchert, Martin France a Frank Steiner). Ukázali, že se topologie vesmíru nepoděpíše jen na mapě teplotních fluktuací reliktního záření, ale že další cenné informace jsou uloženy také ve změnách teploty. V každém místě oblo-

hy určili gradient teploty reliktního záření – jde o dvojrozměrný vektor popisující změny teploty v závislosti na dvou úhlech. Na doprovodném obrázku je vykreslena mapa velikosti teplotního gradientu (odmocniny ze součtu druhých mocnin obou složek vektoru). Vytvořenou mapu teplotního gradientu reliktního záření potom zkoumali standardními metodami statistické fyziky. Výsledek ukázal, že data nejlépe odpovídají vesmíru, který je konečný a není jednoduše souvislý. Nejjednodušším takovým vesmírem je třírozměrná analogie (neumíme si ji představit) dvojrozměrného toroidu nebo pneumatiky či americké koblihy, chcete-li..

Dvojrozměrná analogie toroidálního vesmíru, která připomíná plavecký kruh. Zdroj: ESO, J. Law.



Skupina se také jako první pokusila určit velikost vesmíru. Vědci prováděli rozsáhlé numerické simulace fluktuací reliktního záření pro různě velké vesmíry. Počítačem generované mapy se nejvíce shodovaly s mapou fluktuací reliktního záření získanou z dat sondy Planck pro vesmír o velikosti zhruba trojnásobku viditelné části. Jde o první odhad velikosti vesmíru založený na solidní analýze naměřených dat. Nelze ale v žádném případě činit ukvapené závěry a výsledky je třeba brát s maximální opatrností a rezervou. Do hry mohou vstupovat i dosud nepoznané procesy a zcela neznámé faktory. Jak jsme již psali, neexistence velkorozměrových fluktuací by mohla mít i jiné příčiny, než je konečnost vesmíru. Pokud je ale náš vesmír skutečně konečný, jde o první sofistikovaný pokus o určení jeho velikosti. Výsledek se samozřejmě může v budoucnosti i výrazně změnit, vzpomeňme si na první měření Hubbleovy konstanty, které se od dnes udávané hodnoty lišilo o celý řád. V každém případě přináší nová studie další nové indicie ve prospěch konečnosti našeho vesmíru.

■ Petr Kulhánek, 27. 8. 2021, AB 30/2021



*Sonda Planck, která umožnila vytvořit dosud nejpodrobnější mapu reliktního záření. Zdroj: ESA,/Planck.*



## Velký třesk – deset největších mýtů

**Lowellova observatoř** – observatoř ve Flagstaffu na Marsovském kopci v nadmořské výšce 2 210 metrů. Založena byla přímo ve městě v roce 1894 Percivalem Lowellem. Na observatoři byla pořízena data ukazující na expanzi vesmíru a objeven Pluto. Hlavní náplní je spektrografie. V době Apolla zde probíhalo mapování Měsíce.

Clarkův dalekohled na Lowellově observatoři ve Flagstaffu. Americký astronom Vesto Slipher s ním jako první v letech 1912 až 1915 měřil červený posuv galaxií, který v roce 1927 interpretoval belgický kněz Georges Lemaître jako expanzi vesmíru. Zdroj: Aldebaran.



Velký třesk se stal nedílnou součástí našeho života. O horkém původu světa si dnes snad štěbetají už i ptáci na střechách domů. Tahle teorie se dostala do povědomí široké veřejnosti natolik, že je brána jako cosi samozřejmého, co patří k historii poznávání vesmíru. Do jisté míry tomu tak skutečně je a toto dědictví se stalo nedílnou součástí naší kultury – objevuje se ve filmech, psané literatuře, vtipech na vše možné – zkrátka tak nějak se velký třesk zabydlel v našich myslích a dávno ho nevnímáme jako extravagantní a kdysi částí fyziků proklínanou teorii. A právě takové zevšednění s sebou přináší i různá zjednodušení, mylné a často tradované představy, které nejsou vůbec pravdivé.

### 1. Expanzi vesmíru objevil Edwin Hubble

Objev expanze vesmíru má kořeny v malém arizonském městečku Flagstaff, které leží na křižovatce známé Route 66 vedoucí východozápadním směrem a severojižní cesty. Nadmořská výška 2000 metrů a okolní hory jakoby předurčily tento kraj pro astronomii. Dnes je v okolí celá řada významných observatoří. Tu flagstaffskou založil Percival Lowell v roce 1894 a dnes nese jeho jméno. Celoživotní vášní Lowella byla planeta Mars, observatoř proto založil za účelem jejího pozorování. V roce 1895 objednal z dílny věhlasných optiků bratří Clarkův čočkový dalekohled o průměru 61 centimetrů a ohniskové vzdálenosti 9,75 metru. Percival Lowell prováděl tímto přístrojem kontroverzní výzkum Marsu, při němž se snažil nalézt projevy činnosti inteligentních bytostí. V době, o které hovoříme, si většina astronomů myslela, že mlhavé obláčky pozorované na obloze jsou mlhoviny v Mléčné dráze. V roce 1912 začal Clarkovým dalekohledem systematicky proměřovat spektra těchto „mlhovin“ americký astronom Vesto Slipher (čtete slajf). Nejprve zjistil, že spektrální čáry Velké mlhoviny v Andromedě jsou posunuty k modrému konci spektra a že se tato mlhovina k nám blíží nemalou rychlostí. Toto první měření Vesto Slipher publikoval v roce 1913 v nově vzniklém bulletinu observatoře. Do roku 1915 proměřil spektra patnácti spirálních mlhovin a pouze u tří z nich našel modrý posuv, u ostatních posuv červený. Někteří astronomové už v té době tušili, že jde o objekty za hranicemi Mléčné

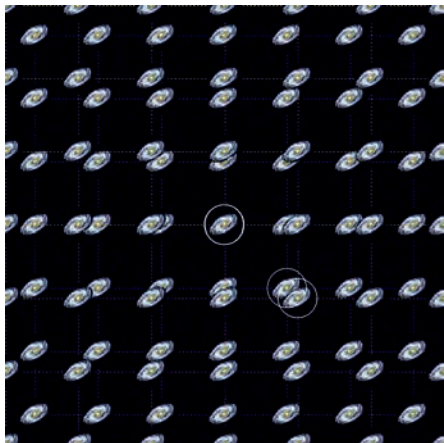


dráhy a hovořili o tzv. extragalaktických mlhovinách. Že jde skutečně o galaxie, zjistil Edwin Hubble až v roce 1923. Slipher v oné době ještě nedokázal interpretovat červený posuv „spirálních mlhovin“ jako expanzi vesmíru. Učinil ale řadu jiných významných objevů. Ze spektra určoval rotační periody planet a planetárních atmosfér, v roce 1914 pozoroval rotaci „spirálních mlhovin“ a objevil sodíkovou čáru v zemské atmosféře. Z nadšeného astronoma se postupně vypracoval na ředitele observatoře. Stal se jím v roce 1926 a observatoř vedl až do roku 1952. Jako ředitel přijímal mladičkého Clauda Tombaugh, který pod jeho vedením objevil v roce 1930 Pluto.

Čerstvý vítr do situace vnesl abbé Georges Lemaître, vzdělaný římskokatolický kněz, který pobýval většinu života v Belgii. Vystudoval v anglické Cambridgi, kde ho setkání s Arthurem Eddingtonem přivedlo ke kosmologii a k obecné relativitě, která se nakonec stala jeho celoživotní vášní. Ve studiích pokračoval na slavném Massachusettském institutu technologií (MIT) a v roce 1925 se vrátil do rodné Belgie, kde začal přednášet na Katolické univerzitě v Lovani. Nezávisle na Fridmanovi řešil v rámci obecné relativity nestacionární modely vesmíru a v roce 1927 dospěl k názoru, že Slipherova měření jsou důkazem expanze celého vesmíru. Tento zcela převratný poznatek publikoval v belgickém časopise *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*,

Slavný Hookerův dalekohled na Mt. Wilsonu (Kalifornie). Tímto přístrojem Hubble s Humasonem doplnili Slipherova měření červeného posuvu „spirálních mlhovin“. Hubble tato pozorování nezávisle interpretoval jako expanzi vesmíru. Zdroj: Aldebaran.

**Observatoř Mount Wilson** – observatoř v blízkosti Los Angeles umístěná v nadmořské výšce 1 740 metrů v Horách sv. Gabriela. Observatoř byla založena v roce 1904 Ellery Halem. V roce 1917 zde byl instalován Hookerův dalekohled o průměru zrcadla 2,5 metru, který byl v té době největším astronomickým přístrojem světa. S tímto dalekohledem byla doplněna data z Lowellovy observatoře poukazující na expanzi vesmíru a v roce 1933 objevena temná hmota. Na observatoři je celá řada dalších dalekohledů a také sluneční věže pro pozorování Slunce. Těmito slunečními věžemi byly v roce 1960 objeveny pětiminutové oscilace Slunce. Dnes je observatoř součástí Carnegieho vědeckého institutu. Kvalitní pozorování znemožňuje světlé znečištění z blízkého Los Angeles.



Expanze probíhá z každého bodu a rychlost vzdalování objektů roste lineárně se vzdáleností. Zdroj: L. McNish.

**Kosmologický princip** – vesmír vypadá ve všech svých místech stejně, je homogenní a izotropní. Expanze vesmíru probíhá ze všech jeho bodů, v každém místě uvidíme vesmír expandující právě od nás. Kosmologický princip vede na expanzi, při níž je rychlost vzdalování objektů úměrná jejich vzdálenosti. Tvrzení platí i obráceně: roste-li rychlost expanze lineárně se vzdáleností, potom probíhá ve všech bodech prostoru stejně.

kteřý bohužel kosmologická komunita nečetla. Lemaître je nejenom prvním objevitelem expanze vesmíru, ale dokonce i udělal první odhad koeficientu přímé úměrnosti mezi rychlostí expanze a vzdáleností (nyní nazývaném Hubbleova konstanta), a to dva roky před Edwinem Hubblem. Byl si vědom i toho, že raný vesmír musel být hustý a horký a této fázi začal říkat *prvotní atom*. Jeho teorie „prvotního atomu“ se stala předobrazem teorie velkého třesku, kterou na konci 40. let představil světu George Gamow.

Edwin Hubble se v roce 1919 stal prvním ředitelem observatoře na Mt. Wilsonu, která byla osazena Hookerovým dalekohledem o průměru 2,5 metru. I on se, podobně jako Vesto Slipher, zabýval spektroskopii. V roce 1923 rozlišil ve Velké mlhovině v Andromedě hvězdy a našel zde cefeidy, pomocí nichž určil vzdálenost této soustavy a přišel na to, že nejde o mlhovinu, ale o galaxii. Do roku 1929 doplnil Slipherova měření o další pozorování červených posuvů spirálních galaxií, která prováděl spolu se svým asistentem a spolupracovníkem Miltonem Humasonem. Celkem naměřili posuvy 46 galaxií. V roce 1929 vyšel Hubbleův článek o expanzi vesmíru, v němž současně poukázal na lineární závislost mezi vzdáleností a rychlostí expanze. Humason, který pozorování prováděl spolu s Hubblem, nebyl uveden jako spoluautor článku a dokonce nebyl v článku ani zmíněn. Citována není ani Slipherova práce, na kterou Hubble s Humasonem navazovali. V první polovině 20. století nebyla astronomie považována za součást fyziky, proto Hubble za jeden z nejvýznamnějších objevů lidstva, který mu byl tehdy připisován, nezískal Nobelovu cenu. Sám Hubble se celý život snažil o to, aby byla Nobelova cena udělována i za astronomické objevy, ale došlo k tomu až těsně po jeho smrti.

Expanzi vesmíru tedy objevil abbé Georges Lemaître v roce 1927. Edwin Hubble ji znovuobjevil v roce 1929. Mezinárodní astronomická unie proto na sklonku roku 2018 doporučila, aby se Hubbleův zákon (o přímé úměrnosti mezi rychlostí vzdalování a vzdáleností objektu) nadále jmenoval Hubbleův-Lemaîtreův zákon. Někteří vědci šli ještě dále a otevřeně hovoří jen o Lemaîtreově zákonu.

## 2. Vesmír se rozpíná z nějakého konkrétního středu

Pocit, že vesmírná expanze musí mít nějaký střed, v němž vesmír vznikl a odkud se rozpíná, je zcela mylný. Právě to, že z našeho stanoviště pozorujeme, že objekty od nás ubíhají tím rychleji, čím jsou dále, je

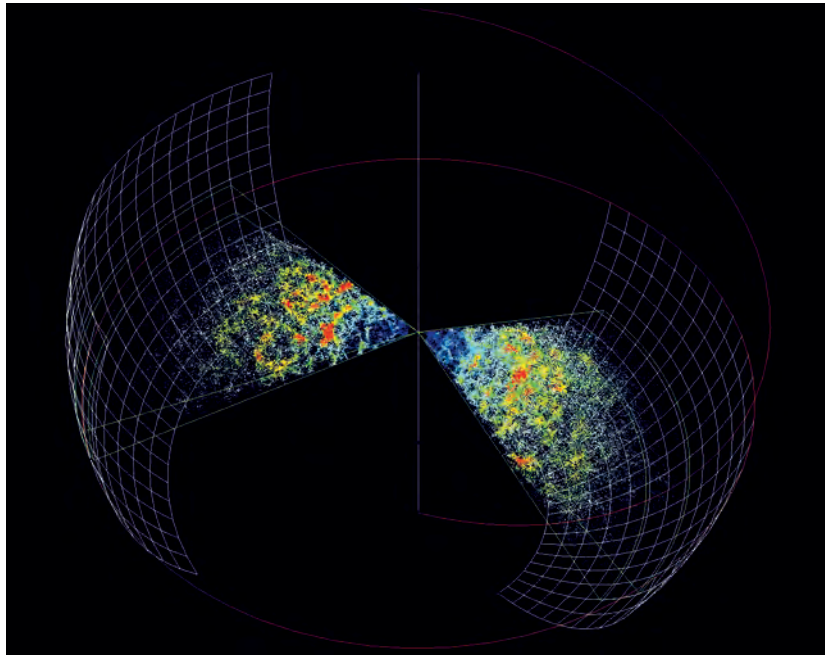


ve skutečnosti důkazem, že vesmír je ve všech svých místech stejný a rozpíná se z každého místa. Představte si obří molitanovou houbu, která se nafukuje. Ať budete bydlet v kterékoli bublince, budete mít pocit, že všechny ostatní bublinky se vzdalují právě od vás a dokonce tím rychleji, čím jsou dále. Jiným příkladem může být prádelní guma posetá značkami, kterou napínáme. Opět platí totéž: postavte se na libovolnou značku a ostatní se budou vzdalovat právě od vás. Jde o tzv. *kosmologický princip*, který říká, že vesmír je homogenní a izotropní a pozorování prováděná kdekoli v něm dopadnou, až na drobné lokální odchylky, stejně. Žádný střed expanze tedy neexistuje a každý pozorovatel má pocit, že právě on se nachází ve středu vesmíru. Můžeme také říci, že středů expanze je nekonečně mnoho, neboť každé místo ve vesmíru je současně i středem expanze.

Kosmologický princip je částečně založen na Koperníkově principu, který říká, že se Země nenachází ve vesmíru na nějakém význačném místě, a na Einsteinově obecné relativitě, která předpokládá, že veškerá měření jsou jen relativní a nějaká absolutní souřadnicová soustava neexistuje. Platnost kosmologického principu byla mnohokrát ověřována. Nejrozsáhlejší studie byly dělány na základě analýzy fluktuací reliktního záření z měření sondy Planck. V polarizačních obrazcích byl superpočítači hledán preferovaný směr, který by svědčil o anizotropii a neplatnosti kosmologického principu. Výsledek analýzy ukázal, že pravděpodobnost existence preferovaného směru je 1: 121 000. Zdá se tedy, že vesmír expanduje ve všech směrech stejným způsobem, přestože se občas vyskytnou články, v nichž autoři s tímto názorem nesouhlasí a snaží se o návrat preferované souřadnicové soustavy do fyziky. Jako jednu z možností pro definici této soustavy vidí reliktní záření.

**2dFGRS** – 2dF Galaxy Redshift Survey, projekt, v rámci kterého již byla pořízena spektra více než 260 000 galaxií pomocí zařízení 2dF (2 degree Field) – unikátního spektrografu na dalekohledu AAT (Anglo Australian Telescope), který má zrcadlo o průměru 3,9 metru a je umístěn od roku 1974 na Anglo-australské observatoři v Austrálii v nadmořské výšce 1 150 m. Spektrograf pořídí v poli o velikosti 2° naráz spektra 400 objektů.

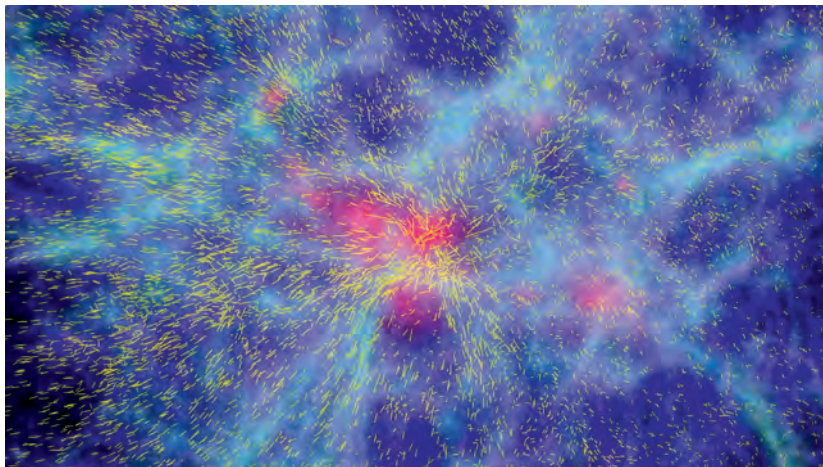
Jedním z prvních velmi přesných potvrzení správnosti kosmologického principu byl přehledkový projekt 2dFGRS, který už v roce 2005 ukázal, že velkorozměrové struktury vesmíru jsou ve dvou různých výšcích, v nichž probíhalo pozorování, zhruba totožné. Každá ze zelených teček na obrázku je jednou z mnoha pozorovaných galaxií. Nejvzdálenější galaxie na obrázku jsou ve vzdálenosti 2 miliardy světelných roků. Zdroj: 2dFGRS.





**Pauliho vylučovací princip** – dvě částice s poločíselným spinem (například elektrony) nemohou být nikdy ve stejném kvantovém stavu. Právě proto různé elektrony v atomárním obalu zaujímají různé kvantové stavy a tím vytvářejí různorodé chování chemických prvků. Právě Pauliho vylučovací princip neumožňuje neomezené stlačení látky. V bílých trpaslicích a neutronových hvězdách dává vzniknout kvantovému tlaku, který odolá gravitaci. Obdobný tlak sehrál svou roli i při vzniku vesmíru.

Počítačová simulace vzniku velkorozměrových struktur ve vesmíru v epoše před deseti miliardami let. Výšeč je velká sto milionů světelných let. Patrné jsou koherentní pohyby galaxií. Zdroj: Klaus Dolag, VIMOS-VLT Deep Survey, Evropská jižní observatoř.



### 3. Na počátku byla singularita

Pokud extrapolujeme současnou expanzi vesmíru do minulosti, zjistíme, že v dávných časech byl vesmír velmi hustý a horký. Dokonce se můžeme dostat do jakéhosi počátečního okamžiku (často se označuje za počátek času), v němž vychází nekonečná hustota a teplota vesmíru. Taková limita vede k často opakovanému tvrzení, že se vesmír zrodil gigantickou explozí z nekonečně malého objemu. Skutečnost je ale zcela jiná. Pokud nám v našich úvahách vyjdou lokalizované nekonečné hodnoty, musíme naše představy revidovat, nekonečna typu singularita se prostě v přírodě nevyskytují, respektive nemají žádný fyzikální smysl. Limitu k nulovému času jsme provedli na základě našich znalostí gravitační interakce. Ale v hustém a horkém zárodečném plazmatu nepochybně hrají roli i ostatní interakce a uplatňují se kvantové zákony mikrosvěta. Jedním z nich je *Pauliho vylučovací princip*, který znemožňuje, aby se některé částice dostaly do stejného kvantového stavu nebo libovolně blízko k sobě. Ano, vesmír na počátku mohl být velmi horký a hustý, ale tyto veličiny rozhodně neměly charakter singularity s nekonečnými hodnotami. Vznik vesmíru mohl například připomínat fázový přechod, při němž se divoké fluktuace kvantové povahy (někdy se hovoří o kvantové pění) přeměnily při prudké expanzi (tzv. *inflaci*) na svět, který se stal později naším domovem. V období fázového přechodu byl vesmír extrémně hustý a horký, ale nemusel být nutně malý, dokonce mohl být nekonečný. O jeho povaze v oné době

toho víme velmi málo a ani si nejsme jisti, zda zrod našeho vesmíru probíhal právě tímto způsobem. Dokonce ani nevíme, zda v průběhu zrodu vesmíru měl smysl pojem času, který máme provázán s hmotnými tělesy (ta zakřivují a spoluvytvářejí čas, bez nich by čas neměl existovat), která zde ještě nebyla. O počátku vesmíru tedy příliš mnoho nevíme, ale jedním si jisti být můžeme. Počáteční singularita je způsobena jen naším nedokonalým popisem počátku světa, nikoli reálnou skutečností při jeho vzniku.

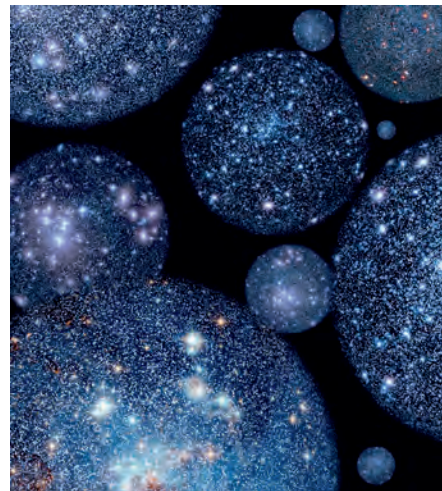
#### 4. Velký třesk byl jediný okamžik

Před několika desítkami let se souslovím velký třesk označovala pouze počáteční singularita. Jak už ale víme, ta neexistuje, takže mnohem logičtější je za velký třesk považovat počáteční horké a husté období, v němž byl vesmír v plazmatickém stavu. Tato éra končí zhruba 400 000 let po počátku (ať už jím bylo cokoli) formováním atomárních obalů, kdy se ve vesmíru objevily neutrální atomy. V závěru velkého třesku se uvolnilo elektromagnetické záření, které v jeho průběhu intenzivně interagovalo s volnými elektrony. Zánik volných elektronů, které se staly součástí atomárních obalů, znamenal ukončení velkého třesku. Reliktní záření je svědectvím o konci tohoto zárodečného období našeho vesmíru a současně svědectvím o konci velkého třesku.

Samotný zrod vesmíru je opředen tajemstvím a jak vznikl vesmír, prostě nevíme. Existují desítky hypotéz, ale většinou jde o pouhé vize bez jakékoli možnosti experimentálního ověření. Ať už byla na počátku inflace, setkání dvou pravesmírů, či jiný proces, měla by být počáteční fáze snad zdrojem chaotických gravitačních vln. Množství těchto vln na různých vlnových délkách je různě hypotézu od hypotézy. Pokud by se jednou podařilo reliktní gravitační vlny zachytit, byly by ty nejméně reálné představy o vzniku vesmíru vyloučeny ze hry.

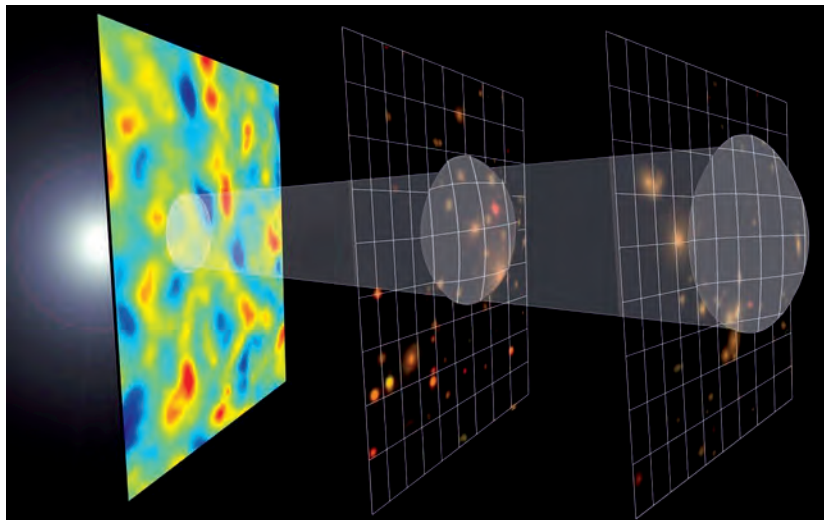
#### 5. Můžeme pozorovat celý vesmír

Člověk má odedávna pocit, že je pánem světa a že se vše točí kolem něho. Země ale není středem vesmíru a hvězdy se kolem ní neotáčí, jak si představovali naši předkové. Dokonce ani Slunce není středem veškerého bytí, jak tvrdily generace následující. Nakonec se ukázalo, že i naše Galaxie, které se říká Mléčná dráha, není jedinou galaxií ve vesmíru a že takových galaxií je obrovské množství. A žádná z nich, ani ta naše, ani některá další, nejsou středem vesmíru. V minulosti jsme také podlehli krásné iluzi, že vesmír je stvořen z atomů, podobně jako naše těla a naše rodná planeta. Ukázalo se ale, že ani toto není bohužel pravda. Největší část hmoty a energie ve vesmíru je tvořena temnou energií a temnou hmotou, ať už jde o cokoli. Vesmír se neotáčí kolem člověka, ale naopak to byl člověk a vlastně veškerý život na Zemi, který se musel v průběhu miliard let vývoje přizpůsobit vnějším podmínkám, nikoli naopak, jak tvrdí některé varianty antropického principu. Člověk je jen malou součástí neznámého světa, který by měl poznávat s pokorou a respektem k přírodním zákonům.



Vesmír si často představujeme jako multiverzum – mnoho vesmírů podobajících se bublinám. My bychom měli žít v jednom vesmíru z mnoha, v jedné takové bublině.  
Zdroj: Victor De Schwanberg, SPL, Getty Images.

**Antropický princip** – tvrzení, že vesmír má přesně takové parametry, aby vyhovoval člověku. Existuje-li více vesmírů současně, žijeme právě v tom, kde se mohl vyvinout život našeho typu, a proto se nemůžeme divit, že parametry našeho vesmíru jsou nařizovány tak, aby život mohl vzniknout. Nepatrná odchylka od hodnot základních konstant či jiných parametrů by znamenala vznik úplně jiného vesmíru, kde by nemohl existovat život tak, jak ho známe. Název antropický princip poprvé použil v roce 1968 Brandon Carter. Jediným dosud nalezeným vědeckým východiskem je hypotéza multivesmíru: existuje mnoho různých vesmírů, přičemž život vzniká právě tam, kde jsou pro to vhodné podmínky. Antropický princip má své skalní příznivce i odpůrce. Odpůrci argumentují zpravidla tím, že antropický princip odvádí pozornost od zkoumání skutečných počátečních podmínek ve vesmíru.



Neproniknutelná stěna reliktního záření nám umožňuje analyzovat jak podmínky za ní, v průběhu velkého třesku, tak před ní, kdy ze šíření reliktního záření určujeme vlastnosti prostředí mezi stěnou a námi. Zdroj: E. M. Huff, Z. Rostomian, SDSS III, South Pole Telescope.

**Inflace** – prudké (exponenciální) zvětšení rozměrů raného vesmíru. Zpravidla se dává do souvislosti s oddělením silné interakce v čase  $10^{-35}$  sekundy od hypotetické nuly dané zpětnou extrapolací expanze. V průběhu inflace dojde k zvýšení entropie faktorem  $10^{90}$  až  $10^{120}$  a k zvětšení rozměrů faktorem  $10^{30}$  až  $10^{50}$ . Uvolněná energie je minimálně  $10^{60}$  GeV, způsobí opětovné ohřátí vesmíru a vznik stochastických reliktních gravitačních vln. Některé modely kladou inflaci do ještě ranějších fází vývoje vesmíru. Pokud ale inflace existovala, je ona samotná skutečnou časovou nulou, skutečným počátkem času v našem vesmíru.

Člověk opravdu nemůže vše a nemůže dokonce ani pozorovat celý vesmír. Rychlost světla je konečná, proto vidíme Slunce tak, jak vypadalo před osmi minutami, Galaxii v Andromedě tak, jak vypadala před dvěma a půl miliony let a světlo z nejvzdálenějších rozpoznatelných struktur k nám putuje téměř 14 miliard roků. Tam leží horizont pozorovatelného vesmíru. A stejně, jako když se díváte na krajinu, víte, že za horizontem leží další města, hory a moře, tak i vesmír za horizontem pokračuje dál, jen světlo nemělo dostatek času, aby k nám za dobu existence

vesmíru z těchto končin doletělo. Pokud by tam, kde my vidíme horizont, bydlely nějaké rozumné bytosti a pohlédly by k nám, uvidí svůj vesmírný horizont v našich končinách. Nespátří tu Zemi, ani člověka, ale díky době, kterou světlo putuje, uvidí tito mimozemšťané v naší domovině konec velkého třesku. Jediné pozitivní je, že se náš horizont stále rozšiřuje (pokud skutečně probíhá expanze vesmíru tak, jak ji chápeme). Takže stačí počkat si jednu či dvě miliardy roků a horizont se posune do vzdálenějších končin a my uvidíme z vesmíru o něco víc, než vidíme dnes. Nevíme, zda je vesmír konečný či nekonečný. Jedno ale víme jistě. Můžeme z něho spatřit jen velmi malou část a zbytek je pro nás ukrytý za horizontem. I kdybychom se snažili sebevíc a do řešení této úlohy zapojili veškeré své dosavadní znalosti, přírodním zákonům neporučíme a za horizont se podívat nemůžeme.

## 6. Vesmír je vnitřek černé díry

Často se objevuje tvrzení, že celý vesmír je vlastně obří černou dírou a my žijeme uvnitř ní. Takové tvrzení je tak trochu zmatením pojmů. Když v roce 1915 představil Albert Einstein světu obecnou relativitu, která je postavena na zakřivení času a prostoru v okolí hmotných těles, snažili se vědci nejprve nalézt pokřivení kolem obyčejné kuličky. Jako prvním se to podařilo Karlu Schwarzschildovi už v roce 1916.



Prostor a čas v okolí kuličky je zakřivený tak, že se většinou tělesa v okolí pohybují po stejných drahách jako v newtonovské teorii. Z řešení ale vyplývá, že pokud by centrální těleso při dané hmotnosti bylo extrémně malé (Slunce by muselo mít poloměr tři kilometry a Země devět milimetrů), začnou se dít zajímavé věci. Zakřivení bude natolik veliké, že z objektu nemůže uniknout žádné těleso, ani světlo. A právě takový objekt se dnes nazývá černou děrou. Schwarzschildovo řešení, včetně černé díry, popisuje zakřivení prostoru a času vně sféricky symetrického tělesa. Vesmír nemusí být sféricky symetrický a už vůbec se nenacházíme jako statický pozorovatel někde mimo vesmír, abychom toto řešení mohli použít. Naopak, jsme uvnitř vesmíru, jsme jeho nedílnou součástí a pohybujeme se spolu s jeho časoprostorem. Řešení rovnic obecné relativity v takovém případě (pro homogenní rozložení látky ve vesmíru) vede na tzv. Fridmanovo řešení, a to nemá s černými děrami nic společného.

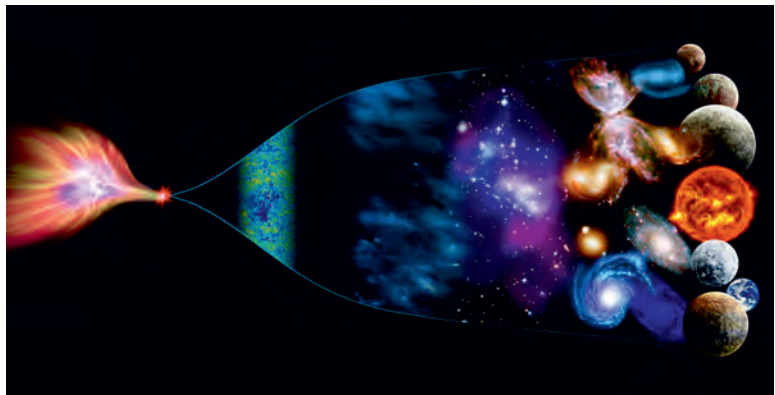
Černé díry nám ale před několika lety přece jen do kosmologie vstoupily. Niayesh Afshordi, Robert Mann a Razieh Pourhasan z Univerzity ve Waterloo a z Kanadského institutu pro teoretickou fyziku představili světu v roce 2014 další z mnoha zajímavých představ o zrodu vesmíru. Celý vesmír by mohl vzniknout v důsledku interakce černé díry přiléhající z extradimenzí (tedy dalších dimenzí, které nevnímáme) v mnohorozměrném vesmíru. Životaschopnost modelu je těžko odhadnutelná. Jak už jsme se zmínili, v budoucnu by mnohé o původu vesmíru mohlo napovědět zachycení gravitačních vln z období počátku vzniku světa. Jejich analýza by měla vyloučit modely, které nejsou v souladu se spektrem těchto vln.

## 7. Velký třesk a prvky

To, že v průběhu velkého třesku vznikaly prvky, je jen částečná pravda. Prvky ve vesmíru vznikaly a vznikají minimálně třemi způsoby. Prvním z nich je tzv. *primordiální nukleosyntéza*. Ta skutečně probíhala v prvních minutách velkého třesku, řádově od jedné do deseti minut. V divokém reji srážek se spolu s protony – jádry vodíku – začala objevovat jádra deuteria, nestabilního tritia, helia 3,

**Extradimenze** – další dimenze nad rámec běžných čtyř – tří prostorových a jedné časové. Poprvé přidali pátou dimenzi do rovnic obecné relativity německý matematik Theodor Klauza a švédský teoretik Oskar Klein v roce 1919. Někteří fyzikové se domnívají, že ve větším počtu dimenzí bude možné spojit obecnou relativitu s kvantovou teorií. Ne všechny přidávané dimenze jsou makroskopické. Největší trhlinou těchto teorií je, že ani na největších urychlovacích světy nebyly žádné podpisy extradimenzí dosud pozorovány.

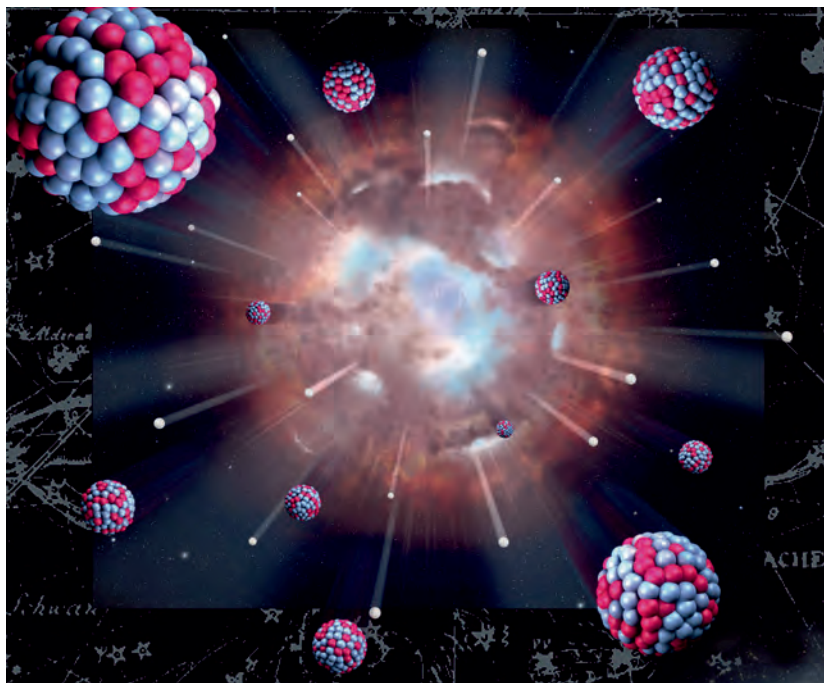
*Představa vzniku vesmíru z černé díry, která se vynořila z extradimenzí. Zdroj: Gabriela Secara, Perimeter Institute for Theoretical Physics.*





**Primordiální nukleosyntéza** – vznik lehkých atomových jader, který ve vesmíru probíhal řádově v minutách. Dříve byl vesmír příliš horký, později příliš řídký. V tomto období se ve vesmíru nacházely protony, neutrony, deuterony, jádra tritia, helia 3, helia 4, lithia a boru. Neutrony a jádra tritia se brzy samovolně rozpadly.

Těžká jádra vznikají například při sloučení dvou neutronových hvězd nebo při mohutných explozích supernov.  
Zdroj: Toshitaka Kajino.



helia 4, lithia 6 a lithia 7. Nestabilní jádra tritia a volné neutrony se postupně rozpadaly na jiné částice. Toto prvotvorné období trvalo jen velmi krátce. V časech menších než minuta byl každý nově vzniklý celek rozbit v dalších prudkých srážkách. V čase pozdějším než deset minut pravděpodobnost srážek díky expanzi razantně klesala a navíc ubývalo volných neutronů, které se rozpadaly na protony, elektrony a neutrino s poločasem rozpadu 10 minut (jejich střední doba života je cca 15 minut). V tak krátkém období mohly vzniknout jen jádra těch nejlehčích prvků. Jejich atomární podoba, tj. atomy i s elektronovými obaly, vznikala až v samotném závěru velkého třesku, v období cca 400 000 let po vzniku vesmíru.

Druhá vlna vzniku prvků probíhala (a stále probíhá) v nitru hvězd. Za extrémního tlaku a teploty se zde zpočátku slučují jádra vodíku na mimořádně stabilní jádra helia. V pozdějších fázích života hvězd dochází k vytváření ještě těžších jader až po železo, které má jádro s nejvyšší vazebnou energií na nukleon. Těžší jádra nemohou samo-

volně vznikat, k tomu by se zvenku musela dodat energie. První generace hvězd se objevovala od 200 milionů roků a jejich vlna kulminovala v období 550 milionů roků, kdy svým svitem ionizovaly okolí a vzniklé plazma polarizovalo reliktní záření. Tyto hvězdy byly obrovské (s hmotností řádově sto Sluncí) a tlak a teplota v nitru natolik extrémní, že tvorba prvků probíhala jak ve zrychleném filmu. Doba života těchto gigantů činila pouze desítky či stovky milionů let. Dnes vznikající hvězdy mají mnohem menší hmotnosti a jejich životní osudy se počítají na miliardy až desítky miliard let. V závěru vývoje některé hvězdy odhazují obálky či dokonce explodují jako supernovy a těžkými jádry obohatí okolní mlhoviny, které se stanou

zárodečnou polévkou pro vznik dalších generací hvězd. Proces smrti a stvoření probíhá po šroubovici zatím nekončícího vývoje.

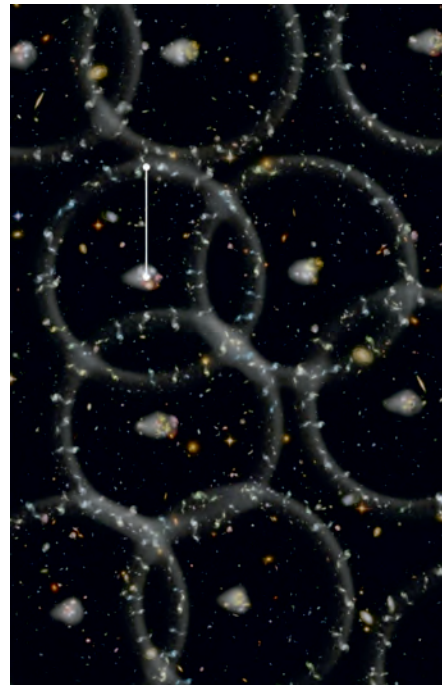
Kde se ale vzala jádra zlata, olova a dalších těžkých prvků, která jsou hmotnější než jádra železa, a nemohla vznikat fúzí v nitru hvězd? Odpověď je jednoduchá. Tato hmotná jádra vznikají při explozích supernov, kdy je dostatek energie, při níž jsou neutrony vtlačovány do již stávajících jader a vytvářejí se obří a často nestabilní (radioaktivní) jádra. K obdobnému procesu dochází také při sloučení dvou neutronových hvězd. V obou případech hrají velmi důležitou roli neutrina, která běžně považujeme za jakési podivné fluidum prostupující celým vesmírem. Neutrina vznikající při srážkách a rozpadech odnášejí z kolabujících objektů podstatnou část energie.

Prvky ve vesmíru tedy vznikají průběžně, a to i v současnosti. V průběhu velkého třesku vznikala jen ta nejjednodušší jádra, v nitrech hvězd se slučují jádra až po železo a ještě těžší jádra vznikají při explozích supernov a fúzích neutronových hvězd (takový děj se někdy označuje jako kilonova).

## 8. Našimi přístroji dohlédneme na počátek vesmíru

Lidské technologie jsou stále důmyslnější a umožňují člověku hluboké poznání přírodních zákonů. V astronomii jsme ale většinou odkázáni na elektromagnetické záření, které v průběhu velkého třesku intenzivně interagovalo se zárodečným plazmatem. Zkrátka pro elektromagnetický signál je počátek vesmíru zcela neprůhledný. Pokud se budeme dívat do velmi velké vzdálenosti, narazíme na neproniknutelnou stěnu konce velkého třesku, z níž k nám putuje téměř 14 miliard roků reliktní záření, které dnes díky expanzi vesmíru, při níž se prodlužuje i vlnová délka záření, vidíme v mikrovlnném oboru. Tuto v elektromagnetickém záření neproniknutelnou stěnu někdy nazýváme *sférou posledního rozptylu* (posledního rozptylu světla na volných elektronech, které se záhy staly součástí atomárních obalů).

Máme nějaké šance se dozvědět informace o průběhu samotného velkého třesku, nahlédnout do jeho kuchyně? Ano a dokonce nemalé. Především se leccos dozvíme z analýzy fluktuací reliktního záření, které pozorujeme na oně neproniknutelné stěně – sféře posledního rozptylu. Ale můžeme provádět i přímé experimenty. Pokoušíme se zachytit reliktní neutrina, která se měla podle našich představ uvolnit ze zárodečné pralátky kolem jedné sekundy po počátku a budujeme

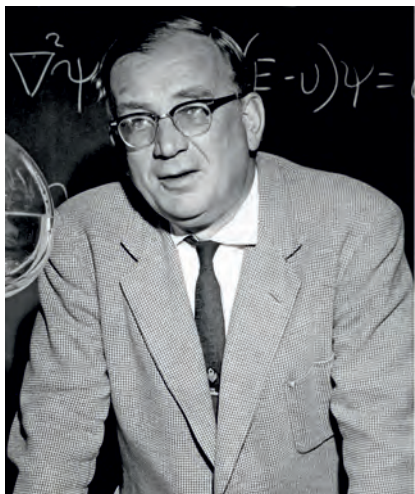


*Pokud se v závěru velkého třesku baryony (mezi ně patří neutrony a protony) rozvinuly do pravidelných obrazců (baryonových akustických oscilací neboli BAO), měly by se tyto oscilace v průběhu vývoje vesmíru přeměnit ve velkorozměrové struktury, v nichž jsou korelovány vzdálenosti mezi jednotlivými galaxiemi. K potvrzení této domněnky bude třeba pečlivých analýz velkorozměrových struktur detekovaných ve vesmíru. Zdroj: Z. Rostomian, LBNL, SDSS III, BOSS.*

**Sféra posledního rozptylu** – oblast, v níž se fotony naposledy rozptýlily na volných elektronech, které zanikly, neboť se staly součástí atomárních obalů. Jde o období konce velkého třesku, při němž vznikaly atomární obaly a od látky se oddělilo reliktní záření pozadí.

**Baryonové akustické oscilace** – BAO, fluktuace hustoty látky na konci velkého třesku. K hmotě atomární látky nejvíce přispívají neutrony a protony, které patří mezi baryony, odsud název těchto oscilací. V primordiálním plazmatu velkého třesku se šířily akustické vlny, které tyto fluktuace způsobily. V průběhu dalšího vývoje vesmíru se tyto akustické oscilace vyvinuly v dnes pozorované velkorozměrové struktury. Porovnání zárodečných fluktuací vtisknutých do reliktního záření se současnými velkorozměrovými strukturami je cenným zdrojem informací o vesmíru.

Nalevo je George Gamow, který je autorem teorie velkého třesku, fotografie pochází z roku 1961. Napravo je Fred Hoyle, který s touto teorií nikdy nesouhlasil a označil ji ve svém rozhlasovém vystoupení pejorativně jako „Big Bang“. Jeho fotografie je z roku 1958. Zdroj: Associated Press, Evening Standard, Getty Images.



přístroje (trojice sond LISA, tisíce radioteleskopů SKA), které by mohly zachytit gravitační vlny ze samotného vzniku vesmíru. Pokud se to někdy podaří, přestanou mít diskuze o vzniku světa charakter lidových bajek a povedou ke skutečným hypotézám a teoriím.

## 9. Velký třesk se podobal explozi

Občas se v médiích dočteme, že velký třesk byl obrovskou explozí či výbuchem, což evokuje dojem velké rány doprovázené zvukovými vlnami. Tato představa není úplně ideální, zejména proto, že dodnes nevíme, co přesně velký třesk odstartovalo. Pokud to byl fázový přechod z kvantové pěny, při němž se mikroskopické kvantové fluktuace zvětšily do makroskopických chuchvalců, byl tento jev spíše doprovázen vznikem tzv. *reliktních gravitačních vln* než vln zvukových. Nicméně i zvukové vlny mají v průběhu velkého třesku své místo. Různé nehomogenity zárodečného plazmatu lze skutečně v pozdějších fázích chápat jako zvukové vlny a dokonce metodami analýzy zvukových vln, zejména rozvojem do harmonických frekvencí, lze zjišťovat vlastnosti prostředí, v němž se tyto „vlny“ pohybují. Jak už víme, někdy jim dokonce říkáme baryonové akustické oscilace.

V roce 2014 Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy do škol distribuovalo učební text paní magistry Věry Pavlátové, ve kterém se doslova o vzniku vesmíru tvrdilo: „Před 15 miliardami let došlo zřejmě

k velké explozi nahromaděných plynů“. Nebyla to ani exploze, ani nahromaděné plyny, neboť lehká jádra vznikala až v minutách po začátku, první lehké atomy neschopné jakékoli exploze až v období 400 000 let a první těžké atomy se objevily až s první generací hvězd. Plyny se mohou nahromadit a explodovat například v kravině, jak popisoval tehdejší dobový tisk jednu událost v Německu, ale rozhodně ne při vzniku vesmíru. Možná, že německá událost natolik ovlivnila paní magistru, že ji zařadila do svého spisku, který se stal zdrojem

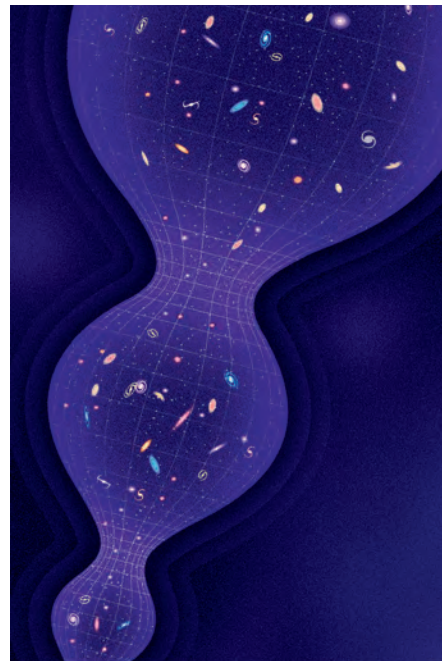


pobavení mnoha astronomů a fyziků a šířil se pod názvem „*Prdící krávy*“. Tvorba tohoto materiálu byla bohužel financována evropskými strukturálními fondy a také prostředky z našich daní.

## 10. Název „velký třesk“ pochází od tvůrců teorie

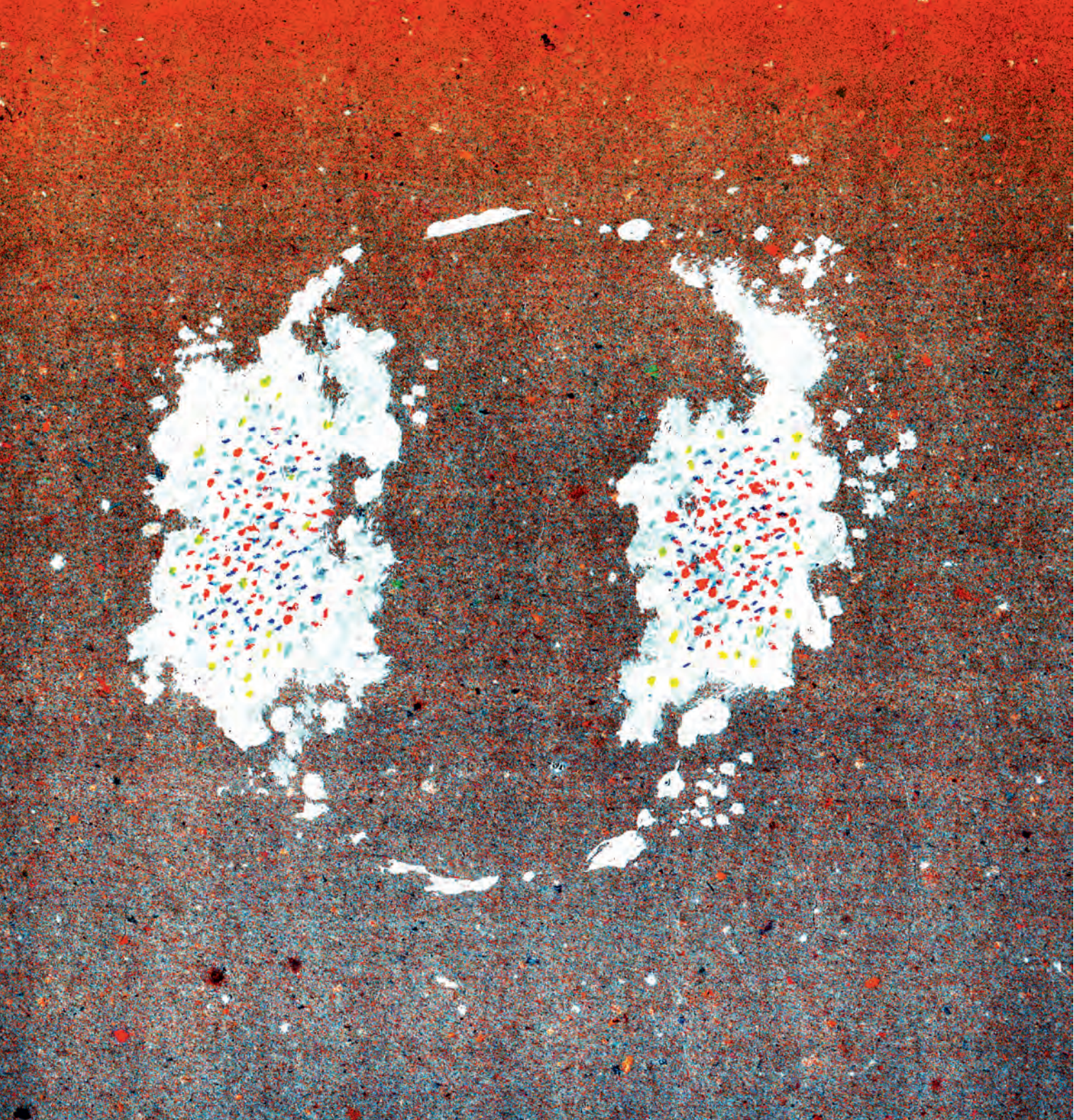
Předobrazem dnešní teorie velkého třesku byly Lemaîtreovy úvahy o prvotním atomu. První realistický průběh procesů v horkém zárodečném plazmatu propočítal americký fyzik ruského původu George Gamow se svými spolupracovníky – Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem na konci čtyřicátých let dvacátého století. Z tehdy dostupných účinných průřezů interakcí elementárních částic počítali, jak ze zárodečné polévky vznikala lehká atomová jádra a jak se na konci velkého třesku oddělilo záření od látky. Jejich teorie horkého původu světa nebyla ale všemi fyziky přijímána. Velmi známý anglický astronom Fred Hoyle ve svém pravidelném popularizačním pořadu rozhlasové stanice Rádio 3 společnosti BBC (bylo to 28. března 1949 v 18:30 hodin) označil Gamowovu teorii horkého původu světa jako *Big Bang* (Velký třesk). V žádném případě ale nezamýšlel dát této teorii přitažlivý název. Jeho označení bylo pejorativní, měl na mysli velké plácnutí, velký nesmysl. Džina vypuštěného z láhve už nelze nikdy vrátit zpět, a tak se tento původně posměšný název ujal.

■ Petr Kulháněk, aktualizováno 2022, AB 45, 46/2018



Mezi kosmology je velmi populární model oscilujícího vesmíru. Zdroj: Samuel Velasco, Quanta Magazine.







### III. FYZIKA

**Kvantový stav** – soubor pozorovatelných parametrů kvantového systému, kterými je systém plně charakterizován. Popis stavu musí respektovat omezení kvantové mechaniky na současnou měřitelnost či neměřitelnost veličin. Kvantový stav je zpravidla charakterizován sadou kvantových čísel a je matematicky vyjádřen tzv. vlnovou funkcí.

**De Broglieova vlna** – vlna, kterou se projevují objekty v mikrosvětě. Každý objekt mikrosvětě se v některých experimentech chová jako vlna a v některých jako částice. Tento dualismus vln a částic je jedním ze základních projevů kvantového světa. Vlnová délka de Broglieovy vlny je nepřímo úměrná součinu hmotnosti a rychlosti částice.

**Koherece** – situace, při které je fázový rozdíl interferujících vln ze zdroje či objektu v určitém bodě prostoru konstantní, anebo se mění pomalu v čase. Opakem koherence jsou nepravidelné a dostatečně rychlé změny fázového rozdílu interferujících vln. Ideální koherence nelze nikdy dosáhnout.

Montáž rakety s experimentem MAIUS-1. Zdroj: DLR.



## Nulté skupenství a beztlíže

Na základní a na střední škole se v hodinách fyziky učíme o prvních třech skupenstvích hmoty. Když je dobrá třída, sebere pan učitel energii a poví žákům o skupenství čtvrtém, o takzvaném plazmatu. Čím jsou žáci lepší, tím více energie je učitel ochoten do nich i do hmoty investovat a případně začne vyprávět o pátém skupenství, o kvarkovém-gluonovém plazmatu. Řetězec skupenství má však dva konce. Když se nám nedaří další energii do systému přidávat, zkusme ji tedy odebírat. Při opravdu nízkých energiích, které odpovídají teplotám v řádech zlomků milikelvinu je již pohyb atomů tak pomalý, že jejich rozkmit začne být srovnatelný s vlnovou délkou. Tehdy atomy s celočíselným spinem (patří do rodiny bosonů), začnou mít tendenci vyhledávat stejný kvantový stav. Takový shluk částic se začne chovat jako jediná částice. Tento stav hmoty předpověděli již počátkem minulého století pánové Albert Einstein a Satyendra Bose, po nich má i jméno: Boseho-Einsteinův kondenzát, zkráceně BEC.

### Jak vyrobit BEC

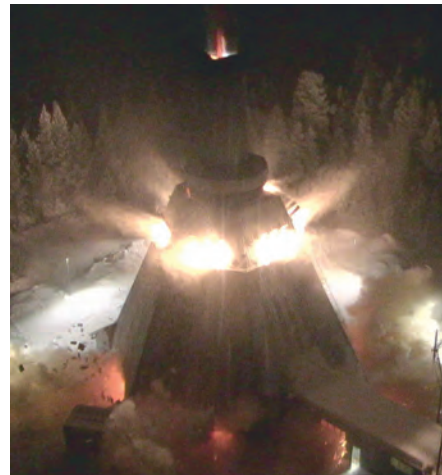
Dosáhnout tohoto stavu hmoty je technická výzva, kterou se plných sedmdesát let nedařilo smysluplně přijmout. Nejde jen o to, aby jednotlivé atomy zaujímaly stejný vnitřní kvantový stav, jako je například celkový moment hybnosti jádra a obalu (složený ze spinu a orbitálního momentu) nebo elektronová konfigurace obalu, ale také vnější kvantový stav. Je zapotřebí, aby částice měly stejnou hybnost a kinetickou energii. V tomto stavu se stírají rozdíly mezi jednotlivými částicemi, znalost stavu jedné částice zároveň znamená znalost stavu všech částic. Principiálně není možno žádným pozorováním jednotlivé částice od sebe rozlišit. Pokud jde o bosony, chová se celý systém jako jedna makroskopická částice vykazující společné kvantové vlastnosti. Protože je velikost de Broglieovy vlny nepřímo úměrná rychlosti částice, je zřejmý směr, kterým se musí experimentátor ubírat. Musí systém ochlazovat, aby klesla rychlost částic (tím se zvětšuje jejich vlnová délka) a zároveň se starat o dostatečnou hustotu (tím co nejvíce zmenšit vzdálenost mezi částicemi, ale ne zase moc, aby nedošlo ke kapalinění či tuhnutí). Ve chvíli, kdy je rozestup částic menší, než jejich de Broglieova vlnová délka, dochází náhle k fázovému přechodu. V něčem se však tento fázový přechod liší od běžných fázových pře-

chodů, jako je například kapalnění. Protože je zapotřebí, aby částice měly stejnou hybnost, hovoříme o fázovém přechodu v hybnostním prostoru. Poprvé bylo tohoto stavu dosaženo v roce 1995, kdy Eric Cornell a Carl Wieman zchladili atomy rubidia na teplotu 170 nanokelvinů. Soustava se začala chovat jako jediná makroskopická částice a vykazovala kvantové chování.

## BEC a beztíže

K praktickým aplikacím máme ještě daleko, nejprve je třeba chování BEC detailně prozkoumat. Dosáhnout Boseho-Einsteinova kondenzátu i pro velké skupiny částic dnes není problém. Hůře jsme na tom v době udržení tohoto stavu. Shluk koherentních částic je velice citlivý na cokoliv, a tak se doba jeho zkoumání omezuje na krátký čas, než podlehne gravitaci a opustí naše zorné pole. To je velice nepříjemné, protože přesnost měření roste s druhou mocninou doby pozorování. Samozřejmě se nabízí možnost umístit měřicí zařízení na oběžnou dráhu, kde můžeme držet kondenzát v beztíži po dosti dlouhou dobu.

To však není jediná možnost, jak tíhu eliminovat. Němci se rozhodli vyřešit problém s gravitací jiným způsobem, sice ne stoprocentním, ale vzhledem k vynaloženým prostředkům elegantnějším. Uvědomili si, že pohyb po oběžné dráze je pouze speciálním případem volného pádu a rozhodli se vytvářet mikrogravitaci jednodušším způsobem. Podobně, jako jsou astronauti připravováni na beztíži v letounech řítících se střemhlav dolů, nechali Němci padat své zařízení z téměř dvou set padesáti kilometrů. Získali tím asi šest minut práce v beztíži, což je dostatečně dlouho pro vykonání stovky experimentů. Počátek tohoto experimentu sahá až do roku 2004, kdy vznikl projekt QUANTUS (*QUANTen Gase Unter Schwerelosigkeit*). Atomy rubidia jsou nejprve ochlazeny metodou laserového ochlazování. K vytvoření BEC je však třeba teplotu snížit ještě více. Na řadu přichází magnetické ochlazování. Tým vědců z Leibnizovy Univerzity v Hannoveru vyvinul atomový čip, který generuje různé konfigurace magnetického pole. Chlazené atomy uzavře do magnetické ohrádky, kterou dokážou přelést jen ty nejenergetičtější. Tím průměrná teplota klesne, atomový čip sníží výšku magnetické bariéry a nechá uniknout opět ty nejrychlejší. Proces opakuje, dokud není teplota dostatečně nízká na vznik BEC. Vývoj čipu a celého zařízení trval sice třináct let, ale nakonec se podařilo aparaturu dotáhnout do funkčního prototypu.



Start rakety MAIUS-1 v lednu 2017. Zdroj: DLR.

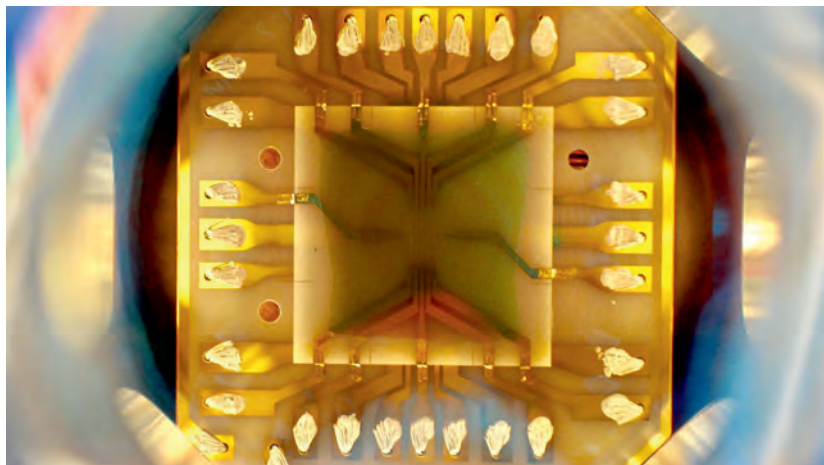
**Boseho-Einsteinův kondenzát** – Bose Einstein Condensate, BEC, stav hmoty, kdy se všechny bosony (částice s celočíselným spinem) nacházejí v jediném a také nejnižším možném energetickém stavu. Tyto částice se chovají jako jeden jediný celek (mají tzv. koherentní chování), jsou popsány jednou vlnovou funkcí a mají zajímavé makroskopické vlastnosti. Někdy se pro tento stav hmoty užívá také název bosonový kondenzát, superatom či supermolekula.

**Ramanova interferometrie** – jde o změnu směru i velikosti vlnového vektoru a polarizace fotonů při průchodu prostředím v důsledku interakce se dvěma stavy atomu či molekuly. Rozptýlené fotony mají jinou frekvenci, fázi i polarizaci a nesou informace o energetickém spektru rozptylového centra. Účinný průřez Ramanova rozptylu je zhruba  $10^{-30} \text{ cm}^2$ . Pokud do prostředí posíláme fotony s vhodnou frekvencí, může dojít ke stimulovanému Ramanovu rozptylu, který je mnohem účinnější. Na tomto jevu jsou založeny Ramanovy lasery.



**Laserové ochlazování** – technika využívající k ochlazování atomů laserového světla s vlnovou délkou nepatrně nižší než je charakteristický elektronový přechod v atomu. Toto „podladění“ má za následek, že atomy absorbují větší množství fotonů, pokud se pohybují směrem ke zdroji, než pokud se pohybují od zdroje. Při interakci s fotonem atom ztrácí odpovídající hybnost ve směru zdroje světla. Při následném vyzáření fotonu sice hybnost opět získá, ale v náhodném směru. Zpravidla se používá šest laserů ve směru a proti směru tří souřadnicových os. Ať se atom vydá kamkoli, vždy proti němu bude svítit laser se správně posunutou frekvencí. Mnohonásobným opakováním lze shluk atomů ochladit na nanokelvinové teploty. V roce 1997 byla za tento objev udělena Stevenovi Chuovi, Claudeovi Cohen-Tannoudžimu a Williamovi Phillipsovi Nobelova cena za fyziku.

Součástka zvaná atomový čip vyvinutá v Leibnizově Univerzitě v Hannoveru. Zdroj: DLR.



## Vzestup a pád BEC

Ty správné obrátky začal projekt nabírat v roce 2017, experimentem MAIUS-1 (*Materiewellen-Interferometrie unter Schwerelosigkeit*) umístěným na raketě Německého střediska pro letecké a vesmírné cesty, která dne 27. ledna 2017 vystartovala ze švédské balónové a raketové základny Esrange nedaleko města Kiruna. Tento malý kosmodrom patří Evropské kosmické agentuře. Raketa o výšce 12 metrů a průměru půl metru vystoupala do výšky 243 km, pak začala padat zpět k zemi a nakonec na padácích přistála. Na sledování letu se podílelo jedenáct německých univerzit a samozřejmě také švédský provozovatel. Experiment začal ve chvíli, kdy raketa dosáhla výšky 100 km a uvnitř nastal stav beztíže. Ačkoli vyhodnocování výsledků trvalo ještě hodně dlouhou dobu, už v prvních okamžicích bylo jasné, že se experiment zdařil. Poprvé v historii byl připraven Boseho-Einsteinův kondenzát ve stavu beztíže.

V tuto chvíli dostal projekt zelenou. Dlužno podotknout, že právem. Teprve před dvaceti lety bylo poprvé dosaženo BEC na laboratorním stole, a to v konfiguraci připomínající spíš pěči na oddělení ARO. Nyní téhož dosáhneme v automatickém režimu na přístrojích, které se musely vměstnat do ani ne třímetrového válce o průměru půl metru, a přestát otřesy a zrychlení při startu rakety. A tak i díky tomuto experimentu můžeme dnes přihlížet přípravám projektu QUANTUS IV, v rámci něhož vystartují dva další experimenty MAIUS-2 a MAIUS-3.

Experiment MAIUS-2 by se měl vydat na cestu na jaře roku 2022, MAIUS-3 na podzim 2023. V prvním z experimentů by mělo dojít k přípravě BEC složeného z atomů draslíku  $^{41}\text{K}$ . Současně se bude provádět interferometrie draslíku a rubidia. V druhém experimentu by měly být připraveny BEC kondenzáty jak  $^{41}\text{K}$ , tak  $^{87}\text{Rb}$ .

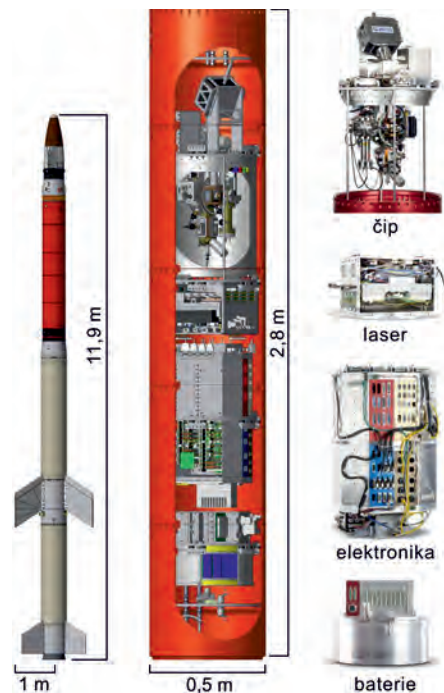
Výbava obou připravovaných nadpozemských experimentů bude stejná: Dvě pece ve vakuové komoře poslouží jako zdroj atomů draslíku a rubidia. Příslušné kon-

figurace magnetického pole vytvoří speciálně vyvinutý atomový čip. Vše bude pracovat za tlaku  $10^{-8}$  Pa, o což se postarají dvě sublimační titanová čerpadla. Správný průběh experimentu v mikrogravitaci zajistí elektronický modul. Jedná se o soustavu osazených desek, propojenou sběrnicovým systémem vyvinutým speciálně pro práci s výkonnými laserovými diodami. Laserový systém se skládá ze dvou částí – pozemního a letového. O průběh experimentu v raketě se postará letový laserový systém. Bude ochlazovat atomy draslíku a rubidia na nízké teploty. Hlavní úlohu také sehraje při Ramanově interferometrii. Poslední součástí experimentů je bateriový set, který zajistí napájení přístrojů v průběhu experimentů.

### Vznešené cíle

O projekt projevil zájem hned v jeho počátcích i americká NASA a jeho modifikovanou verzi zařadila do programu laboratoře CAL (*Cold Atom Lab*), která je umístěná na Mezinárodní kosmické stanici. Nové experimenty umožní testovat kvantovou teorii na zcela bezprecedentní úrovni. Nepochybně přispějí ke vzniku nových technologií. Možná uplatnění se již rýsují. Pomocí BEC se podařilo vytvořit optické prostředí, v němž se zachytilo světlo a pomocí speciálního pulsu opět rekonstruovalo, což se dá také interpretovat jako zastavení světla. Velké naděje se také vkládají do aplikací ve výpočetní technice. Jednak v té klasické, protože by BEC mohl principiálně sloužit k uchování informací, ale hlavně v kvantových počítačích. Dále se poukazuje na jakousi formální podobnost s lasery, kde se v podobném stavu nachází fotony. Hmota v koherentním stavu by mohla být základem pro konstrukce unikátních diagnostických přístrojů. Čip podobný těm, které využívají experimenty MAIUS by mohl být užitečný v navigačních systémech. Interferenční obrazec kondenzátu je velmi citlivý na nepatrné změny gravitačního pole a může být použit k přesnému mapování gravitačního pole. A tyto mapy lze pak využít při manévrech vesmírných lodí v kosmickém prostoru. O různé aplikace výzkumu Boseho-Einsteinova kondenzátu v prostředí mikrogravitace tedy rozhodně nebude nouze.

■ Rudolf Mentzl, aktualizováno 2022, AB 42/2018



Experiment MAIUS. Schéma uložení jednotlivých přístrojů, řídicí elektroniky a baterie v experimentální části nosné rakety. Zdroj: DLR.

**MAIUS** – Materiewellen-Interferometrie Unter Schwerelosigkeit, experiment Leibnizovy University v Hannoveru a Německého střediska pro letecké a vesmírné cesty. Výsledkem spolupráce je automatické zařízení na výrobu a testování Boseho-Einsteinova kondenzátu ve stavu beztlaku, který se vytvoří v raketě letící po balistické dráze.

## I jádro lze vzrušit, aneb jaderné hodiny

**Atomové hodiny** – hodiny, jejichž základním řídicím cyklem je frekvence vyzařovaná atomem při nějakém známém přechodu mezi jeho energetickými stavy. Běžná přesnost takových hodin je dnes asi  $10^{-9}$  s za den. Nejlepší atomové hodiny pracují při teplotách blízkých absolutní nule. Ty mohou dosahovat až fascinující přesnosti desetiny sekundy za dobu, co existuje vesmír.

**Slupkový model jádra** – popisuje nukleony jako navzájem spolu neinteragující částice, které se pohybují volně v potenciálové jámě. Povolené stavy, ve kterých se mohou nukleony nacházet, získáme na základě řešení Schrödingerovy rovnice. Skupina stavů s blízkou energií tvoří slupku.

Cesiové svazkové hodiny 5071A coby státní etalon frekvence a času. Zdroj: Český metrologický institut.



Fyzikální veličina, kterou dokážeme měřit s největší přesností, je již po mnoho desetiletí čas. Odvíjí se to patrně od snadné dostupnosti etalonu. Příroda nabízí mnoho periodicky se opakujících dějů, které lze využít pro stanovení časové základny. Přesnost měření však nezávisí pouze na rovnoměrnosti těchto dějů, ale také na naší schopnosti eliminovat rušivé vlivy. Ukazuje se, že tato rušení rostou s rozměry etalonu. Částečně to platilo již v mechanických chronometrech. Příliš dlouhá kyvadla vstupovala do rezonance se záchvěvy věží, ve kterých byla uchycena. Naproti tomu malé nepokoje kapesních hodinek, jakkoli trpí jinými neduhy, neovlivní ani krátkoperiodické otřesy denního užívání. Miniaturní krystaly posunují přesnost hodin ještě dále. Nejlépe pak změříme čas hodinami atomovými, které se opírají o oscilátory na mikroskopické úrovni. I tady však rozměry hrají roli. První atomové hodiny využívaly kmitání molekuly čpavku. Když i ta se ukázala příliš velká, přišel na řadu atom cesia. Perioda záření cesia 133, odpovídající přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury jeho základního stavu, se stala základem pro definici sekundy. Je možné sáhnout

po ještě menších rozměrech a získat přesnější etalon? Odpověď zní kladně, zatím jsme se pohybovali pouze v elektronovém obalu. Je tu ale ještě atomové jádro.

### Jak pracují atomové hodiny

Připomeňme si nyní ve stručnosti základní princip běžných cesiových hodin. Skládají se ze dvou stěžejních komponent. Z nádoby s parami cesia a laditelného generátoru mikrovln. Přeskoky elektronů mezi orbitály generují fotony o frekvenci v řádu stovek terahertzů, což je obtížně dosažitelná frekvence. Proto atomové hodiny nepracují s přesko-

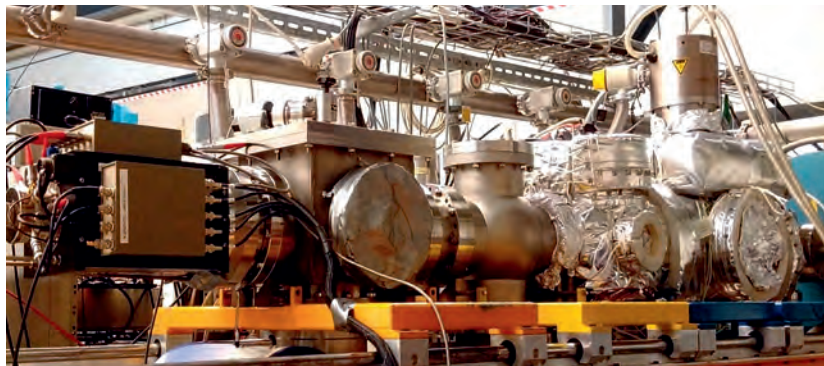
ky mezi orbitály, nýbrž mezi hladinami velmi jemné struktury atomu v jeho základním stavu, které jsou charakteristické snadno realizovatelnými frekvencemi v jednotkách gigahertzů, tedy v mikrovlnách. Mikrovlny správné frekvence dokážou v cesiu vybudit přeskok elektronu na vyšší hladinu velmi jemné struktury. Ten se dá snadno detekovat, protože cesium má v excitovaném stavu jiné magnetické vlastnosti. Správný chod hodin není nic jiného než neustálé doladování generátoru tak, aby bylo co nejvíce atomů cesia v excitovaném stavu. Převrácenou hodnotu frekvence generátoru pak chápeme jako základní časovou jednotku, od které je odvozena sekunda. Praktické řešení hodin je samozřejmě spojeno s řadou technických i principiálních problémů. Komora s atomy cesia je dynamický systém s magnetickým filtrem na vstupu i na výstupu. Vstupní filtr se stará o to, aby do komory vstupovaly pouze nevybuzené atomy. Na výstupu jsou atomy opět magneticky tříděny a podle poměru mezi počtem vybuzených a nevybuzených se usuzuje na míru excitace.

Současná technika již dokáže pracovat i s přeskoky na běžných elektronových orbitalech odpovídajícími optickému oboru. Tak lze konstruovat ještě přesnější hodiny. Hodiny tak přesné, že zpochybňují etalon času založený na cesiu, a tak možná brzy začnou definici sekundy odtikávat poslední sekundy. Hlavní princip těchto hodin – zpětná vazba řídicí chod hodinového signálu – zůstává stejný. Atomové hodiny pracující v optickém oboru (například stronciové, ytterbiové) mají větší přesnost a stabilitu díky vyšší energii nutné k přeskoku. Ještě vyšší energie nalezneme v atomovém jádře, které je zároveň o pět řádů menší než celý atom a je tedy i odolnější vůči rušivým vlivům.

Současná technika již dokáže pracovat i s přeskoky na běžných elektronových orbitalech odpovídajícími optickému oboru. Tak lze konstruovat ještě přesnější hodiny. Hodiny tak přesné, že zpochybňují etalon času založený na cesiu, a tak možná brzy začnou definici sekundy odtikávat poslední sekundy. Hlavní princip těchto hodin – zpětná vazba řídicí chod hodinového signálu – zůstává stejný. Atomové hodiny pracující v optickém oboru (například stronciové, ytterbiové) mají větší přesnost a stabilitu díky vyšší energii nutné k přeskoku. Ještě vyšší energie nalezneme v atomovém jádře, které je zároveň o pět řádů menší než celý atom a je tedy i odolnější vůči rušivým vlivům.

## Do nitra jádra

Atomové jádro drží pohromadě díky silám silné interakce. Tyto síly vytváří energetickou jámu, na jejímž dně se nachází nukleony. Snad proto jsme si zvykli na atomové jádro pohlížet jako na jutový pytel, ze kterého se nukleony sice nemohou dostat, ale dokud jsou v něm,



Přístroj pro přímou detekci izomeru jádra thoria  $^{229m}\text{Th}$ .  
Zdroj: Lars von der Wense, LMU.

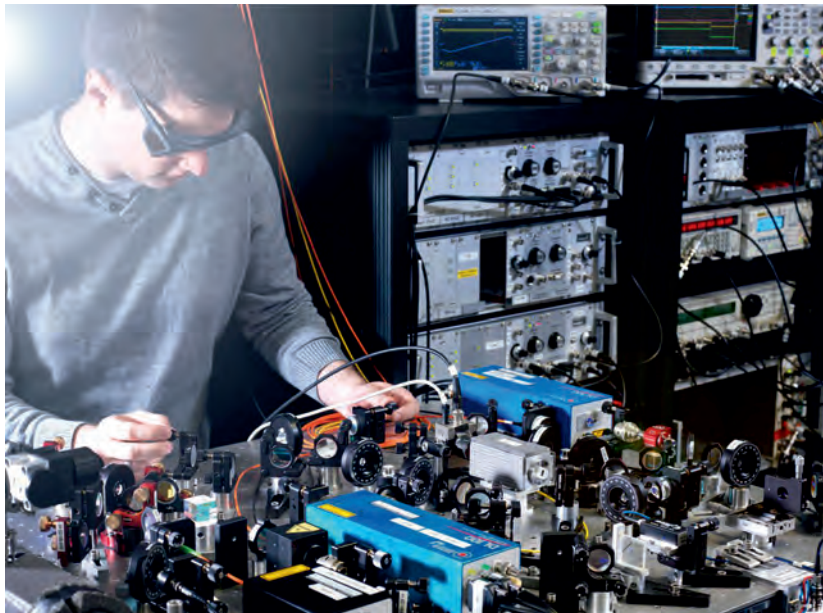
**Atomové jádro** – centrální část atomu, v níž je soustředěna naprostá většina jeho hmotnosti. Jádro je složeno z nukleonů, ty dělíme na kladně nabitě protony a neutrony bez náboje. Samotné nukleony jsou složeny z kvarků, které drží pohromadě silná interakce. Ta z nukleonů „prosakuje“ navenek a drží celé jádro proti odpuzivým elektromagnetickým silám. Jádro má rozměry řádově  $10^{-14}$  m. Nejlépe vázaná jádra jsou v okolí železa  $^{56}\text{Fe}$ . Proto lze získávat energii štěpením větších jader, nebo slučováním jader lehčích. Nukleony v jádře se energeticky seskupují do slupek. Slupkový model jádra vytvořila Maria Goeppert Mayerová. Za tento počín získala Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1963.



**Sekunda** – doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133, který je v klidu za teploty blízké absolutní nule. Původ definice sahá do roku 1967, upravena byla v roce 1997. Od května 2019 je sekunda definována frekvencí příslušného přechodu, která je zařazována. Na podstatě definice se nic nemění.

**Jemná struktura** – rozštěpení energetických hladin v elektronovém obalu způsobené interakcí orbitálního a spinového momentu elektronů. O řád menší je tzv. velmi jemná struktura, která vzniká dalším rozštěpením energetických hladin vlivem interakce elektronů s magnetickým polem jádra atomu, tj. s jeho spiny.

Laserová sestava pro sledování změn stavu jádra izotopu thoria  $^{229m}\text{Th}$ . Zdroj: PTB, Welt der Physik.



pohybují se víceméně volně. Jako vše v kvantovém světě, jsou i silné jaderné síly kvantovány. Nukleony se díky Pauliho vylučovacímu principu mohou vyskytovat jen na určitých energetických hladinách, které obsazují podle známých pravidel. Vzdáleně se to podobá hladinám v elektronovém obalu, nicméně jsou tu důležité rozdíly plynoucí z různé povahy vedlejších kvantových čísel hladin v jádře a obalu. Díky tomu se hladiny sdružují do skupin, kterým říkáme slupky, mluvíme o slupkovém modelu jádra. Oproti elektronovému obalu tu jsou ovšem dva druhy částic. Vedle neutronů zde navíc najdeme elektricky nabitě protony, navzájem se coulombicky odpuzující. Silná interakce sice nad elektrickými silami vítězí, ty přesto dokážou ovlivnit celkovou konfiguraci, proto se obsazení neutronových a protonových slupek liší. Zatímco protonové slupky obsahují při úplném zaplnění 2, 6, 12, 8, 22 a 32 protonů, u neutronů připadá v úvahu ještě jedna slupka obsahující 44 neutronů. Jádro s plně obsazenými slupkami bývá mimořádně stabilní. Ačkoli je podstata sil panujících v jádře jiná, nemůžeme přehlédnout jistou formální podobnost s elektronovým obalem a jeho netečností v případech zaplněných hladin.

## Jaderné hodiny

V analogiích s hladinami elektronového obalu můžeme pokračovat. I v jádru se snaží nukleony zaujmout co nejvýhodnější energetickou polohu. Po dodání energie přeskočí do vyšší slupky, kde nějakou dobu setrvávají a pak spadnou zpět. I zde mluvíme o excitovaném stavu. Proton můžeme vybudit i fotonem. To je výhodné, protože ten je svázan s určitou frekvencí, která by se mohla stát časovou základnou. Podobně jako v cesiových atomových hodinách hledáme optimální frekvenci, při které dochází k excitaci elektronu, tady se snažíme dosáhnout excitace jádra. Excitace jádra na sebe upozorní změnou

elektrického a magnetického momentu. Zdá se, že máme vše potřebné ke konstrukci jaderných hodin. Jeden zádrhel však zůstal.

Na excitaci jádra je zapotřebí poměrně vysoká energie. Energie odpovídající gama záření, se kterým zatím nedovedeme pracovat s dostatečnou elegancí. Obrat přišel nedávno. Peter Thirolf, Lars von der Wense a Benedict Seiferle z Mnichovské university dokázali z rozpadových produktů uranu  $^{233}\text{U}$  izolovat izotop thoria  $^{229}\text{Th}$ , jehož jádro je v metastabilním stavu (hovoříme o jaderném izomeru s označením  $^{229\text{m}}\text{Th}$ ). O tomto izomeru se vědělo již dávno z nepřímých pozorování, ale teprve nyní se podařilo jeho existenci prokázat. Izotop  $^{229\text{m}}\text{Th}$  je zatím jediný známý prvek, jehož jádro lze excitovat ultrafialovým zářením. Cesta k sestrojení hodin využívajících přechodů v atomovém jádru se otevřela.

## Nač taková přesnost?

V roce 2003, při stavbě silničního mostu Hochrheinbrücke mezi Švýcarskem a Německem došlo k poučné události. Obě země využívají jiného referenčního bodu při určování nadmořské výšky. Výškový rozdíl mezi nimi činí 27 cm. To je geodetům samozřejmě velice dobře známo, a tak se usnesli, že na švýcarské straně tuto hodnotu přičtou. Kvůli chybě ve znamínku však ustavili výšku základního kamene o 54 cm níže. Chyba je samozřejmě v lidském faktoru, její kořeny ale leží jinde. O znaménku by nebylo třeba vůbec rozmýšlet, pokud by byl stanoven jednotný referenční bod nadmořské výšky, kterých je zatím několik. Jejich sjednocení není triviální úlohou ani v éře satelitní navigace. GPS s podporou pozemní korekční stanice sice dokáže změřit polohu v prostoru s dostatečnou přesností, ze které lze zjistit vzdálenost od středu Země, jenomže neposkytne údaj, který bychom potřebovali. Ponechme stranou problém s určením přesné nadmořské výšky korekční stanice. Principiální problém tkví v tom, že geodety nezajímají absolutní souřadnice v prostoru. Úkolem geodeta je vytyčit vodorovnou plochu. Díky nerovnoměrnosti rozložení hmoty v Zemi i díky (eliminovatelné) závislosti na zeměpisné šířce, není tíhové zrychlení na všech místech na Zemi stejné, tedy ani hladina vody pomyslně pokrývající celou Zemi není jednoznačně určena vzdáleností od jejího středu. Hladina vody odpovídá určité úrovni gravitačního potenciálu. Dnešní časoměrná technika nabízí možnost, jak měřit zrychlení s bezprecedentní přesností. Z obecné teorie relativity plyne, že



Dvojice bludných balvanů označovaných Pierre du Niton v Ženevském jezeře slouží jako referenční bod pro určování nadmořské výšky. Rozhodně nepůsobí dojmem neotřesitelné stability. Zdroj: Imago.

**Velmi jemná struktura** – velmi malé rozštěpení energetických hladin v elektronovém obalu způsobené interakcí spinů jádra a elektronů. Poprvé pozorováno Albertem Abrahamem Michelsonem v roce 1891, vysvětlení však podal až Wolfgang Pauli v roce 1924. Toto rozštěpení je asi o tři řády menší než jsou rozdíly hladin jemné struktury a je v optickém oboru pozorovatelné jen spektroskopy s vysokou rozlišovací schopností.



Mobilní verze optických atomových stronciových hodin. Nápis informuje kolemjdoucí vozidla o použité frekvenci. Zdroj: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

**PTB** – Physikalisch-Technische Bundesanstalt, národní metrologický ústav Spolkové republiky Německo. Je nejvyšší autoritou, kterou přímo řídí vláda. Organizace je nástupcem PTR (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) založené v roce 1887. Duchovními otci byli Werner von Siemens a Hermann von Helmholtz.

rychlost běhu času je na zrychlení závislá. Říkáme, že hmotné objekty, které jsou zdrojem gravitačního pole, zakřivují čas. Toto zakřivení je sice zanedbatelné, nicméně měřitelné. Již v roce 1960 pánové Robert Pound a Glen Rebka změřili rozdíl v chodu času způsobeném gravitací Země na výškovém rozdílu necelých 23 metrů.

Dnes máme k dispozici hodiny, které dokážou měřit čas s odchylkou jedné sekundy za 20 miliard let. Jestliže je náš vesmír starý necelých 14 miliard let, zdá se logické ptát se, k čemu potřebujeme takovou nebo ještě vyšší přesnost.

Předchozí odstavce jednu odpověď dávají. Optické atomové hodiny, ještě před rokem neschopné opustit prostředí laboratoře, se dnes vyrábějí jako mobilní zařízení namontované na přívěsu osobního automobilu. Synchronizací takových hodin, rozmístěných po celém světě, dokážeme měřit drobné deformace času související s rozdílnými hodnotami tíhového zrychlení. Tím se otevřela cesta k praktické definici referenčního bodu nadmořské výšky.

Nabízejí se i další využití. Otevírá se nové okno do hlubin Země. Touto metodou budeme již brzy detekovat přesuny magmatu, což by mohlo odkrýt tajemství skrývající se za migrováním magnetických pólů nebo třeba povede i k předvídání zemětřesení. S jadernými hodinami založenými na periodické excitaci jádra thoria  $^{229\text{m}}\text{Th}$  se přesnost takových měření ještě zvýší. A je tu ještě význam teoretický. Zkoumání chodu času v prostředí, kde vládne silná interakce. Žádná teorie zatím nevyžaduje, aby se čas v atomovém jádře choval jinak. Potvrdit to je však potřeba. Kdyby se ukázalo, že tomu tak není, objevili bychom novou fyziku, která posune poznání lidstva o úroveň dál.

■ Dana a Rudolf Mentzlovi, 1. 3. 2021, AB 9/2021



# Relativistické efekty v atomu

Počátek minulého století dal vzniknout dvěma teoriím, které aspirují na post vládce světa. Obě popisují náš svět s přesností, která je ověřena na počet desetinných míst o mnoho převyšující naše reálné potřeby. Přesto víme, že alespoň jedna z nich není správně. Kvantová teorie i teorie relativity, o kterých je tu řeč, ztrácejí na svém lesku tam, kde se potkávají. Na malých škálách předvídají hodnoty rostoucí nade všechny meze, a proto... a proto se pojďme podívat tam, kde se tyto dvě teorie vhodně doplňují a vysvětlují, proč je zlato žluté, rtuť tekutá, wolframové vlákno se v žárovce nevypaří nebo prostě jen to, proč nás atmosférický kyslík dávno nespálil, jak by podle tradičního pohledu měl.

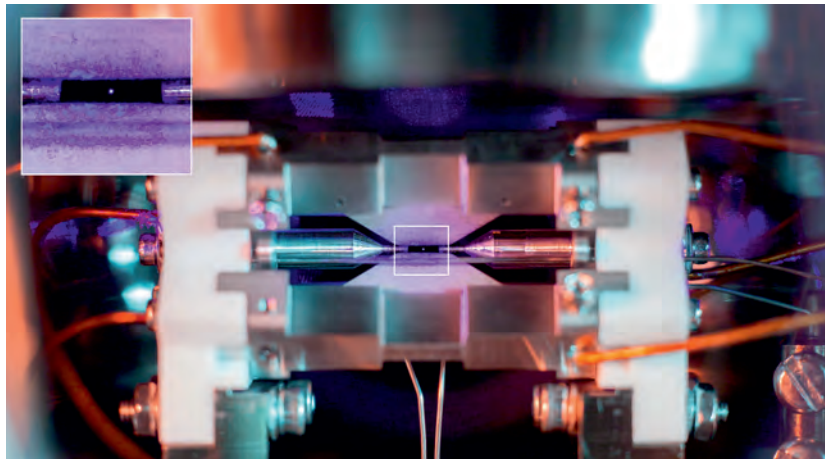
## Atomy a relativita

Podle výpočtu na základě Bohrova modelu atomu dosahuje rychlost elektronu v atomárním obalu vodíku hodnoty přibližně 2 200 km/s. Toto mechanistické pojetí nekoresponduje se skutečností a slouží pouze k vytvoření povšechné představy. Přesto, nebo právě proto, chvíli u něj zůstaňme. Vodík je nejlehčí prvek s nejmenšími přitažlivými silami mezi jádrem a obalem, a přesto tu rychlost elektronu dosahuje téměř jednoho procenta rychlosti světla ve vakuu. V atomech, jejichž jádra obsahují více protonů, panují mnohem větší síly, a tedy i rychlosti elektronů v obalu. Například u jádra s osmdesáti protony (rtuť) můžeme dopočítat, že rychlost elektronu je 58 % rychlosti světla. To už je hodnota, u které nemůžeme zanedbat relativistické efekty. Lorentzův kontrakční faktor zde dosahuje hodnoty téměř 1,23 a v tomto poměru se zvýší hmotnost elektronu a zároveň zmenší poloměr dráhy. Je zřejmé, že má smysl sáhnout po modelech, které relativistické efekty zohledňují.

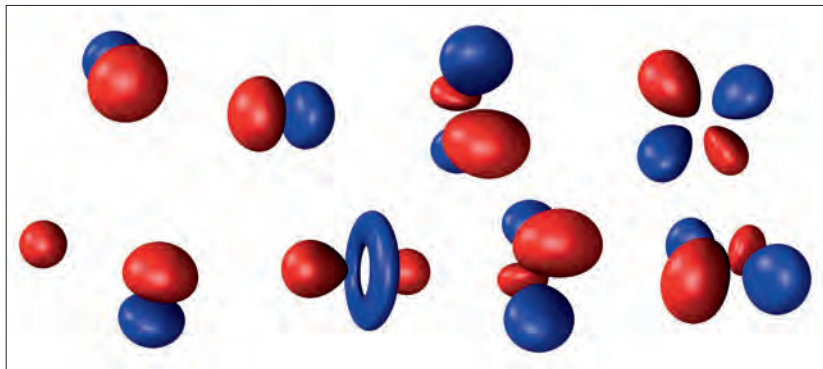
**Atom** – základní strukturní jednotka hmoty, jádro je složeno z neutronů a protonů, obaly z elektronů. Rozměry atomu jsou  $10^{-10}$  m, rozměry jádra  $10^{-14}$  m, hustota atomu je  $10^{11}$  g·cm<sup>-3</sup>, hustota jádra  $10^{14}$  g·cm<sup>-3</sup>. Elektrony nejsou v atomárním obalu lokalizovány, můžeme určit jen pravděpodobnosti jejich výskytu v tzv. orbitalech.

**Bohrův model atomu** – představa atomu jako planetární soustavy, v níž elektrony krouží kolem jádra po „dovolených“ trajektoriích. Model představil Niels Bohr v roce 1913. Model vysvětlil spektrum vodíku, ale z hlediska kvantové teorie, která má pravděpodobnostní charakter, nakonec neobstál.

Fotografie jediného zářícího atomu stroncia pořízená Davidem Nadlingerem, doktorským studentem Oxfordské univerzity. Za fotografii získal první cenu EPSRC (2018). Atom (tečka uprostřed) je excitován laserem, proto svítí. Zdroj: Oxford University.







Tvary jednotlivých orbitalů a jejich zaplňování elektrony. Orbital  $s$  jedním kulově symetrickým lalokem je  $s$ , dva laloky mají  $p$  orbitály a orbitály  $d$  mají na obrázku více laloků. Zdroj: Nano Science Center.

Korektní modely respektující pravidla kvantové mechaniky poskytují výsledky analogické mechanickým modelům. Nemluvíme zde o oběžných drahách, nýbrž o orbitalech  $s$ ,  $p$ ,  $d$  a  $f$ . I zde se relativistické efekty zvyšují s rostoucím protonovým číslem. Nejvíce se samozřejmě deformuje orbit  $s$ , který je nejbližší jádru. Vnější orbity  $d$  a  $f$  jsou již vzdálené, zde se relativita významně neuplatňuje. Tím

by se mohlo zdát, že jsme se ocitli na čistě akademické půdě, protože chemická rozmanitost vesmíru je dána právě obsazením vnějších vrstev. Tak uvažoval i sám Paul Dirac, který se zasloužil o začlenění speciální relativity do popisu atomových orbitalů. Situace je však složitější. Přímými relativistickými efekty je nejvíce ovlivněna vnitřní vrstva  $s$ . U těžkých prvků se nachází mnohem blíže k jádru, než by vyžadovalo klasické nerelativistické pojetí. Tím účinněji však stíní jádro, vnější vrstvy  $d$  a  $f$  pocítují jeho kladný náboj slaběji a posunují se do větší vzdálenosti. Mluvíme pak o nepřímém relativistickém jevu. Vrstva  $p$  zůstává téměř beze změny, nachází se ve vzdálenosti, kde jsou relativistické efekty zhruba kompenzovány stíněním slupkou  $s$ . Posun vrstev  $d$  a  $f$  už nemůže brát chemik na lehkou váhu. Atomy tvoří vazby právě díky elektronům na vnějších orbitalech. Pokud jsou dále od jádra, jsou slaběji vázány a mnohem snáze se excitují nebo atom opouštějí.

## Proč je zlato žluté a rtuť tekutá

Zlato a stříbro se nacházejí ve stejné skupině tabulky prvků, daly by se tedy očekávat podobné rysy. Vnější elektronové hladiny stříbra jsou s atomem pevně svázány a excitovat je lze pouze energetickými fotony, které ve viditelném světle nejsou. Naproti tomu jádro zlata obsahuje o 32 protonů více, valenční elektrony (u přechodových prvků orbital  $d$ ) se díky nepřímému relativistickému jevu přiblíží k vodivostnímu pásu (pás energií, v němž nejsou elektrony vázány ke konkrétnímu jádru) natolik, že je lze excitovat i modrým světlem. Jinými slovy, vnější elektronové slupky jsou schopny pohlcovat modré světlo, které v odraženém světle chybí. Proto se zlato třpytí žlutě.

**Multiplet** – skupina příbuzných kvantových stavů, například v elektronovém obalu molekuly. Jednotlivé stavy se liší projekcí celkového spinu a jejich počet  $(2s+1)$  se nazývá multiplacita. V částicové fyzice se jako multiplet se také označují skupiny příbuzných elementárních částic, které se liší projekcí izospinu.

**Singlet** – stav kvantového systému, například elektronového obalu molekuly, při kterém jsou všechny spiny spárovány. Celkový spin je nula a multiplacita stavu je rovna 1.

**Triplet** – stav kvantového systému, například elektronového obalu molekuly, ve kterém je celkový spin roven jedné a multiplacita rovna třem (spin rovný jedné může mít tři projekce: 0, +1, -1). Zářivý přechod molekul z tripletového stavu do singletového stavu je vzhledem k dlouhým časům relaxace označován jako fosforescence. Skutečnost, že se molekula kyslíku za pokojové teploty vyskytuje v tripletovém stavu, umožňuje výskyt kyslíkové atmosféry na Zemi, neboť tento stav je z hlediska chemické kinetiky jen málo reaktivní.

Ještě vyšší atomové číslo má rtuť. Zde je orbital s deformovaným ještě více, kdežto orbital  $p$  zůstává na svém místě. Důležité je, že právě tyto dva orbitály se podílejí na vazbách kovové mřížky. Ta je tím silnější, čím více se orbitály překrývají. U rtuti je již jejich vzájemná vzdálenost příliš velká, síly jsou slabé, a proto je rtuť kapalná i při teplotách hluboko pod bodem mrazu. Je paradoxní, že tentýž efekt u prvků, jako je třeba wolfram, naopak způsobuje odolnost vůči vysokým teplotám. Je to proto, že u těchto prvků se na vazbách podílejí slupky  $d$ , které se díky nepřímým relativistickým jevům roztahují, a proto překrývají.

## Spin

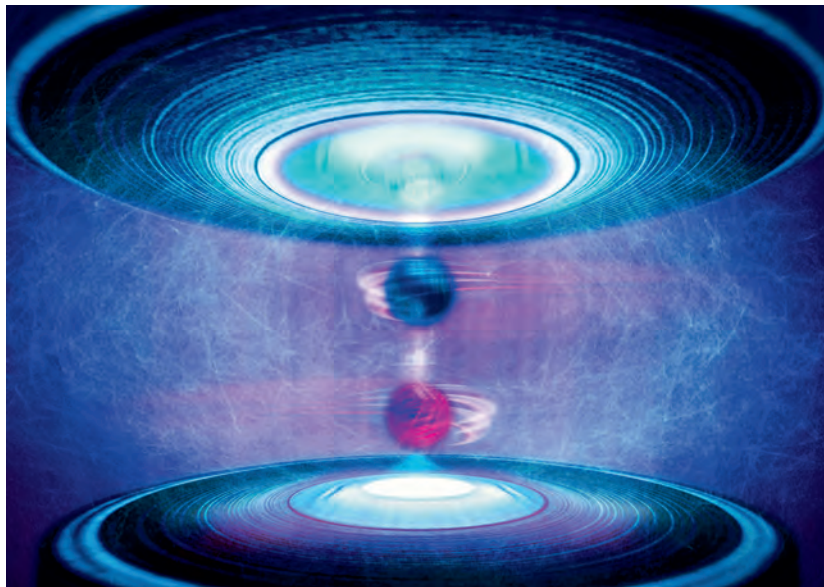
V roce 1925, ve snaze vysvětlit některé aspekty chování atomu, navrhl student Ralph Kronig další kvantovou vlastnost – rotaci – a nazval ji spin. Jeho učitel Wolfgang Pauli takový přístup zavrhl. Správně předpokládal, že zavádění čistě mechanistických představ do kvantové teorie je cesta do pekel. Nicméně několik málo měsíců poté přišli se stejnou myšlenkou nizozemští fyzikové Georg E. Uhlenbeck a Samuel A. Goudsmit a jejich myšlenka se okamžitě ujala. Pravdu měli všichni. Spin je důležitá kvantová vlastnost, ale je nesprávné ji považovat za rotaci, tak jak ji známe z makrosvětla. O tři roky později problém definitivně vyřešil Paul Dirac. Když do rovnic popisujících chování částic zavedl relativistické efekty, objevila se v jeho výpočtech zcela přirozeným způsobem nová vlastnost, kterou nebylo obtížné se spinem ztotožnit.

Elektrony se v orbitalech usazují po dvojicích, ale vždy s opačnou projekcí spinu. Zaujímají tzv. singletový stav vyznačující se tím, že má nulový magnetický moment. Tak zní jedno ze základních kvantových příkázání, se kterým by se nedalo nic dělat, kdyby se tu neuplatňovaly relativistické jevy. Díky nim se může občas stát, že oba spiny

**Bílé zlato** – slitina zlata s jiným kovem. Mezi příměsami musí být alespoň jeden bílý kov, typicky nikl nebo paládium. Barva slitiny je také bílá.

**Spin** – vlastní (vnitřní) rotační moment částice související s Lorentzovou symetrií. Pro částici v centrálním poli se přirozeným způsobem skládá s momentem hybnosti. Částice s nenulovým spinem se mohou chovat jako elementární magnetické dipóly, aniž by měly elektrický náboj. Takové částice reagují na vnější magnetická pole.

*Spin je vnitřní vlastnost částic, kterou si v makrosvětě nedokážeme představit. Jde o další rotační stupeň volnosti, který souvisí s relativistickým chováním částic mikrosvětla a který je například zodpovědný za tvar orbitalů.*  
Zdroj: Richard Kail, Getty Images.



**Kyslík** – Oxygenium, plynný chemický prvek, tvoří druhou hlavní složku zemské atmosféry. Je biogenním prvkem a jeho přítomnost je nezbytná pro existenci většiny živých organismů na naší planetě. V atmosféře tvoří plynný kyslík 21 objemových procent. Kromě obvyklých dvouatomových molekul  $O_2$  se kyslík vyskytuje i ve formě tříatomové molekuly jako ozon  $O_3$ . Produkty hoření se nazývají oxidy, dříve kysličníky. Kyslík je po vodíku a heliu třetím nejhojnějším prvkem ve vesmíru.

Pamětní deska na budově Frankfurtské univerzity, kde Otto Stern a Walter Gerlach provedli zlomový experiment, kterým potvrdili existenci spinu a jeho kvantového chování. Mezi reliéfy vědců je schematicky zobrazeno uspořádání pokusu. Foto: Frank Behnsen, 2010.



miří stejným směrem. Tento stav se nazývá tripletový. Tyto jevy se uplatňují například při fosforescenci. Ze školy si pamatujeme jednoduchý princip: elektron absorbuje foton, přeskočí na vyšší energetickou hladinu a při zpětném přeskoku kvantum opět vyzáří. To je sice v hrubých obrysech pravda, ale nevysvětluje se tím, jak je možné, že fosforeskování trvá tak dlouho. Proces je složitější. Po excitaci nemusí elektron nutně kvantum vyzářit, ale může se jeho energie zbavit přechodem do tripletového stavu. Tento přechod se děje pomocí tzv. *spinorbitální interakce*, při které vstupuje do hry kombinace magnetického pole daného spinem a magnetického pole vytvořeného orbitálním pohybem. Takový proces lze správně vysvětlit pouze akceptováním relativistických efektů. Důležité je, že přechod mezi tripletovým s a singletovým stavem je velmi málo pravděpodobný, a tak může trvat i minuty.

Při pátrání po tripletových stavech nemusíme chodit daleko. Obvyčejná molekula kyslíku se po většinu času nachází v tripletovém stavu. Můžeme za to být jen rádi, protože v tomto stavu nemůže reagovat. Při reakcích musí nejprve přijmout energii a obrátit spin. To pochopitelně reakci zpomaluje, a jen tomu vděčíme za snadno ověřitelný fakt,

že jsme dosud neshořeli. Kyslík v základním stavu je neporovnatelně reaktivnější. Proto se při opalování tak snadno spálíme. Ultrafialové fotony dopadající na tělo mohou překloupat molekuly organického barviva v kůži do tripletového stavu, jehož energii barvivo ochotně poskytne tripletovému kyslíku, a ten se tím dostane do svého základního agresivního stavu. Lékaři si povšimli této vlastnosti a využívají ji při léčení některých typů nádorů. Nádory, které mají schopnost vázat ve svém okolí tato barviva, jsou ozařovány vhodným světlem převádějícím elektrony do tripletového stavu. Kyslík obsažený ve tkáni přejde do singletového stavu a nemocné buňky zničí.

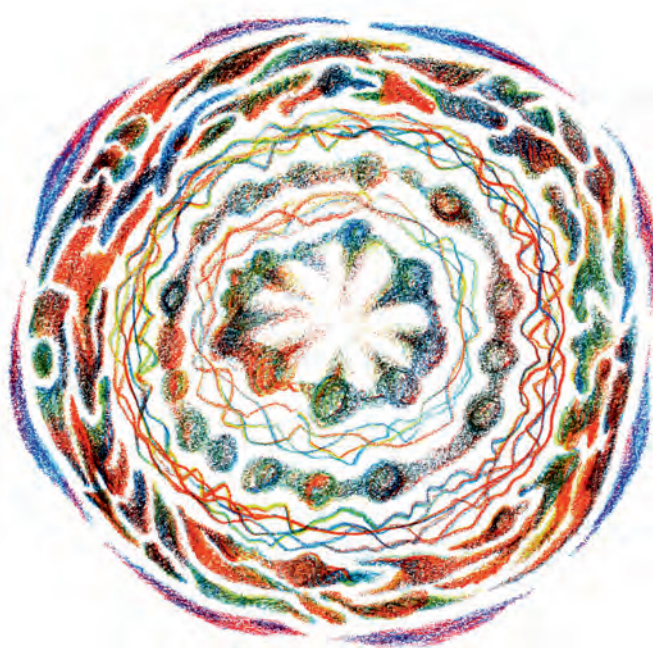


## Těžké prvky a relativita

Relativistické procesy, bez kterých by popis atomu byl nejen neúplný, ale často vyloženě chybný, jsou dobře zmapovány téměř sto let. Přesto tu stále leží hozená rukavice čekající na experimentátory, kteří ji snad někdy zvednou. Těžké prvky nacházející se v periodické tabulce daleko za uranem zatím známe jen z urychlovačů nebo jsou pouze teoreticky předpovězeny. Ty, které již potvrzeny byly, žijí příliš krátce a máme jich tak málo, že nemůžeme ověřit jejich chemické vlastnosti. Výzva, o které píšeme, nespočívá jen ve vyladování technologie, nýbrž v ověření, zda periodická tabulka platí i v oblastech, kde jsou zatím lvi. Relativistické efekty by tu měly být tak silné, že by nemělo docházet k uspořádání prvků do skupin.

**Speciální relativita** – úprava mechaniky, kterou provedl v roce 1905 Albert Einstein a která měla za cíl dát klasickou mechaniku do souladu s Maxwellovou elektrodynamikou, z níž vychází princip konstantní rychlosti světla a transformace rychlostí, která je jiná než v mechanice. Důsledkem speciální relativity je kontrakce délek a dilatace časových intervalů. Speciální relativita považuje všechny inerciální souřadnicové soustavy za relativní, odsud její název. Ve speciální relativitě nezávisí výsledky mechanických a elektromagnetických experimentů na volbě inerciální soustavy.

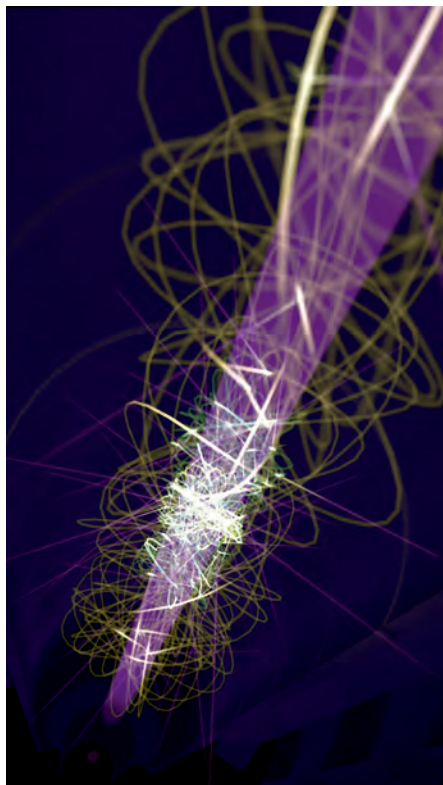
■ Dana a Rudolf Mentzlovi, 26. 4. 2019, AB 17/2019





**Antivodík** – nejjednodušší antiatom, v jádře má antiproton a v obalu pozitron. Antivodík je rutinně připravován jen ve dvou laboratořích na světě: v CERNu a ve Fermilabu. Dle dosavadních výsledků se antivodík chová stejně jako vodík.

Umělecká představa atomů antivodíku držených v magnetické pasti. Zdroj: Chukman So/TRIUMF.



## Antivodík

Kdysi základní, dnes střední škola nás učí zanedbávat nemožná řešení slovních úloh vedoucích na kvadratické rovnice. Vyjde-li nám, že fotbalové mužstvo čítá jedenáct nebo minus šest hráčů, vůbec o druhém výsledku neuvažujeme. Britský fyzik Paul Dirac se tímto přístupem nenechal zmást, počítal i se zdánlivě nesmyslnými kořeny a v roce 1928 předpověděl existenci kladně nabitého elektronu. Když pak o čtyři roky později Carl Anderson objevil stopy pozitronu v kosmickém záření, byla existence antihmoty definitivně prokázána. Právě kosmické záření bylo po dlouhá desetiletí jediným zdrojem antihmoty. Posléze jsme se naučili připravovat antičástice v urychlovačích. V roce 1995 dokázali v laboratořích CERN spojit antiproton s pozitronem a uměle připravit antivodík. Přelomová práce se stala rutinou a dnes se pokoušíme vlastnosti antivodíku zevrubně zkoumat. Skvělým pomocníkem je laserové ochlazování antihmoty.

### Výroba antivodíku

Postavit atom antihmoty z elementárních antičástic se zatím daří pouze u antivodíku. Antiprotony se vyrábí na urychlovači bombardováním kovového terčíku svazkem protonů. Z podstaty věci jsou vzniklé antiprotony příliš rychlé a je potřeba je nejprve patřičně zpomalit, uvěznit v magnetické pasti a dochladiť na milikelvinové teploty. Pak nezbyvá, než doufat, že se pozitrony přivedené z radioaktivního zdroje  $^{22}\text{Na}$  usadí na jejich volných orbitalech a dají vzniknout antivodíku. Z řádově sto tisíc antiprotonů a milionů pozitronů zbude v magnetické pasti po mnoha výrobních cyklech několik tisíc atomů antivodíku.

Původní experiment ATHENA v CERNu nahradil koncem roku 2005 nový experiment APLHA (*Antihydrogen Laser Physics Apparatus*). Kolaborace ALPHA oznámila již v roce 2011, že její magnetické pasti dokážou zadržet atomy antivodíku po dobu až tisíc sekund. Ačkoli je to dostatečně dlouhá doba, atomů je stále málo na klasické spektroskopické metody, které počítají s řádově  $10^{12}$  atomy. K významným úspěchům si ALPHA může započítat měření pozitronového přechodu  $1s-2s$ , který se chová stejně jako elektronový přechod  $1s-2s$  atomu vodíku. S rostoucí obtížností dalších měření stoupají i nároky na teplotu vzorku. Koncem března 2021 kolaborace oznámila úspěšné zvládnutí technologie laserového ochlazování u antivodíku.

## Chladíme laserem

Samotné použití slov laser a ochlazování v jedné větě cítíme jako protimluv. Laser spojujeme s pojmy zapálit, protavit nebo ohřát. A přece, podobně, jako studený vítr dokáže ochladit, může ochladit i laserový paprsek. Ačkoli studený vítr nese energii, ochlazuje, protože je jeho teplota nižší, než teplota prostředí. Má-li laserový paprsek teplotu menší, než prostředí, kterým prochází, ochladí ho také. K pochopení jevu je zapotřebí mít na paměti pouze dvě skutečnosti. Teplota je pouze makroskopickým projevem víření atomů a atomy jsou schopny interagovat pouze s fotony přesně určených frekvencí.

Posvětime-li na atomy světlem o frekvenci jen o málo menší, než dokážou absorbovat, nic se nestane. Protože jsou však zahřáté, pohybují se náhodnými směry. Ty, které se pohybují naproti přilétávajícím fotonům, vnímají díky Dopplerově jevu jejich frekvenci jako poněkud vyšší. Atom pohybující se správnou rychlostí takový foton pohltí a ztratí přitom svou hybnost (proti směru paprsku) a tedy i energii. Následně vyzáří jiný foton náhodným směrem. Jenže hybnost atomu získaná vyzářením fotonu se statisticky po mnoha takových aktech vyruší. Výsledkem je neustálé snižování hybnosti atomů pohybujících se proti laserovému paprsku, tím i energie a teploty. V praxi se ochlazovaný plyn ozařuje šesti lasery ve třech navzájem kolmých směrech. Tímto způsobem lze látku dochladit na teploty v řádu nanokelvinů.

## Jak se chladí antivodník

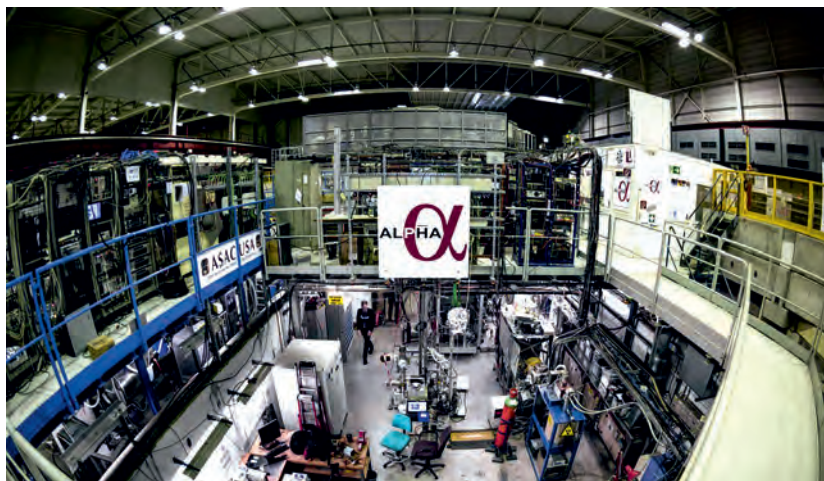
K ochlazení antivodíku využila kolaborace ALPHA přechod  $1s-2p$  Lymanovy série. Na rozdíl od běžného laserového ochlazování zde stačí aplikovat laserový paprsek pouze v podélném směru, protože sama magnetická past nejen zabráňuje rozbíhání vzorku do stran, ale také mění příčný pohyb částic na podélný. Každý laserový impuls sníží rychlost o 3,3 m/s. Po několika desítkách pulzů klesne teplota vzorku na submikroelektronvoltové energie. Díky takovému ochlazení

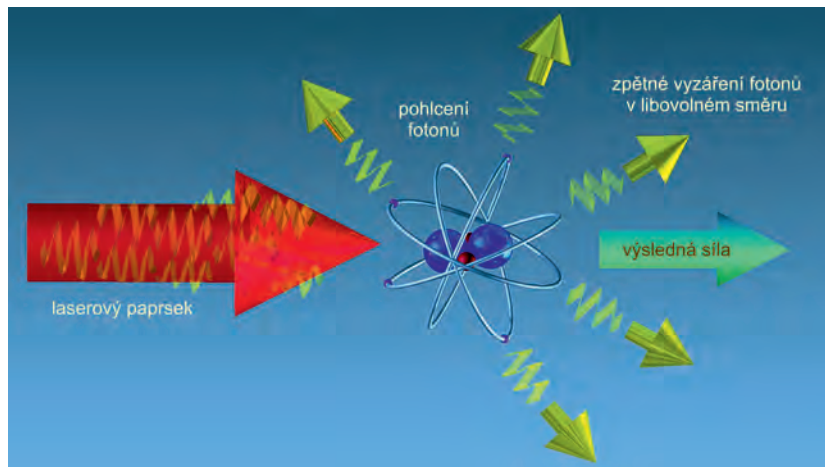
**Antiproton** – antičástice k protonu. Je stabilní, nicméně rychle anihiluje s okolní látkou. Antiproton byl objeven v roce 1955 Emiliem Segrém a Owenem Chamberlainem, kteří za tento objev získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1959.

**Lymanova série** – série spektrálních čar vznikajících v atomu vodíku přechodem na základní stav  $1s$ . Při přechodu  $2s-1s$  například vzniká Lymanova alfa čára s vlnovou délkou 121,5 nm.

**CERN** – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Evropské centrum jaderného výzkumu. Komplex urychlovačů a laboratoří na pomezí Švýcarska a Francie založený v roce 1954. Na výzkumu se podílí 22 členských zemí včetně České republiky. K největším objevům patří objev polních částic slabé interakce, příprava antivodíku, objev kvarkového-gluonového plazmatu a objev Higgsovy částice. V CERNu byl také vynalezen a poprvé použit Web. V současné době je zde vybudován největší urychlovač světa – Large Hadron Collider.

Experiment ALPHA umístěný v komplexu urychlovačů CERN. Zdroj: Maximilien Brice/CERN.





*Princip laserového ochlazování. Se slabě podladěným laserovým paprskem interagují pouze atomy pohybující se směrem ke zdroji světla. Po následném vyzáření fotonu náhodným směrem se atom pohybuje pomaleji, než před interakcí. Zdroj: AGA.*

proč je náš vesmír tvořený prakticky výhradně hmotou a antihmotou objevujeme pouze stopově, jako důsledek extrémních událostí. Jeden z návrhů, jak tento fakt vysvětlit, se opírá o myšlenku nesymetrie hmoty a antihmoty. Žádné měření zatím symetrii nezpochybnilo, nicméně možností ověřit všechna pozorování precizně bylo zatím poskrovnu. Do nitra hmoty jsme již nahlédli. S laserovým chlazením experimentu ALPHA se nyní můžeme zaměřit na nitro antihmoty.

■ Rudolf Mentzl, 23. 4. 2021, AB 15/2021

# Skyrmiony útočí

V roce 1834 pozoroval skotský vědec John Scott Russel zajímavý jev. Na úzkém kanálu Union v blízkosti Edinburku se zastavil člun tažený podél kanálu párem koní. Ve směru původního pohybu se vytvořila osamocená vlna, kterou Russel na koni sledoval přibližně dva kilometry. Dnes takové osamocené vlně říkáme *soliton*. Russel nemohl tušit, že svým pozorováním otevírá zcela novou kapitolu nelineární fyziky, která povede k převratným technologiím budoucnosti. Dnes se nikdo nepozastaví nad tím, že balíčky světla (solitony) putují optickými vlákny na vzdálenost stovek i tisíců kilometrů. Solitony jsou vytvářeny zvukovými vlnami šířícími se v krystalech, solitony vznikají v plazmatu a v posledních letech jsou zraky konstruktérů paměťových médií upřeny k magnetickým *skyrmionům* – solitonům vznikajícím za určitých podmínek v magnetických materiálech. K manipulaci s nimi jsou zapotřebí elektrické proudy o mnoho řádů nižší než při čtení a zápisu v konvenčních discích. Další kapitola spintronické revoluce se otevírá přímo před našima očima.

## Milníky v historii skyrmionů

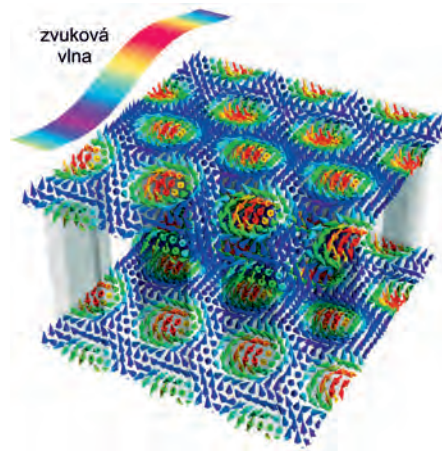
Ve většině magnetů, se kterými se setkáte, jsou zdrojem magnetického pole spiny jednotlivých atomů, z nichž je magnet tvořen. To se týká například i magnetu na lednici, kterým si připevňujete důležité poznámky. Za vysokých teplot jsou jednotlivé elementární magnety (spiny) rozmístěny chaoticky, míří náhodnými směry a výsledná magnetizace je nulová. Pokud magnet ochlazujeme, dojde při tzv. Curieově teplotě k fázovému přechodu do nízkoteplotní fáze, pro kterou jsou typické tzv. Weissovy domény. V každé z nich jsou spiny orientovány stejně, ale sousední domény mají orientaci spinů odlišnou. Celková magnetizace je nenulová (domény mají různé velikosti, s klesající teplotou jedna z nich naroste do celého objemu magnetika) a soustava spinů má magnetické vlastnosti. V roce 1972 zjistili britští fyzikové Michael Kosterlitz a David James Thouless, že u některých feromagnetik existuje mezi vysokoteplotní neuspořádanou fází a nízkoteplotní doménovou fází ještě jedna fáze, v níž se směr spinů mění jen velmi pomalu a spiny vytvářejí spinové vlny a víry nejrůznějších velikostí a tvarů.

Němečtí teoretici Alexej Bogdanov z Ústavu Maxe Plancka a Ulrich Rößler z drážďanského Ústavu pevných látek a materiálů v roce

**Spintronika** – spinová elektronika neboli magnetoelektronika. Jde o technologii využívající kvantové vlastnosti spinu elektronu, případně celého atomu. Zatímco klasická elektronika využívá ve všech technologiích pouze náboj elektronu, ve spintronice se kromě náboje elektronu využívá i orientace jeho spinu.

**Kvazičástice** – z místa na místo se přesouvající rozruch neboli excitace budící dojem pohybu skutečné částice. Příkladem mohou být postupně padající kostky domina, překlápějící se elementární spiny, šířící se vibrační kvantum v krystalu nebo excitace hustotní vlny elektronů.

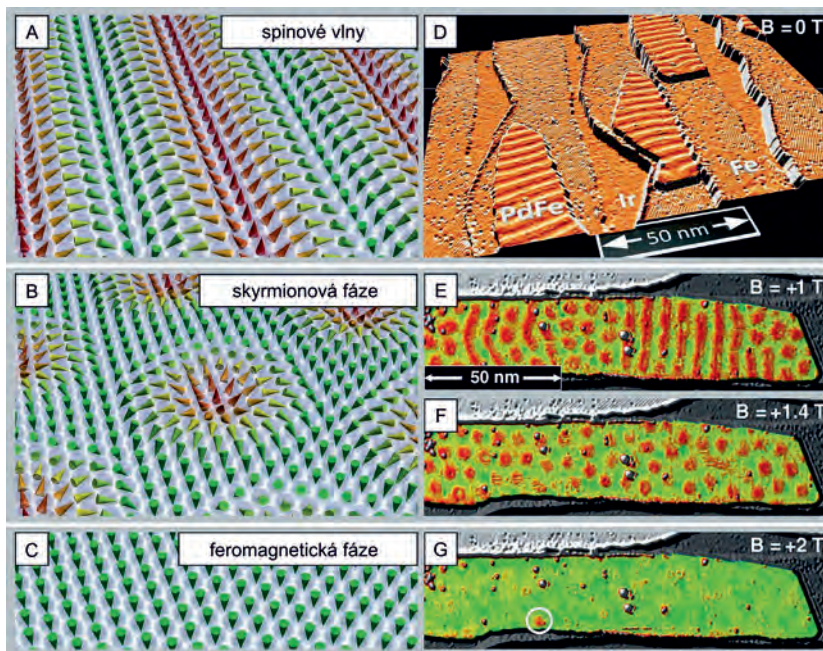
Model trojúhelníkové sítě skyrmionů, která byla v roce 2017 připravena v japonském vědeckém středisku RIKEN. Spiny okolí míří vzhůru (čistě modrá), spin uprostřed skyrmionu míří přesně dolů (čistě červená). Působením magnetického pole se specialistům podařilo síť změnit na čtvercovou. Zdroj: RIKEN/Yoichi Nii.





**Skyrmion** – topologicky stabilní konfigurace nelineárního pole, kterou poprvé v roce 1962 využil britský fyzik Tony Skyrme při popisu struktury nukleonů. Tyto kvazičástice byly na jeho počest pojmenovány skyrmiony.

Fázové přechody od spinových vln přes skyrmiony až po běžné feromagnetikum v závislosti na vnějším magnetickém poli. Experimenty byly prováděny na dvojvrstvě ze železa a paládia nanesené na iridiovém podkladu. Nalevo (A až C) je počítačové znázornění jednotlivých fází, napravo (D) je snímek z rastrovacího tunelového mikroskopu, (E až F) je rekonstrukce magnetizace, červené pruhy jsou spinové vlny, červené shluky jsou skyrmiony. V silném poli se materiál stane feromagnetikem. Poslední přeživší skyrmion je vpravo dole zakroužkovan. Zdroj: Niklas Romming, Science.



2000 předpověděli, že by mohly existovat magnetické skyrmiony – osamocené víry odolné vůči vnějším vlivům, které jsou stabilizovány svými topologickými vlastnostmi a mají charakter solitonů. Ukázali, že by skyrmiony měly samovolně vznikat zejména v tenkých magnetických systémech. V roce 2009 pozoroval první skutečné skyrmiony Christian Pfleiderer z Mnichovské technické univerzity. Vznikaly spontánně v nesymetrických krystalech slitiny manganu s křemíkem za nízké teploty kolem 30 kelvinů v přítomnosti magnetického pole. Jejich velikost byla od 20 do 90 nanometrů. Struktury vědci zkoumali pomocí ohybu neutronů a fotografie pořizovali elektronovým mikroskopem. Praktickému využití bránila jednak nízká teplota a jednak náhodný vznik skyrmionů, který nebylo možné ovlivnit. Ani velikost vznikajících skyrmionů nebyla ideální. Pro jejich vznik je podstatná nesymetrie krystalické látky, proto začali vědci experimentovat s materiály složenými z tenkých vrstev (nemají všesměrovou symetrii), kde interakce mezi vrstvami změni orientaci spinů sousedních atomů, což je základním předpokladem pro vznik skyrmionu.

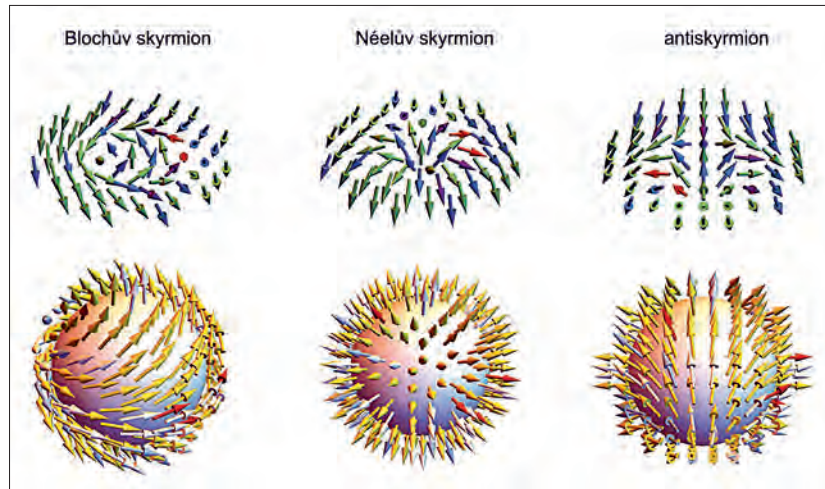
V roce 2011 se podařilo skupině vědců pod vedením Stefana Heinze z Kielské univerzity připravit na vrstvě železa (šesterečné uspořádání, atomární tloušťka), pod níž byl podklad z iridia, skyrmiony za teploty 11 kelvinů. Jejich vznik již nebyl samovolný, ale cílený. Skupině se podařilo vytvořit celou čtvercovou mříž skyrmionů. Podle teorie by vznik skyrmionů měl probíhat v tlustších materiálech obsahujících větší množství vrstev i za vyšších teplot. Příprava skyrmionů za pokojové teploty se nakonec podařila v roce 2015 v magnetickém mnohavrstevném materiálu složeném z vrstev iridia, platiny a kobaltu. Skyrmiony byly sice dost velké (téměř 100 nanometrů), ale cesta k aplikacím za

běžné teploty byla otevřena. Tento průlomový krok provedla skupina z francouzského CNRS (Národní centrum vědeckého výzkumu) pod vedením Vincenta Crose.

## Vlastnosti skyrmionů

Skyrmiony mají jedinečný tvar, který je chrání před vnějšími vlivy (hovoří se o tzv. *topologické ochraně*, změně jejich podoby brání zákony zachování tzv. *topologických nábojů*). Proto přežívají velmi dlouho a jsou odolné k různému rušení, například okolnímu šumu, což znamená, že jsou ideálním médiem pro uchování informace. Skyrmiony se navíc mohou pohybovat, a to jak pod vlivem magnetického pole, tak pod vlivem spinové polarizovaného elektrického proudu. Při čtení informace tedy nebude třeba používat pohyblivé mechanické součástky, jak je tomu u klasických harddisků, ale skyrmiony budou prolétat před čtecím senzorem.

Skyrmiony lze vyrobit jednodimenzionální (postupné otočení spinu na malém úseku řetězce spinů), dvoudimenzionální (různé typy vírů a „ježečků“) i třídímenzionální (kulička s atypicky trčícími spiny). Jejich velikosti jsou od jednotek až po stovky nanometrů. Pro technologické aplikace jsou zajímavé zejména velmi malé skyrmiony, kterých může být v daném objemu magnetika velké množství. Všem skyrmionům je společné to, že jejich centrální spin míří opačným směrem než spiny z okolí skyrmionu. V objemových magnetikách se nejčastěji vyskytuje tzv. *Blochův skyrmion*, který má tvar spirálního víru. Ve vrstvených magnetikách vzniká tzv. *Néelův skyrmion*, jehož spiny se v radiálním směru postupně překlápí do protisměru a zcela zde chybí překlápění v azimutálním směru. V roce 2017 vytvořil německo-francouzský tým další konfiguraci, které se začalo říkat *antiskyrmion*. Je mimořádně stabilní i při vysokých teplotách a jde o nejvážnějšího kandidáta pro paměťové technologie budoucnosti. Není bez zajímavosti, že za výzkum topologických struktur tvořených spiny byla v roce 2016 udělena Davidu Thoulessovi a Michaelu Kosterlitzovi Nobelova cena za fyziku.



Různé druhy skyrmionů. Zdroj: *Frontiers in Physics*.

**Magnetický skyrmion** – kruhová konfigurace překlápějících se spinů (připomínající buď ježka, nebo spirálový vír), která je stabilní a může se přemísťovat z místa na místo beze změny tvaru (jde o soliton). V běžných materiálech (železo, iridium) mají skyrmiony rozměr od jednoho nanometru do několika desítek nanometrů. Lze je vytvářet a ovládat raménkem rastrovacího tunelového mikroskopu. Mohou být využity k zápisu informace (1 – existuje skyrmion, 0 – neexistuje skyrmion) v nastupující generaci spintronických zařízení. Magnetický skyrmion byl předpovězen v roce 2001 a poprvé experimentálně pozorován v roce 2009. Jejich tvorba za pokojové teploty (včetně ovládní) se podařila v roce 2015.

**Soliton** – osamocená vlna, která se šíří na velké vzdálenosti s minimální změnou tvaru. Solitony přenášejí energii z místa na místo a mohou skrz sebe procházet. První soliton pozoroval skotský vědec John Scott Russel na úzkém vodním kanále Union poblíž Edinburku v roce 1834. Existenci solitonů poprvé teoreticky vysvětlili v roce 1895 holanďští matematici Diederik Korteweg a Gustav de Vries. V solitonu je přirozená disperze (rozplývání) kompenzována nelineárními jevy, takže může vzniknout dlouhodobě stabilní útvar.

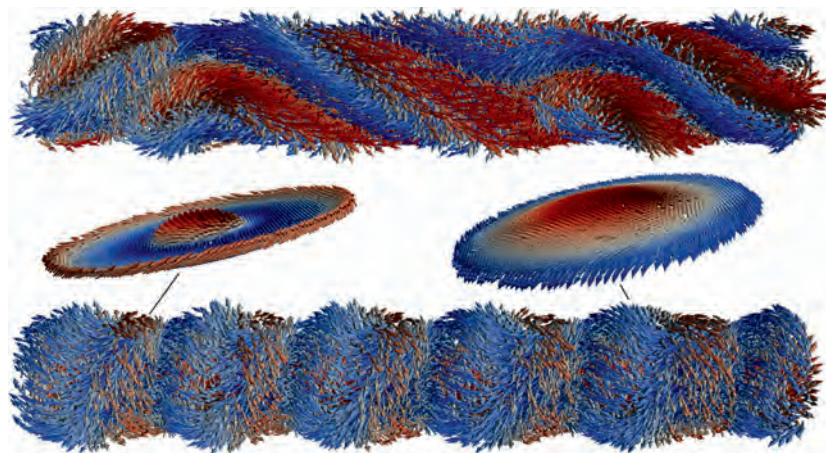
## Paměťová média

Do skyrmionů jsou vkládány velké naděje. Mohly by se stát základem nového typu paměťových médií. Technika čtení a zápisu byla zvládnuta už v roce 2015. Základní podmínkou jsou samozřejmě skyrmiony existující za pokojových teplot. V tuto chvíli se zdá, že v roce 2017 objevený antiskyrmion ve vrstveném magnetiku je přesně tím pravým ořechovým. Nejenom, že je stabilní i při vysokých teplotách, ale na rozdíl od jiných skyrmionů se pohybuje přesně ve směru toku spinové polarizovaného proudu. Skyrmiony lze řadit do vláken nebo plošných či prostorových mříží. V magnetiku se pohybují jako kvazičástice. Potřebné elektrické proudy jsou o mnoho řádů nižší, než je nutné ke čtení a zápisu na současných magnetických médiích. Skyrmiony lze „rozpohybovat“ na rychlost 100 metrů za sekundu, ideální by byla rychlost ještě několiknásobně vyšší. Na klasickém médiu se sousední bity navzájem ovlivňují, což limituje hustotu zápisu. Skyrmiony se nejen neovlivňují, ale mohou být až o dva řády menší (klasické domény mají stovky nanometrů, skyrmiony mohou mít jen několik nanometrů), což umožní mnohonásobně vyšší hustotu zápisu na nová média.

Z doposud vyvíjených pamětí je nejbližší tzv. *Racetrack Memory*. Paměť navrhl v roce 2008 anglický fyzik Stuart Parkin pracující pro společnost IBM. Řetězec domén se pohybuje pod vlivem elektrického proudu kolem čtecího a zapisovacího senzoru bez jakýchkoli mechanických součástí. Po deseti letech vývoje začala společnost IBM

připravovat výrobu těchto pamětí. V budoucnosti by mohly být střídající se domény nahrazeny řetězcí skyrmionů ve vrstveném magnetiku, což by výrazně zvýšilo kapacitu média. Skyrmiony lze řadit nejen do vláken, ale tato vlákna lze i zprohýbat do smyček, čímž se dosáhne ještě vyšší hustoty zápisu. Předpokládá se, že logická jednička bude znamenat přítomnost skyrmionu, nula naopak jeho nepřítomnost. Obdobný systém už vyzkoušela skupina vědců z Číny, Ruska, Švédska a Německa, která

Magnetické nanovláknko. V horní části jsou spiny uspořádány do šroubovice. V dolní části vytvářejí řetězec skyrmionů o průměru 120 nm a délce 500 nm. Ve výřezech je zobrazen jejich tvar ve dvou typických místech vlákna. Zdroj: M. Charilaou, *Physical Review*.





připravila nanopásek s vrstvami železa a germania. Vytvořili v něm řetězce válcových vírů (skyrmionů) o průměru 40 nanometrů, které rozpochovali a úspěšně s nimi manipulovali.

Skyrmiony budou mít i další využití. Měly by se stát základem nového procesoru s extrémně nízkými energetickými nároky a síť skyrmionů by mohly vytvořit „biologický počítač“ simulující síť neuronů v lidském mozku. Napětí na neuronu by odpovídalo dráze uražené skyrmionem a výkonný povel neuronu (uvolnění akčního potenciálu) by korespondovalo s dopadem skyrmionu do detektoru. Zatím jde sice jen o úvahy, ale právě v této oblasti postupuje vývoj natolik rychle, že se máme na co těšit v nejbližší budoucnosti. A na závěr ještě jedna novinka: skupině vědců z Německa, Švédska, Francie a České republiky se podařilo pomocí antiskyrmionu generovat skyrmionové-antiskyrmionové páry. Je možné, že studium skyrmionů přispěje i k pochopení některých problémů z oblasti elementárních částic.

■ Petr Kulháněk, 7. 9. 2018, AB 31/2018

**Rastrovací tunelový mikroskop** – zařízení založené na tunelovém jevu, umožňující zobrazit povrch pevné látky v rozlišení jednotlivých atomů. Povrch je doslova osaháván piezoelektricky vychylovaným wolframovým hrotem. Ve směru povrchu je jeho rozlišení řádově  $10^{-10}$  m, v kolmém směru k povrchu je však rozlišení řádově lepší v důsledku velmi nelineární závislosti velikosti proudu na vzdálenosti od povrchu. Na špičce wolframového hrotu je v ideálním případě jediný atom, podle toho, jak se hrot podaří vyleptat. Rastrovací tunelový mikroskop umožňuje nejenom zviditelnit polohu atomů na povrchu krystalové mřížky, ale také je přenášet z místa na místo, když se pomocí přiloženého elektrického napětí překoná chemická vazba s povrchem a atom se hrotem mikroskopu přenesne.





## Kvantová provázanost mnohačásticového systému

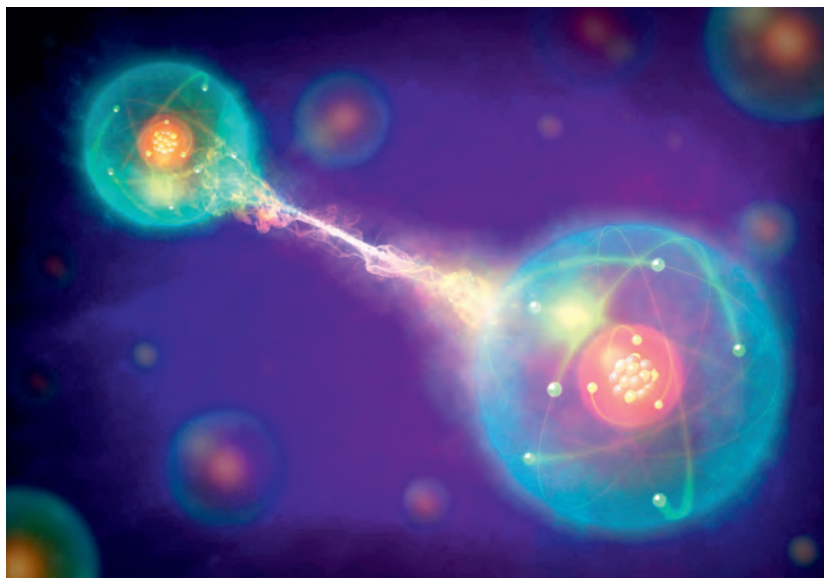
**EPR paradox** – paradox kodaňské interpretace kvantové teorie zveřejněný v roce 1935 Albertem Einsteinem, Borisem Podolským a Nathanem Rosenem. Podle něho by pro částice se společným původem mohlo dojít k tomu, že měření na jedné částici okamžitě ovlivní stav druhé částice. Einstein viděl řešení tohoto působení na dálku v neúplnosti kvantové teorie a předpokládal, že existují skryté parametry, které v experimentu nejsou uvažovány. V letech 1976 až 1983 byla existence lokálních skrytých parametrů experimentálně vyvrácena na základě Bellových nerovností.

Umělecká vize dvou objektů s provázaným kvantovým stavem. Zdroj: Mark Garlick, SPL, Getty Images.

Kvantový svět nás fascinuje od chvíle, kdy naše experimentální prostředky umožnily zkoumání mikrosvěta. Svět malých rozměrů se chová jinak, než bychom předpokládali a než bychom si přáli. Naše představivost k popsání dějů nestačí, a tak se opíráme o matematické výpočty, které dávají předpovědi experimentů s neuvěřitelnou přesností. Přestává nás trápit, že si nedokážeme představit nelokálnost elementární částice, superpozici stavů, provázanost objektů, interferenci objektu sama se sebou a mnohé další jevy, které s sebou kvantový svět přináší. Postupně jsme se smířili i s tím, že měření na jednom členu z dvojice provázaných částic nám okamžitě přináší informace o druhém členu páru, ať se nachází kdekoli. V letech 2017 a 2018 byly ale poprvé uskutečněny experimenty s provázaným mnohačásticovým systémem a ukázaly, že stejné principy platí i u Boseho-Einsteinova kondenzátu. Dva základní kvantové principy – provázanost a chování bosonů při nízkých teplotách si v tomto experimentu podávají ruce.

### EPR paradox a provázanost stavů

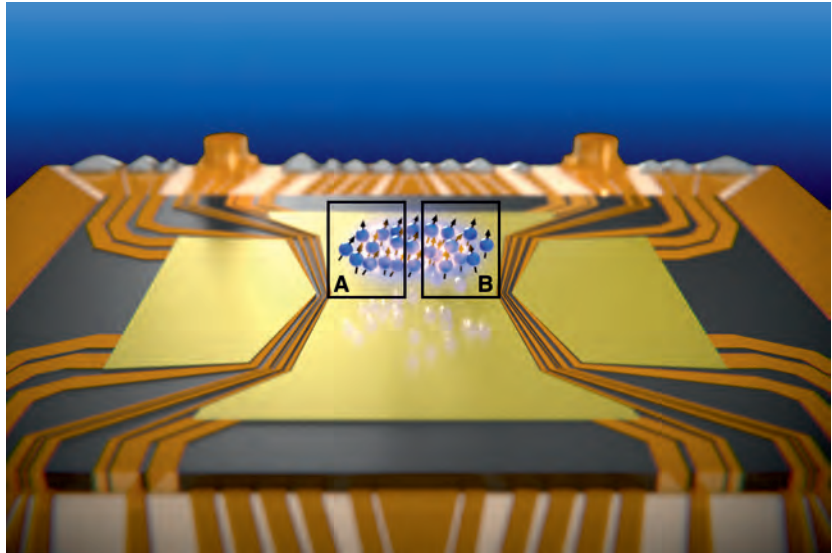
Odpor části fyziků k rodící se kvantové teorii vyústil v roce 1935 k formulaci myšlenkového experimentu, který měl demonstrovat neúplnost kvantové teorie a ukázat, že kvantová teorie je vnitřně sporná a bude muset být nahrazena lepší teorií mikrosvěta. U zrodu tohoto myšlenkového experimentu stáli Albert Einstein, ruskoamerický fyzik Boris Podolsky a ameriko-izraelský fyzik Nathan Rosen. Podle počátečních jmen autorů se hovoří o tzv. *EPR paradoxu*. Dnes se nejčastěji používá formulace Davida Bohma, která pochází



z roku 1951. Představme si částici s celkovým momentem hybnosti 0, která se rozpadne na dvě od sebe letící částice A a B, z nichž každá má spin  $\frac{1}{2}$ . Orbitální moment obou částic je nulový (letí od sebe), a proto zákon zachování celkového momentu hybnosti vede na podmínku, že pokud naměříme u jedné z částic projekci spinu do libovolné osy  $\frac{1}{2}$ , musí mít druhá částice projekci do téže osy  $-\frac{1}{2}$  a naopak. O obou částicích říkáme, že mají provázané stavy (propletené, anglicky *entanglement*), což znamená, že vlnovou funkci obou objektů nelze separovat na prostý součin, kde by jedna část závisela pouze na proměnných jednoho objektu a druhá na proměnných druhého objektu.

Zdánlivý paradox vznikne tím, že provedením měření projekce spinu na jedné částici se okamžitě dozvíme projekci spinu u druhé částice, ať je jakkoli daleko. Na první pohled to vypadá, jakoby se informace šířila okamžitě, což odporuje principu kauzality (příčinnosti) ze speciální relativity. Na vině je nelokální chování částic. Při měření na jedné částici zkolabuje vlnová funkce v celém prostoru, a to se projeví při následujícím měření na druhé částici, ať už je kdekoli. Nejde o porušení kauzality, provedením měření na jedné částici se ke druhé částici nepřenáší žádná hmota ani energie a oba pozorovatelé při kontrole svých výsledků musí tak jako tak použít podsvětelnou komunikaci, která zajistí kauzalitu obou měření.

Provázání stavů může být buď historické (objekty mají například společný původ) a nebo může být uměle navozené například za pomoci laserového nebo mikrovlnného impulzu. V každém případě se měřením na jednom objektu dozvíme i některé informace o druhém objektu, ať se v dané chvíli nachází jakkoli daleko. Provázání stavů kvantových bitů je také důležité pro chod kvantových počítačů. V roce 2017 se podařilo prolomit hranici padesáti provázaných qubitů. Současné technologie umožňují provázat stovky qubitů.



Uspořádání basilejského experimentu. Pod čipem je dobře patrný chomáč chladných atomů a dvě prostorově oddělené oblasti A a B, ve kterých bylo prováděno měření spinu atomů. Zdroj: Basilejská univerzita.

**Relace neurčitosti** – v mikrosvětě není možné současně změřit polohu a hybnost objektů. Změření jedné veličiny naruší měření druhé veličiny. Čím přesněji zjistíme polohu, tím menší informaci budeme mít o hybnosti a naopak. Jde o principiální zákonitost kvantového světa, která souvisí s nekomutativností veličin na elementární úrovni. Relace neurčitosti objevil Werner Heisenberg. Stejně relace platí také mezi energií a časovým intervalem. Ve vakuu mohou po velmi krátkou dobu vzniknout ve shodě s relacemi neurčitosti fluktuace (objekty) o určité energii. Čím vyšší energie, tím kratší doba života těchto fluktuací. Dále relace platí i pro jakoukoli zobecněnou souřadnici a její hybnost. Může jít například o nějaké pole, které nemůže mít současně nulovou hodnotu a nulovou hybnost, což vede k jeho vakuovým fluktuacím.

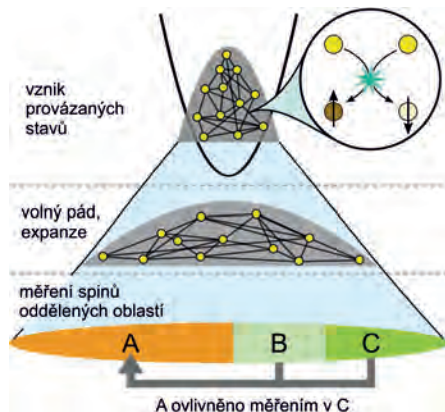


Schéma obdobného experimentu na Heidelberské univerzitě. Po vypnutí pasti dojde k volnému pádu a rozšiřování chomáče ultrachladných atomů tvořících Boseho-Einsteinův kondenzát. Zdroj: Heidelberská univerzita.

**Provázaný stav** – entanglement, kvantově korelovaný stav systému dvou a více částic, v němž nemá smysl mluvit o stavech jednotlivých složek. Například z provázaného stavu dvojice fotonů nelze vyjádřit stavy jednotlivých fotonů. Měřením provedeným na jedné částici se dozvíme určitou informaci o částici druhé. Je to způsobeno tím, že mají společnou vlnovou funkci (společný stav), a to buď z minulosti, nebo uměle vytvořený například mikrovlnným či laserovým impulzem. Někdy se také hovoří o propletených stavech.

## Basilejský experiment

Tým vědců pod vedením profesora Philippa Treutleina z Basilejské univerzity a ze Švýcarského ústavu nanotechnologií (SNI) připravili zajímavý experiment, který posouvá chápání provázanosti do další úrovně. Na počátku ochladili za pomoci laserového ochlazování několik set atomů na teplotu několika miliardtin kelvinu, které následně drželi v elektromagnetické pasti cca 300 mikrometrů pod povrchem čipu. Vznikl Boseho-Einsteinův kondenzát, na němž byla doposud vždy prováděna jen měření kolektivních vlastností kondenzátu jako celku. Basilejský tým ale uskutečnil zcela odlišné měření. Za extrémně nízké teploty došlo při interakcích jednotlivých atomů k provázání jejich spinových stavů. Vědci nejprve vypnuli elektromagnetickou past a chomáč provázaných atomů o rozměru cca 5 mikrometrů klesal dolů volným pádem a přitom se rozšiřoval. Za pomoci zobrazování s vysokou přesností byli schopni měřit korelace spinů ve dvou prostorově vzdálených oblastech padajícího chuchvalce.

Výsledky měření ukázaly, že jsou spiny v obou oddělených oblastech silně korelovány a že jsou výsledky měření v jedné konkrétní oblasti pod hranicí Heisenbergových relací neurčitosti, tedy měření v oblasti C bylo ovlivněno měřením v oblasti A a skutečně jde o výsledek kvantového provázání stavů. Basilejská výzkumná skupina předpokládá, že by nového jevu bylo možné úspěšně využít při konstrukci zcela nových typů senzorů pro měření vlastností atomů a pro přesné zobrazování elektromagnetických polí. Obdobné experimenty se také úspěšně konají na Heidelberské univerzitě v Německu.

## A co dál?

V posledním desetiletí se objevuje velké množství kvantových technologií, které využívají jevů v mikrosvětě k výpočtům, přesným měřením nebo technologickým postupům, o nichž se našim předchůdcům mohlo jen zdát. Připomeňme si kvantové počítače, kvantovou teleportaci, kvantové gravimetry nebo ultrastabilní hodiny. Existují ale i mnohá další kvantová zařízení a technologie, které si naši předchůdci nedokázali ani představit. Kvantová teorie se zabývá jevy, které se postupně stávají pomocníkem člověka v každodenním životě, a my zažíváme kvantovou revoluci, aniž si to možná uvědomujeme.

■ Petr Kulháněk, 25. 5. 2018, AB 16/2018

# Strašidelné interakce ve kvantovém světě

Zákony kvantové mechaniky předpovídají fenomén provázanosti kvantových systémů, která je nezávislá na jejich vzájemné vzdálenosti. Tento efekt je poprvé zmiňován ve známém článku Alberta Einsteina, Borise Podolského a Nathana Rosena (EPR) z roku 1935 a jev bývá často označován jako EPR paradox, protože zdánlivě narušuje základní principy teorie relativity. Albert Einstein proto kvantovou provázanost označil jako „strašidelné působení na dálku“. Ukážeme si, jak kvantovou provázanost experimentálně pozorovat a podíváme se na experiment, který využívá objekty vzdáleného vesmíru k testování lokálnosti fyzikálních zákonů.

## Provázané stavy

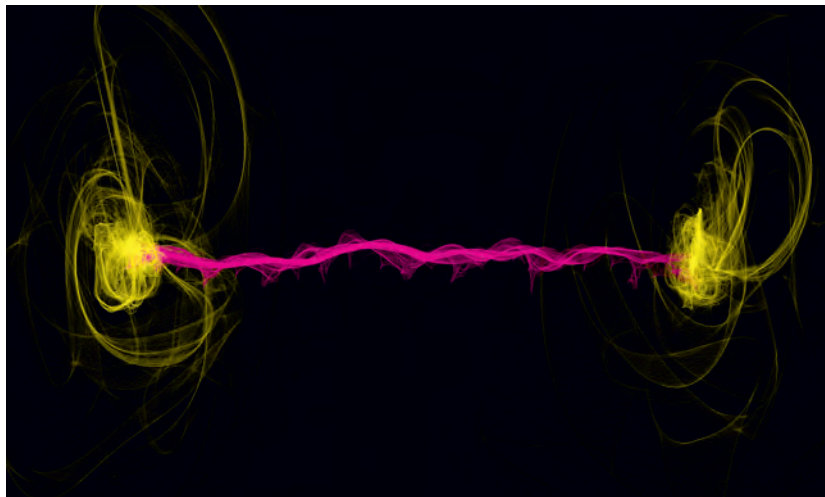
Kvantovou provázanost je možné připravit mnoha způsoby. Za provázané (někdy se používá slovo propletené nebo z angličtiny entanglované) stavy lze považovat například orientaci spinů, polohy a hybnosti částic, anebo polarizaci fotonů. Právě provázané stavy realizované polarizací fotonů se často používají v moderních experimentech a lze je snadno připravit excitací vhodného krystalu, například borátu  $\beta$ -bá-ria (Beta-Barium Borate), laserem. Krystal při absorpci krátkovlnného fotonu laseru emituje pár fotonů o dvojnásobné vlnové délce oproti laseru se shodně orientovanou polarizací. Provázané fotony jsou posílány na měřicí stanoviště opatřené polarizačními filtry, detektory a zkušenými experimentátory Alicí a Bobem (tato jména nahrazují všední označení A, B).

Orientace polarizačního filtru určuje bázi pro měření polarizace fotonu. Zdroj provázaných fotonů generuje fotony, jejichž polarizaci lze popsat pomocí superpozice

**Polarizace fotonu** – rovina kmitů elektrického pole, fotony jako kvanta příčného elektromagnetického vlnění mohou mít dvě nezávislé polarizace. Skutečný stav fotonu je potom lineární kombinací obou polarizačních stavů v dané bázi.

**Kauzalita** – příčinná souvislost. Pokud jsou dva děje v příčinné souvislosti (například zapálení rozbušky a exploze) musí ve všech souřadnicových soustavách nastat ve stejném pořadí. Kauzálně spojené děje jsou v takové vzdálenosti, že mezi nimi mohl proběhnout světelný signál.

Umělecká vize interakcí kvantově provázaných systémů.  
Zdroj: K. J. Runia, Open Curve.





| ALICE | BOB | ALICE | BOB |
|-------|-----|-------|-----|
| 0     | 1   | 0     | 0   |
| 0     | 0   | 0     | 0   |
| 1     | 1   | 1     | 1   |
| 0     | 1   | 0     | 0   |
| 1     | 0   | 1     | 1   |
| 1     | 1   | 1     | 1   |
| 1     | 0   | 1     | 1   |
| 0     | 0   | 0     | 0   |

Záznam osmi měření, kdy jednička odpovídá detekci fotonu, a nula situaci, kdy detekován nebyl. Tabulka vlevo platí pro nezávislé fotony a tabulka vpravo pro provázané fotony. Zdroj: T. Maudlin, Wiley Online Library.

bázových stavů každého z filtrů. Každý z fotonů má padesátiprocentní pravděpodobnost, že filtrem projde a bude detekován. Člověk by si tak mohl naivně myslet, že ve výše uvedeném experimentu občas jeden z detektorů zachytí foton jako v levé tabulce na obrázku a tu a tam Alice i Bob detekují foton současně. Takto by tomu bylo v případě nezávislých fotonů. Pro provázané fotony a souhlasně nastavené polarizační filtry však kvantová mechanika předpovídá scénář dle pravé tabulky. Každý detektor zvlášť rovněž zachytí pouze 50 % fotonů, avšak s tím rozdílem, že pokud Alice detekuje foton, pak i Bob detekuje foton, a naopak. Výsledky měření jsou v případě provázaných fotonů korelované, jak předpovídá kvantová teorie.

Tato teoretická předpověď má poměrně hluboké důsledky. Podle kvantové mechaniky oba fotony tvoří jeden kvantový stav. Pokud je jeden z fotonů detekován, pak je o něm přesně známo jakou má polarizaci, a tím pádem je známa i polarizace druhého fotonu, který již „ví“ že má také projít filtrem na druhé straně experimentu. Tato okamžitá vazba mezi fotony je nelokální a zdánlivě odporuje základním principům Einsteinovy speciální teorie relativity o rychlosti signálu limitovaného rychlostí světla ve vakuu. Výsledky tohoto myšlenkového experimentu nebylo schopno akceptovat velké množství předních fyziků, kteří se často odkazovali na to, že kvantová mechanika je neúplná a že výše uvedený výsledek je možné vysvětlit pomocí skryté proměnné, která je nastavena ve fotonech již při jejich vzniku a předem určuje, jak mají při daném natočení filtru reagovat.

## Bellovy nerovnosti

V roce 1964 (29 let po publikování EPR článku) publikoval skotský fyzik John Stewart Bell slavný článek, ve kterém teoreticky zkoumal, jestli zavedením skrytých proměnných do experimentu je možné reprodukovat výsledky experimentu s provázanými stavy. Výsledkem

Bellovy práce je limit, který určuje maximální míru korelace výsledků z obou stanovišť za předpokladu, že průchod fotonů filtrem určují skryté proměnné. Tento limit je známý pod názvem *Bellovy nerovnosti*. Význam Bellových nerovností je dvojitý. Prvním z nich je skutečnost,

Schéma myšlenkového experimentu pro měření provázaných fotonů. Zdroj: autor, Quantum Gazette.



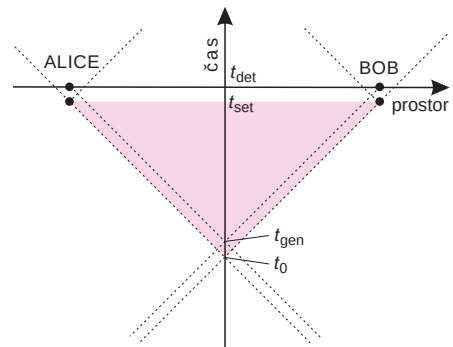
že výsledek experimentu, který předpovídá kvantová mechanika, tyto nerovnosti nespĺňuje. Druhý, možná zásadnější význam Bellových nerovností je návod, jak testovat hypotézu skrytých proměnných v reálném experimentu.

## Experimentální testy Bellových nerovností

Prokazatelné experimentální potvrzení narušení Bellových nerovností trvalo dalších 16 let díky nedostatečným technologickým možnostem. V letech 1980 až 1982 prováděl francouzský fyzik Alain Aspect lehce modifikovanou verzi experimentu popsaného výše. Výsledky Aspectova experimentu jasně ukazovaly narušení Bellových nerovností, a tím i neplatnost hypotézy skrytých proměnných a podpoření hypotézy o nelokálním chování provázaných částic. Výsledek Aspectova experimentu způsobil malé zemětřesení v obraze chápání světa, nicméně narušení Bellových nerovností bylo od té doby mnohokrát opakovaně prokázáno v různých případech.

Interpretace výsledků experimentů narušujících Bellovy nerovnosti jako nelokální chování vyžaduje jisté předpoklady. Jedním z předpokladů je kauzální oddělení měřicích stanišť (viz časoprostorový diagram). Toho je možné dosáhnout generací fotonů v přesně definovaný čas  $t_{\text{gen}}$  a změnou orientace polarizačního filtru (nastavení báze) v pozdějším čase  $t_{\text{set}}$  (když už jsou fotony na cestě) řízenou generátorem náhodných čísel na stanišťích Alice a Boba. V období mezi  $t_{\text{set}}$  a  $t_{\text{det}}$  není kauzálně možné, aby například Alice v době přiletu fotonů  $t_{\text{det}}$  věděla o nastavení Bobova polarizačního filtru (Aliceino staniště v čase  $t_{\text{det}}$  leží mimo budoucí světelný kužel nastavení filtru v  $t_{\text{set}}$  na Bobově stanišťi). Přesto však i takto záladně připravený experiment prokázal narušení Bellových nerovností.

Možná, že experiment s takto opožděnou volbou báze řízenou generátory náhodných čísel nebyl dostatečně důkladný. Vygenerování náhodných čísel sice bylo kauzálně oddělené od okamžiku detekce fotonů, ale samotné generátory byly kauzálně oddělené pouze od krátkého okamžiku (čas  $t_0$ ) před vysláním fotonů (čas  $t_{\text{gen}}$ ). Kauzální oddělení generátorů vymezuje růžová oblast v grafu. Co když se generátory před časem  $t_0$  mohly ovlivnit tak, že nastavení filtrů bylo takové, aby výsledek experimentu narušil Bellovy nerovnosti? Tuto „trhlínu“ v experimentu lze zmenšit umístěním generátorů náhodných čísel co nejdále od měřicích stanišť tak, aby okamžik  $t_0$  ležel daleko v minulosti.



Časoprostorový diagram znázorňující kauzální vztah stanišť Alice a Boba. Zdroj: autor.

**Kvazar** – objekty objevené v roce 1963, mají malé úhlové rozměry ( $<1''$ ) a obrovský zářivý výkon v celém spektru ( $10^{35}$  až  $10^{40}$  W). Kvazary se nacházejí ve velkých kosmologických vzdálenostech, jejich světlo je poznamenáno rozpínáním vesmíru a spektrum je výrazně posunuté k červenému konci. Energetická bilance odpovídá vyzařování celých galaxií. Jde o zárodky budoucích galaxií, v jejichž středu se nachází obří černá díra s charakteristickým výtryskem hmoty.

**Statistická významnost** – popisuje výsledek testování statistické hypotézy. V částicové fyzice se statistická významnost vyjadřuje v násobcích směrodatné odchylky  $\sigma$  normálního rozdělení. Za objev je považována statistická významnost vyšší než 5 $\sigma$ , kdy je pravděpodobnost, že je výsledek náhodnou fluktuací, 1:3,5 milionu.



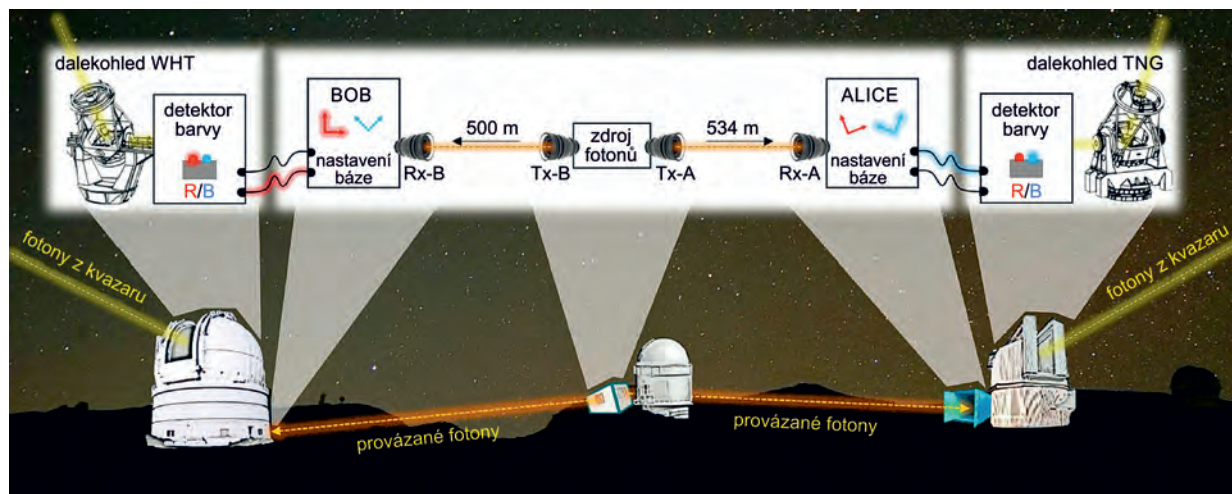
Kopule dalekohledu Williama Herschela (WHT). Dalekohled je druhým největším evropským dalekohledem. Nachází se na ostrově La Palma a průměr zrcadla má 4,2 metru. Zdroj: ESA.

## Kosmické testy Bellových nerovností

Rakouští fyzikové z Institutu kvantové optiky a kvantové informace IQOQI ve Vídni pojali problém kauzálního oddělení generátorů náhodných čísel ve velkém stylu a zvolili za tyto generátory náhodných čísel dva vzdálené kvazary, kde barva jejich fotonů rozhoduje o tom, jak budou voleny báze měření na stanovištích Alice a Boba. Kvazary mají katalogová označení QSO B0350–073 a QSO J0831+5245 a světlo od nich k Zemi putuje 7,78 a 12,21 miliard let. Experiment tedy začal 1,59 miliardy let po velkém třesku. Minulé světelné kužely obou kvazarů se protínají v čase před 13,15 miliardami let.

Kosmický Bellův test se odehrál na observatoři ORM (*Observatorio del Roque de los Muchachos*) na jednom z Kanárských ostrovů – La Palmě. Pro koncentrování světla vzdálených kvazarů byly použity dalekohledy TNG (*Telescopio Nazionale Galileo*) s průměrem zrcadla 3,6 m a WHT (*William Herschel Telescope*) s průměrem zrcadla 4,20 m. Koncentrované světlo kvazarů dále procházelo dichroickým zrcadlem, které rozdělilo tok fotonů dle vlnové délky na „modrý“ kanál (vlnová délka kratší než 630 nm) a „červený kanál“ (vlnová délka delší než 630 nm). Místo klasických polarizačních filtrů zde byly použity rychlé elektrooptické modulátory, které otáčejí polarizaci fotonu a nastavují bázi měření. Pokud Alice detekovala „červený“ foton, tak elektrooptický modulátor nastavil bázi měření na 22,5° a 112,5°, po-

Schéma kosmického Bellova experimentu. Zdroj: Dominik Rauch, *Physical Review Letters*.



kud detekovala „modrý“ foton, tak měřila polarizace  $67,5^\circ$  a  $157,5^\circ$ . Červený foton u Boba nastavil měření na  $0^\circ$  a  $90^\circ$  a modrý foton na  $45^\circ$  a  $35^\circ$ . Zdroj provázaných fotonů se nacházel 534 metrů od Alice a 500 metrů od Boba. Provázané fotony procházely částečně optickým vláknem a částečně vzduchem až na měřicí stanoviště, kde je čekal elektrooptický modulátor. Dále byly fotony směřovány na polarizační dělič svazku a dvojici detektorů typu SPAD (*Single Photon Avalanche Diode*). Měření probíhalo 17 minut a celkem bylo detekováno 30 000 korelovaných párů fotonů.

Na základě měření korelací výsledků Alice a Boba byly vyhodnoceny tzv. Clauserovy Hornovy Shimonovy a Holtovy (CHSH) nerovnosti (experimentálně vhodnější přepis Bellových nerovností). Výsledky narušují CHSH nerovnosti se statistickou významností 9,3 směrodatných odchylek ( $9,3 \sigma$ ). Narušení CHSH nerovností bylo opakovaně potvrzeno měřením s dalším kvazarem QSO B0422+004. Podmínky, za kterých byl tento kosmický Bellův test proveden, vylučují kauzální příčinu naměřených korelací až k samému počátku vesmíru.

## Nelokální charakter

V experimentech s provázanými fotony patrně nikdy nebude možné zcela vyloučit kauzální příčinu korelací. Každopádně je ještě technologicky možné připravit ultimátní experiment, kde bázi měření budou určovat fotony reliktního záření, což umožní vyloučit kauzální souvislost z ještě větší části časoprostoru. Nicméně již nyní je velice obtížné přijmout fakt, že procesy, které se odehrály před miliardami let, by mohly způsobit iluzi nelokálního chování provázaných částic v současnosti. Výsledek experimentu kosmického Bellova testu tedy spíše potvrzuje fakt, že některé procesy v přírodě mají skutečně nelokální charakter.

■ Miroslav Havránek, 8. 5. 2020, AB 19/2020



Galileův národní dalekohled (TNG) o průměru zrcadla 3,6 metru je italským dalekohledem postaveným na Kanárském ostrově La Palma. v nadmořské výšce 2 400 m. Zdroj: INAF-TNG.

**ORM** – Observatoř Roque de los Muchachos, astronomická observatoř na ostrově La Palma. Observatoř vlastní přes deset velkých dalekohledů. Jejich činnost řídí Kanárský astrofyzikální institut sídlící na sousedním ostrově Tenerife. Největším dalekohledem je GTC (Gran Telescopio Canarias) s největším celistvým zrcadlem na světě (průměr 10,4 metru). Druhým největším přístrojem je Dalekohled Williama Herschela.



## Zvítězí Verlinde nad temnotou?

**Kvantová teorie pole** – popis interakce založený na kvantových principech, tj. na nekomutativnosti základních operací v mikrosvětě. Kvantová teorie pole nahrazuje silové působení polními částicemi. Tyto částice jsou virtuální a nikdy nemohou skončit v detektoru, působí jen mezi dvěma interagujícími částicemi. Jako první prototyp kvantové teorie pole se vyvinula ve 30. letech 20. století kvantová elektrodynamika, později se objevila teorie slabé a silné interakce. Jediná gravitace je popsána jinak – za pomoci obecné relativity.

Množství informace uložené v konečné oblasti nemůže být nekonečné. Zdroj: Thought Co.



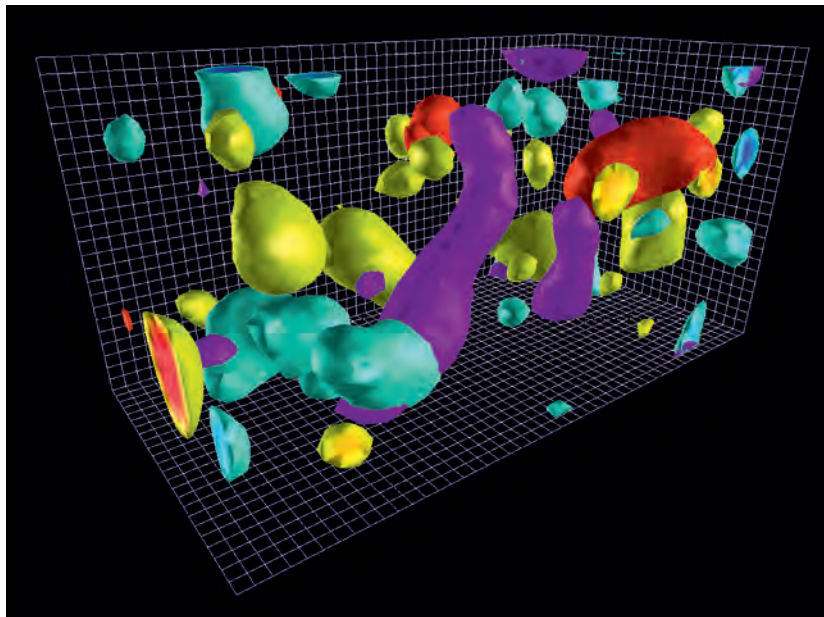
Mezi lety 2009 až 2011 šokoval Erik Verlinde, holandský teoretik působící tehdy v Princetonu, svět svým názorem, že gravitace nepatří k základním interakcím, ale je způsobena statistickými projevy mikrosvěta a je tedy ve skutečnosti pouze maskovanou kvantovou interakcí. Od té doby už uplynulo hodně vody. Verlinde svou první verzi teorie doplnil v roce 2016 o další postulát, jehož výsledkem je, že jeho teorie nedává stejné výsledky jako Newtonův gravitační zákon či obecná relativita. V prostředí s vysokou hustotou látky, například ve Sluneční soustavě, splývají předpovědi s Keplerovými zákony nebo v extrémních situacích s obecnou relativitou. Při nízké hustotě látky, například u celé galaxie či u kupy galaxií, jsou ale předpovědi odlišné. A to už začíná být zajímavé. Pokud dvě teorie dávají různé výsledky, může jen experiment rozhodnout, která z nich je v souladu s přírodními jevy, jež chceme popsat. Jak už to u nových teorií bývá, zatím jsou výsledky rozporuplné, některé práce teorii potvrzují, jiné vyvracejí. Nejzajímavější ale je, že poslední varianta Verлиндovy teorie nepotřebuje k popi-

su rotačních křivek galaxií temnou hmotu, což by mohlo znamenat velký posun při interpretaci stávajících měření. Pojďme se na tyto záležitosti podívat podrobněji.

### Jak šel čas

Kořeny vztahu mezi termodynamikou, statistikou a gravitací sahají až do roku 1973. Tehdy izraelský teoretik Jacob Beckenstein zjednodušeně analyzoval myšlenkový experiment, při němž periodicky házeli do černé díry fotony uvolňované z nějaké nádoby, která se opakovaně dostávala do blízkosti horizontu černé díry. Napadlo ho, že by takové zařízení v podstatě

fungovalo jako klasický tepelný stroj. Ten ale může trvale a cyklicky fungovat jen s dvěma teplotami – teplotou kotle a teplotou chladiče. Za vyšší teplotu posloužila sama teplota fotonů. S chladičem ztotožnil Beckenstein povrch černé díry a z jednoduchých úvah odvodil, jaká by teplota povrchu černé díry, jakožto chladiče, měla být. Tato teplota je velmi malá, například pro černou díru o hmotnosti našeho Slunce vychází pouhých  $10^{-7}$  K. O dva roky později provedl anglický teoretik Stephen Hawking mnohem preciznější výpočet na základě kvantové teorie pole. Teplota povrchu černé díry mu vyšla stejná jako Beckensteinovi a navíc předpověděl mechanismus Hawkingova vypařování černé díry. Díky kvantovým procesům (ať už si je představíme jako tunelování z oblasti pod horizontem či jako kreaci virtuálního páru nad horizontem, při níž jedna částice skončí pod horizontem) mohou černou díru přece jen tu a tam některé částice opustit. Černá díra by měla proto zářit jako černé těleso o Beckensteinově teplotě. Tímto efektem by se černá díra o hmotnosti Slunce vypařila za neskutečných  $10^{62}$  let (stáří vesmíru je 14 miliard let). Není jasné, zda je Hawkingův jev reálný fyzikální mechanismus a zda bude vypařování černých děr někdy detekováno. Beckenstein i Hawking přispěli k existenci nové vědní disciplíny: *termodynamice černých děr*. Pokud přiřadíme povrchu černé díry teplotu, můžeme mu přiřadit i entropii. Není právě v ní zakódována informace o látce uvnitř černé díry? Každá částice, která horizontem prošla, ať už dovnitř, či naopak kvantovými procesy ven, nepatrně přispěla ke zvlnění horizontu černé díry. Právě tyto fluktuace (plošná entropie) by mohly být zdrojem informací o vnitřku černé díry. Zakódování informace o vícerozměrném objektu na méněrozměrné množině se nazývá *holografický princip* a zdá se, že jde o důležitý princip fungující jak v makrosvětě, tak v mikrosvětě.



Fluktuace vakua jsou objemovým zdrojem entropie, který způsobuje odchylky Verlinďovy teorie od obecné relativity. Na obrázku je vizualizace těchto vakuových fluktuací na základě numerických simulací z kvantové teorie pole. Zdroj: Univerzita v Adelaide.

**Entropie** – v termodynamice je definována jako teplo dělené absolutní teplotou. Takto zavedená entropie je na rozdíl od tepla úplným diferenciálem, její integrál nezávisí na cestě ve stavovém prostoru. Ve statistice má entropie význam logaritmické míry pravděpodobnosti realizace stavu, v kvantové teorii je logaritmickou mírou počtu kvantových stavů, kterými lze daný makroskopický stav realizovat. Entropie tak souvisí s „množstvím chaosu“ v systému. V informatice entropie popisuje množství informací. V uzavřeném systému může entropie jen růst. V termodynamické rovnováze dosáhne svého maxima.

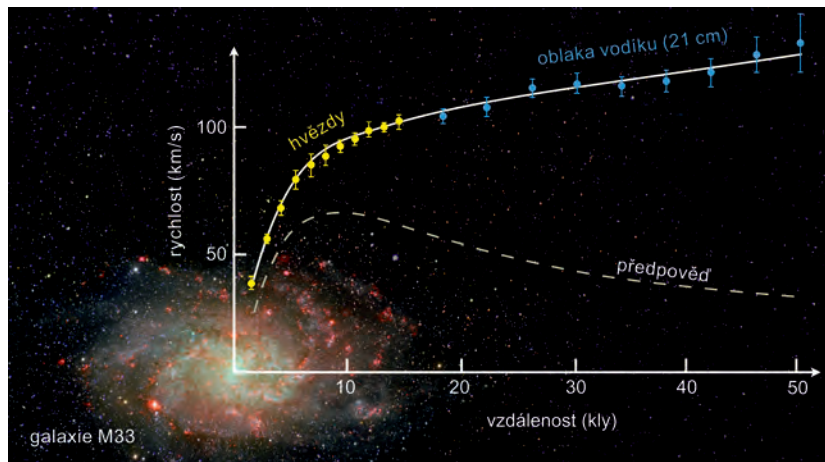
**Holografický princip** – představa, že informace o vícerozměrné entitě je zapsatelná v méně dimenzích. Název pochází z holografie, v níž se informace o třírozměrném objektu zapisují na dvojrozměrném hologramu, z něhož je možné původní objekt rekonstruovat. V matematice jsou ze znalosti hodnot komplexní funkce mající derivaci (tzv. holomorfní funkce) na hranici množiny určitelné její hodnoty v celé množině. Ve fyzice jsou vlastnosti černé díry určeny pouze jejím povrchem. Holografický princip je velmi atraktivní ve fyzice elementárních částic a v některých teoriích gravitace.

Samotná informace by měla být zakódována na nějakém nosiči, v tomto smyslu je třeba s informacemi zacházet obdobně jako s energií či hmotou. Množství informace v dané objemové jednotce musí být konečné (tzv. *princip maxima entropie*), nemůže mít nekonečnou hodnotu podobně jako množství energie či hmoty soustředěné v konečné oblasti. Výsledkem principu maxima entropie je fakt, že elementární částice nemohou být dělitelné do nekonečna. Někde musí existovat hranice tvořená skutečně elementárními, dále nedělitelnými částicemi. Možná to jsou dnešní kvarky a leptony, možná bude existovat ještě nějaká další úroveň dělení. Pokud se bude taková částice navenek jevit jako struktura s určitým rozměrem (například bude strunou či něčím jiným), bude muset být veškerá informace o jejím vnitřku zapsaná na povrchu tohoto útvaru. Hovoříme o tzv. *projekční ploše*. Možné je, že je sám prostor kvantovaný a existuje nějaké základní kvantum prostoru. Potom by projekční plochou mohla být hranice tohoto elementárního kvanta. I v mikrosvětě by tedy mohl v nějaké podobě fungovat holografický princip. S těmito myšlenkami oživil termodynamiku mikrosvěta nizozemský teoretik Gerardus 'tHooft a americký teoretik Leonard Susskind v roce 1994.

O pouhý rok později, v roce 1995, ukázal americký teoretik Ted Jacobson z Marylandské univerzity, že z termodynamiky a entropie lokalizované na povrchu lze odvodit Einsteinovy rovnice obecné relativity. Blížkost obou disciplín byla najednou ještě těsnější. Nešlo

o novou teorii, jen o zajímavé alternativní odvození, které nevede k jiným výsledkům, než dává obecná relativita předložená dříve Einsteinem. O dalších 15 let později, v roce 2010, vstupuje na scénu holandský teoretik Erik Verlinde a Jacobsonův koncept prohlubuje. Gravitaci začíná vnímat jako statistické projevy mikrosvěta. Koncept entropie chápe nikoli termodynamicky, ale z hlediska pravděpodobnosti a statistiky. Přítomnost těles mění rozložení entropie a vzniká entropická síla, kterou

Jsou ploché rotační křivky na periferii spirálních galaxií důsledkem existence temné hmoty, nebo projevem objemové složky entropie? Na obrázku jsou měření pro galaxii M33 v Trojúhelníku. Zdroj: De Leo, Wikipedia.

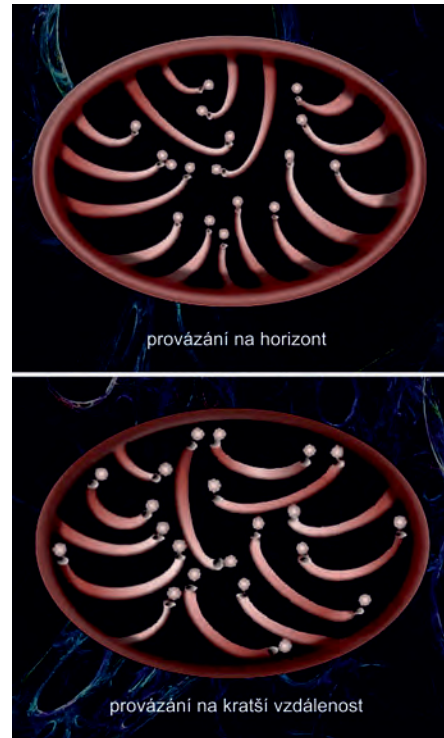


ztotožňuje s gravitačním působením. Plošné zdroje entropie opět vedou na správný gravitační zákon. V roce 2016 přidává Erik Verlinde i objemový zdroj entropie související s fluktuacemi vakua, které jsou při kvantových procesech nevyhnutelné. Tím poprvé dostává teorii, která v některých případech dává jiné výsledky než obecná relativita, což je experimentálně ověřitelné.

## Entropie a tři Verлиндovy principy

Entropie byla původně definována v termodynamice jako poměr tepla dodaného do systému a absolutní teploty. Takto upravené teplo má vlastnosti úplného diferenciálu, což vede na příjemnou vlastnost: entropie mezi dvěma stavy systému nezávisí na způsobu, jak se systém z jednoho stavu do druhého dostal (o teple totéž říci nelze). Ve statistice má entropie význam logaritmické míry pravděpodobnosti realizace stavu a v kvantové teorii je logaritmickou mírou počtu kvantových stavů, kterými lze daný makroskopický stav realizovat. Entropie tak souvisí s „množstvím chaosu“ v systému. V informatice entropie popisuje množství informací. V uzavřeném systému může entropie jen růst, tomuto tvrzení říkáme *druhá věta termodynamická*. V termodynamické rovnováze dosáhne entropie svého maxima. Gradient (spád entropie) vede na vznik makroskopických sil. Typickým příkladem je „síla“ nutící vůni z rozbité lahvičky voňavky zaplnit celou místnost, v tomto případě hovoříme o difúzi. Obdobnou entropickou silou je osmóza (prosakování rozpouštědla membránou) vedoucí na vznik osmotického tlaku. Ve změnách entropie má původ i obyčejná elasticita gumičky. Koneckonců i tlak plynu na stěnu má původ v chování velkého souboru systémů navenek. Jedna částice tlak nikdy nevytvoří, velký soubor částic ano. Verlinde věří, že i gravitaci lze chápat jako entropickou sílu, tedy důsledek statistického působení mnoha mikroskopických kvantových systémů.

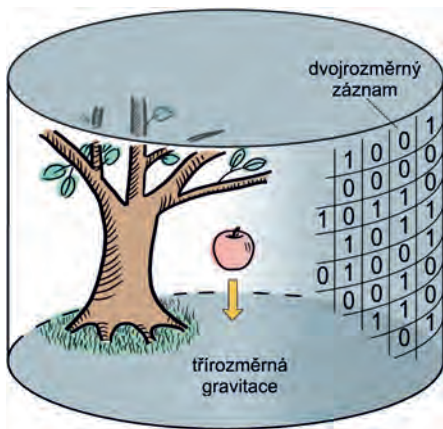
Verlinde postavil svou teorii na třech principech. První už jsme zmínili. Gravitace je entropickou silou. Další dva principy řeší, kde jsou zdroje entropie. Ty by měly být dvojí: jednak plošné (druhý princip, 2010) a jednak objemové (třetí princip, 2016). Plošné zdroje souvisí s holografickým principem. V okolí mikroskopického objektu by měla existovat jakási projekční plocha, na níž je veškerá informace o objektu. A na této ploše je lokalizován jeden ze dvou zdrojů entropie. Druhý zdroj entropie respektuje Heisenbergovy relace neurčitosti.



Vakuové fluktuace polí jsou obecně považovány za zdroj zrychlené expanze vesmíru, tedy za původce temné energie. Ve Verлиндově teorii záleží na tom, jak jsou vlnové funkce těchto fluktuací vzájemně provázány. Buď je to na vzdálenosti kratší než k horizontu viditelného vesmíru, nebo až na horizont. Každá varianta přispívá k objemové složce entropie jiným způsobem, což by mohlo být rozpoznatelné na skutečném průběhu zrychlené expanze vesmíru. Zdroj: Erik Verlinde, SciPost Physics.

**Modifikovaná gravitace – MOND – Modified Newtonian Dynamics**, úpravy Newtonových zákonů, které mají za cíl vysvětlit rozdělení rychlostí hvězd v galaxiích jinak než za pomoci temné hmoty. Teorie MOND má velké množství zastánců i nesmířitelných odpůrců.





Holografický princip. Kresba: Hiroši Ooguri.

Šestice teoretiků, která nejvíce přispěla k pochopení vztahu mezi termodynamikou, statistikou, teorií informace a gravitací. Postupně (jako při čtení) jsou: Jakob Beckenstein, Stehen Hawking, Ted Jacobson, Gerardus 'tHooft, Leonard Susskind a Erik Verlinde. Zdroj: AGA.



U mikroskopického objektu nelze nikdy současně změřit polohu a hybnost. Obdobné relace platí i pro všechna pole. Ve vakuu nemůže být současně nulová hodnota pole a nulová hodnota hybnosti pole. To vede k nenulovým fluktuacím všech polí (elektromagnetických i dalších), které jsou zdrojem objemové složky entropie.

### Možnosti ověření

Podle Verлиндových analýz je plošná entropie zdrojem běžné gravitační síly, tedy ubývající s druhou mocninou vzdálenosti od objektu. Objemová složka entropie ale přináší jinou závislost připomínající poněkud snahu zastánců modifikování gravitace. V každém případě vede objemová složka na zrychlenou expanzi s nenulovou kosmologickou konstantou v Einsteinových rovnicích obecné relativity. Velmi důležitý je fakt, že samotná přítomnost látky snižuje objemovou složku entropie a navíc vede k jejímu přerozdělení. Poměr objemové a plošné entropie tedy závisí na průměrné hustotě okolního prostředí. V hustých oblastech, například ve Sluneční soustavě, je tento poměr velmi malý a vede na předpovědi ve shodě s obecnou relativitou. V limitě, kdy jsou objemové zdroje entropie zanedbatelné, dává Verлиндova teorie přesně obecnou relativitu. V oblastech s nízkou hustotou energie,

například v galaxiích jako celku, už je ale objemovou složku entropie třeba započíst, což vede na ploché rotační křivky, podobné těm, které se měří v periferních oblastech spirálních galaxií a které jsou chápány jako důsledek existence galaktického haló z temné hmoty. Verлиндovo pojetí tak považuje temnou energii a temnou hmotu za pouhý rub a líc jediné mince – za projevy objemové složky entropie. Veškeré výpočty jsou bohužel zatím prováděny jen pro sféricky symetrické rozložení hmoty, a tak má tato nezvyklá hypotéza ještě vůči svým předchůdcům co dohánět. Sympatické je, že se v posledních letech

objevila řada měření, jejichž autoři se snaží předpovídané odchylky od obecné relativity ověřit experimentálně. Sady dat jsou ale zatím malé, a proto autoři studií nedocházejí k jednoznačným závěrům – zkrátka jedni Verlinovu hypotézu potvrzují a druzí vyvracejí. Na osud gravitace, která se vynoří v makrosvětě jako posel z mikrosvěta (anglicky *Emergent Gravity*, česky vynořivší se neboli emergentní gravitace), si tedy budeme muset nějakou dobu ještě počkat. Jen budoucnost ukáže, zda je gravitace skutečnou silou, nebo pouhou iluzí.

**Emergence** – spontánní vznik kvalitativně nových makroskopických vlastností složitých systémů, jež není snadné odvodit z mikroskopických vlastností jejich jednotlivých prvků a vazeb mezi nimi. Tyto jevy mohou být zcela neočekávané a z hlediska obvyklého lidského chápání nové. Matematickým jazykem pro popis emergence je teorie komplexních systémů.

■ Petr Kulháněk, 3. 5. 2019, AB 18/2019



## Mapa gravitačních teorií

**Kvantová gravitace** – teorie pokoušející se spojit zákony kvantové mechaniky se současnou teorií gravitace, obecnou relativitou. Donedávna se zdálo, že nejbližší cíli jsou tzv. teorie strun.

**Smyčková gravitace** – Loop Quantum Gravity, teorie snažící se rozpor mezi obecnou relativitou a kvantovou teorií vyřešit kvantováním prostoru na základní kvanta – tzv. smyčky. Síť těchto smyček se nazývá spinová pěna. Rozměry smyček by měly být rovny Planckově délce, tj.  $10^{-35}$  m.

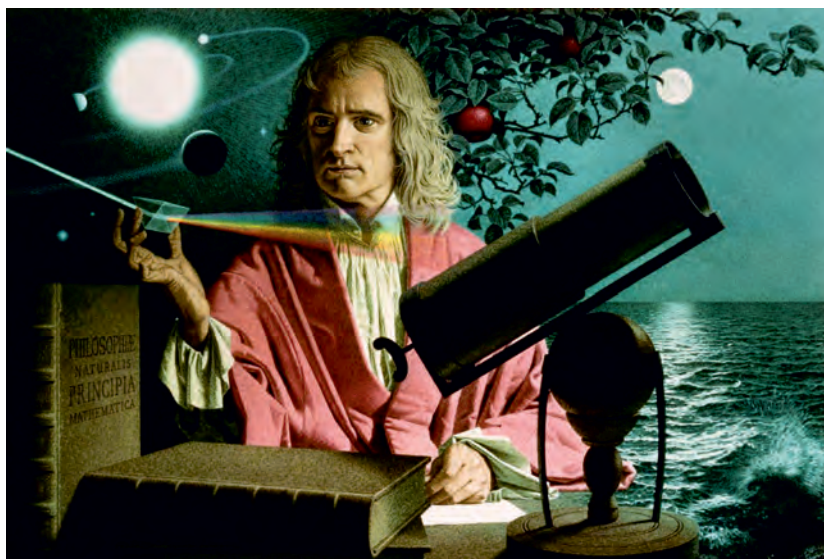
Gravitace je bezpochyby nejdéle zkoumaná základní síla. Přestože její projevy dokážeme správně spočítat s přesností daleko převyšující naše reálné potřeby, stále tápeme, jak ji správně uchopit. Víme totiž, že naše teorie nejsou správné. Obecná teorie relativity, která je tak úspěšná při popisu působení gravitace na velkých vzdálenostech, je ve sporu s kvantovou teorií, která popisuje svět neméně přesně, ale na malých měřítcích. Tam, kde se tyto dvě teorie potkají, předvídají nekonečné hodnoty, což je neklamný znak jejich selhání. Již mnoho desetiletí fyzici doufají, že naleznou jednotnou teorii popisující vesmír jediným způsobem. Pokud taková teorie vůbec existuje, musí obecnou relativitu i kvantovou teorii obsahovat jako dva okrajové případy, podobně jako obecná relativita obsahuje Newtonův gravitační zákon. Představme si některé z hlavních směrů, kudy se výzkum ubírá.

### Jak to začalo

Isaac Newton byl zakladatelem moderního pojetí vědy a autorem první úspěšné teorie gravitace. Zdroj: Jean-Leon Huens, National Geographic, 100+1.

První teorii gravitace, podpořenou matematickým aparátem, přivedl na svět Isaac Newton. Je to jednoduchý vztah, který popisuje, že gravitační síla ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Druhá mocnina souvisí

s geometrií našeho prostoru. Dlouho se zdálo, že je vzorec dokonalejší, ale přesná pozorování poukazovala na drobné chyby. Nejznámější případ je stáčení perihélia oběžné dráhy Merkuru (i po odečtení známých poruch od ostatních planet). Za pozornost stojí jeden ze způsobů vysvětlení, který upravoval Newtonův zákon. Předpokládal, že číslo v exponentu vzdálenosti není přesně 2, ale má hodnotu jen o málo menší. Pak by vzorec předpovídal dráhu Merkuru tak, jak byla pozorována. Z dnešního pohledu je tento pokus úsměvný, nicméně, když se na něj podíváme tak, jak by asi sám autor nečekal,



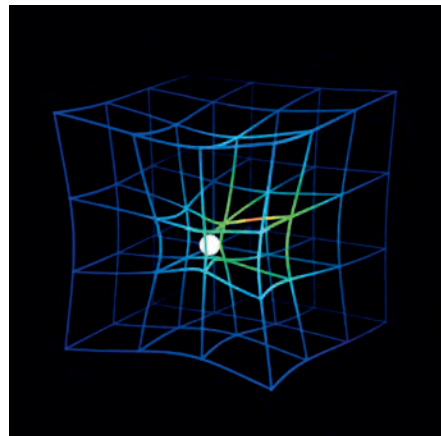
mohli bychom usoudit, že geometrie prostoru v místech Merkuru není eukleidovská, že povrch koule není  $4\pi r^2$ , což by odpovídalo dnešnímu pojetí gravitace – obecné teorii relativity.

Obecná teorie relativity pojem síly vůbec nezavádí. V Einsteinově pojetí zakřivují tělesa čas a prostor svou hmotností a vše se v něm pohybuje po nejpřímějších možných drahách, tzv. *geodetikách*. V současnosti se jedná o nejprecizněji propracovanou, obecně uznávanou teorii gravitace, která zatím přesně vysvětlila všechny pozorované jevy. Na velmi malých škálách, jejichž zkoumání je zatím mimo naše technické možnosti, však dává znepokojující předpovědi. Je několik cest, kudy z této nelehké situace ven.

### Posvit' me si na malé škály

Naše představy o popisu světa selhávají, když se přiblížíme k tzv. Planckovým škálám. V praktickém životě nás to neomezuje, protože jde o rozměry o pětadvacet řádů menší, než je průměr atomu. Snad logickým krokem, jak se z tohoto problému dostat, je hledat mechanismy, které zabráni jít do takto malých rozměrů. Můžeme třeba přijmout premisu, že elementární částice nejsou bodové, ale mají nějakou minimální velikost. Tímto směrem se ubírala *teorie strun*, později *teorie superstrun*. Předpokládá, že všechny dosud známé částice jsou tvořeny jakýmsi základními kameny – *strunami*. Název pramení z toho, že by tyto struktury měly mít tvar jednorozměrných strun navzájem se lišících vibračními stavy. Teorie ještě navíc vyžaduje další prostorové rozměry. To se může zdát podezřelé, protože naše denní zkušenost počítá jen se čtyřmi, započítáme-li i čas. Je však možné, že na mikroskopické úrovni můžeme, až se zdokonalí naše pozorovací technika, narazit na další, tzv. *svinuté dimenze*. Asi jako se nám vlas zdá být jednorozměrný, ale pod mikroskopem uvidíme, že jeho povrch má nejen délku, ale i příčný směr, který vlas obtáčí v uzavřené smyčce. Je dechberoucí, že tímto jednoduchým principem lze zkonstruovat všechny známé elementární částice, tedy i ty, které zprostředkovávají interakce. Jedna z těchto částic má vlastnosti, jaké očekáváme u hypotetického gravitonu, plnící částice gravitační interakce.

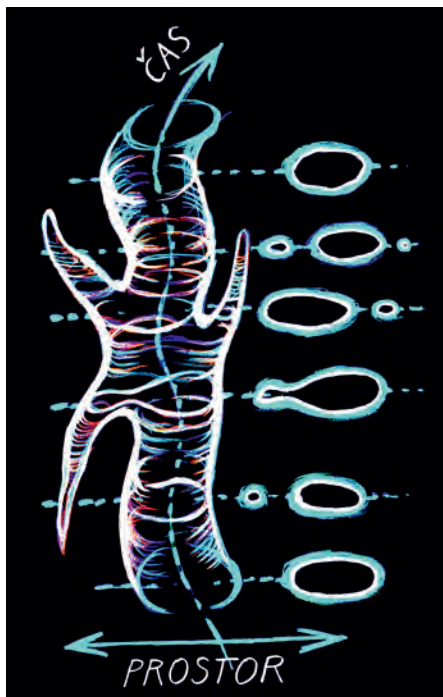
Název teorie strun se drží už jen z historických důvodů, protože struny sehrály klíčovou roli u jejího vzniku. Dnes tu ovšem vystupují i další objekty, jako například membrány, zkráceně brány. Českou stopu zde zanechal strunový fyzik Petr Hořava, když v roce 1989 objevil



Každé těleso kolem sebe zakřivuje a spoluvytváří jemné předivo času a prostoru. Zdroj: ESA.

**Kvadratická gravitace** – třída alternativních teorií gravitace, které rozšiřují rovnice obecné relativity o druhou mocninu Ricciho skaláru (popisuje skalární křivost, v obecné relativitě (OTR) je v první mocnině) a zúžení Weylova tenzoru (popisuje torzní a slapové jevy, OTR ho neobsahuje) se sebou samým. Jsou-li tyto členy rovny nule, přechází rovnice kvadratické gravitace v klasickou Einsteinovu obecnou teorii relativity (OTR).





Ukázka časového vývoje uzavřené struny (analogie Feynmanova diagramu). Kresba Ivan Havlíček.

**Emergentní gravitace** – teorie gravitace založená na předpokladu, že gravitace není samostatnou silou, ale vynoří se jako makroskopický jev na základě statistického chování mikrosvětla. První variantu teorie zpracoval Erik Verlinde v letech 2009 až 2010. Dnes je jeho představa gravitace založena na tom, že gravitace je entropická síla a zdroje gravitace jsou plošné (holografický princip) a objemové (fluktuační vakua).

tzv. D-brány. To jsou plochy v časoprostoru, kde mohou končit struny. Matematicky jsou omezeny Dirichletovými podmínkami (podmínky platící na hranici množiny), proto je v názvu písmeno D. Pojmenování D-brány vzniklo na popud amerického fyzika Josepha Polchinského, kterému je i neprávem přičítáno prvenství Hořava objevu. Ten sehrál v roce 1995 zásadní roli při vzniku M-teorie.

Teorie superstrun se později rozvinula do pěti teorií, které jedinečným způsobem problém popisovaly. To je samozřejmě podezřelé, ale později se ukázalo, že tyto teorie nejsou nezávislé, jak to z počátku vypadalo. Jejich syntézou vznikla tzv. M-teorie. Zvláštním bonusem strunového přístupu je také vysvětlení, proč je gravitační síla v porovnání s jinými tak slabá. Vícerozměrný prostor by umožňoval únik gravitačního působení do jiných (makroskopických) dimenzí. Odpůrci M-teorie ji sice přiznávají vnitřní eleganci a principiální jednoduchost, ale jedním dechem vytýkají neúměrnou matematickou složitost. Přes veškerý pokrok v matematice se leckdy nedaří sestavit ani samotné rovnice popisující problém. Teorie také předpovídá existenci částic a extradimenzí, které zatím nikdo nepozoroval. Prubířským kamenem by samozřejmě byl experiment, který by rozhodl ve prospěch klasických teorií nebo M-teorie. Takový však zatím nemáme.

Jiný způsob, jak se vyhnout příliš malým rozměrům, je přijmout premisu, že sám prostor není spojitý, ale je složený z jakýchsi kvant prostoru nazývaných smyčky. To je základní koncept tzv. *smyčkové gravitace*. Smyčky spolu navzájem komunikují, vytvářejí předivo prostoru nazývané *spinová pěna*. Z této koncepce se vytrácí pojem prostoru i času. Prostor je tvořen provázáním jednotlivých smyček a představa makroskopického plynutí času vzniká v důsledku vztahů mezi jednotlivými kvanty prostoru.

Ačkoli myšlenka smyčkové gravitace není dosud opuštěna, potýká se se závažnými problémy. Prostor rozdrobený na smyčky by měl mít vlastnost, kterou v makroskopickém ekvivalentu pojmenováváme index lomu. Signál šířící se prostorem by se měl zpomalovat přeskoky od jedné smyčky k druhé, v závislosti na jeho energii. Jinými slovy, rychlost světla by měla být závislá na vlnové délce. Zatím se tuto disperzi nejen nepodařilo pozorovat, ale z analýzy světla, které k nám přilétá z končin vesmíru vzdálených miliardy světelných roků (tady by měla být disperze již dobře patrná), vysvítá, že pokud je snad prostor kvantován, rozměr zrn je možná ještě menší, než je Planckova délka.

## Opravme Einsteina

Pozapomeňme na problémy s kvantováním a podívejme se, zda je správně obecná relativita. To je výzva poměrně smělá, protože jsme zatím nenašli sebemenší odchylky jejich předpovědí od pozorovaných jevů. Nová teorie gravitace by tedy měla obecnou relativitu zahrnovat jako svou limitní formu. Mezi takové alternativní teorie patří i rozsáhlá třída teorií nazývaná *kvadratické gravitace*. Obecná teorie relativity je závislá na hodnotách dvou základních konstant. Na gravitační a na kosmologické konstantě. Kvadratické gravitace přibírají ještě další dva členy, které se zde vyskytují ve své druhé mocnině. To je také důvod, proč se mluví o kvadratických gravitacích.

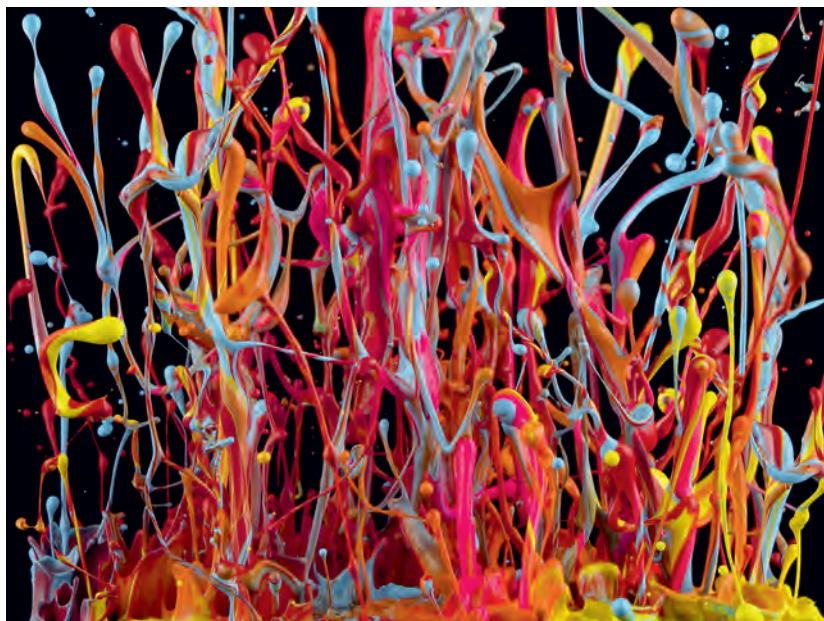
V souvislosti s kvadratickými gravitacemi připomeňme nedávný průlom ve zobecnění Schwarzschildova řešení nerotující černé díry, tentokrát pomocí kvadratické gravitace. Za úspěchem stojí (v abecedním pořadí) Jiří Podolský (MFF UK), Vojtěch Pravda, Alena Pravdová (oba MÚ AV ČR) a Robert Švarc (MFF UK). Zatímco je Schwarzschildovo řešení poměrně jednoduché, kvadratické gravitace neměly donedávna jinou možnost, než se odvolat na numerické metody se všemi problémy, které přinášejí. Výše zmíněnému týmu se podařilo najít explicitní tvar metriky, který problém popisuje. Mimo jiné tím ukázali, že v kvadratické gravitaci neplatí tzv. Birkhoffův teorém. Birkhoffův teorém tvrdí, že Schwarzschildovo řešení je v obecné relativitě jediné možné. Podle kvadratických gravitací je třída řešení širší. Analytické řešení rovnic gravitačního pole se opírá o tzv. *Bachův tenzor*. Při jeho nulové hodnotě přechází rovnice v klasické Schwarzschildovo řešení. Mluvíme o Schwarzschildově-Bachově černé díře, zkráceně o díře Schwa-Bach.

Svou stopu na poli alternativních teorií gravitace zanechal i původně strunový fyzik Petr Hořava.

**Graviton** – hypotetická polní částice gravitační interakce, která by měla smysl, pokud by gravitace byla popsatelná kvantovou teorií. Graviton by měl mít spin 2. Našími současnými prostředky není bohužel detekovatelný.

**Okrajové podmínky** – podmínky zajišťující jednoznačnost řešení partiálních diferenciálních rovnic. Dirichletovy podmínky předepisují hodnotu hledané funkce na hranici výpočetní oblasti. Neumannovy podmínky předepisují hodnotu první derivace hledané funkce na hranici výpočetní oblasti.

Umělecká představa malé části prostoru tvořeného spinovou pénou. Zdroj: Carlo Rovelli, Francesca Vidotto.





Petr Hořava je spoluvůrce jedné z alternaticních teorií gravitace. Zdroj: Martin Svozilek, Hospodářské noviny.

Erik Verlinde s jablkem, neodmyslitelným symbolem gravitační interakce. Fotografie: Willeke Duijvekam.



Mezinárodní pozornost přitáhl teorií nazývanou *Hořavova-Lifšicova*. Sama teorie je pouze Hořavovo dílo, protože však k jejímu rozvinutí použil matematické postupy ruského fyzika Jevgenije M. Lifšice (1915–1985), figuruje v názvu i druhé jméno. Základní princip budí pochybnosti, protože se tváří jako velký krok zpět. Teorie ustupuje od rovnocennosti prostorové a časové souřadnice, takže není invariantní vůči Lorentzovým transformacím. Je zřejmé, že jakkoli zhoubně se teorie tváří vůči mnohokrát ověřeným pozorováním na makroskopických vzdálenostech a malých energiích, v mikrosvětě odstraní problémy s divergencemi veličin, jako jsou hmotnost a energie. Hořava našel v roce 2009 způsob, jak se s fatálním nedostatkem vypořádat. Formuloval teorii, podle které se ve světě vysokých energií invariance vůči Lorentzovým transformacím nezachovává, ale v limitě nízkých energií ano. Některé symetrie, které Einstein postuloval jako výchozí, zde vyplynou z podstaty věci, což teorii přidává na zajímavosti.

## A co když gravitace neexistuje?

Všechny dosud uvedené teorie se snaží o popis, jak gravitace působí, žádná se nepokouší odpovědět na otázku proč. Víme, že je mikrosvět kvantován, ale už neřešíme proč. Víme, jakým způsobem hmotnost zakřivuje prostoročas, nevíme však, proč to tak dělá. Na tom není nic znepokojujícího, přírodní vědy si odpovědi na otázku proč rezervují pro problémy, které nejsou základní. Pokud by gravitace základní silou nebyla, mohli bychom se pokusit odpovědět, proč tu je, a tím by odpadl i rozpor s kvantovou teorií. Co gravitaci způsobuje, se lidé pokoušeli vysvětlit již dávno. Byla tu jakási naivní představa, že je prostor vyplněn mikroskopickými částicemi, které termickým pohybem tlačí na tělesa, podobně jako molekuly vzduchu tlačí na vše kolem nás. Osamělé těleso by tyto částice bombardovaly ze všech stran, jejich celkový účinek by byl tedy nulový. Dvě planety vedle sebe by se však navzájem stínily, proto by byl vnější tlak větší a tělesa by se přitahovala. Z tohoto principu doplněného těžko stravitelnými ad hoc podmínkami vysvítala i kvadratická závislost síly na převrácené hodnotě vzdálenosti. Je však zřejmé, že takové částice by musely vytvářet odporující prostředí a planety by se na svých drahách zpomalovaly. Rozporů s realitou je mnohem více, proto si dnes z tohoto přístupu ponechme pouze myšlenku, že gravitace nemusí být základní silou. Velký pokrok v takovém bádání v posledních letech přinesl holandský fyzik Erik Verlinde.



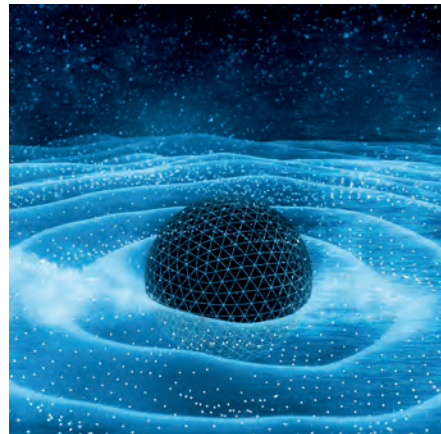
Podle Verlindeho gravitace ve skutečnosti neexistuje, to, co pozorujeme, je jen statistickým projevem mikroskopických procesů. Verlinde chápe gravitaci jako entropickou sílu, která vzniká při nárůstu entropie. Sama entropie má plošné zdroje (holografický princip) a objemové zdroje (kvantové fluktuace). V první verzi v roce 2011 se z jeho analýz jako vedlejší produkt vynořil Newtonův gravitační zákon, což je samo o sobě pozoruhodné. O několik let později takto získal i obecnou relativitu a v některých speciálních případech dokáže i vysvětlit projevy, které se připisují temné hmotě a energii. Jakkoli je tato teorie přitažlivá, není zatím ověřena.

### Která teorie je nejlepší?

Pokusili jsme se zmapovat alternativní teorie gravitace, výčet zřejmě není úplný. Vynechali jsme exotické teorie předpokládající imaginární hmotnost, nezmiňovali jsme ani modifikovanou newtonowskou dynamiku, která se snaží úpravou gravitačního zákona odstranit potřebu temné hmoty v galaxiích. Pozorování chování slupkových galaxií a srovnání výsledků s numerickými simulacemi dává nadějně výsledky. Je snad tedy modifikovaná gravitace ta správná teorie?

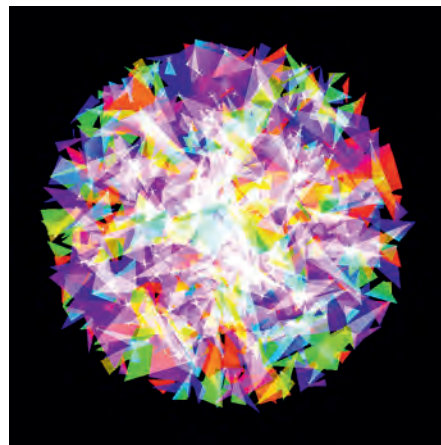
Jediným kritériem správnosti teorie je shoda s realitou, tedy srovnávání s již známými fakty a experimentem. Dokud teorie tuto shodu neporušují, není možné rozlišit, která z nich je ta správná. Fyzika nehledá věčné pravdy, nýbrž matematické modely reality. To však neznamená, že by se fyzikové do filozofických otázek nesměli pouštět, nechat se jimi vést a případně je včas opustit, pokud je dovedou do míst, kde se názor rozchází s pozorováním. Teorie poskytující stejné výsledky pak hodnotí podle jejich vnitřní elegance a svého osobního vztahu, což je samozřejmě subjektivní pohled. Správným krokem je navrhnout experiment, který rozhodne. Na sjednocení obecné relativity a kvantové teorie pracují nejlepší mozky již od počátku minulého století, přesto se dosud nepodařilo problém uspokojivě rozřešit. Možná se ještě ten správný mozek nenašel, možná jednotná teorie neexistuje. To už jsme ale za hranicemi fyziky. Řečeno s Cimirmanem: vyrovnat se s tím, toť věčný úděl filozofie.

■ Rudolf Mentzl, 30. 8. 2019, AB 34/2019



*Představa gravitační vlny v kvantové teorii gravitace.  
Zdroj: Univerzita v Santa Barbaře.*

*Představy kvantové gravitace mohou mít i ty nejdivočejší podoby, a to i v těch nejrenomovanějších pracovištích.  
Zdroj: Perimeter Institute for Theoretical Physics.*





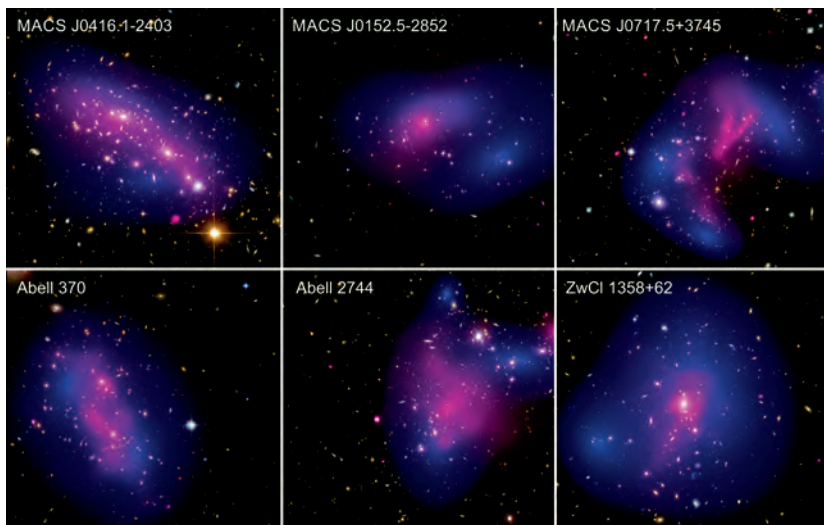
## Pátá interakce

**Gravitační interakce** – interakce působící na všechny částice bez výjimky. Má nekonečný dosah a její intenzita ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Současnou teorii gravitace je obecná relativita publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1915. Podle této teorie kolem sebe každé těleso zakřivuje prostor a čas a v tomto pokriveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách. Obecná relativita předpověděla řadu jevů, které z Newtonovy gravitace nevyplývají.

Dosud nevysvětlenými projevy gravitační interakce jsou temná hmota a temná energie. Za temnou energii by mohly být zodpovědné kvantové fluktuace vakua, ale také síly spojené s modifikovanou gravitací. Předpokládá se, že temná hmota je naopak tvořena neznámými částicemi, které nejsou součástí standardního modelu. Na snímku je rekonstrukce rozložení temné hmoty v kupách galaxií. Zdroj: D. Harvey, NASA, ESA, EPFL.

V současnosti lze veškeré interakce mezi objekty v přírodě popsat čtyřmi základními interakcemi: gravitační, elektromagnetickou, silnou a slabou. Dvě z nich jsou dalekodosahové (gravitační a elektromagnetická) a dvě krátkodosahové (silná a slabá). Gravitační úspěšně popisuje prostřednictvím zakřiveného časoprostoru obecná relativita a zbývající tři interakce jsou popsány kvantovou teorií. V současnosti nemáme jedinou teorii pro všechny čtyři interakce. Kvantovou část dobře popisuje tzv. *standardní model elementárních částic a interakcí*. Celkový počet čtyř interakcí nemusí být konečný. Například nizozemský teoretický fyzik Erik Verlinde se domnívá, že gravitace není samostatnou silou, ale jde o projev, kterými se statisticky chová navenek mikrosvět popsaný kvantovými zákony. Pokud by se tato vize potvrdila, poklesl by počet základních interakcí na tři. Většina fyziků nespokojených s číslem 4 se ale domnívá, že budou naopak existovat i další, velmi slabé interakce, které jsou současnými prostředky obtížně měřitelné a může jich dokonce být i větší počet. Jedna z nich by mohla být spojena se samotným Higgsovým polem, které by mohlo způsobovat další, zatím neměřitelnou, interakci elementárních částic. Není ani vyloučené, že by gravitace na velkých škálách mohla mít více složek, které

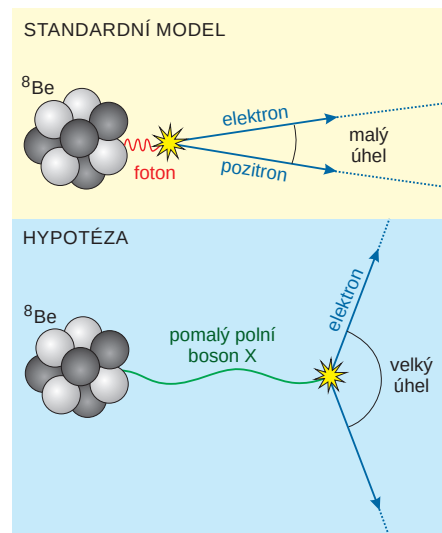
se nám dosud nepodařilo objevit. Snad by taková interakce mohla vysvětlit podstatu temné energie. Většina fyziků se ale domnívá, že pokud nějaká další interakce existuje, bude mít kvantovou povahu, tj. bude za ní zodpovědná nějaká polní částice, která není součástí stávajícího standardního modelu. Taková polní částice by navíc mohla být usilovně hledanou částicí temné hmoty. V některých současných experimentech se opravdu zdá, že by pozorovaná fakta mohla být projevem dalších interakcí. Pojďme se na dva takové experimenty podívat podrobněji.



## Modifikovaná gravitace

Gravitace je jedinou silou, která by měla působit na veškerá tělesa bez rozdílu. Ústřední tezí současné teorie gravitace, obecné relativity, je princip ekvivalence, který předpokládá, že setrvačné a gravitační účinky všech těles jsou shodné. Nejasnou otázkou je velmi silný princip ekvivalence, podle kterého by i samotná energie gravitačního pole (a jí odpovídající zakřivení prostoročasu a hmotnost) měla mít jak setrvačnou povahu, tak schopnost gravitačního přitahování. Pokud by velmi silný princip ekvivalence neplatil, mohla by na tělesa působit další velmi slabá síla, kterou poprvé popsal už v roce 1968 americký fyzik Kenneth Nordtvedt. V roce 1981 šokoval australský geofyzik, profesor Frank Donald Stacey (\*1929) z Queenslandské univerzity, měřeními gravitační konstanty v důlní šachtě kilometr pod povrchem. Výsledek se lišil o 2 % od hodnoty měřené na povrchu. Jedním z možných vysvětlení byla existence newtonovské složky gravitační síly. Obdobná měření se proto konala na palubě americké ponorky USS Dolphin (AGSS 555), která byla schopna se ponořit do podstatně větší hloubky. Australská měření se ale nepotvrdila. *Nordtvedtova síla* by také mohla způsobovat malé změny vzdálenosti Měsíce od Země, které se pokouší detekovat experiment LRR (*Lunar Laser Ranging*) využívající pro laserová měření vzdálenosti koutové odražeče umístěné na Měsíci posádkami Apolla 11, 14 a 15. Další síla analogická gravitaci by mohla mít původ v extradimenzech, které jsou součástí některých snah o sjednocení všech čtyř interakcí. Za extradimenze považujeme další dimenze přidávané v modelech ke třem běžným prostorovým dimenzím a k jedné časové dimenzi. Mohou být jak makroskopické, tak kompaktifikované (svinuté). Jejich projevy ale dosud nebyly pozorovány, takže není jisté, zda existují, nebo zda jde o slepou uličku. Jestliže by nová síla závisela na složení látky (například poměru protonů a neutronů), byla by v principu objevitelná nějakou sofistikovanou variantou Eötvösova experimentu (dvě různá tělesa na rameni torzních vah, na která působí jak odstředivé síly způsobené rotující Zemí, tak gravitace). Výsledkem by byl nenulový moment síly působící na tato tělesa. Zatím se ale žádné síly tohoto typu detekovat nepodařilo.

Jako modifikovaná gravitace se také označují různé snahy o modifikaci Newtonova gravitačního zákona. Nejznámější jsou pokusy o nahrazení druhé mocniny, s níž gravitace ubývá se vzdáleností, jiným exponentem. Žádný z těchto pokusů ale zatím nevedl k cíli.



Atomki anomálie (viz str. 194). Pik na velkých úhlech by mohl být způsoben novou částicí. Zdroj: Atomki.

**Elektromagnetická interakce** – interakce působící na všechny částice s elektrickým nábojem. Má nekonečný dosah, mezi tělesy ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Polními částicemi jsou fotony, které vytvářejí mezi nabitými tělesy elektromagnetické pole. Nemají elektrický náboj, mají nulovou klidovou hmotnost a spin rovný jedné. Teorie elektromagnetické interakce se nazývá kvantová elektrodynamika (QED).

**Silná interakce** – interakce krátkého dosahu, přibližně  $10^{-15}$  m. Silná interakce je výběrová, působí jen na částice s barevným nábojem, tj. kvarky. Polními částicemi silné interakce jsou gluony (z anglického „glue“ = lepit, lepidlo). Gluony spojují kvarky do větších celků, tzv. hadronů. Nejznámější jsou proton a neutron složený ze tří kvarků. Silná interakce je odpovědná za soudržnost atomárního jádra. Polní částice mají barevný náboj, a proto mohou působit samy na sebe. Barevný náboj na malých vzdálenostech (při vysokých energiích) slábne a kvarky se chovají jako volné částice. V tomto případě hovoříme o tzv. asymptotické volnosti kvarků. Teorii silné interakce se nazývá kvantová chromodynamika (QCD).

Spektrometr s vysokým rozlišením ve vědeckém ústavu Atomki, který analyzuje páry gama fotonů vylétajících z excitovaných jader. Zdroj: CERN Courier.



## Částice X17 (Atomki anomálie)

Velmi zajímavý experiment provedli v roce 2015 v Ústavu jaderného výzkumu Maďarské akademie věd v Debrecíně (ústav je znám pod kratším a výstižnějším názvem Atomki). Skupina vědců pod vedením Attily Krasznahorkaye posílala urychlené protony na jádra  ${}^7\text{Li}$ , která se při srážkách měnila na excitovaná jádra  ${}^8\text{Be}$ . Z těchto jader by podle standardního modelu měly vylétávat energetické fotony, které se vzápětí přemění na elektronový-pozitronový pár. Skupina měřila úhly mezi vylétávajícími elektrony a pozitrony. Pro malé úhly statistika souhlasila se standardním modelem, ale kolem  $140^\circ$  se objevil malý pík (zvýšené množství elektronů a pozitronů vylétávajících pod tímto úhlem), který se standardním modelem částic a interakcí nesouhlasil. Statistická významnost byla „jen“  $3,1\sigma$ , což znamená, že pravděpodobnost, že jde o náhodnou fluktuaci je 1:1000. Za prokázaný objev se považuje  $5\sigma$  (pravděpodobnost náhodné fluktuace 1:3 500 000). Zvýšenému počtu elektronů a pozitronů rozptylujících se pod úhlem  $140^\circ$  odpovídal pík v energetickém spektru o energii/hmotnosti 17 MeV. Skupina upozornila, že by mohlo jít o novou elementární částici – boson – za hranicí standardního modelu, která získala podle své hmotnosti pracovní označení X17. Bosony patří ve standardním modelu

k nosičům sil, takže by částice X17, pokud skutečně existuje, mohla být spojena s novou neznámou silovou interakcí. Hmotnost 17 MeV je padesátinou hmotnosti protonu a 34-násobkem hmotnosti elektronu. Taková částice by mohla být i žhavým kandidátem na usilovně hledané částice temné hmoty.

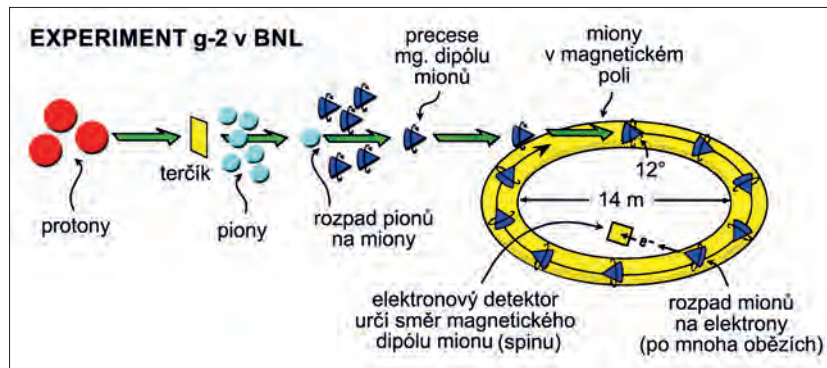
Publikace o existenci možné nové částice vyšla v roce 2016. Novou částici bohužel nepotvrdila žádná jiná skupina, neuspěl ani experiment NA64 prováděný na urychlovači SPS v CERNu. Řada fyziků poukazovala na možné systematické chyby. V letech 2017 až 2018 proto debrecínská skupina

detektor přestavěla a začala provádět další sérii experimentů, mj. i s rozpadem excitovaného jádra  $^4\text{He}$ . Nové výsledky byly velmi zajímavé. Kromě již známého píku na úhlu  $140^\circ$  se objevil další pík na úhlu  $115^\circ$ . Oba píky hovoří ve prospěch existence částice X17. Výsledky byly publikovány v letech 2019 a 2020, ale opět nebyly potvrzeny žádnou jinou vědeckou skupinou. V současnosti už ale ne-

jde jen o záležitost maďarské vědecké skupiny. Nezávislou analýzu experimentálních dat provedla skupina z Kalifornské univerzity v USA (Jonathan Feng, Tim Tait, Christopher Verhaaren) s podobnými závěry. Američané navrhli další experiment s excitovaným jádrem  $^{12}\text{C}$ . Navíc bude částice X17 hledána v Jeffersonově laboratoři, kde plánují experimenty, v nichž budou elektrony/pozitrony urychlené v injektoru CEBAF nastřelovány na tantalové a uhlíkové terče a ve vylétávajících částicích bude hledán podpis částice X17. V průběhu několika nadcházejících let by tak mohla být případná existence nové polní částice X17 definitivně potvrzena, nebo vyvrácena.

## Mionový experiment g-2

Další skupina experimentů, která vedla na podezření z existence páte interakce, se týká měření magnetického momentu mionů (těžších příbuzných elektronu). Magnetický moment nabitých částic je dán jak jejich spinem (vlastní část), tak orbitálním momentem (pohybová část). Magnetický moment je kvantovaný a základní kvantum se nazývá *Bohrův magneton*. Podle Diracovy rovnice, popisující chování mionu, by měl být vlastní (spinový) magnetický moment mionu dvojnásobkem Bohrova magnetonu. Výpočet se provádí přes tzv. *Feynmanovy diagramy* s jedním a dvěma vrcholy. V roce 1948 ukázal americký teoretik Julian Schwinger, že příspěvky od složitějších Feynmanových diagramů povedou na tzv. *anomální magnetický moment* elektronu a mionu, který se od dvojnásobku Bohrova magnetonu nepatrně liší. Příslušný koeficient se nazývá *gyromagnetický faktor* a pro miony ze Schwingerova výpočtu (ze standardního modelu) vychází



Princip mionového g-2 experimentu v Brookhavenu.

Zdroj: Brookhavenská národní laboratoř.

**Slabá interakce** – interakce s konečným dosahem, který je přibližně  $10^{-17}$  m. Působí pouze na levotočivé kvarky a leptony. Polními částicemi jsou vektorové bosony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$  se spinem rovným jedné. Hmotnosti částic jsou v rozmezí 80 až 90 GeV. Typickým slabým procesem je například beta rozpad neutronu. Teorie slabé interakce se nazývá kvantová flavourdynamika (QFD).





Stěhování magnetu z Brookhavenské národní laboratoře do Fermilabu. Zdroj: BNL, Fermilab.

→ Standardní model elementárních interakcí a částic.  
Zdroj: Particle Data Group.

$g = 2,00233183620(86)$ , číslo v závorce udává neurčitost posledních dvou platných cifer měření. Odchylka od hodnoty 2 vypovídá o jemných mechanismech kvantové elektrodynamiky, proto se experimenty testující kvantovou elektrodynamiku založené na měření magnetického momentu označují jako  $g-2$  ( $g$  minus dvě). Jakákoli nepatrná odchylka od hodnoty  $g$  faktoru  $2,00233183620(86)$  vypočtené ze standardního modelu znamená, že standardní model neplatí přesně a existují v něm další částice a silová pole.

První větší experiment tohoto druhu byl uskutečněn před zhruba dvěma desítkami let v Brookhavenské národní laboratoři na poloostrově Long Island v blízkosti New Yorku. Urychlené protony byly nastřeleny na terčík, z něhož vylétaly piony, jež se rozpadaly na miony. Miony poté vletly do akumulčního prstence, kde byly udržovány na kruhové trajektorii magnetickým polem. Elementární magnetické dipóly, které v magnetickém poli precedují (jejich osa se otáčí kolem siločar magnetického pole po kuželové ploše) se po mnoha obězích rozpadnou na obyčejný elektron letící ve směru osy magnetického dipólu. Zařízením je možné velmi přesně určit magnetický moment mionů. Brookhavenský experiment měl označení E821 a z analýzy dat nasbíraných v roce 2001 vzešel článek v roce 2004 oznamující, že byly naměřeny odchylky od standardního modelu se statistickou významností  $2,7\sigma$ . Šlo tedy spíše o podezření než o skutečný objev.

V roce 2013 byl brookhavenský experiment rozebrán a jeho podstatné části, zejména magnet o hmotnosti 15 tun, byly převezeny do Fermilabu sídlícího na předměstí Chicaga. Cesta měřila 5 120 kilometrů a zaměstnanci Fermilabu uvítali přijíždějící magnet s velkou pompou. Mionový experiment  $g-2$  byl znovu postaven ve Fermilabu a získal označení E989. Supravodivý magnet akumulčního prstence o průměru 15 metrů je provozován za teploty  $-268^\circ\text{C}$ . Staronový experiment sbírá data od roku 2018 a první výsledky byly oznámeny v dubnu 2021. Naměřený magnetický moment mionu je  $2,00233184122(82)$ , tedy se od hodnoty předpověděné standardním modelem liší na osmém desetinném místě. Je to nepatrná odchylka, ale byla naměřena se statistickou významností  $4,2\sigma$ . Pokud další sběr povede k překročení hodnoty  $5\sigma$ , nebude již pochyb o vědeckém objevu, který by znamenal, že na miony působí další neznámé síly za hranicí standardního modelu. Bylo by to poprvé, kdy by k popisu přírodních dějů standardní model nestačil. Zatím se experimenty vždy chovaly podle tohoto modelu.

# Standardní model elementárních částic

tři generace částic látky  
(fermiony)

interakce / nosiče sil  
(bosony)

|                                                                        | I                                                                                                                                                                                      | II                                                                                                                                                                                     | III                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>hmotnost</div> <div>náboj</div> <div>spin</div> <div>KVARKY</div> | $\approx 2,2 \text{ MeV}$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>u</b><br>up                     | $\approx 1,28 \text{ GeV}$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>c</b><br>charm                 | $\approx 173,1 \text{ GeV}$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>t</b><br>top                    | $0$<br>$0$<br>$1$<br><br><b>g</b><br>gluon                                 |
|                                                                        | $\approx 4,7 \text{ MeV}$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>d</b><br>down                  | $\approx 96 \text{ MeV}$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>s</b><br>strange                | $\approx 4,18 \text{ GeV}$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>b</b><br>bottom                 | $0$<br>$0$<br>$1$<br><br><b><math>\gamma</math></b><br>foton               |
|                                                                        | $\approx 0,511 \text{ MeV}$<br>$-1$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b>e</b><br>elektron                     | $\approx 105,66 \text{ MeV}$<br>$-1$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b><math>\mu</math></b><br>mion         | $\approx 1,7768 \text{ GeV}$<br>$-1$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b><math>\tau</math></b><br>tauon         | $\approx 91,19 \text{ GeV}$<br>$0$<br>$1$<br><br><b>Z</b><br>Z boson      |
|                                                                        | $< 1,0 \text{ eV}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b><math>\nu_e</math></b><br>elektronové neutrino | $< 0,17 \text{ MeV}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>mionové neutrino | $< 18,2 \text{ MeV}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br><br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>tauonové neutrino | $\approx 80,39 \text{ GeV}$<br>$\pm 1$<br>$1$<br><br><b>W</b><br>W boson |
| <div>LEPTONY</div>                                                     |                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                          | <div>SKALÁRNÍ BOSONY</div>                                                                                                                                   |
|                                                                        |                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                          | <div>POLNÍ BOSONY</div> <div>VEKTOROVÉ BOSONY</div>                                                                                                          |



Rozluštit záhadu páté interakce by mohl největší urychlovač světa – Velký hadronový kolider v komplexu urychlovačů CERN v blízkosti Ženevy. Obvod urychlovače je 27 kilometrů a protony zde mohou získat energii až 14 teraelektronvoltů. Zdroj: CERN.

## A co dál?

Další nezávislý poznatek, že se miony nechovají zcela dle standardního modelu, přinesly experimenty na Velkém hadronovém kolideru v komplexu CERN. Na detektoru LHCb se statistickou významností  $4,2\sigma$  vychází, že se při rozpadu b kvarku miony chovají poněkud jinak než elektrony. Poprvé se tak objevují experimenty, které naznačují, že existují jevy, které nejsou standardním modelem popsitelné. Bombastické novinové titulky o objevu páté interakce je ale třeba brát zatím s rezervou. Je třeba dalších dat a dalších experimentů s podstatně vyšší citlivostí. I v případě, že budou maďarské, fermilabské a cernské experimenty potvrzené, není zatím jasné, zda mají společného jmenovatele, nebo zda jde o několik různých jevů. Probíhají usilovné diskuze o charakteru polní částice nové silové interakce, může jít o tzv. *leptokvark*, který je schopen převádět kvarky na leptony, ale také o analogii polní částice slabé interakce, tzv.  $Z'$  *boson* (na rozdíl od polní částice  $Z$  slabé interakce se za označením píše čárka). Další diskuze probíhají o názvu případné nové síly. Někteří navrhuji *voňavá síla* podle kvantové vlastnosti (vůně) odlišující elektrony od mionů, jiní *hypersíla*. Žijeme v převratné době, kdy standardní model, který byl po mnoho desetiletí neochvějným stavebním kamenem veškerých znalostí o elementárních částicích a interakcích, začíná ztrácet půdu pod nohama a pravděpodobně dojde k tomu, tak jak tomu už bylo mnohokrát v minulosti, že se stane jen speciálním případem nějakého obecnějšího modelu, který bude schopen popsat i jevy, které v současnosti objevujeme.

■ Petr Kulháněk, 10. 9. 2021, AB 32/2021

# To je on, elektron

Od objevu elektronu už uplynulo více než století. Za tu dobu jsme se ho naučili využívat v různých zařízeních a slovo „elektron“ zdomácnělo natolik, že nám tato částice připadá jako důvěrný známý. Rozhodně si ale elektron nepředstavujte jako malou kuličku. Jde o objekt mikrosvětla se vším všady – nemusí být na jednom jediném místě, má vlnové vlastnosti, dokáže se ohýbat na překážkách, interferovat sám se sebou a konat další, pro nás neuvěřitelné, až kouzelnické kousky. Elektron je dobrý sluha a zlý pán, a to nejenom pro člověka, kterého dokáže zabít, ale také pro naše technologie, v nichž mohou elektrony s extrémními energiemi napáchat nevratné škody. Na vyprávění o elektronech by nestačily ani knihy o mnoha tisících stranách. Proto se zaměříme jen na některé zajímavosti spojené s elektronem – poslem mikrosvětla v našich končinách, který způsobil jak elektrotechnickou, tak v současnosti probíhající spintrickou a kvantovou revoluci.

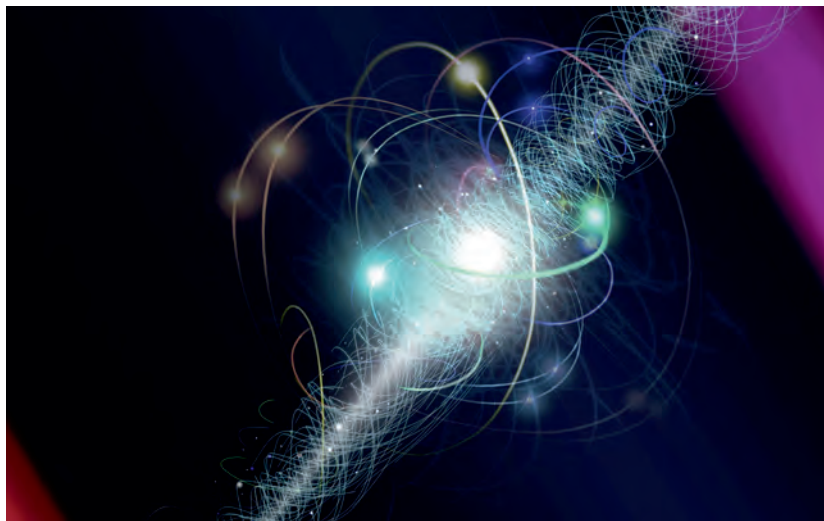
## Trocha historie

Elektron objevil při experimentech s katodovou trubicí v roce 1897 anglický fyzik Joseph John Thomson. Z katody vycházelo zvláštní záření, kterému se začalo říkat *katodové záření*. Ukázalo se, že jde o záporně nabitě částice, které při interakci se zředěným plynem v trubici vydávají charakteristické záření. Po dopadu katodového záření (elektronů) na terčíky z různé látky vznikalo rentgenové záření, proto katodové trubice přispěly k prvním námluvám s rentgenovým oborem spektra.

Nezvyklé chování elektronu nepochybně přispělo k pádu klasické mechaniky na počátku 20. století. Schrödingerova rovnice z roku 1925 správně popisovala nelokální chování elektronu v atomárním obalu, ale nepostihovala relativistické jevy a spin elektronu, který

**Elektron** – první objevená elementární částice. Je stabilní. Hmotnost má  $9,1 \times 10^{-31}$  kg a elektrický náboj  $1,6 \times 10^{-19}$  C. Elektron objevil sir Joseph John Thomson v roce 1897. Existenci antičástice k elektronu (pozitron) teoreticky předpověděl Paul Dirac v roce 1928 a objevil Carl Anderson v roce 1932.

*Umělecká představa elektronu letícího mezi dvěma laserovými paprsky. Elektron rozhodně nevypadá jako letící kamínek. Tento objekt mikrosvětla má vlastnost připomínající otáčení kolem osy, vytváří kolem sebe oblak dalších elementárních částic, v divokém rejži je vyznačuje a opět pohlcuje. Zdroj: Nicolle R. Fuller, NSF.*





**Pozitron** – antičástice k elektronu. Teoreticky existenci pozitronu předpověděl Paul Dirac v roce 1928. Experimentálně ho objevil v kosmickém záření Carl Anderson v roce 1932. Dnes jsou pozitrony využívány v řadě technologií, například pozitronové-elektronové tomografii (PET), jedné ze zobrazovacích metod v medicíně.

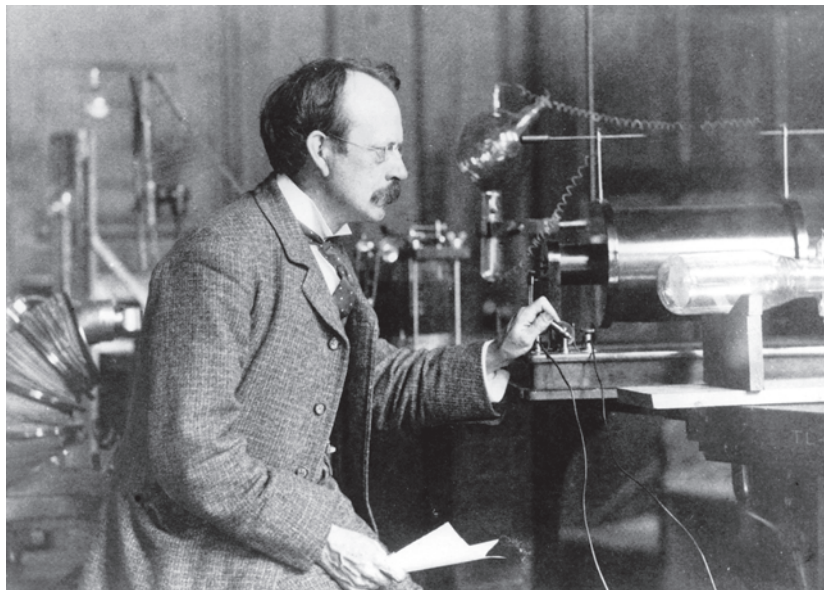
s nimi souvisí. Relativistickou rovnici pro elektron odvodil anglický teoretik Paul Adrien Maurice Dirac v roce 1928. Pomocí této rovnice navrhl existenci pozitronu, antičástice k elektronu. Tu našel o čtyři roky později v sekundárních sprškách kosmického záření americký fyzik a vynikající experimentátor Carl Anderson, který za její objev získal Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1936.

Téhož roku, kdy Anderson přebíral cenu za objev pozitronu, našel v kosmickém záření ještě těžšího bratra elektronu, mion. Mion se chová velmi podobně jako elektron. Má hmotnost 207 elektronů. Doba života je přibližně 2,2 mikrosekundy. Potom se těžký elektron rozpadá na normální elektron a neutrino:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ . Mion je stejně jako jeho dvojník elektron schopen vytvořit vázaný stav s protonem, tzv. *mionium* (vodík s mionem v obalu místo elektronu). Miony s relativistickými rychlostmi vznikají interakcí kosmického záření s horními vrstvami atmosféry.

Nakonec se ukázalo, že elektrony existují dokonce tři. Poslední, tauon neboli supertěžký elektron, má hmotnost 3 484 elektronů, což je přibližně dvojnásobek klidové hmotnosti protonu. Jde o nestabilní částici s dobou života  $3 \times 10^{-13}$  s. Rozpadá se na své lehčí dvojníky

(elektron nebo mion) a neutrino. V přírodě se dnes běžně nevyskytuje, lze ho připravit uměle na urychlovačích. V raných horkých fázích vesmíru byly všechny tři formy elektronu rovnoměrně zastoupeny. Tato rovnováha se narušila až tehdy, když průměrná energie částic ve vesmíru klesla pod klidovou energii tauonu, což znemožnilo jeho samovolný vznik. Ve vesmíru se tak stalo při teplotě 20 bilionů kelvinů. Tauon byl objeven v roce 1977 na urychlovači SPEAR ve Stanfordském urychlovačovém centru týmem, který vedl americký fyzik Martin Lewis Perl. Za objev tauonu získal Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1995.

Joseph John Thomson a katodová trubice, s jejíž pomocí objevil elektron. Zdroj: Cavendish Laboratory.



Elektron tedy existuje ve třech různých podobách. Vkrádá se otázka, zda na větších urychlovačích, než máme nyní k dispozici, nenalezeme další, ještě těžší podoby elektronu. Dnes se zdá, že to je vyloučené. Se čtvrtým elektronem by podle našich znalostí musela existovat i čtvrtá generace kvarků a vesmír by se vyvíjel o dost jinak, než pozorujeme.

### Pomalé elektrony

Nevím proč, ale většina lidí se představuje, že pokud jsou elektrony ve vodiči schopny roztočit mixér, pračku či jiné zařízení, musejí v drátech cválat nejméně rychlostí splašeného koně. Skutečnost je zcela jiná. Elektron ve vodiči podléhá mnoha srážkám, je zabrzděn, odrazí se – často v opačném směru – a jen pomalu driftuje podél vodiče ve směru elektrického proudu (přesněji řečeno v opačném směru, neboť proud je definován pomocí pohybu kladně nabitých částic). Například ve vodiči o průměru dva milimetry, kterým teče elektrický proud jeden ampér, bude průměrná rychlost pohybu elektronů kolem sedmi centimetrů za hodinu. Elektrony jsou v běžných zařízeních velmi pomalé, a přesto vykonávají mnoho užitečné práce. Výzkum elektrických a magnetických jevů byl doménou celého 19. století. Francouzský matematik a fyzik André Maria Ampère ukázal, že kolem vodiče protékaného elektrickým polem vzniká magnetické pole a velký anglický experimentátor Michael Faraday naopak ukázal, že změny magnetického pole vedou ke vzniku elektrického pole. Takové poznání umožnilo konstrukci prvních elektromagnetů, dynam a motorů a vyústilo v elektrifikaci velkých měst a později i vesnic. Počáteční období bylo poznamenáno nelitostným bojem mezi zastánci stejnosměrného proudu (Alva Edison a Werner von Siemens) a střídavého proudu (Nicola Tesla). Dodnes se tradují nechutné scénky s veřejnými popravami nebohých zvířat, které měly prostým lidem ukázat nebezpečnost střídavého proudu. Nakonec Teslova koncepce



Dobová fotografie prstence urychlovače SPEAR, na kterém byl objeven tauon, supertěžký elektron. Zdroj: SLAC.

**Mion** – těžký elektron, hmotnost má  $207 m_e$  (11 % hmotnosti protonu). Střední doba života je přibližně  $2 \times 10^{-6}$  s. Těžký elektron se rozpadá na stabilní elektron, elektronové antineutrino a mionové neutrino. Mion se vyskytuje v sekundárních sprškách z kosmického záření. Mion byl objeven Carlem Andersonem v kosmickém záření za pomoci mřížné komory v roce 1936.

**Tauon** – supertěžký elektron, jeho hmotnost je  $3\,484 m_e$  (přibližně dvojnásobek hmotnosti protonu). Jde o nestabilní částici se střední dobou života  $3 \times 10^{-13}$  s. Rozpadá se na své lehčí dvojinky (elektron nebo mion) a neutrino. Byl objeven v roce 1977 Martinem Perlem na urychlovači SPEAR.



První tranzistor zkonstruovaný v Bellových telefonních laboratořích. Vývoj k první komerčně použitelné součástce trval pouhé čtyři roky. Rozvoj elektroniky, který následoval, nemá v historii civilizace obdoby a pokračuje dodnes. Zdroj: Bellovy telefonní laboratoře.

elektrifikace tak jako tak zvítězila. V Čechách jsou tyto počátky neomyšlitelně spjaty s Františkem Křižíkem. V roce 1887 Křižík předvedl veřejné osvětlení ve středu Písku a o rok později zde uvedl do provozu první hydroelektrárnu v Čechách. Ve stejné době zprovoznil také vodní elektrárnu v Jindřichově Hradci. Obě byly zdrojem stejnosměrného proudu. V roce 1889 Křižík zprovoznil další městskou elektrárnu na stejnosměrný proud na pražském Žižkově, který měl tenkrát statut samostatného města. O něco později, v roce 1900, byla dostavena první elektrárna na střídavý proud v Holešovicích, která zajišťovala dodávky elektřiny pro většinu Prahy. Dnes si města a vesnice bez elektřiny už sotva dovedeme představit.

Velkým zlomem ve využívání elektřiny byl objev tranzistoru v Bellových telefonních laboratořích. John Bardeen, William Shockley a Walter Brattain objevili polovodičovou součástku, která umožnila miniaturizaci tehdejších neohrabaných elektronek a odstartovala elektronickou revoluci. Za objev tranzistoru získali všichni tři Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1956. Pozdější objev integrovaných obvodů s tisíci tranzistory na jediném čipu už byl jen pomyslnou třeshinkou na dortu. Elektronická revoluce změnila naši civilizaci k nepoznání. Složitá elektronika, počítače a mobily jsou jen nejznámějšími výdobytky z milionů elektronických zařízení, která během pouhých sedmdesáti let zaplavila svět. Veškerá tato zařízení ale využívají jen jednu vlastnost elektronu, a tou je jeho náboj. Elektron má také spin, který dnes umíme ovládat stejně dobře jako jeho náboj a technologie na něm založené můžeme očekávat v brzké budoucnosti.

## Střední rychlosti

Pokud elektrony opustí vodiče, v nichž se loudají ještě pomaleji než státník při slavnostní přehlídce, mohou vyvinout i značnou rychlost. Teď nemáme na mysli elektrony urychlené ve speciálních zařízeních či za extrémních podmínek na rychlost blízkou rychlosti světla, ale elektrony středních rychlostí, při nichž by jak hlavu státu, tak slimáka, nechaly rychle za sebou, ale světlo by pro ně bylo nedostižnou chimérou. Takových případů je velmi mnoho, proto se zaměříme jen na tři ukázky. První bude elektron v atomárním obalu. Pokud by podle vžitě představy elektron kroužil kolem jádra, měl by například ve vodíku rychlost 2 200 kilometrů za sekundu (to není ani 1% rychlosti světla ve vakuu). S touto rychlostí by obletěl Zemi za pouhých 18 sekund.

**Sekundární sprška** – kužel mnoha částic letících směrem k zemi z oblasti interakce primární částice kosmického záření s atmosférou. Spršky kosmického záření objevil italský fyzik Bruno Rossi v roce 1934, rozsáhlé spršky detekoval o čtyři roky později francouzský fyzik Pierre Auger. V sekundárních sprškách byla objevena antičástice k elektronu – pozitron a těžký elektron – mion.



Kolem těžkých jader ale elektrony podle klasické představy krouží mnohem rychleji. Například u atomu rtuti už jde o polovinu rychlosti světla. Představa kroužení je nicméně poněkud scestná. Elektron nekrouží, je to nelokální rozprostřený objekt mikrosvěta, který vyplňuje prostor kolem jádra a my můžeme určit jen pravděpodobnost jeho výskytu při opakovaném měření na mnoha atomech připravených ve stejném stavu. Na jednom jediném atomu měření opakovat nemůžeme. Pokud měřením atom nezlikvidujeme, určitě ho alespoň vážně poškodíme. V každém případě je rychlost oběhu určena ze zákonů klasické mechaniky zavádějící. Ve skutečnosti nelze rozumně rychlost elektronu v atomárním obalu definovat.

Jako druhý příklad poslouží sluneční vítr, neustávající proud elektronů, protonů a dalších částic, jimiž Slunce zaplavuje celou Sluneční soustavu. Tady u Země má sluneční vítr rychlost kolem 500 kilometrů za sekundu. Je to sice méně, než činí „rychlost“ elektronu v atomárním obalu, ale v tomto případě jde o rychlost reálnou a rozumně definovatelnou. Kvantové jevy jsou pro pohyb elektronu ve slunečním větru zanedbatelné. Sluneční vítr má, podobně jako vítr normální, různé poryvy a čas od času se v něm dokonce mohou objevit větší chuchvalce plazmatu, které k nám přilétají ze sluneční koróny (říkáme jim *koronální výrony hmoty*). Takový chuchvalec s sebou nese magnetické pole, a pokud si to zamíří k Zemi, může způsobit magnetickou bouři (rozvlnění siločar). Elektrony slunečního větru kloužou podél magnetických siločar Slunce a Země a za příznivých podmínek mohou polárními oblastmi pronikat až do horních vrstev atmosféry. Zde excitují atomy a molekuly a při jejich návratu do původního stavu vyzařují fotony, které vnímáme jako polární záře. Polární záře tedy nejsou plápolající duše mrtvých hříšníků, ani lišky s ohnivým ocasem letící napříč polární oblohou, jak se domnívaly některé severské národy, ale svit atmosféry excitované převážně elektrony slunečního větru.

**Elektronový mikroskop** – mikroskop, který k zobrazení předmětů využívá vlnových vlastností svazku elektronů. Elektron se chová podobně jako světlo, jeho vlnová délka je ale výrazně kratší, a tak je možné sledovat menší předměty než za pomoci světla. Elektronový mikroskop vynalezl v roce 1932 německý elektroinženýr Ernst Ruska.

První elektrárna vyrábějící střídavý proud pro Prahu byla v Holešovicích. Fungovala přes čtvrt století, od roku 1900 do roku 1926. Po spuštění Ervnické elektrárny byla přebudována na teplárnu. Tomuto účelu slouží dodnes. Zdroj: Český svět 1905.







Knoll (nalevo) a Ruska (napravo) při stavbě elektronového mikroskopu v roce 1932. Dobová fotografie.

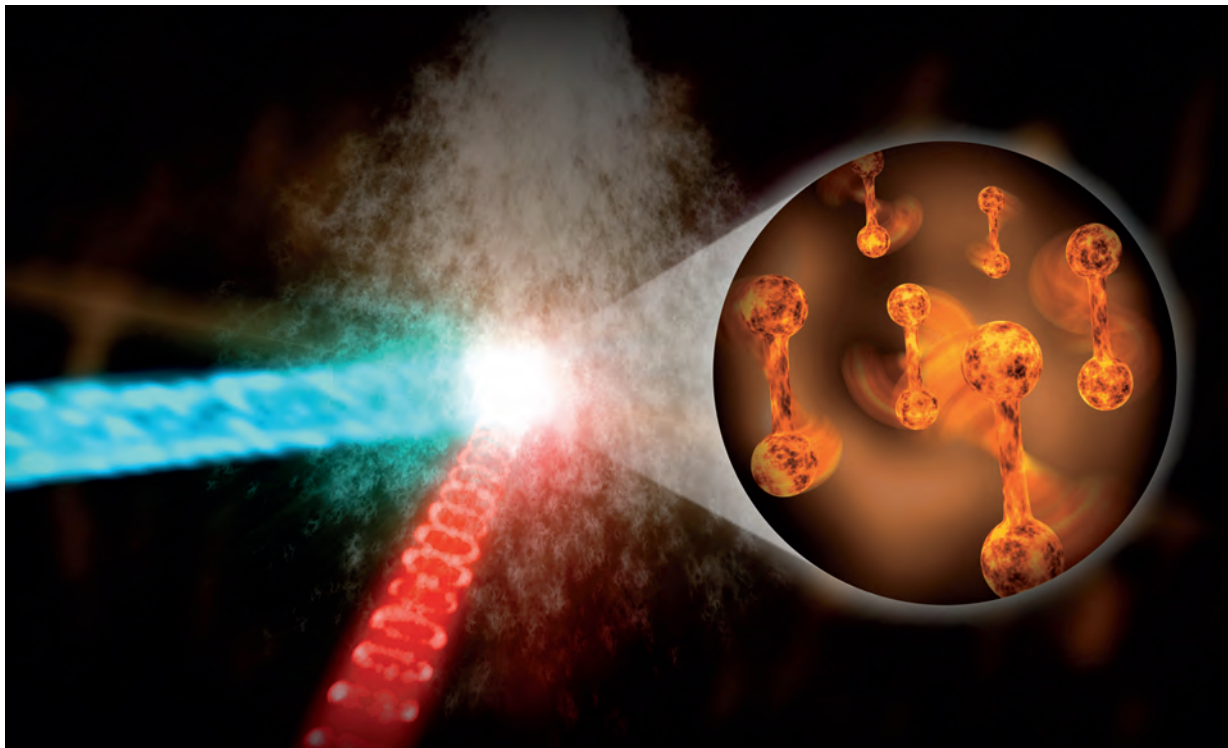
Polární záře nad Kanadou vyfotografovaná z Mezinárodní vesmírné stanice. Fotografii pořídil astronaut Tim Peake v lednu 2016. Zdroj: ESA, NASA.



Posledním příkladem bude dnes už běžný elektronový mikroskop. Je to geniální zařízení, které navrhl a spolu s Maxem Knollem zkonstruoval v roce 1932 německý elektroinženýr a fyzik Ernst Ruska. Jeho mikroskop využívá namísto světla elektrony. Ty mají, jakožto objekty mikrosvěta, také vlnové chování, ale jejich vlnová délka je podstatně kratší než u viditelného světla, což umožní rozlišení mnohem větších detailů. První prototyp pouze demonstroval princip nové metody a měl jen čtyřsetnásobné zvětšení, ale mikroskop zkonstruovaný Ruskou v roce 1933 měl už lepší rozlišení než světelné mikroskopy a dosáhl zvětšení 12 000×. První komerční mikroskop byl prodán v roce 1938. Čím rychlejší elektrony, tím kratší vlnovou délku mají. Pokud v elektronovém mikroskopu projdou elektrony rozdílem potenciálů (napětím) 1 kV, získají rychlost zhruba 20 000 km/s a jejich vlnová délka bude přibližně 0,04 nanometru. Při napětí 100 kV už ale získají rychlost 160 000 km/s (více než 50 % rychlosti světla) a jejich vlnová délka poklesne na 0,004 nanometru. Dnes se elektronové mikroskopy běžně využívají v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti. U některých elektronový svazek prochází tenkým řezem vzorku (tzv. *transmisní elektronový mikroskop*), u jiných se odráží a postupně skenuje povrch vzorku (tzv. *rastrovací elektronový mikroskop*).

## Rychlé elektrony

Elektrony můžeme urychlovat na vysoké rychlosti (a tím i energie) v urychlovačích. Děje se tak vždy elektrickým polem, ve velkých urychlovačích urychlování obstarávají mikrovlnné dutiny. Na první pohled se kruhový systém zdá jako ideální, neboť urychlovací proces probíhá opakovaně. Elektrony ale na kruhové dráze září. Vzhledem k tomu, že je vyzařovaný výkon nepřímo úměrný druhé mocnině hmotnosti částice, ztrácejí zářením elektrony podstatně více energie než protony a urychlování na extrémní energie už není účinné. Pro-



to se staví i lineární urychlovače elektronů. V plánu je mezinárodní lineární kolider ILC (*International Linear Collider*) s délkou mezi 30 a 50 kilometry, jehož stavba se díky vysoké ceně (přes 7 miliard dolarů) neustále odkládá. V současnosti není jasná ani lokalita výstavby. Elektromony by při srážce měly v ILC dosáhnout energii 500 GeV. Dosud největší lineární urychlovač je v Národní urychlovačové laboratoři SLAC Stanfordovy univerzity. Jeho délka je 3,2 km a dosažitelná energie 90 GeV. Historicky největším a dosud nepřekonaným urychlovačem byl kruhový systém LEP v CERNu s obvodem 27 kilometrů a dosažitelnou energií při srážce 209 GeV. V tunelu urychlovače LEP (a pozdějšího LEP 2) musely být před detektory v kruhovém tunelu rovné úseky, aby urychlené elektrony přestaly zářit a bylo možné provádět experimenty. Dnes je v jeho tunelu urychlovač LHC pro protony a těžké ionty, které při urychlování na zakřivené dráze tolik nezáří.

*Umělecké ztvárnění nejrychlejší vysokorychlostní kamery světa (viz text na další straně). Z trysky jsou do vakuované reakční oblasti přiváděny molekuly dusíku (dole). Laserový paprsek (červený) seřadí molekuly do stejného směru a vybudí jejich kmity. Elektronový paprsek (modrý) vytvoří ohybový obrazec, který umožní kmity sledovat. Úhel mezi elektronovým a laserovým paprskem je 5°. Zdroj: Národní urychlovačová laboratoř SLAC..*

**SLAC** – Stanford Linear Accelerator Center, středisko s několika urychlovači, nejznámějším je přes 3 kilometry dlouhý lineární urychlovač patřící Stanfordově univerzitě v Kalifornii, podle něhož je centrum SLAC pojmenováno. Urychlovač je v provozu od roku 1962. V současnosti je středisko přejmenováno na „SLAC National Accelerator Laboratory“ a je jednou z deseti národních laboratoří Spojených států. Na kruhovém urychlovači SPEAR byl v této laboratoři objeven tauon – supertěžký elektron.

Stanfordský lineární urychlovač je s délkou 3,2 kilometru největším lineárním urychlovačem elektronů na světě. První svazek částic v něm byl urychlen už v roce 1966. Zdroj: Národní urychlovačová laboratoř SLAC.



Urychlené elektrony mohou pronikat hluboko do jiných částic a stát se fascinujícím diagnostickým nástrojem. Takto byly objeveny v roce 1968 na Stanfordském lineárním kolideru kvarky uvnitř protonů. Urychlené elektrony pronikaly hluboko do protonů, docházelo k nepružnému rozptylu a z výsledků bylo jasné, že se elektrony uvnitř protonu rozptylují na třech centrech. V současnosti se na tomto urychlovači konají neméně zajímavé experimenty. V jednom z nich se urychlené elektrony chovají jako vlny a dochází k jejich ohybu (difrakci) na kmitajících molekulách dusíku. Elektrony se tak stávají nejdůležitějším prvkem vysokorychlostní kamery, která dokáže snímat vybuzené kmity těchto molekul. Na dosud největším (kruhovém) urychlovači LEP byly v 90. letech 20. století pomocí urychlených elektronů měřeny různé parametry standardního modelu elementárních částic, například hmotnosti polních částic slabé interakce Z a W. Pokud je shluk elektronů z jakéhokoli urychlovače namířen do oblasti střídajících se magnetických pólových nástavců (tzv. *undulátoru*), cloumá s ním magnetické pole sem a tam a elektrony vydávají typické koherentní záření. To je základním principem laseru na volných elektronech. Největší takové zařízení (*European XFEL*) je postaveno v německé částicové laboratoři DESY v Hamburku a má délku tři kilometry. Takové lasery slouží buď jako gigantické mikroskopy, nebo jako prostředek pro přípravu extrémních forem látky. Hitem posledních dvou desetiletí jsou malé urychlovače elektronů, které se vejdou na laboratorní stůl. Laserový paprsek vytvoří po dopadu na terčik plazma a v plazmové stopě vznikne podélné elektrické pole o velikosti až 300 GV/m. Hovoříme o tzv. *brázdovém poli*, název vznikl z paralely s vodní brázdou za pohybující se lodí. Brázdové pole dokáže urychlit elektrony podobně, jako valící se vlna urychlí surfaře na pobřeží moře. Tyto urychlovače na pracovním stole nesou označení LWFA (*Laser Wake-Field Accelerators*).

## Ubíhající elektrony

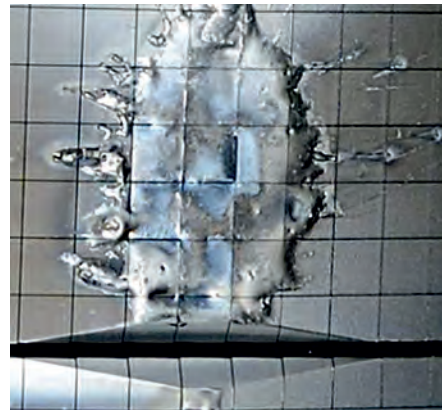
V některých situacích se elektrony urychlí na extrémní energie, aniž bychom si to přáli. Interakce elektronu s okolním plazmatem klesá s rostoucí rychlostí elektronu. Při malých rychlostech okolní náboje s elektronem intenzivně interagují. Pokud má elektron vysokou rychlost, proletí kolem okolních nábojů za krátkou dobu a účinný průřez srážek se zvyšující se rychlostí razantně klesá. Za normální situace je urychlování elektrickým polem kompenzováno srážkami (hovoříme



o tzv. *ohmickém režimu*). Pokud má ale elektron vysokou (nadkritickou) rychlost, nastane zajímavá situace. Srážky už nejsou schopné kompenzovat urychlování elektrickým polem a elektron dokáže v krátkém čase získat extrémní energii. V laboratorním plazmatu se takovým elektronům říká *ubíhající* (anglicky *runaway*), v magnetosférickém a atmosférickém plazmatu se pyšní názvem zabijácké (anglicky *killers*) elektrony. Působí-li na plazma elektrické pole, vždy se najde pár elektronů s natolik vysokou energií (z chvostu Maxwellova rozdělení), že se stanou ubíhajícími elektrony. Je jich ale zpravidla zanedbatelné množství. V extrémně silném poli počet ubíhajících elektronů roste a může dojít i k lavinovému efektu. Elektrony s obrovskou energií při srážkách s ionty generují další nadkritické elektrony, ty další atd. Urychlování těchto elektronů ale neprobíhá nade všechny meze, jak se občas traduje. Elektron s vysokou energií ztrácí energii zářivými procesy, které jsou intenzivní zejména v přítomnosti magnetických polí. Pokud energie přesáhne dvojnásobek klidové energie, může ubíhající elektron velmi účinně ztrácet energii tak, že emituje elektronové-pozitronové páry. Ty mohou být při dostatečně velkém elektrickém poli opětovně urychlovány a dokáží vytvořit další laviny elektronů a pozitronů.

V laboratoři jsou ubíhající elektrony velkým problémem například při závěrečné fázi existence fúzního plazmatu v tokamacích. Při zhášení plazmatu (tzv. *disrupci*) dojde k celé posloupnosti jevů: zpočátku prudce klesá teplota plazmatu, což s sebou nese snížení vodivosti plazmatu a zmenšení elektrického proudu tekoucího plazmatem. To má za důsledek pokles poloidálního magnetického pole, které je generováno proudem tekoucím plazmatem. Změna magnetického pole s sebou ale nutně podle Faradayova indukčního zákona přináší genezi silného elektrického pole a právě toto pole je schopné dostat část elektronů do ubíhajícího režimu a udržovat ji v něm. Pokud chuchvalec takových vysoce energetických ubíhajících elektronů narazí do stěny zařízení, je zaděláno na průšvih. Ubíhající elektrony jsou schopné fatálně poškodit stěnu tokamaku. Proto se dnes hledají mechanismy, jak předejít vzniku populace ubíhajících elektronů, a pokud už vznikla, jak ji účinně a rychle zlikvidovat.

Podobné procesy jsou známy i v průběhu bouřkové aktivity. Přítomné elektrické pole může dostat některé elektrony s výjimečnými rychlostmi (mohou pocházet i z kosmického záření) do ubíhajícího režimu, a ty se pak postarají o lavinový efekt. Za bouřek může ještě



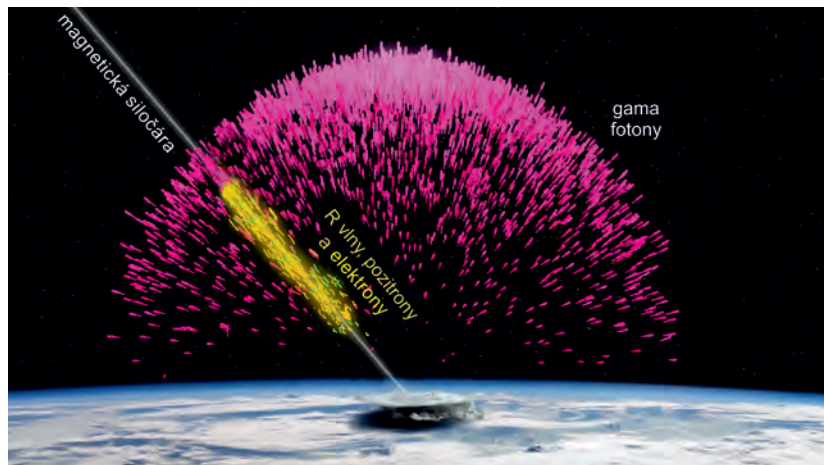
Dnes už legendární snímek poškození vnitřní části komory tokamaku JET (Joint European Torus) způsobené ubíhajícími elektrony. Zdroj: JET, UKAEA.

**Relativistická částice** – částice s rychlostí, která je podstatná při porovnání s rychlostí světla. Při takových rychlostech už nelze zanedbat kontrakci délek a dilataci časových intervalů. Za ultrarelativistické částice považujeme objekty pohybující se takovou rychlostí, že je jejich kontrakční faktor výrazně větší než 1. Pro rychlost rovnou 87 % rychlosti světla je tento faktor roven 2 (délky jsou poloviční a časové intervaly dvojnásobné). Pohybová energie částice je v tomto případě rovná klidové energii. Proto se někdy za ultrarelativistické elektrony považují elektrony, jejichž pohybový příspěvek k hmotnosti je větší než klidový.





pomocí magnetické pole a podél něho se šíří nízkofrekvenční elektromagnetické vlny (hvězdy), jejichž elektrické pole může dodávat elektronům další energii prostřednictvím tzv. *cyklotronní rezonance*, při níž je frekvence oběhu elektronu kolem magnetických siločar rovna frekvenci elektromagnetické vlny spojené s hvězdou. Zdá se, že laviny takovýchto elektronů jsou zodpovědné za gama záblesky pozorované při bouřkách jak z oběžné dráhy, tak z pozemských stanic.



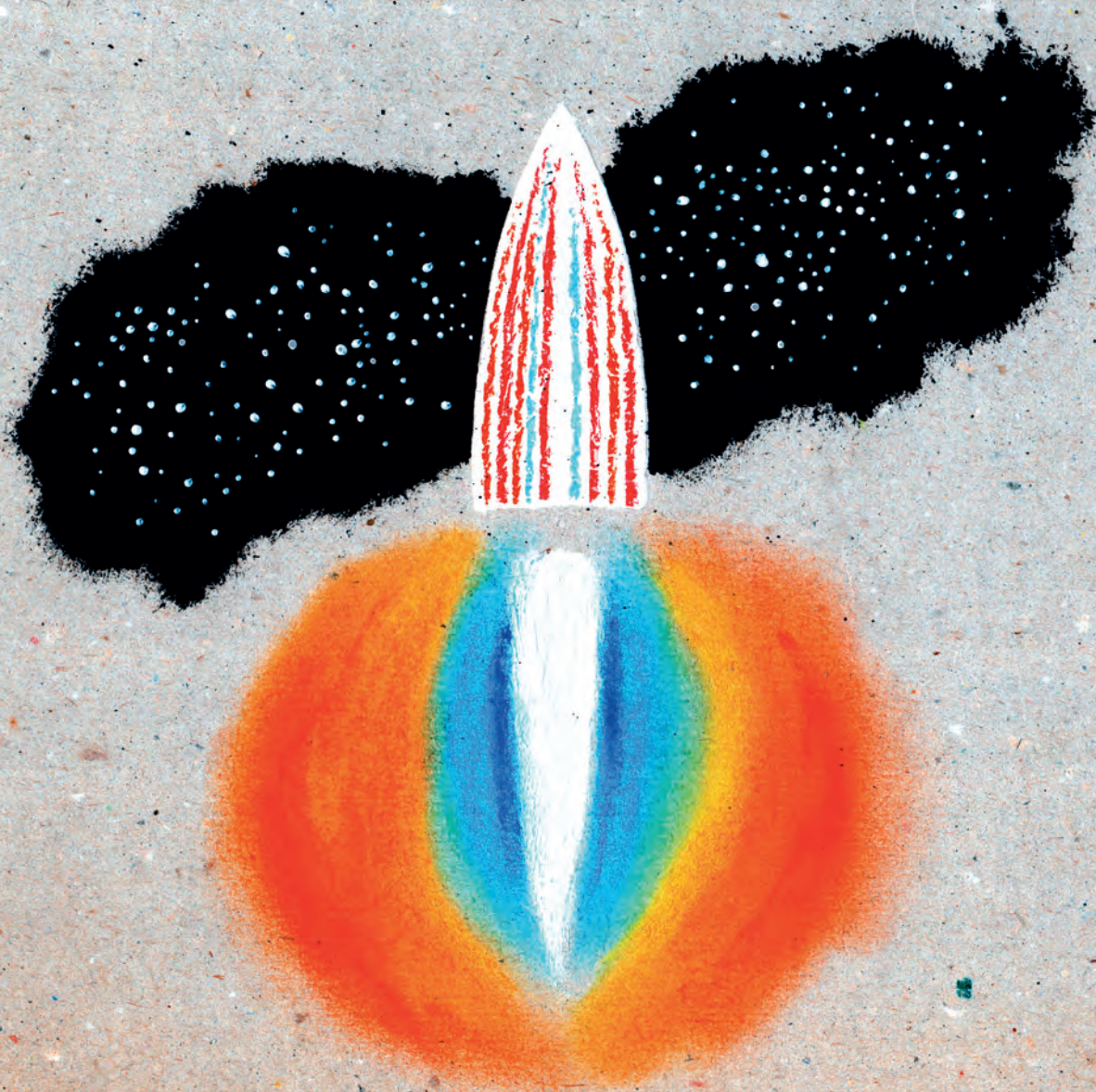
Fyzika elektronů s vysokými energiemi je atraktivním odvětvím současné vědy a přináší nám nejen další poznání struktury hmoty, ale často i nechtěné problémy, které je třeba neprodleně řešit. Existenci ubíhajících elektronů navrhl už vynálezce mlžné komory Charles Thomas Rees Wilson v roce 1925. Podrobnější teoretickou analýzu udělal australský fyzik s italskými kořeny Ronald Gordon Giovanelli v roce 1949. V roce 1992 navrhl sovětsko-ruský fyzik Alexandr Viktorovič Gurevič lavinový mechanismus průrazu blesku za bouřkové aktivity, který je odstartován relativistickými elektrony ze sekundárních spršek kosmického záření. V roce 2003 ukázal americký fyzik Joseph R. Dwyer, že ke vzniku takové laviny postačí jeden jediný elektron s energií kolem jednoho megaelektronvoltu. Výzkum ubíhajících elektronů se ale dostal do popředí zájmu fyziků až v souvislosti s častým vznikem jejich početné populace v komorách velkých tokamaků, pro něž je shluk ubíhajících elektronů nebezpečím číslo jedna, zejména při dopadu na stěnu komory.

Pozemské gama záblesky (TGR – Terrestrial Gamma Radiation) vznikají za ne zcela jasných okolností za bouřek. Fotony s velkou energií mohou při srážkách s obyčejnými atomy vytvářet i páry elektronů a pozitronů, tedy antihmotu. Zdroj: Simulace NASA.

← Nadoblačné výboje z horní vrstvy bouřkového oblaku do dolní ionosféry jsou velmi časté. Na fotografii je snímek modrého výtrysku přecházejícího v červeného skřítku (horní část). Fotografie byla pořízena na observatoři Gemini North na hoře Mauna Kea na Havaji v únoru 2021. Zdroj: Gemini, NOIRLab, NSF, AURA, A. Smith.

■ Petr Kulhánek, 5. 4. 2019, AB 13, 14/2019





## IV. KOSMONAUTIKA



**Sea Launch Equatorial Range** – původně mezinárodní a nyní ruský námořní kosmodrom kotvící v Tichém oceánu poblíž rovníku. Rakety startují z přebudované ropné plošiny Ocean Odyssey, řídicí středisko se nalézá na doprovodné lodi Sea Launch Commander. Následník italského kosmodromu San Marco Equatorial Range.

**San Marco Equatorial Range** – italský námořní kosmodrom vypouštějící menší rakety Scout. Vznikl v roce 1965, první start se uskutečnil v roce 1967, poslední v roce 1988.

Start rakety Dlouhý Pochod 11 z čínské plovoucí plošiny.  
Zdroj: NASA Spaceflight.



## Plovoucí kosmodromy

Čína se během posledních dvou desetiletí stala nepřehlédnutelnou mocností dobývající vesmír. Bylo by předmětem hlubokého rozboru a nekonečných diskuzí, zda se v budoucnosti stane i lidrem, proto se zaměříme na to, co dělá nyní. V nedávné době jsme zaznamenali její další úspěch na poli plovoucích kosmodromů.

Čína se při startech kosmických raket musí potýkat s jednou komplikací – se zeměpisnými predispozicemi. Většina jejího území není pro výstavbu kosmodromu vhodná. Velkou část zabírá hornatá Himálaj, hustě obydlené oblasti nepřipadají v úvahu z pochopitelných důvodů. I její nejjihnější část (kde by bylo beztak riskantní kosmodrom vybudovat) se nachází asi 2000 kilometrů daleko od rovníku, kde jsou podmínky ke startu z energetického hlediska nejvýhodnější. Díky rotaci Země zde každý bod dosahuje rychlosti téměř 0,5 km/s, tedy asi 6 % první kosmické rychlosti. Proto se kosmodromy staví pokud možno co nejbližší rovníku. Větší část rovníku však prochází oceánem. Čína tuto komplikaci přeměnila ve výhodu a zkonstruovala plovoucí kosmodrom, z něhož mohou rakety startovat takřka odkudkoli.

### Z vody do vesmíru

Myšlenka plovoucího kosmodromu rozhodně není nová a už vůbec ne původní. O letech do vesmíru snili lidé dávno před tím, než se uskutečnil první start. Ve fantastických románech jsme se mohli dočíst nejen o kosmodromech plovoucích, ale i podvodních. Teprve moderní doba ukázala, že to nejsou jen fantazie, dnes máme obojí. Srovnáme například start rakety v mém filmu Žena na Měsíci s (neuskutečněným) projektem z moře startující obří rakety Sea Dragon (na obrázku na protější straně). Ačkoli je děj filmu neskutečně naivní, k technickým konzultacím si přizvali samotného profesora Hermanna Julia Obertha, německého průkopníka raketových letů. Spolu s Ciolkovským a Goddardem patří k otcům kosmonautiky. Ten místo startovací rampy navrhl umístit raketu pod vodní hladinu. Na první pohled bláznivý nápad má i nesporné výhody. Předně je to stabilita před startem a v prvních fázích startu. Dále odpadá problém s pomalými deformacemi způsobenými vlastní tíhou. Tlak okolní vody také zjednodušuje konstrukci palivových nádrží. Mnohokrát testované starty balistických raket z ponorek potvrzují řešitelnost technologických problémů.

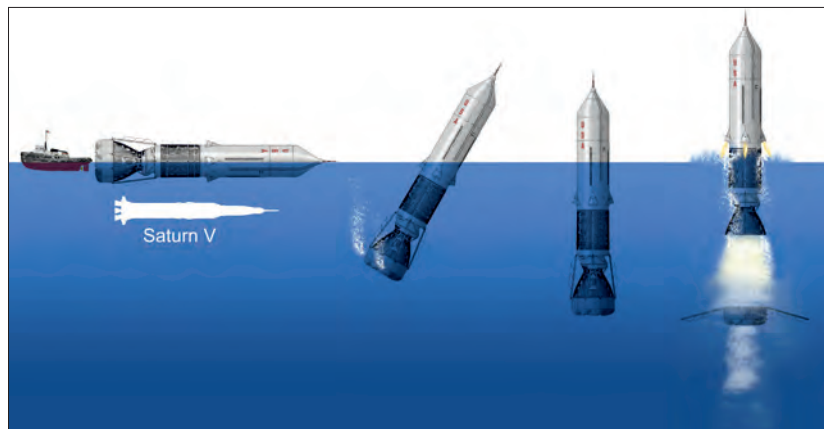
Start rakety z ponorky na oběžnou dráhu není jen vize. Z ruské mezikontinentální balistické rakety R-29R povstala v roce 1995 raketa Volna s ambicemi vynést na nízkou oběžnou dráhu až 120 kg užitečného zatížení. Nebýt ojedinělosti koncepce, nestály by její úspěchy za zmínku. Z pěti startů se zdařil pouze první, a ten mířil jen na suborbitální dráhu. Při druhém startu měl být vypuštěn prototyp sluneční plachetnice Cosmos 1 společnosti *Planetary Society*, bohužel skončil

havárií. U dalších startů někdy selhal software, jindy turbočerpadlo, což jsou dětské nemoci a jistě by se dal celý systém doladit, nicméně po roce 2005 byl projekt zrušen. Nebyl to jediný pokus tohoto typu. V roce 1998 vypustila ruská ponorka K-407 Novomoskovsk z Barentsova moře dvě německé komunikační družice Tubsat. Možnost putovat s kosmodromem po světovém oceánu zůstává tedy stále zajímavá. Proto se pojďme podívat na podobné, ale úspěšnější koncepce.

První mořský kosmodrom zkonstruovali již v roce 1966 Italové a bezproblémově fungoval až do roku 1988. Kosmodrom *San Marco Equatorial Range* postavili na pilotech ukotvených v hloubce dvaceti metrů v mezinárodních vodách nedaleko Keni. Byl tvořený dvěma plošinami vzdálenými několik set metrů. Hlavní plošina s dílnami a odpalovací rampou měla půdorys obdélníku o stranách 100×30 m, vedlejší s řídicím střediskem a ubytovnami vypadala jako rovnostranný trojúhelník o straně 30 m. Kosmodrom sloužil k vypouštění menších raket typu Scout.

## Za málo peněz hodně muziky

Jiný plovoucí kosmodrom pořídila poměrně levně ze staré ropné plošiny firma *Sea Launch* sdružující čtyři soukromé firmy – americký Boeing (40 %), ruskou Eněrgii (25 %), norskou Aker Solutions (20 %) a ukrajinskou Južnoje (15 %). Po ekonomických kotrmelcích je dnes vlastníkem ruská S7 Group. Starty do vesmíru by chtěla obnovit, ale není jasné, zda se to v současné, poněkud nestabilní situaci, podaří.



Neuskutečněný projekt z roku 1962 – raketa *Sea Dragon* schopná startovat na oběžnou dráhu přímo z moře.  
Zdroj: @AstroBiduals, Rb4827, CC BY 4.0.

**Karmánova hranice** – pomyslná hranice mezi zemskou atmosférou a kosmickým prostorem. Je definována jako výška, ve které rychlost potřebná k udržení hladiny letu pomocí vztlaku křídel dosahuje orbitální rychlosti. Hodnota Karmánovy hranice – 100 km – je definitorickým kompromisem mezi hodnotami kolísajícími podle aktuálního stavu ovzduší a parametrů letadla.

**Radar se syntetickou aperturou** – radar rychle se pohybující nad krajinou, který vysílá v rychlém sledu sérii rádiových impulzů a matematickou analýzou odražených paprsků získává obraz s vyšším rozlišením, než by poskytl statický radar. Postup je náročný na výpočetní techniku. Zpracovává informaci nejen o amplitudě, ale i o fázovém posunu odražených vln.



Raketa Scout na italském kosmodromu San Marco Equatorial Range. Zdroj: Wikipedia.

Start rakety společnosti S7 Group z plošiny Ocean Odyssey dne 30. března 2020. Zdroj: S7 Space.



Komplex se skládá ze dvou základních částí: z velitelské lodě *Sea Launch Commander* a ze startovní plošiny *Ocean Odyssey*. Velitelská loď má dva úkoly. Nejprve, ještě v přístavišti, poslouží jako montážní hala, ve které se kompletuje nosná raketa a náklad, později přejímá funkci řídicího střediska. Plošina *Ocean Odyssey* převezve připravenou raketu k rovníku, kde dojde ke startu rakety.

Plovoucí kosmodrom *Sea Launch Equatorial Range* je specializovaný na odpalování raket Zenit – 3SL s komerčním nákladem na palubě. Od prvního startu v roce 1999 do posledního startu v roce 2014 má na kontě 32 úspěšných startů a čtyři selhání, z nichž to nejhorší potkalo plošinu v lednu 2007. Výbuch nosné rakety přímo na plošině *Odyssey* zničil holandskou telekomunikační družici NSS-8. Příčina havárie není jednoznačně prokázána, předpokládá se však, že explozi způsobilo turbočerpadlo zablokovávané cizím tělesem. Škody na plošině se ukázaly víceméně jen jako povrchové, a tak k dalšímu startu došlo již za rok. V plánu je obnovení startů s jiným typem raket.

Další úspěch na poli dobývání kosmu z hladiny moře se odehrál dne 5. června 2019. K nebi vzlétla z plovoucí základny ve Žlutém moři čínská čtyřstupňová raketa *Dlouhý pochod 11*. Sama raketa se za pět let provozu stala osvědčeným prostředkem pro dopravu na oběžnou dráhu. Byla vyvinuta Čínskou akademií raketových technologií jako raketa, která má být vždy po ruce. To se podařilo především díky po-

honu – jedná se o raketu na tuhá paliva, se kterým nejsou problémy během skladování. Se svou délkou 20,8 m a průměrem 2 m patří spíše mezi ty menší rakety, nicméně na heliosynchronní dráhu ve výšce 700 km nad zemí dokáže dopravit náklad o hmotnosti až 350 kg.

Vlastní plošina má rozměry 110×80 m. Do startovní polohy dostává raketu 15,5 m vysoká konstrukce. Sama raketa je odpalována z uzavřeného sila, což s sebou nese mnoho rizik, od nezanedbatelné energie zvukových vln až po problematický odvod horkých spalin.

Proto se v takových případech raketa vystřeluje stlačenými plyny jako z děla a teprve v dostatečné výšce dochází k vlastnímu zážehu raketových motorů. Tento způsob, jakkoli povážlivě vyhlíží, se při testech osvědčil a přináší uspokojivé výsledky.

## Bilancování

Od doby, kdy se německá balistická střela V2 při pokusném letu dotkla hranic kosmického prostoru, vyrostly na Zemi desítky raketodromů. Většina z nich dokáže vypouštět rakety schopné dosáhnout oběžné dráhy. Z mnoha důvodů je klíčovým parametrem jejich umístění. Někdy je žádoucí využít co nejvíce rotace Země, pak jsou stavěny poblíž rovníku. Jindy je důležitý sklon dráhy, pak je upřednostněna jiná rovnoběžka. Významná je také orientace pobřeží. Většina startů využívá rotaci Země, proto je preferováno východní pobřeží, aby odhazované první stupně raket padaly do moře. Vojáci (a nejen oni) ovšem leckdy mají zájem na retrográdním oběhu. Oběh proti směru otáčení Země je pak téměř o 1 km/s rychlejší, což zvýší rozlišení radarů se syntetickou aperturou ve špionážních družicích. V tom případě je výhodné startovat z pobřeží západního.

Ne vždy se podaří pro požadované parametry oběžné dráhy najít kosmodrom s optimální polohou. Je možné, že na požadovaném místě ani není možné kosmodrom postavit. Zde je prostor právě pro plovoucí kosmodromy. Zatím mají konstrukci vyžadující ukotvení v mělkých vodách, nicméně na příkladech vypouštění raket z ponorek vidíme, že i tento nedostatek se dá odstranit. Otázka je, zda o to bude zájem. Dosavadní úspěchy nevyznívají příliš přesvědčivě. Za 22 let provozu italské plošiny San Marco Equatorial Range zde bylo vypuštěno pouhých devět raket nižší tonáže. Novější plošina Odyssey se svými 32 úspěšnými starty je na tom lépe, ale ve srovnání s klasickými kosmodromy se nedá mluvit o triumfu. Uvidíme, zda čínský příklad přinese zlom v dobývání vesmíru.

■ Rudolf a Dana Mentzlovi, aktualizace 2022, AB 36/2019



Úspěšný start rakety Dlouhý pochod 11 z plovoucí základny umístěné ve Žlutém moři. Na první fotografii je samotný start za pomoci stlačených plynů. Druhý a třetí snímek zachycují stav těsně před a těsně po zážehu raketových motorů. K zážehu motorů nedochází na plošině, ale až ve vzduchu, neboť by ji plameny mohly poškodit. Zdroj: China Central Television.



**Germinace** – obyčejné klíčení. Počátek vývoje rostlin, kdy po přijetí vody v semenech započnou štěpné procesy zásobních látek (tuků, bílkovin či polysacharidů) a ze semene vyrůstá klíček.

**Fytohormon** – rostlinný hormon. V porovnání s živočišnými hormony mají často méně specifické funkce, a tak výsledek zpravidla záleží na kooperaci několika fytohormonů.

**Fotosyntéza** – biochemický pochod, při kterém dochází k přeměně světelného záření na energii chemických vazeb. Při fotosyntéze se takto zpracovává oxid uhličitý a voda na kyslík a cukr.

Výhonky řeřichy klíčí v průhledném gelu na Mezinárodní vesmírné stanici. Zdroj: NASA, Smithsonian.



## Vesmírné zahradničení

Když si představujeme, co takový astronaut dělá na Mezinárodní vesmírné stanici, málokoho asi jako první napadne okopávání záhonků s rajčaty. Ale ač je to možná překvapivé, tak výzkum chování rostlin ve vesmíru je až nečekaně rozsáhlá a stará experimentální oblast. První rostliny putovaly do vesmíru už v roce 1960 na palubě Sputniku 4. A byli to také Rusové, kteří vyslali na palubě Saljutu 1 v roce 1973 první systém pro jejich pěstování jménem Oasis. Američané se samozřejmě nenechali zahanbit a první zástupce rostlinné říše poslali na oběžnou dráhu v roce 1967 v Biosatelitu 2. Dnes na Mezinárodní vesmírnou stanici pravidelně putují zásilky semen určených k experimentům. V roce 2014 dokonce poprvé astronauti ochutnali zeleninu vypěstovanou pouze v nulové gravitaci (pro zájemce: byl to římský salát). Rostliny v extrémních podmínkách pomáhají vědcům porozumět nejen tomu, jak rostliny mohou pomoci při dlouhodobém pobytu ve vesmíru, ale usnadňují navíc recyklaci vody nebo vzduchu. Rostliny ve vesmíru nám také pomáhají porozumět fyziologii rostlin přímo u nás, na domácí půdě.

### Příprava na život ve vesmíru

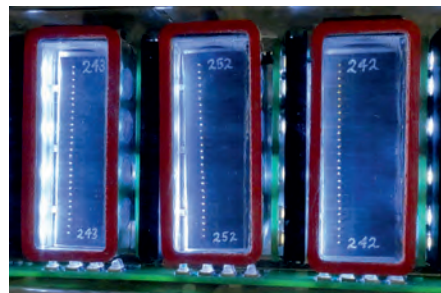
Rostliny jsou pro kosmický program extrémně zajímavé díky své schopnosti měnit oxid uhličitý na kyslík a vodu při fotosyntéze. Taková vlastnost se nám může náramně hodit, pokud chceme pobývat mimo planetu Zemi delší dobu a potřebujeme si vytvořit vlastní soběstačný biosystém. Poznatky získané studiem rostlin na oběžné dráze se ale zdaleka nepoužívají jenom při pokusech o dlouhodobý pobyt ve vesmíru. Naopak, mnoho dat, která byla získána, našlo uplatnění v základním výzkumu. Například se zjistilo, že charakteristický pohyb stonku při růstu (tzv. *cirkumnutace*) není vlastností rostlin jako takových, ale důsledek gravitace. Také byl, díky možnosti poslat rostliny na výlet do vesmíru, u některých semen rostlin objeven fototropizmus k červenému světlu. Tento jev byl dlouhá desetiletí maskován právě větším vlivem gravitace při semenění. Objev možná zní triviálně, ale pomáhá objasnit předtím neznámé části evoluce rostlin. V současnosti se stále častěji uvažuje o cestě lidské posádky na Mars, kde by naši potomci mohli vybudovat stálou základnu. Soběstačný biosystém je pro tyto účely nejen žádoucí, ale zdá se, že i nezbytný.

## Jak pěstovat rostliny ve vesmíru?

Především musíme souběžně pěstovat rostliny na Zemi. Ke každému experimentu v nulové gravitaci běží stejný experiment i „tady dole“. Například při experimentech s rostlinnou brukví řepákem (*Brassica rapa*) se v průhledném gelu do vesmíru přinesla semínka rostliny a po 28 dní se pozorovala germinace (klíčení) za umělého světla ve speciální komoře. Úplně stejná komora se použila i v kontrolním experimentu na Zemi. Astronaut musí jednou denně rostliny vyndat z komory a pořídit fotografie, které jsou zaslány výzkumníkům na Zemi. Po ukončení experimentů lze semena rostlin nebo i celé rostlinky chemicky fixovat a dopravit zpět na povrch, kde je možné provádět další standardní experimenty, na které na Mezinárodní vesmírné stanici není dostatek místa. Jde například o mikroskopické studie semen, k nimž je zapotřebí elektronový mikroskop, nebo třeba DNA či RNA analýzu. V některých experimentech lze rostliny pěstovat v aeroponických komorách, kde jsou rostliny pravidelně zavlažovány sprejem bohatým na důležité živiny. Tento způsob pěstování nevyžaduje téměř žádné živné médium, a lze tak pěstovat rostlinnou stravu po celý rok.

## Ke kořenům

Jak rostliny na Zemi vědí, kterým směrem je nahoru a kterým dolů? Směr dokážou detekovat několika způsoby. Například díky *fototropismu* (reakci na světlo). Pokud je část rostliny ve stínu, tvoří se v oné části fytohormon auxin, který způsobuje prodloužení buněk, a tak nutí rostlinu růst směrem za světlem. Naopak kořeny se snaží růst od světla. Tohle není žádná novinka, už Charles Darwin dělal pokusy s ohýbáním rostlin tím, že zakrýval část rostliny kusem látky. Druhým, a ještě silnějším pomocníkem při orientaci, je *gravitropismus* (reakce na gravitaci). Známých receptorů gravitace je několik. Aktinová



Komory pro růst rostlin na Mezinárodní vesmírné stanici. Zdroj: NASA, Chris Wolverton.

Letový inženýr Steve Swanson připravuje mikroskop pro pozorování klíčení huseničky rolního (*Arabidopsis Thaliana*) na Mezinárodní vesmírné stanici. Zdroj: NASA.



**Fototropizmus** – ohyb rostliny nebo její části za zdrojem nebo od zdroje světla. Pomocí fototropizmu jsou například rostliny schopné regulovat množství ozářených listů, a tím i míru fotosyntézy.

**Gravitropizmus** – ohyb rostliny nebo její části ve směru nebo proti směru gravitačního působení (dle toho se dále rozděluje na gravitropizmus pozitivní či negativní). U rostlin tuto funkci zajišťuje primárně fytohormon auxin.

**Aeroponie** – pěstování rostlin, při němž jsou živiny získávány především ze vzduchu. Obdobou je v domácnostech oblíbená hydroponie – získávání živin z živného roztoku.

**Exprese** – exprese genu, převod genetické informace z DNA do funkční podoby. To může znamenat pouhý přepis do RNA, která sama může mít v buňce funkci, či následný přepis RNA do proteinu. Gen, u něhož právě probíhá exprese, se označuje jako exprimující gen.

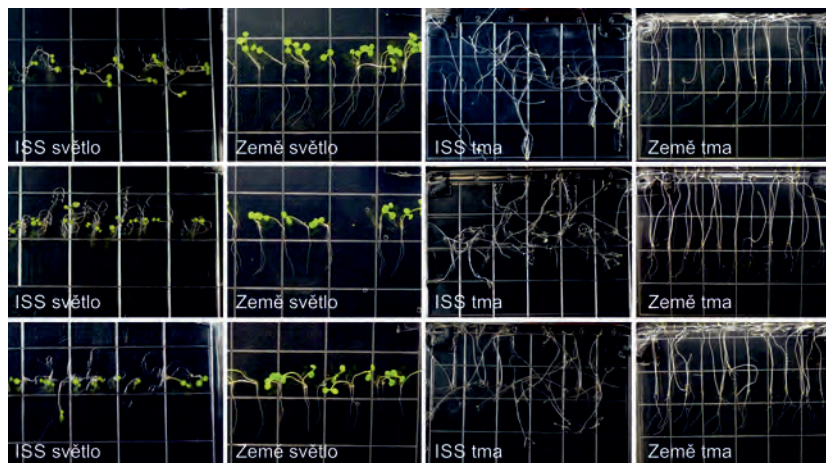
filamenta a vápníkové kanály mají na vnímání gravitace vliv, který je zvláště dobře pozorovatelný na jednobuněčných rostlinách. Amyloplasty si zase v rostlinných buňkách „sedají“ díky gravitaci a pomáhají tak expresi (převodu genetické informace) fytohormonu auxinu a rostlina roste směrem dolů. Druhým hormonem v tomto procesu je pak cytokinin, který podporuje dělení buněk v kořenu.

Fototropizmus lze jednoduše vyřešit osvětlováním rostliny bílým nebo modrým světlem uměle, ale gravitace se už nahrazuje hůře. Logicky tak vědce zajímalo, co se stane, pokud rostlinu vystavíme mikrogravitaci. Vytvořili tak genový reportér, vlastně fluorescenční barvu, kterou označovali auxin či cytokinin, a mohli poté pozorovat jejich rozložení v rostlinných pletivech. Ukázalo se, že auxin vykazuje podobné rozložení v pozemských i vesmírných rostlinách. Zato cytokinin měl rozložení jiné. Auxin ovlivňuje založení primárního kořene rostlin, a tak počátek rostlinného vývoje není téměř narušen ani při nedostatku gravitace. Rostlina se ve vesmíru reorientuje na fototropizmus a kořeny rostou podle gradientu světla. Pokud například světlo přivedeme z více směrů, je růst kořenů pozměněn, ale stále je rostlina schopná rozpoznat, že kořen má růst směrem od vrchní části. Nicméně samotný vzhled kořenů se pak velice změní.

Při bližším zkoumání ale vědci zjistili, že mnoho buněčných struktur je pozměněno na buněčné úrovni. Je to například xylém, buněčná stěna, tvar buněk a listů, dělení buněk nebo cytoskelet (trojrozměrná

opěrná síť vláken a tubulů). V posledních experimentech na Mezinárodní vesmírné stanici vědci našli díky transkriptomickým metodám stovky genů, které mají zvýšenou nebo sníženou expresi v závislosti na přítomnosti gravitace. Nabízí se pak otázka, zda bude mít prostředí obdobný efekt i na rostliny, které kořeny nemají. Další experimenty tak byly provedeny jak s jednobuněčnými rostlinami, tak s rostlinnými buněčnými kulturami. I tady lze pozorovat dramatické změny v genové expresi.

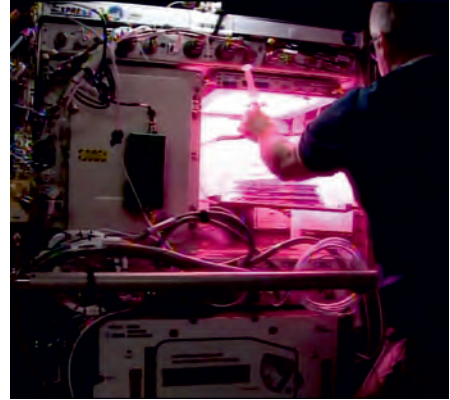
Růst kořenů huseníčku rolního. Porovnání variant: na světle, za tmy, na Mezinárodní vesmírné stanici, na zemském povrchu. Zdroj NASA.





Dalším krokem je zkusit rostliny adaptovat na život ve vesmíru. Evoluce je tady díky své pomalosti krátká, a tak si vědci na pomoc berou metody molekulární biologie. Při vyřazení některých genů se lze přiblížit pozemskému fenotypu a usnadnit rostlinám adaptaci na mikrogravitaci, která je jinak velmi energeticky náročná a narušuje velikost rostlin. Přizpůsobování rostlin životu ve vesmíru je dlouhodobý úkol, který může přinést mnohá další překvapení.

■ Lucie Kulhánková, 22. 6. 2018, AB 20/2018



Manipulace s kultivátorem rostlin na ISS. Zdroj: NASA.

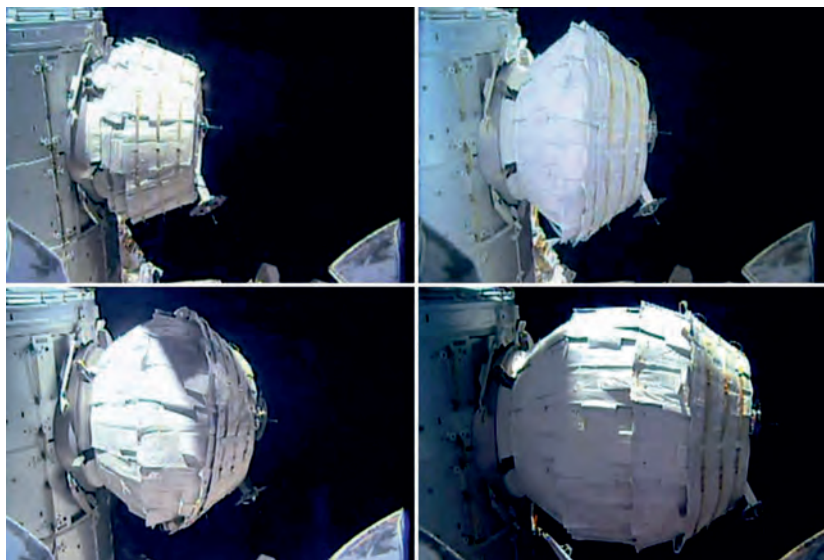




## Rozšiřování Mezinárodní vesmírné stanice

**ISS** – *International Space Station*, mezinárodní vesmírná stanice. Od roku 1993 je společným projektem americké NASA, Ruska, Kanady, evropských států sdružených v kosmické agentuře ESA a Japonska. První modul byl vynesena v roce 1998, první posádka na stanici byla v roce 2000. V roce 2008 byl k ISS připojen evropský výzkumný modul Columbus. V roce 2011 byl instalován víceúčelový americký modul Leonardo a v roce 2021 zatím poslední ruské moduly Nauka a Pričal. V roce 2011 letěl k ISS poslední raketoplán. Od té doby zajišťují stýk se stanicí lety ruských lodí Sojuz, v poslední době se přidaly lodě Crew Dragon soukromé společnosti SpaceX. Na ISS operuje stálá posádka.

Nafukování modulu BEAM dne 28. dubna 2016. Zdroj: NASA, The Planetary Society.



Mezinárodní vesmírná stanice (*International Space Station*, ISS), jeden z nejvýznamnějších vědeckých projektů současnosti, obíhá nad našimi hlavami už téměř čtvrt století. Její stavba započala vynesemím modulu Zarja raketou Proton-K dne 20. listopadu 1998. Již o dva týdny později, dne 4. prosince 1998, odstartoval raketoplán Endeavour na misi STS-88. V jeho nákladovém prostoru se nacházel modul Unity. Ke spojení těchto dvou modulů došlo o dva dny později, 6. prosince 1998. Domovem pro astronauty a kosmonauty je ISS nepřetržitě od 31. října 2000, kdy na její palubu vstoupili členové Expedice 1, astronaut William M. Shepherd a kosmonauti Sergej Krikalev a Jurij Gidzenko.

### Mezinárodní vesmírná stanice

K tomu, aby se Mezinárodní vesmírná stanice rozrostla do dnešních rozměrů, bylo potřeba více než 40 vesmírných letů, 36 z těchto letů vykonaly raketoplány, dva lety vykonaly rakety Proton-K a stejný počet i rakety Sojuz-U. Později se ještě zapojily zásobovací mise lodí

Dragon od SpaceX: modul BEAM (CRS-8), IDA-2 (Mezinárodní dokovací adaptér 2, CRS-9) a IDA-3 (Mezinárodní dokovací adaptér 3, zásobovací mise CRS-18).

K velmi zajímavému rozšíření ISS došlo 28. května 2016, kdy byl nafouknut experimentální modul BEAM (*Bigelow Expandable Activity Module*) společnosti Bigelow Aerospace, který byl k ISS dopraven lodí Dragon dne 8. dubna 2016 v rámci zásobovací mise CRS-8. Samotný modul BEAM má po nafouknutí vnitřní objem 16 metrů krychlových při hmotnosti 1,4 tuny. V nejširším bodě je jeho průměr 3,2 metru a celková délka

je 4 metry. Tělo modulu je složeno ze dvou kovových přepážek a hliníkové konstrukce. Jeho stěny jsou vícevrstvé a jsou tvořeny: vzduchovou bariérou, vrstvami chránícími modul při zásahu mikrometeority, vícevrstvou izolací, která má snížit tepelné ztráty vzniklé vyzařováním a BETA obalem (BETA je látka složená z nehořlavých křemičitých vláken).

Cílem toho experimentu bylo ověřit technologii konceptu nafukovacího modulu, dále prověřit schopnosti tepelné, strukturální a mechanické odolnosti, funkci radiační ochrany a bezpečnost provozu nafukovací konstrukce na ISS. Jelikož se modul BEAM osvědčil, byla původně plánovaná dvouletá mise v červenci 2019 oficiálně prodloužena až do roku 2028.

## Nauka

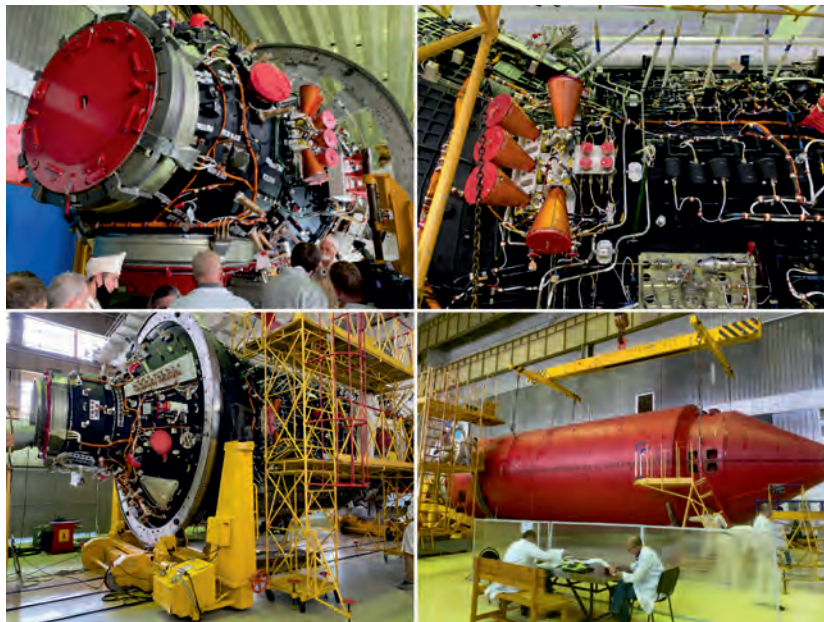
Víceúčelový ruský vědecký modul Nauka (česky Věda) je založen na funkčním nákladovém modulu, který byl jednou ze dvou hlavních částí sovětské zásobovací lodi TKS (transportní zásobovací loď). Druhou hlavní částí byla hermetizovaná část pro osádku – pozůstatek neúspěšného lunárního programu Sovětského svazu; šlo o sovětský ekvivalent velitelského modulu z amerického programu Apollo.

Zásobovací loď TKS byla vyvinuta konstrukční kanceláří OKB-52 (dnes NPO Mašinostrojenija) pod vedením Vladimira Nikolajeviče Čelomeje. Tato loď sloužila k pilotovaným i automatizovaným letům k sovětským vojenským stanicím projektu Almaz. Ze struktury nákladového modulu ideově vycházely moduly stanice Mir (Kvant-1, Kvant-2, Kristal, Spektr a Priroda) a také modul ISS Zarja a modul Nauka. Zmíněná stanice Mir pracovala v letech 1986 až 2001, kdy byla řízeně navedena do atmosféry a zbytky dopadly do Tichého oceánu.



Členové Expedice 1. Postupně zleva doprava: Sergej Konstantinovič Krikalev (Roskosmos), William (Bill) Shepherd (NASA) a Jurij Pavlovič Gidzenko (Roskosmos).  
Zdroj: NASA, Roskosmos.

**NASA** – National Aeronautics and Space Administration, americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, byl založen prezidentem Eisenhowerem 29. července 1958. Jde o instituci zodpovědnou za kosmický program USA a dlouhodobý civilní i vojenský výzkum vesmíru. K nejznámějším projektům patří mise Apollo, která v roce 1969 vyvrcholila přistáním člověka na Měsíci, mise Pioneer, Voyager, Mars Global Surveyor a dlouhá řada dalších.



Modul Nauka ve Státním kosmickém vědeckovýrobním středisku M. V. Chruničeva. V levém horním rohu je záběr na dokovací port, který bude směřovat k Zemi (nadír), v pravém horním rohu je detailnější záběr na trysky modulu, které se budou starat o jeho správnou orientaci. Levý dolní obrázek zachycuje dokovací port, kterým bude Nauka připojena k modulu Zvezda a v pravém dolním rohu je modul Nauka již uzavřen v ochranném přepravním obalu. Zdroj: Katja Pavlušenko, Roskosmos.

**Roskosmos** – ruská kosmická agentura, dříve Ruská letecká a vesmírná agentura, je vládní agentura zodpovědná za ruský vesmírný program a letecký výzkum. Ruská kosmická agentura byla založena v Sovětském svazu v druhé polovině padesátých let. Vyvinula první balistickou raketu, umělou družici Země, vyslala prvního kosmonauta na oběžnou dráhu, provedla první průzkum Měsíce, Venuše a Marsu a provozovala stanici Mir.

Modul Nauka byl původně vyvíjen jakožto náhrada za modul Zarja pro případ, že by se vypuštění modulu nezdařilo. Po úspěšném spojení modulů Zarja a Unity dne 4. prosince 1998 bylo nakonec rozhodnuto využít i tento záložní modul a rozšířit o něj ruskou část Mezinárodní vesmírné stanice. Roku 2004 bylo rozhodnuto, že bude fungovat jako laboratorní modul, který umožní provádět vědecké experimenty v ruské části stanice. Start byl stanoven na rok 2007.

Ke startu modulu Nauka, naplánovanému na rok 2007, ale nedošlo. Důvodem byly problémy s financováním a stále nekončící úpravy modulu. Docházelo k neustálému posouvání termínu startu.

Jedním z nejvýznamnějších problémů byla kontaminace palivového vedení i samotných nádrží kovovými hoblinami na podzim 2013, což si vyžádalo instalaci zcela nového pohonného systému a další odklad startu. Modul Nauka nakonec opustil brány Státního kosmického vědeckovýrobního střediska M. V. Chruničeva až 10. srpna 2020 a vydal se na 2 500 km dlouhou cestu po železnici do kosmodromu Bajkonur, kam dorazil o devět dní později. Zde došlo k finální kompletaci modulu, byly připevněny solární panely, panely tepelné kontroly, tepelná izolace pro práci ve vakuu, Evropské robotické rameno a ochrana proti mikrometeoritům. Také byly provedeny závěrečné testy pro ověření správné funkce všech systémů.

Modul Nauka vynesla raketa Proton-M dne 21. července 2021. Start proběhl bez problémů a po dvou desítkách let vývoje byl 29. července 2021 modul Nauka konečně připojen k modulu Zarja Mezinárodní vesmírné stanice, kde nahradil modul Pirs, který byl před přiletem Nauky od stanice oddělen a následně shořel v atmosféře. Při startu byla hmotnost modulu Nauka 20 tun. Modul má délku 13,1 metru a šířku (v nejširším bodě, bez solárních panelů a radiátorů) 4,2 metru.



S rozvinutými solárními panely má šířku 30 metrů. Tento laboratorní modul nabízí 70 krychlových metrů prostoru, z čehož je čistě pro vědecké experimenty určeno 6 metrů krychlových.

## Pričal

Uzlový modul Pričal (česky molo) je ruský modul, který odstartoval 24. listopadu 2021 z kosmodromu Bajkonur na raketě Sojuz-2.1b. K Mezinárodní vesmírné stanici se připojil o dva dny později. Modul Pričal nemá žádnou pohonnou jednotku, proto byl připojen k nákladní lodi Progress (tato kombinace se nazývá Progress M-UM), která ho dopravila až k Mezinárodní vesmírné stanici. Následně došlo k jeho připojení ke spodní straně modulu Nauka.

Modul Pričal je vybaven šesti dokovacími porty, jedním aktivním a pěti pasivními. Aktivním portem je připojen k modulu Nauka, zbylé porty slouží pro připojení lodí Sojuz a Progress, popřípadě dalších modulů ruského segmentu ISS. Hmotnost modulu Pričal je 4 tuny a nabízí 14 kubických metrů prostoru.

## Modul Bishop Airlock

Bishop Airlock Module je komerční přechodová komora od společnosti NanoRacks, určená k vypouštění malých satelitů typu CubeSat z Mezinárodní vesmírné stanice. K ISS byla dopravena v prosinci 2020 společností Space-X v rámci zásobovací mise CRS-21. Modul byl připojen ke stanici 19. prosince 2020. Modul Bishop byl připojen na levou stranu modulu Tranquility. K tomuto modulu je také připojen například pozorovací modul Cupola. Do instalace modulu Bishop bylo možné CubeSaty vypouštět z ISS pouze z japonského výzkumného modulu Kibō. Japonský modul ale umožňuje jen omezený počet cyklů, během nichž lze přemísťovat vědecké experimenty nebo CubeSaty do vesmírného prostoru. Modul Bishop je schopen takovýchto cyklů uskutečnit až 10 za rok.



*Spojovací modul Pričal připevněný k modulu Nauka. Snímek byl pořízen 14. února 2022 při přeletu nad Egyptem. Zdroj: ESA, NASA, Matthias Maurer.*

*Modul Bishop (malý oblé segment nalevo) připojený k modulu Tranquility (válcový modul uprostřed snímku). Zdroj: NASA, NanoRacks.*





**Nanosatellity** – satelity s hmotností kolem 1 kg a rozměry přibližně 10 cm. Jsou často vynášeny do vesmíru ve větším množství, jako tomu je například při některých startech nosných raket Vega, Atlas V nebo Falcon 9. Do jejich vyřazení roku 2018 byly k těmto misím využívány i rakety Delta II. Nejznámější projekt týkající se nanosatelitů je CubeSat, kde mají nanosatellity tvar krychliček o hraně 10 cm.

**CubeSaty** – třída nanosatelitů, která využívá standardizovaný tvar a rozměry. Rozměr CubeSatů se udává v jednotkách U (z anglického unit), kde 1U představuje krychli o délce hrany 10 cm a s hmotností do 1,33 kilogramu. Nejčastější rozměry CubeSatů jsou 1U, 1,5U, 2U, 3U, 6U a 12U.

Dohoda o vývoji a umístění soukromé přechodové komory určené k vypouštění CubeSatů na ISS byla podepsána v květnu roku 2016 mezi NASA a společností Nanoracks. Modul je vyvíjen ve spolupráci s dalšími společnostmi Boeing a Thales Alenia Space.

## Axiom

Axiom Space, Inc., neboli zkráceně Axiom, je soukromá společnost sídlící v texaském Houstonu. Zabývá se vesmírnými lety a kosmickými technologiemi. V roce 2016 byla založena Michaellem Suffredinim a Kamem Ghaffarianem. Michael Suffredini působil mezi roky 2005 až 2015 jako programový manažer pro projekt Mezinárodní vesmírné stanice. Mezi klíčové členy této firmy patří i bývalý ředitel NASA Charles Bolden nebo bývalí astronauti NASA, Michael Lopez-Alegria a Brent W. Jett Jr. Oba mají na svém kontě čtyři lety do vesmíru.

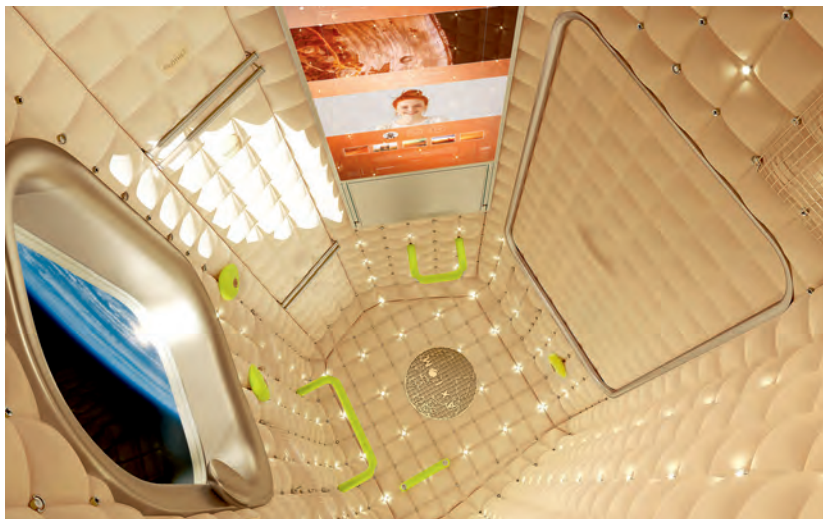
Dne 27. ledna 2020 získal Axiom 140 miliónů dolarů od NASA na vývoj a výrobu alespoň jednoho obyvatelného modulu pro Mezinárodní vesmírnou stanici. NASA doufá, že moduly společnosti Axiom pomohou k rozvoji ekonomiky ve vesmírném prostoru.

Při vývoji modulů spolupracuje Axiom s firmami Boeing, Maxar Technologies, Intuitive Machines a Thales Alenia Space. Výhledově má společnost Axiom v plánu připojit k Mezinárodní vesmírné stanici

celkem tři hermetizované moduly, které vytvoří samostatný segment: uzlový modul, obyvatelný modul pro posádku a modul pro výzkum a technologie. Moduly společnosti Axiom budou připojeny k modulu Harmony, a to na místo, kde se dnes nachází přechodový tunel PMA-2 s adaptérem IDA-1, který bude muset být přemístěn do jiné části stanice.

Tyto moduly vytvoří základ budoucí soukromé vesmírné stanice. Po ukončení programu ISS dojde k jejich odpojení a následnému doplnění dalšími moduly. Moduly společnosti Axiom budou sloužit

Vnitřní část modulu Axiom pro posádku. Autorem návrhu je architekt Phillipe Starck. Zdroj: Axiom, Phillipe Starck.



i jako ubytování pro soukromé vesmírné turisty, proto se věnuje zvýšená pozornost i designu interiéru, který bude zhotoven dle návrhu francouzského architekta Phillipe Starcka.

Dále je plánován vyhlídkový modul OOW (*Earth Observation Window*), z něhož budou prováděna pozorování Země. Start prvního modulu se očekává v roce 2024, k dokončení by mělo dojít ke konci dvacátých let. Na Mezinárodní vesmírné stanici se bude trvale nacházet alespoň jeden profesionální astronaut společnosti Axiom, který bude dohlížet na vědecké experimenty a na správné fungování celého segmentu složeného ze tří modulů.

I když se nyní Mezinárodní vesmírná stanice nachází již ve třetí dekádě své existence, stále jsou plánovány další moduly, které budou velkým přínosem pro vědecké programy a objevy na oběžné dráze okolo naší planety. Nejnovější moduly dokonce přežijí i samotnou ISS, neboť se stanou součástí plánovaných budoucích vesmírných stanic provozovaných soukromými nebo státními subjekty. Doufejme, že smělé plány nenaruší v současnosti se zhoršující mezinárodní politická situace.

■ Vilém Boušek, aktualizováno 2022, AB 38/2020

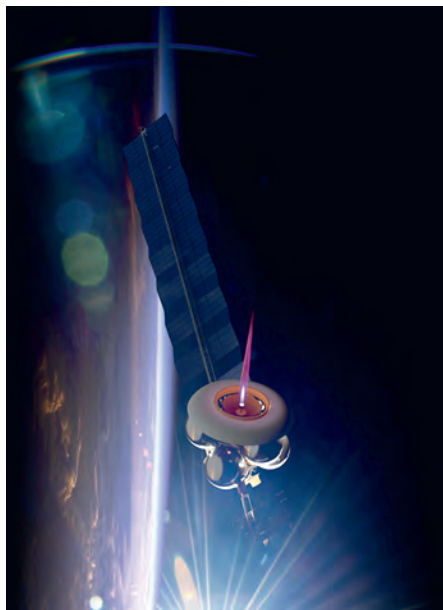


Mezinárodní vesmírná stanice. Zdroj: NASA.

**Vodní plazma** – plazma vytvořené vodíkem a kyslíkem. Je využíváno v raketových motorech za teplot, při kterých již voda dávno nemůže existovat, protože je rozložena na základní prvky částečně zbavené elektronů a volné elektrony.

**Specifický impuls** – poměr tahu raketového motoru ( $I$ ) k množství spotřebovaného paliva za jednotku času ( $kg/s$ ). Tato veličina vyjadřuje účinnost raketových a proudových motorů. Raketové motory mají menší specifický impuls než motory proudové, protože se do pracovní látky započítává i hmotnost kyslíčovaadla, které vozí s sebou.

Umělecká vize vesmírného tahače Ardoride (pro střední náklady) společnosti Momentus, který je poháněn vodním plazmatem. Zdroj: Momentus.



## Rakety na páru

Použít vodu jako náplň do raketového pohonu se zdá stejně dobrý nápad jako pokusit se dýchat oxid uhličitý. Voda je kapalina bez oxidačních schopností a bez energie. Přesto po ní společnost *Startup Momentus Space* ze Silicon Valley sáhla a měla s ní úspěch. Dokázala se totiž přenést přes pověru, že pro létání kosmickým prostorem je třeba s sebou brát palivo nadupané energií. Té je ve vesmíru dost. To, co tam není, je pevný bod, od kterého by se mohla raketa odrazit, proto s sebou musí brát nějaké médium, kterého se za potlesku zákona akce a reakce zbaví.

### Může raketa létat na vodu?

Jestliže v pohonném médiu není energie, musíme ji dodat zvenčí. Asi jako když děti vystřelují poloprázdné PET láhve. Dvě třetiny objemu natlakuji hustilkou, stlačený vzduch kapalinu vytlačí a zpětný ráz vyneše improvizovanou raketu do výšky několika desítek metrů. Důmyslnější rakety nepoužívají jako hnací plyn vzduch, nýbrž páru. V roce 2018 se Mike Hughes, v touze dokázat plochost Země, nechal vynést do více než půlkilometrové výšky raketou vlastní konstrukce. Její motor využíval zmíněného principu. Jím vyrobená raketa na páru mu nakonec byla v roce 2020 osudná. Paradoxně byl start rakety, při němž Hughes zahynul, filmován pro televizní pořad *Domácí astronauti*.

Nevýhodou takových raket je nutnost tlustostěnné nádrže schopné odolávat tlakům páry, která se chce uvolnit z vody zahřáté na zhruba 200 °C. Zato odpadají všechna další důmyslná zařízení nezbytná u klasických raket. Voda je vytlačována do výtokové trubice, kde se začne okamžitě vypařovat a tryskat ven. Protože se trubice rozšiřuje, tlak klesá a přehřátá voda se vypařuje stále překotněji. Výsledkem je intenzivní proud těžkých par schopných udělit raketě mocný impuls. Přesto lze, v porovnání s chemickými palivy, považovat tento způsob dopravy na orbitu za neúčinný a vlastně nereálný.

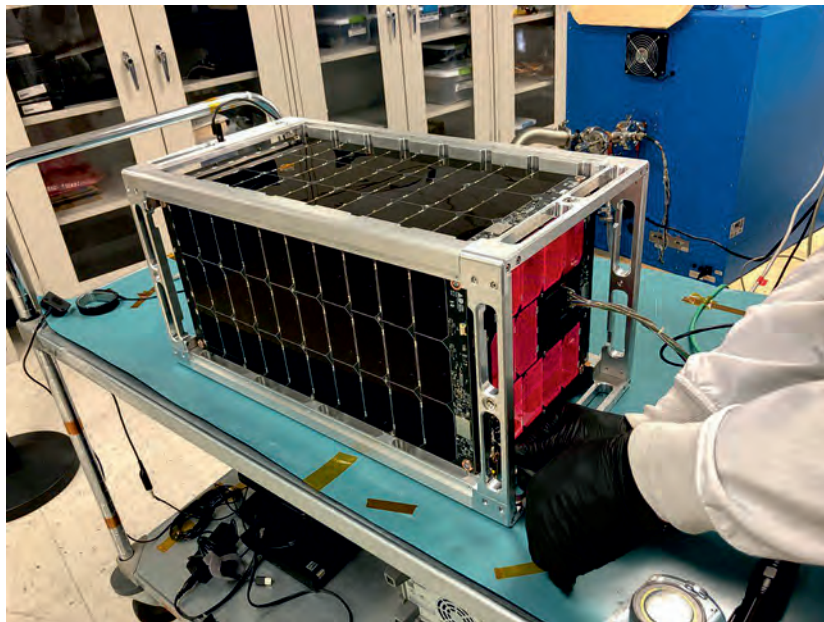
### Století páry opět na scéně

Jinak je tomu v kosmickém prostoru. Zde je třeba zohledňovat i další faktory. Pohon malých korekčních motorků chemickým palivem naráží na konstrukční problémy. Miniaturní čerpadla, spalovací komora, potíže s uskládáváním oxidačního činidla a mnohé další komplikace se

obchází motorky na stlačený plyn. Jednoduchá konstrukce, energie stlačeného plynu však není velká, a životnost motorů je tím omezená. Tam kde to vadí, sahají konstruktéři po jen o trochu složitějším řešení. V nádrži není plyn, ale voda, která je zahřívána nad bod varu. Není samozřejmě nutné zahřívát všechnu vodu v rezervoáru a komplikovat si život nároky na pevnost nádrže. Stačí ji zahřívát až těsně před tryskou. K tomu se dobře hodí i obyčejná topná spirála napájená například ze slunečních baterií. Již ze samotného principu vysvítá další výhoda – takový motor nemůže explodovat. Energie, která je v jednom okamžiku přítomna v systému, by na něco takového nestačila.

Nenáročnost technologie a malé výkony posunují parní motorky do role korekčních zařízení nebo pohonů velmi malých satelitů, jako jsou třeba stále žádanější CubeSaty. Mise OCSD (*Operations and Data Transmission Optical Communications and Sensor Demonstration*) úspěšně využila tohoto principu pro oddálení dvou CubeSatů v roce 2017. Poslání mise je přitom někde jinde. Mimo jiné pootevřívá vrátka pro dlouho zamýšlené programy založené na kolektivním chování mikrosatelitů. Spolehlivý autonomní pohon je samozřejmě podmínkou, a ten byl při misi úspěšně otestován.

Nejdále ve vodních raketových pohonech postoupila společnost Momentus (zmíněná v úvodu) s kosmickým transportérem. Verze pro tahání malých družic a objektů do 200 kg se jmenuje *Vigoride* (první start je naplánován na rok 2022), verze pro manipulaci s tunovým nákladem *Argoride* a verze budoucnosti pro náklady do deseti tun *Fervoride*. Budoucím zákazníkům tyto tahače umožní přesun jejich družic na libovolnou orbitu a stažení zpět do atmosféry. Za tímto účelem si Momentus nechal společností AstroDigital zkonstruovat družici El Camino Real, která byla 5. července 2019 vynesena ruskou raketou



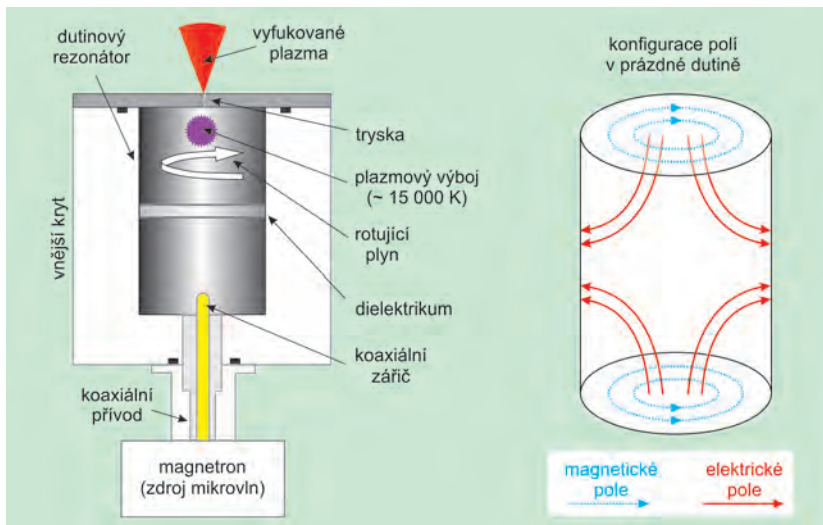
Sonda El Camino Real se skládá ze šestnácti jednotek CubeSatů. Ve vesmíru v roce 2019 poprvé testovala motor na vodní plazma. Zdroj: Momentus.

**Mikrovlny** – část spektra s vlnovou délkou od 0,4 mm do 15 cm (frekvencí od 2 GHz do 750 GHz). Hranice mezi infračervenou a mikrovlnnou oblastí, stejně tak jako hranice mezi mikrovlnnou a rádiovou oblastí, není přesně definována a různé obory používají různé hodnoty. Mikrovlnným vlnovým délkám odpovídá velikost hmyzu. S mikrovlnami se v praxi setkáme při televizním vysílání, u polohovacího systému GPS nebo při ohřevu potravin v mikrovlnné troubě (vlnová délka 12,24 cm). Ve vesmíru září v mikrovlnné oblasti reliktní záření z období konce velkého třesku (maximum má na vlnové délce 1 mm), plyn a prach v galaxiích, rodící se hvězdy a nejchladnější zákoutí hlubin vesmíru.



**Mikrovlnná dutina** – rezonátor skládající se z uzavřené kovové konstrukce, která vymezuje prostor pro elektromagnetické pole. Rezonanční vlnové délky s uzly na stěně dutiny vytvářejí stojaté vlnění. Dutina může sloužit jako pásmový filtr, zesobník mikrovln či jako prostředí ovlivňující nabitě částice. V urychlovačích slouží takové rezonanční dutiny k urychlení nabitých částic.

Rezonanční dutina a mikrovlnný přenos energie umožňují ohřev média v ose komory. Důmyslně vedený vír přitékající vodní páry dostatečně izoluje její stěny, takže je žár nepoškodí. Zdroj: Golden.



Sojuz-2-1b na oběžnou dráhu, kde po tři měsíce testovala manévrování pomocí motoru na vodní plazma. Vodní plazma je, striktně chápáno, povážlivé slovní spojení, nicméně je to dobré obchodní označení intuitivně vysvětlující, oč asi jde.

## Když už voda není vodou

Na rozdíl od běžně využívaných parních raket je voda v motorech společnosti Momentus ohřívána mikrovlnami. Použitá frekvence 10 GHz (což je asi čtyřikrát více než v kuchyňských mikrovlnných troubách) dokáže rozehrát vodní páru na teploty, při kterých se voda nejen rozkládá na vodík a kyslík, ale ty dokonce ztrácí své elektrony. Proto (nebo přesto) je řeč o vodním plazmatu, ačkoli voda jako chemická látka tu již dávno neexistuje. Mikrovlnný ohřev je výhodný z mnoha důvodů, nejdůležitější je asi minimalizace nároků na materiály. Nejen, že by tak vysoké teploty nevydržely případné topné spirály či elektrody, ale vypařily by se i stěny rezonanční komory. Díky vlnové povaze přenosu energie lze však plazma ohřívat pouze v ose komory. Zde se volné elektrony rozkmitají tak, že mají teplotu 15 až 20 tisíc stupňů Celsia, což vede k ohřevu plazmatu na několik tisíc stupňů Celsia. Směrem od osy komory teplota rychle klesá, takže se její stěny v žáru nerozpustí. Tento princip nazývají MET (*Microwave ElectroThermal*).

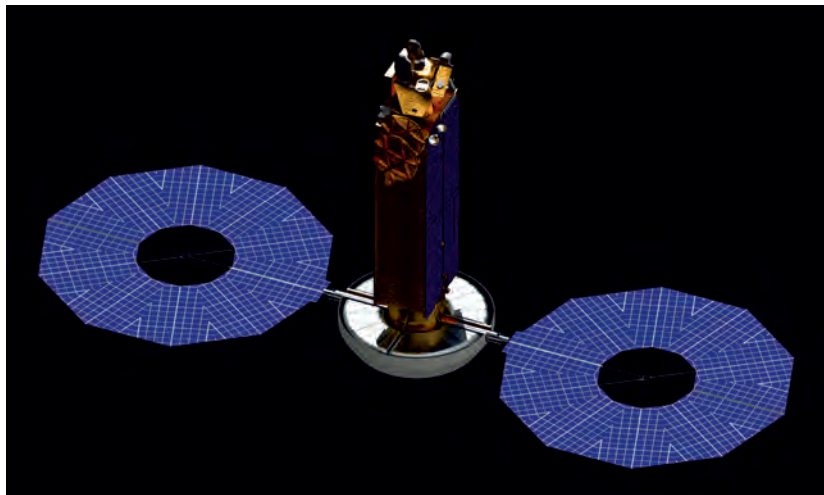
Zkoušky v kosmickém prostoru zatím dopadají na výbornou. V rámci pokusů vědci nechali vodu v systému zamrznout a po rozmrazení motor opět naběhl v normálním režimu. Ani ostatní testy mezních situací neukázaly výrazné nedostatky, natož principiální vady. Společnost se nyní věnuje vyhodnocování dat a porovnáváním s hodnotami, které nashromáždili při pozemních testech.

## Podivný název pro sondu

El Camino Real je téměř 1 000 km dlouhá silnice spojující San Francisco se San Diegem. Založena byla

již koncem sedmnáctého století španělskými misionáři. Název se běžně překládá jako Královská cesta, což by mohlo evokovat duchovní spřízněnost s čínskými názvy velkých projektů. Právě odtud jsme zvyklí na slovní spojení jako třeba *Dlouhý pochod* (čínská nosná raketa). Nemusíme však až do Číny, španělština nabízí i jiný výklad. El Camino Real může také znamenat *Skutečná*, nebo zde ještě lépe *Možná cesta*. Touto slovní hříčkou autoři patrně chtěli nejen vyjádřit vznešenost myšlenky, ale zároveň naznačili, kudy by se mohlo či snad

dokonce mělo ubírat dobývání Sluneční soustavy. Předpoklady proto tu jistě jsou. Vody je ve Sluneční soustavě dost, energie také. Půjdou-li po královské cestě novodobí conquistadoři i tentokrát, uvidíme jistě v nejbližších letech. První krok by měl být učiněn v druhé polovině roku 2022 (tedy v roce vydání této knihy), kdy je plánován start nejmenší verze tahače nazvané Vigoride.



*Fervoride – finální verze tahače pro náklady až do deseti tun patří zatím jen ke smělým plánům společnosti Momentus. Realizace přichází v úvahu až po otestování menších verzí Vigoride a Ardoride. Všechny tři tahače mají využívat reaktivní sílu unikajícího vodního plazmatu a měly by být naprostou revolucí v manipulaci s objekty na oběžné dráze. Zdroj: Momentus*

■ Rudolf Mentzl, aktualizace 2022, AB 42/2019

**Metan** – nejjednodušší uhlovodík s chemickým vzorcem  $\text{CH}_4$ . Patří mezi tzv. alkany. Při pokojové teplotě je to netoxický plyn bez barvy a zápachu, lehčí než vzduch. Bod samozážehu je  $595^\circ\text{C}$ . Molekula metanu má symetrii pravidelného čtyřstěnu, v těžišti je uhlík a ve vrcholech vodík. Hlavním zdrojem metanu je přírodní surovina, zemní plyn. Metanové molekuly jsou běžné i ve vesmíru, nacházejí se nejen v mlhovinách, ale i v atmosférách mnoha planet a některých velkých měsíců.

V letech 1942 až 1945 bylo Němci odpáleno přes 3 000 raket V2. Tato raketa byla prvním krokem pozdějších vesmírných závodů Spojených států a Sovětského svazu o dobytí Měsíce. Zdroj: Německý spolkový archiv.



## Dostane nás metan na Mars?

První lidmi vyrobený stroj, jenž překonal tzv. Karmánovu hranici mezi zemskou atmosférou a kosmickým prostorem (nachází se ve výšce 100 km) byla roku 1944 první balistická raketa V2 sestavená týmem Wernera von Brauna. Jako palivo byla používána směs etanolu a vody (74 % etanol, 26 % voda), jako okysličovadlo kapalný kyslík. Dolet rakety byl přibližně 340 km a jejím hlavním úkolem bylo bombardování jižní Anglie za druhé světové války. Během 50. a 60. let, kdy probíhaly závody o „dobytní vesmíru“ mezi Spojenými státy americkými a Sovětským svazem se již jako palivo používal kapalný vodík nebo kerosin, v obou případech s kapalným kyslíkem jako okysličovadlem. Tato paliva jsou používána dodnes, razantní změnu by mohlo přinést až zavedení nového paliva, kapalného metanu.

### Ciolkovského rovnice

Říká se, že každý vzoreček v textu odradí polovinu čtenářů. V tomto případě bychom ale měli udělat výjimku, protože Ciolkovského rovnice popisující pohyb objektu s proměnnou hmotností je alfou i omegou snah dostat družici na oběžnou dráhu nebo změnit rychlost sondy raketovými motory. Zanedbáme-li vliv atmosféry, je změna rychlosti rakety  $\Delta V$  přímo úměrná jednak rychlosti výtokových plynů  $U$  a jednak logaritmu poměru počáteční a koncové hmotnosti  $M_0/M$ . Matematicky lze tento vztah zapsat jednoduchou formulkou

$$\Delta V = U \ln (M_0/M) - gt,$$

kterou odvodil ruský vědec Konstantin Eduardovič Ciolkovskij koncem 19. století. Poslední člen popisuje vliv tíhového zrychlení  $g$  v závislosti na čase  $t$  a uplatňuje se jen při startu rakety v zemské tíži. Z hlediska získání co možná nejvyšší rychlosti je důležitá rychlost výtokových plynů (ta je daná specifickým impulzem motorů) a také koncová hmotnost  $M$ , proto se mimo jiné stavějí několikastupňové rakety (dalším důvodem je optimalizace motorů pro práci v atmosféře a ve vakuu). Co si pod ní ale představit? Pod koncovou hmotnost spadá hmotnost rakety bez paliva neboli hmotnost nákladu, zásob, astronautů, raketového motoru, baterií, zdroje elektrické energie a samozřejmě nádrží, ve kterých bylo palivo.

## Metan jako palivo

Palivo je nejdůležitější částí každého letu do vesmíru, proto nyní porovnejme vlastnosti jednotlivých paliv a metanu. Uvedme na úvod jeden jednoduchý příklad. Kapalný metan má vyšší hustotu než kapalný vodík a poměr okysličovadla ku palivu je také nižší, proto by při stejné hmotnosti paliva postačila raketoplánu hlavní palivová nádrž s třetinovým objemem. Použití metanu tedy zcela mění prostorové a hmotnostní dispozice vesmírného letu. Jaké parametry hrají u paliva hlavní roli?

Velmi důležitá je hustota paliva (udává se zpravidla v gramech na litr). Čím vyšší hustota, tím je zapotřebí nádrž s menším objemem, například kapalný kyslík má hustotu kolem 1 140 g/l. Na dalším místě je spalovací poměr. Jde o poměr hmotností okysličovadla a paliva. Čím nižší hodnota, tím je třeba méně kapalného kyslíku a let je méně náročný. Ke stěžejním parametrům patří specifický impuls (vyvinutý tah ku spotřebě). Popisuje účinnost raketového motoru – čím vyšší hodnota, tím efektivněji se energie paliva využije k urychlení rakety. Vliv mají i teplota spalování – nižší hodnota klade menší nároky na chlazení motoru, a bod varu paliva – vyšší hodnota je příznivější, například je snazší udržet v kapalném stavu kerosin než vodík. Z hlediska zanášení motoru je podstatné složení spalin. U dálkových misí, například k Marsu, je klíčovou otázkou, zda je možné palivo získat nebo vyrobit mimo Zemi.

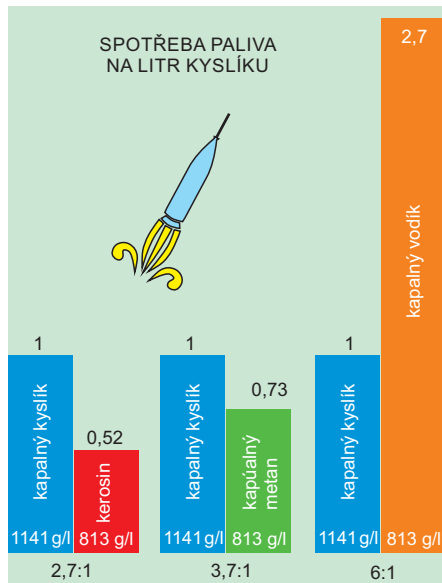
V tabulce na následující straně převzaté z Everyday Astronaut jsou uvedeny a porovnány základní parametry pro kerosin, metan a vodík. Jak je patrné, ani v jednom z parametrů metan nevíteží, a i přesto by se mohl stát palivem blízké budoucnosti. Tekutý metan v sobě totiž kombinuje přednosti vodíku i kerosinu a jako bonus je jeho bod varu podobný bodu varu kapalného kyslíku, tedy chlazení nádrží bude jednotné pro obě složky paliva a jednodušší než u kapalného vodíku.



Konstantin Eduardovič Ciolkovskij, zakladatel kosmonautiky. Spála ho téměř připravila o sluch. Byl vynálezce, učitelem a vědcem. Zdroj: 100+1.

**Tah motoru** – nejjednodušší veličina popisující raketové motory. Udává sílu vyvinutou motorem v newtonech. K odvozeným veličinám patří tahový součinitel (tah/výkon, jednotka newton/watt) a specifický impuls (tah/spotřeba, jednotka newton na kilogram za sekundu).





Spotřeba paliva na litr kyslíku. V dolním řádku je poměr hmotnosti okysličovadla a paliva. Příkladem rakety využívající kerosin je Falcon 9 a příkladem rakety využívající kapalný vodík je Delta IV. V poměru výšky sloupců jsou i poměry velikostí odpovídajících palivových nádrží. Zdroj: Everyday Astronaut.

| PARAMETR                   | KEROSIN                               | METAN                              | VODÍK            |
|----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------|
| hustota (g/l)              | 813                                   | 422                                | 70               |
| spalovací poměr            | 2,7                                   | 3,7                                | 6                |
| specifický impulz (N·s/kg) | 3 630                                 | 4 500                              | 5 220            |
| teplota spalování (K)      | 3 670                                 | 3 550                              | 3 070            |
| bod varu paliva (K)        | 490                                   | 111                                | 20               |
| spaliny                    | CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, C | CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O |
| dostupnost mimo Zemi       | ne                                    | ano                                | ano              |

### Další výhody

Tekutý metan je „zlatou střední cestou“ mezi vodíkem a kerosinem, zjednodušuje chlazení nádrží a snižuje náklady na stavbu raket. Má ale ještě jednu podstatnou výhodu: můžeme si jej vyrobit i jinde než na Zemi, jen za použití vody, oxidu uhličitého a elektřiny. Proč s sebou vozit a celé měsíce skladovat tuny paliva, když si jej můžeme doplnit třeba na Marsu. Celá mise se tím mnohonásobně zlevní a bude i bezpečnější. Zdá se tedy, že využití metanu jakožto raketového paliva pro nejrůznější vesmírné mise, například letu člověka k Marsu, je otázkou blízké budoucnosti.

■ Vilém Boušek, 7. 1. 2020, AB 3/2020

## Orel přistál, všichni na kutě!

Zkuste se vžít do pocitů prvňáčka, kterému rodiče slíbili návštěvu hvězdárny ve večerních hodinách, ovšem pod podmínkou, že se bude dobře učit. Neprohloupí, uvidí všechny ty hvězdy a planety, na které se kouká na chalupě divadelním kukátkem, ale tentokrát pořádným hvězdářským dalekohledem. A tak se Honzík snaží, učí se číst, psát, počítat, zvládá základy sexuální výchovy a na konci roku přinese vysvědčení se samými. Rodiče pochopí, že z toho se už nevykrotí, oželí nejnovější díl Ordinace v růžové zahradě a vydají se na dlouhou cestu. Honzík si ji jaksepatří užívá. Výprava MHD je dobrodružství samo o sobě a putování korunované jízdou lanovkou našponuje Honzíkovy nervy až k mezi pevnosti. Už stojí před hvězdárnou, už vytahují peníze na vstup, když si rodiče uvědomí, že je Honzík unavený a nařídí mu, aby se před návštěvou kopule nejprve řádně prospal na lavičce. Absurdní? A přece se něco podobného stalo před více než půl stoletím, necelých čtyři sta tisíc kilometrů od Země.

### Tři, dva, jedna, spát!

První stroj pilotovaný lidskou posádkou, lunární modul *Eagle* – *Orel* přistál na Měsíci v Moři klidu dvacátého července 1969. Legendární výrok o malém kroku pro člověka a velkém skoku pro lidstvo už dnes asi nikoho nepřekvapí. Málo se však ví, co se v modulu dělo před tím, v době od přistání do výstupu. Pracovní náplň prvních dvou hodin je stejně tak nudná, jako nezbytná – kontrola celého zařízení, tzv. *post landing checks*. Ani dalších pětáct minut nikoho neudiví, jíst je třeba. Další čtyři hodiny však měli astronauti strávit spánkem. Příkaz logický a neproveditelný. Tak, jako

**Apollo** – americký program pilotovaných vesmírných letů probíhající v letech 1961 až 1972 a současně název kosmické lodi, která dopravila člověka na Měsíc. Vyvrcholením bylo přistání člověka na Měsíci (Apollo 11, Neil Armstrong, 20. července 1969). K cestě na Měsíc byla používána dosud největší nosná raketa Saturn V. Astronauti posledních misí využívali k pohybu po povrchu Měsíce speciální motorové vozítko.

**Eagle** – *Orel*, název lunárního modulu Apollo 11. Přistál 20. 7. 1969 v oblasti Moře klidu. Neil Armstrong a Buzz Aldrin tvořili jeho posádku stanuli jako první lidé na cizím vesmírném tělese. Repliku modulu ve skutečné velikosti 8×9×9 m lze navštívit i zevnitř prohlédnout pouze v pražském planetáriu.

Lunární modul *Eagle* na oběžné dráze kolem Měsíce, jak jej zachytil Michael Collins ze servisního modulu *Columbia*. Zdroj: NASA.



**EVA** – Extra-Vehicular Activity, výstup do vesmírného prostoru. Přelomové okamžiky v dějinách vesmírných výstupů byly: 18. 3. 1965, kdy Alexej Leonov jako první člověk opustil mateřskou loď (Voschod 2); 3. června 1965 vystoupil do kosmu první Američan Ed White (Gemini IV) a dne 20. 7. 1969 vystoupil první člověk na jiné vesmírné těleso – na Měsíci stanul Neil Armstrong.

Pohled do interiéru lunárního modulu – stanoviště Buzze Aldrina Zdroj: NASA LPI.



by byl pošetilý pokus uspat Honzíka před návštěvou vytoužené hvězdárny, zrovna tak bláhové bylo domnívat se, že první člověk na Měsíci dokáže zamhouřit oči, sotva že přiletěl. Jak se později potvrdilo, i pouhý pokus o odpočinek byl odsouzen k nezdaru. Je těžké oponovat z tepla kanceláře organizátorům mise, kterým se ruce jen hemží argumenty, když nikdo z nás na Měsíci nebyl. Proto nechme promluvit samotného Buzze Aldrina:

*„Ať tento plán vypracoval a schválil kdokoli, neměl nejmenší tušení o fyziologii a psychologii. Přistáli jsme právě jedním z nejúžasnějších manévřů dějin astronautiky jako první lidé na Měsíci. Byli jsme až k límečku napumpovaní adrenalinem. A kdyby nám teď někdo vyprávěl, že si máme nejdřív pospat, než vyjdeme na Měsíc, bylo by to, jako kdyby někdo dítěti před Štědrým večerem s dárky řekl, že si teď má nejdřív lehnout do postele.“*

Jak už z Aldrinových slov vysvítá, brzy se Houston jen bezmocně díval, jak si oba astronauti poopravili harmonogram a s vědomím, že oni jsou teď pány situace, vyšli ven. Nešlo však o porušení rozkazu. Armstrong s Aldrinem věděli již dopředu, že plán je nesmyslný a s plánovači možnost předčasné mimopalubní aktivity diskutovali. Teprve po návratu a nezbytných úkonech se připravili ke spánku. Okamžitě se naplno ukázalo, že obavy z obtížného usínání byly na místě. I teď, když byli astronauti opravdu unavení, nedokázali usnout, prostředí kabiny jim v tom bránilo. Předně, žaluziemi byla opatřena pouze postranní okna, což způsobilo sice propad vnitřní teploty na nepříjemných 16 °C, ale světla se stejně nezbačili. Když nepočítáme světlo od všudypřítomných přístrojů, stále

kabinu zalévalo romantické světlo Země, které dovnitř dopadalo z potkávacího okénka ve stropě. Ani zraku, ani jiným smyslem nebylo dáno, aby si odpočinuly. V kabině neustále hučela klimatizace, bublala glykolová čerpadla a do toho se mísilo hrozivé praskání teplem namáhaného materiálu sondy. Pohodlně natáhnout tělo mohl astronaut pouze v místech, kde byl průměr modulu 2,1 m. Ovšem pouze teoreticky. Minimalizace hmotnosti sondy si vyžádala absenci veškerých krytů a ochran. Kabeláž byla sice pevně přichycena ke stěnám, nicméně volně přístupná a stále hrozilo, že astronaut mimoděk něco utrhne. Proto oba

členové posádky museli zaujmout skrčenou polohu. Armstrong musel své nohy zastrčit do pomocné smyčky, aby nespadly na Aldrina. Jediné bezpečnostní opatření, které se v dobré obrátilo, bylo spaní ve skafandrech. Plánovači mise se obávali, že se astronauti nadýchají jemného měsíčního prachu, který si přinesou na skafandrech, a proto spali v nich a dýchali přefiltrovaný vzduch. Armstrong i Aldrin hodnotili skafandr jako těsný spací pytel, který by se dal v šestinové gravitaci považovat i za pohodlný. Přesto se jim na Měsíci usnout nepodařilo.

## Další mise

Návštěvy Měsíce byly podle programu rozděleny na tři typy. První mise byla jako jediná typu G, trvala 22 hodin a astronautům musel stačit jediný výstup. Mise Apollo 12, (13 nedokončeno), 14 a 15 spadaly do kategorie H. Pobyt na Měsíci trval 33 hodin, během kterých šli astronauti ven dvakrát. Nejdelší mise – Apollo 16, 17 (18 a 19 zrušeno) – byly typu J. V těchto programech měli astronauti na povrchu Měsíce strávit plně tři pozemské dny a během každého provést jeden výstup. Později byl let Apollo 15 přefazován mezi mise typu J, což měla být náplast za zrušené lety Apollo 18 a 19.



Celý interiér lunárního modulu složený ze šesti dílčích snímků. Pózuje Buzz Aldrin. Zdroj: NASA, Jon Hancock.

**SEVA** – Stand-Up Extra-Vehicular Activity, neúplný výstup do vesmíru. Astronaut je stále v mateřské lodi a vyčnívá pouze částí těla. Původně plánováno Američany pro let Gemini IV, ale díky náskoku Sovětského svazu se nakonec uskutečnila plnohodnotná EVA. Další SEVA se uskutečnila při misi Apollo 15, kdy David Scott po přistání vyhlédl z lunárního modulu a vyfotografoval okolí.



**Měsíc** – přirozený satelit Země, rotuje tzv. vázanou rotací (doby oběhu a rotace jsou shodné). Díky tomu stále vidíme přibližně jen přivrácenou polokouli Měsíce. Měsíc je prvním cizím tělesem, na kterém stanul člověk (Neil Armstrong, Apollo 11, 1969). Voda na Měsíci byla objevena ve stinných částech kráterů a pod povrchem (Lunar Prospektor, 1998). Povrch Měsíce je pokryt regolitem (drobná drť s vysokým obsahem skla). Malé pevné jádro je obklopené plastickou vrstvou (v hloubce 1 000 km pod povrchem). Velké množství kráterů má rozměry od milimetrů po stovky kilometrů. Několik z nich je pojmenováno i po českých osobnostech (například kráter Anděl, Bečvář a Heyrovský).

Pohled na Zemi z Měsíce, jaký se naskytl astronautům výprav Apollo. Zdroj: NASA.



Ani v misích typu H se před výstupem nespalo, ačkoli to původní plán vyžadoval. O spánek se astronauti pokoušeli vždy až po prvním návratu do modulu. Tentokrát jim NASA spaní ulehčila houpacími sítěmi s úchyty ze suchých zipů. Spaní již bylo pohodlnější, nicméně nikdo nepřipouštěl, že by snad mohl spánek označit za osvěžující. Conrad přirovnával spaní ve skafandru ke spánku v krunýři hráče amerického fotbalu, navíc ho rozladila voda z chladicího systému skafandru, která mu natekla do bot. Mise Apollo 14 zase byla poznamenána přistáním v šikmé poloze (sklon 8°), což komplikovalo nejen práci v modulu, ale i pokusy o spánek. Skřípot plavidla na strašidelnosti jen dodával, a tak se posádka pobavila pouze ve chvíli, kdy si po jednom obzvláště vyvedeném akustickém kousku uvědomili, že zcela zbytečně šeptají.

Mise typu J byly jiné, trvaly tři dny. Tady už nebylo možné odvolávat se na alternativní postup svých předchůdců, spát se muselo ještě před prvním výstupem. Posádka Apollo 15 měla na programu malé zpestření nazývané Stand-up EVA, tzv. SEVA (*Stand-up Extra-Vehicular Activity*). Je to jakýsi poloviční výstup z kosmické lodi, známý již z počátků dobývání oběžné dráhy Země, kdy se američtí astronauti připravovali na výstup do volného prostoru. V původním plánu bylo, že se při letu Gemini IV postaví astronaut Ed White na svém křesle a nad průlez se vysune pouze trupem. Ještě v době příprav však Rusové Američany předběhli (výstup Alexeje Leonova do volného prostoru), a tak nakonec Ed White provedl také plnohodnotný výstup EVA a Stand-up EVA si vyzkoušel na Měsíci až velitel výpravy Apollo 15 David Scott. Vylezl na kryt motoru, aby dosáhl na průlez k dokovacímu tunelu, otevřel ho a vyfotografoval okolí. Nebyl to sice opravdový výstup na povrch, ale uvolnil napjaté nervy. Při této misi si také konečně astronauti dali do uší ucpávky a poprvé v historii usnuli lidé na Měsíci posilujícím spánkem.

### Kdo nevěří, ať tam běží!

Zde uvedený výčet komplikací s usínáním není úplný. Pohodový spánek komplikovaly nesčetné faktory: od nevinného Scottova a Irwinova chrápání, přes emocionální vypětí až po nedobrovolnou inhalaci měsíčního prachu. Při misích typu J, které trvaly tři dny, již astronauti nemohli být celou dobu ve skafandrech a dýchat filtrovaný vzduch. Skafandry svlékali ve speciálních uzavíratelných vacích, ale ani toto opatření nestačilo, aby se jemný měsíční prach nedostal do lodi.

Vzduch byl dle jejich slov cítit po střelném prachu a dráždil ke kašli. Proto se astronauti vyspali nejlépe paradoxně právě v oné problematické, dojmy nabitě přestávce před prvním výstupem, kdy byl vzduch v lunárním modulu ještě čistý.

Autoři doufají, že předchozí popis byl dostatečně barvitý, aby přiblížil nesnáze, jakým museli dobyvatelé Měsíce čelit. Není však nad vlastní zkušenost. Před budovou pražského planetária ve Stromovce je velmi zdařilá replika měsíčního modulu v životní velikosti. Jde o jedinou repliku na světě, u níž je možné nahlédnout dovnitř a přesvědčit se, jak pohodlně by zde bylo možné usnout.

■ Dana a Rudolf Mentzlovi, 26. 7. 2019, AB 29/2019



*Snímek lodi Apollo 17 z lunárního modulu. Zdroj: NASA.*



## Program Artemis – návrat člověka na Měsíc

**Artemis** – americký program návratu člověka na Měsíc. Na programu se dominantně podílí americká NASA, v menší míře i další vesmírné agentury: evropská ESA, japonská JAXA a kanadská CSA. První fáze, která bude stát 35 miliard amerických dolarů, by měla být završena přistáním člověka v oblasti jižního pólu Měsíce v roce 2025. Přistávání bude probíhat z vesmírné stanice Gateway na oběžné dráze kolem Měsíce. Program je pojmenován podle Artemis, řecké bohyně Měsíce, která byla dvojčetem boha hudby Apollóna. Jako nosná raketa poslouží nově vyvíjená SLS. Vlastní obytná loď programu Artemis se bude jmenovat Orion.

Je tomu již přes půl století, kdy poprvé vstoupila noha člověka na povrch našeho vesmírného souseda – Měsíce. Vesmírné závody o dobytí Měsíce mezi Spojenými státy a Sovětským svazem skončily fenomenálním úspěchem amerického programu Apollo. Dlouhá desetiletí se poté zdálo, že návrat člověka na Měsíc už není cílem velmocí. To vše by měl změnit americký program Artemis. Jeho název připomíná řeckou bohyni Měsíce, která byla dvojčetem boha hudby Apollóna. Název se proto současně týká jak Měsíce, tak předchozího úspěšného programu Apollo. Podle smělých plánů by měl člověk opět vstoupit na Měsíc v roce 2025, a to v oblasti jižního pólu, který je mimořádně zajímavý z fyzikálního i geologického hlediska. Americká NASA se o to pokusí ve spolupráci s dalšími vesmírnými agenturami: evropskou ESA, japonskou JAXA a kanadskou CSA. Pro přistávání člověka na Měsíci se vybuduje na oběžné dráze kolem Měsíce vesmírná stanice Gateway.

### Supertěžké nosiče

Od vyřazení raket Saturn V, k němuž došlo v sedmdesátých letech 20. století, chybí na této planetě nosič „supertěžké kategorie“. Do této skupiny se řadí rakety s nosností přes 50 tun na nízkou oběžnou dráhu (označuje se LEO). Kromě již zmíněných Saturnů V to byla sovětská raketa N-1, která měla dopravit sovětské kosmonauty na povrch Měsíce, a raketa Eněrgija, jež měla sloužit jako nosič pro sovětský raketoplán Buran. Při svém prvním letu měla vynést na oběžnou dráhu maketu bojové družice Poljus (česky Pól), která měla v ostré verzi mít laserový systém pro ničení nepřátelských družic. Let se uskutečnil 15. května 1987 a byl neúspěšný. Při druhém a posledním letu byl úspěšně vynesena na orbitu nepilotovaný sovětský raketoplán Buran – stalo se tak 15. listopadu 1988. Po té byl projekt raketoplánu Buran i rakety Eněrgija ukončen. Raketa Falcon Heavy společnosti SpaceX do této kategorie spadá pouze v případě, že poletí v konfiguraci, v níž dojde k obětování prvního stupně i obou boosterů.

Pokud chceme poslat člověka dále než na nízkou oběžnou dráhu, například k Měsíci, či do ještě větší vzdálenosti, je třeba mít silný nosič. Americká NASA si tuto potřebu uvědomovala a již v osmdesátých



letech dvacátého století vzniklo několik koncepcí založených na designu tehdy zbrusu nových raketoplánů. Jednou z nich byla například koncepce *Shuttle-C*. Mělo jít o jednorázově použitelnou, nepilotovanou nákladní verzi raketoplánu. První koncepce rakety podobající se současné SLS se objevila již v roce 1991 během programu NLS (*National Launch System*). Projekt se bohužel nedostal z koncepční fáze, neboť byl administrativou prezidenta Billa Clintona v roce 1993 zrušen. V roce 2004 prezident George W. Bush vyhlásil program „*Constellation*“ (česky Souhvězdí), který měl za cíl znovu dopravit člověka na měsíční povrch do konce dvacátých let. V rámci tohoto programu mělo dojít ke konstrukci nové třídy raket Ares – v první fázi k vývoji raket Ares I a Ares V.

Ares I byla dvoustupňová raketa, která měla vynášet modul Orion s lidskou posádkou na nízkou oběžnou dráhu. První stupeň tvořil pěti-segmentový raketový motor na pevné palivo SRB (*Solid Rocket Booster*) s tahem 15 000 kN. Druhý stupeň tvořil motor J-2X, který používal k pohonu směs tekutého vodíku a tekutého kyslíku. Ares I měl mít cílovou nosnost na nízkou oběžnou dráhu okolo 25 tun a primárním úkolem bylo vynášet loď Orion k Mezinárodní kosmické stanici a na oběžnou dráhu. Raketa Ares I, respektive její prototyp Ares I-X, letěla pouze jednou, a to 28. října 2009. Let byl částečně úspěšný, během odpojování prvního stupně došlo k anomálii, při které první stupeň narazil do stupně druhého.

Zatímco raketa Ares I byla určena k vynášení astronautů, Ares V měla být tažným koněm celého programu „*Constellation*“, neboť byla určena k vynášení až 160 tun nákladu na nízkou oběžnou dráhu (LEO). Jednalo se opět o dvoustupňovou raketu, první stupeň měl využívat prodlouženou verzi externí palivové nádrže používané raketoplány, která by obsahovala palivo a oksyličovadlo pro pět (nebo šest, nebylo definitivně rozhodnuto) motorů RS-68B, každý s tahem 3 300 kN. K nádrži měly být připojené dva pětisegmentové boostery SRB, každý s tahem 15 000 kN. Druhý stupeň měl být poháněn jedním, nebo dvěma motory J-2X. Je nesmírná škoda, že raketa Ares V nikdy neopustila projekční fázi. Celý program *Constellation* ukončila v roce 2010 administrativní rozhodnutí prezidenta Baracka Obamy. Oficiálním důvodem bylo značné překročení plánovaného rozpočtu. Součástí programu byl také vývoj kabiny Orion a servisního modulu vyvíjeného Evropskou kosmickou agenturou, ale o nich později.



Sovětská raketa Enérģija s prototypem bojové družice Poljus připravená ke startu na kosmodromu Bajkonur. Zdroj: Neznámý.

**LEO** – Low Earth Orbit, nízká oběžná dráha, na které obíhají družice kolem Země ve výšce od cca 200 km do 2 000 km. Oběžná doba je od 84 do 127 minut. V této výšce již není takový odpor vzduchu, aby způsobil rychlý pokles výšky.

**MEO** – Medium Earth Orbit, střední oběžná dráha, na které obíhají družice kolem Země ve výšce od 2 000 km do 35 000 km.

**GEO** – Geostationary Earth Orbit, geostacionární dráha. Družice na této dráze má takovou oběžnou dobu, že zdánlivě „visí“ nad určitým místem Země. Výška takové dráhy je 35 800 km.



**Saturn V** – největší nosná raketa dosud vyrobená člověkem. Raketa Saturn V byla použita v programu Apollo a bezpečně dopravila člověka na Měsíc. Později vynesla upravená verze kosmickou stanici Skylab na oběžnou dráhu Země. Jedná se o třístupňovou raketu. První stupeň (5 motorů F-1 společnosti Rocketdyne) využíval jako palivo kerosin a kapalný kyslík, hořel 150 sekund a celkový tah měl 34 MN. Druhý stupeň (5 motorů J2) měl jako palivo kapalný vodík a kyslík, hořel 360 sekund a tah měl 5 MN. Třetí stupeň měl jediný motor J2 s tahem 1 MN a zapaloval se dvakrát, poprvé na 165 sekund a podruhé na 335 sekund. Celková výška rakety byla 111 metrů, průměr měla 10 metrů, hmotnost 3 000 tun. Při 13 startech rakety nedošlo nikdy k žádné havárii. Poslední start proběhl v roce 1973.

Nádrže na tekutý vodík a tekutý kyslík používané americkými raketoplány. Zdroj: NASA.



## Raketa SLS

Raketa SLS (*Space Launch System*) je vyvíjena od roku 2011. Jde o „levnější“ alternativu ke třídě raket Ares. První stupeň SLS tvoří prodloužená verze externí palivové nádrže raketoplánů (program *Space Shuttle*). Nádrž je prodloužena ze 47 na 62 metrů, obsahuje palivo a okysličovadlo – tekutý vodík a tekutý kyslík – pro 4 motory RS-25D. Stejný typ motorů poháněl raketoplány. Pro první lety budou použity motory vyvinuté a používané v rámci letů raketoplánů. Od pozdějších letů se počítá s výrobou výkonnější verze označované jako RS-25E. K nádrži budou připevněné dva pětisegmentové pomocné raketové motory na pevné palivo (podobné, jako u raketoplánů, ale s tím rozdílem, že raketoplány používaly dvě čtyřsegmentové verze). Druhý stupeň rakety SLS Block 1 je tvořen druhým stupněm raket Delta IV poháněným jedním motorem RL-10B-2. Pro verzi SLS Block 1B se počítá s vývojem nového druhého stupně označovaného jako EUS (*Exploration Upper Stage*). Měl by být poháněn čtyřmi motory RL10C-3. Pro zajímavost: třetí stupeň raket Saturn I pohánělo šest motorů RL10A-3.

S verzí SLS Block 1 se počítá pro mise Artemis 1 až Artemis 3. Artemis 1 má za cíl bez posádky obletět Měsíc, mise Artemis 3 má v roce 2025 přistát na jižním pólu Měsíce. S Verzí SLS Block 1B se počítá od mise Artemis 4. Jisté pochybnosti způsobuje cena za SLS, neboť roční náklady na provoz se odhadují na dvě miliardy dolarů, přičemž samotná raketa má stát okolo 800 miliónů dolarů.

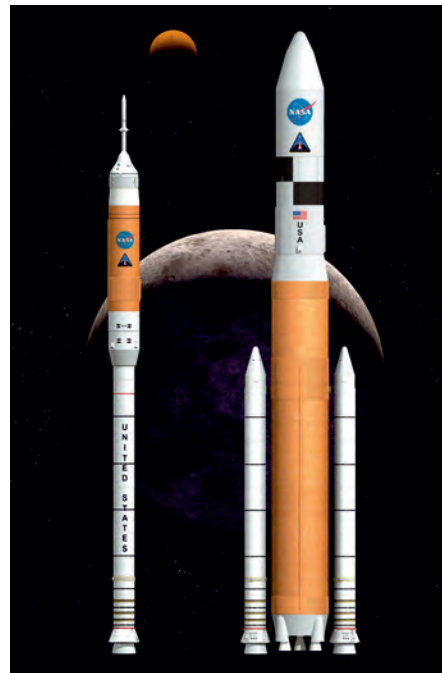
Raketa SLS měla původně vynést sondu Europa Clipper k Jupiteru. Přednost ale získala plánovaná cesta k Měsíci, a proto se autoři projektu museli poohlédnout po komerčním nosiči. Nakonec se problém vyřešil a sonda Europa Clipper bude vynesena raketou Falcon Heavy společnosti SpaceX. Stále se ale počítá s použitím rakety SLS pro vynesení následovníka sondy Europa Clipper, sondy Europa Lander, která by měla startovat k Jupiterově měsíci Europa v roce 2027, přistát na tomto měsíci a po-

kusit se provrtat jeho ledový příkrov. Prvních pět raket SLS je nyní blokováno pro lety k Měsíci v rámci projektu Artemis. Po mnoha odkladech stále platí, že první mise Artemis 1 by měla proběhnout v květnu 2022, tedy v období vydání této knihy. Jejím cílem je oblet Měsíce bez posádky. V plánu je při této misi vypustit miniaturní sondy CubeSat na translunární dráhu, po které se dostanou k Měsíci. Druhá mise, plánovaná na květen 2024, by měla dopravit člověka k Měsíci a opět vypustit početnou flotilu CubeSatů na translunární dráhu. Posádka Měsíc ale pouze obletí. K přistání by mělo dojít až při třetí misi plánované na rok 2025. Čtvrtá mise je plánována na rok 2026 a pátá na rok 2027. Po roce 2027 by měla být raketa SLS konečně využitelná i pro jiné projekty, než je Artemis. Počítá se s jejím nasazením pro projekty *Neptune Odyssey* (cesta k Neptunu a jeho měsícům), již zmíněný *Europa Lander*, *HabEx* (hledání obyvatelných exoplanet v naší Galaxii), *Origins Space Telescope* (vynesení dalekohledu pro vzdálený infračervený obor) a mnohé další. Raketa SLS by se tedy během nejbližších pěti let měla stát základním nosičem americké kosmonautiky.

## Lod' Orion

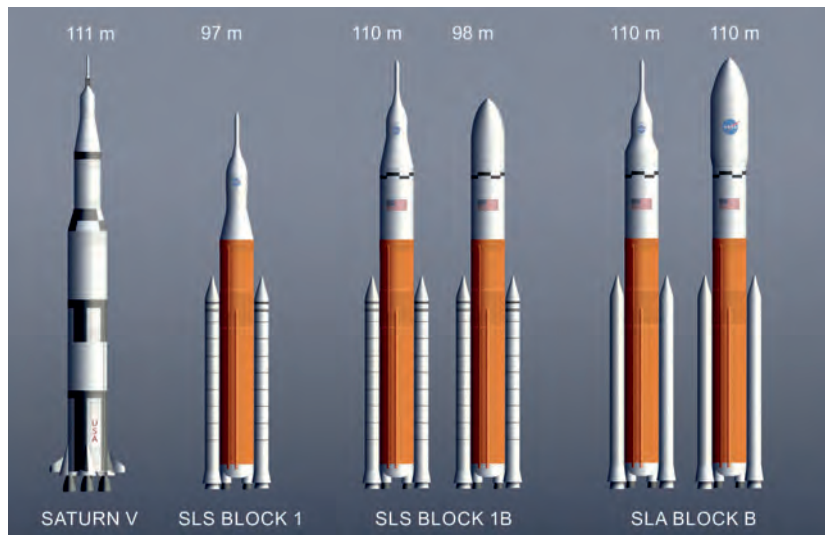
Celý název lodi je Orion MPCV (*Orion Multi-Purpose Crew Vehicle*). Tato vesmírná loď se skládá z modulu pro posádku CM (*Crew Module*) a z evropského servisního modulu ESM (*European Service Module*) zajišťujícího pohon a manévrování lodi. Vesmírná loď Orion pochází z programu *Constellation* a je ve vývoji od roku 2006. Její první let proběhl dne 5. prosince 2014, kdy byla vynesena pomocí rakety Delta IV Heavy na oběžnou dráhu. Testovací let trval několik hodin a modul pro posádku (kapsle) se úspěšně vrátil na Zem.

Lod' Orion je navržena pro šest astronautů, jejichž mise mohou trvat po dobu až tří týdnů. K pohonu Orionu slouží evropský servisní modul ESM obsahující řadu manévrovacích trysek a hlavní motor AJ10. Během misí Artemis 1 až 3 bude použit typ AJ10-190, jenž používá jako palivo monometylhydrazin a jako okysličovadlo oxid dusíku  $\text{NO}_2$ . Tento typ motoru byl používán raketoplány při manévrování na oběžné dráze, předešlá generace tohoto motoru, AJ10-137, poháněla servisní modul programu Apollo. Výhodou hydrazinového paliva je jeho vysoká stabilita a fakt, že snese i prudké změny teploty po dlouhou dobu. Nevýhodou je vysoká toxicita a karcinogenita, proto se převážně používá k pohonu vyšších stupňů raket nebo vesmírných sond.



Rakety Ares I a Ares V ze zrušeného programu Constellation (2004–2010). Zdroj: NASA.





Porovnání raket SLS s raketou Saturn V. Verze se záchrannou věžičkou (nalevo) je verze pro posádku (pod věžičkou je kuželovitá kabina posádky s katapultovacím zařízením a pod ní vlastní loď Orion). Verze bez věžičky (napravo) je určena pouze pro dopravu nákladu (Cargo). Zdroj: NASA.

V rámci programu Artemis se počítá při misi Artemis 1 s nepilotovaným testem lodě Orion v polovině roku 2022, následně o dva roky později by mělo během pilotované mise Artemis 2 dojít k obletu Měsíce – tato mise by měla trvat 21 dní – a následná mise Artemis 3 by již měla přistát na měsíčním povrchu. Plánovaná data startů ale byla již několikrát posunuta. Při všech letech bude loď Orion vynesena na oběžnou dráhu raketou SLS, jmenovitě pro mise Artemis 1 až 3 raketou SLS Block 1, od mise Artemis 4 se počítá s využitím výkonnější verze SLS Block 1B.

## Srovnání misí Apollo a Artemis

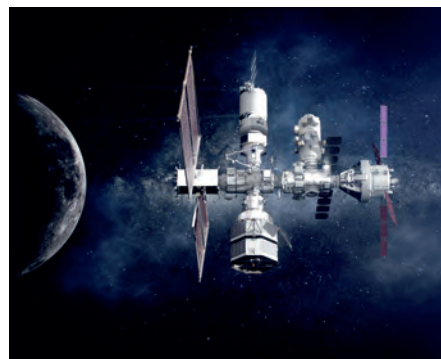
Hlavním rozdílem bude místo přistání. Mise Apollo mohly přistávat pouze do třicáté rovnoběžky (severně i jižně) od měsíčního rovníku. Bylo to dáno jejich letovou trajektorií. Přistát v okolí měsíčního rovníku je navigačně a technicky nejsnazší – ze všech možných přistávacích míst je potřebná změna rychlosti mezi oběžnou dráhou a povrchem nejmenší. Pokud je vaším cílem „jen“ přistát na Měsíci, je toto ideální volba. Pokud chcete na Měsíci zůstat delší dobu, je vhodnější zvolit místo, které vám umožní získat komodity, například vodu, které by jinak musely být dovezeny ze Země. Voda se ve formě ledu nachází v kráterech v okolí měsíčních pólů, větší koncentrace se předpokládá na jižním pólu, který je také cílem programu Artemis. Vodu, resp. hydroxylové molekuly, objevila sonda *Lunar Reconnaissance Orbiter* po dopadu impaktoru do jednoho z kráterů v blízkosti jižního pólu Měsíce. K čemu je vlastně potřeba voda? Kromě obvyklých lidských potřeb, kterými je dostatečná hydratace nebo kyslík pro dýchání, lze vodu přeměnit na raketové palivo. Mít jeho zásobárnu 400 tisíc kilometrů od Země není k zahození, ušetří to značnou část nákladů pro budoucí mise k Marsu či k planetkám. Program Artemis také počítá s výstavbou vesmírné stanice Gateway na polární dráze kolem Měsíce.





## Lunární orbitální stanice Gateway

Výběr vhodné oběžné dráhy pro lunární orbitální stanici probíhal na základě mnoha kritérií a byl nakonec kompromisem, který umožní lodi Orion spojení se stanicí a bezpečné přistání na Měsíci. Stanice Gateway bude nakonec obíhat na polární dráze okolo Měsíce, periluna má být ve výšce přibližně 3 000 km nad severním pólem Měsíce a apoluna ve výšce 70 000 km nad jižním pólem Měsíce. Perioda oběhu by měla být 7 dní a stanice nebude, na rozdíl od Mezinárodní kosmické stanice, obydlená po celý rok. V první fázi se počítá se čtyřmi moduly lunární orbitální stanice Gateway: modul PPE (*Power and Propulsion Element*) zajišťující energetické potřeby stanice, obytný a zásobovací modul HALO (*Habitation and Logistics Outpost*), modul pro telekomunikaci a doplňování paliva ESPRIT (*European System Providing Refueling, Infrastructure and Telecommunications*) a další obytný modul iHAB (*International Habitation Module*). Oba obytné moduly HALO a iHAB budou poskytovat přibližně 125 metrů krychlových obyvatelného prostoru pro posádku. Stanice bude samozřejmě budována a uváděna do provozu postupně.



Mezinárodní lunární stanice Gateway. Zdroj: NASA.

Ilustrace lodi Orion při zážehu motorů, který loď navede na přechodovou dráhu k Měsíci. Zdroj: NASA.







## Přistání na Měsíci

Přistání na Měsíci bude probíhat následovně: loď Orion se připojí ke stanici Gateway. Ke stanici bude také připojen přistávací modul, který bude vyneseno pomocí komerčních raket. Část osádky Orionu přestoupí do přistávacího modulu, který se oddělí od stanice ve chvíli, kdy stanice bude nejbližší měsíčnímu povrchu a provede zážeh motoru, který jej zpomalí. Až se bude modul přibližovat k jižnímu pólu, dojde ke druhému zážehu a následnému přistávacímu manévru zakončenému samotným přistáním. Celý proces od opuštění stanice po přistání by neměl trvat déle než den. Okno pro start z Měsíce se bude otevírat každých sedm dní, opětovné spojení se stanicí se bude znovu odehrávat během největšího přiblížení stanice k povrchu.

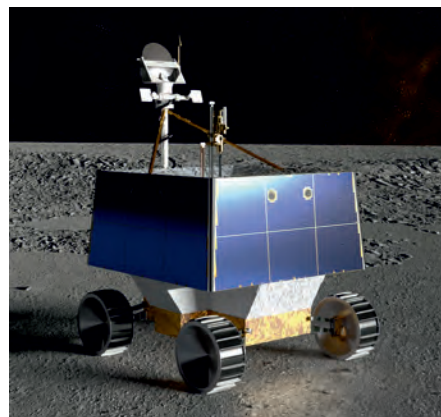
Program Artemis nebude čistě americkou záležitostí, Evropská vesmírná agentura ESA vyvíjí servisní moduly pro loď Orion a společně s Japonskou vesmírnou agenturou JAXA vyvíjejí obytný modul iHAB. Stejně jako v případě Mezinárodní kosmické stanice se počítá s „robotickou rukou“, která umožní snazší připojení lodí ke stanici. Robotickou ruku dodá Kanadská vesmírná agentura CSA. Zásobování stanice by měly zajišťovat jak státní (JAXA, Roskosmos, ESA), tak i soukromé subjekty (Blue Origin, ULA, SpaceX...). Na podzim roku 2019 projeвило zájem o širší zapojení do programu Artemis Japonsko. Japonsko konkrétně nabízí nové generace dopravních lodí, které budou pomáhat dopravovat zásoby k Měsíci a také vývoj a stavbu lunárního roveru. To vše výměnou za přistání japonského astronauta, či astronautů na měsíčním povrchu.

V rámci programu Artemis, před samotným přistáním člověka, dojde na jižním pólu Měsíce k přistání několika automatů se zásobami, rovery, či jinými vědeckými přístroji. V současné době usiluje 14 společností o vítězství svého přistávacího modulu v tomto podpůrném programu, který dostal název *Commercial Lunar Payload Services*. Na konci roku 2023 by měl na jižním pólu Měsíce přistát rover VIPER (*Volatiles Investigating Polar Exploration Rover*), který bude mít za úkol zkoumat výskyt a dostupnost ledu v místě přistání misí Artemis. Doufáme, že se po více než půl století člověk úspěšně vrátí k našemu nejbližšímu vesmírnému sousedu – Měsíci – a plány několika vesmírných agentur se podaří splnit.

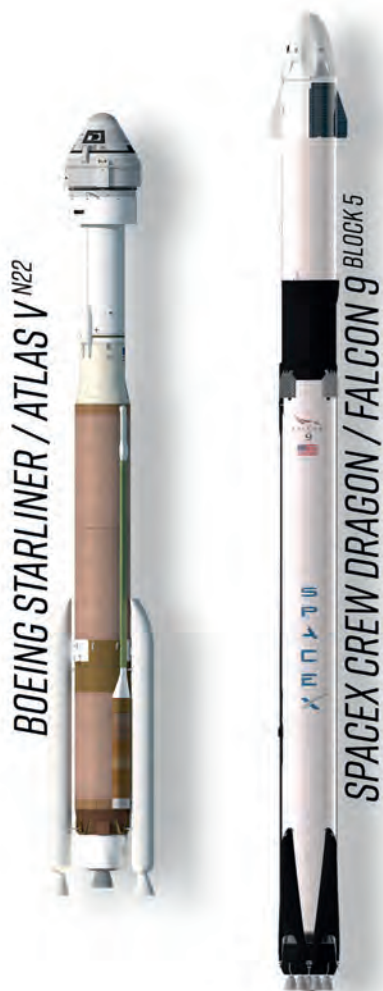
■ Vilém Boušek, 13. 3. 2020, AB 11/2020



Vývoj roveru VIPER. Snímek je z roku 2020. Zdroj: NASA.



Umělecká vize roveru Viper na Měsíci. Zdroj: Sierra Nevada Corporation.



Raketa Atlas V N22 s lodí CST-100 Starliner a raketa Falcon 9 Block 5 s lodí Dragon 2. Zdroj: Everyday Astronaut.

## Program Commercial Crew

Od 8. července 2011, kdy proběhl start poslední mise raketoplánů STS-135, byl k dispozici pouze jediný způsob, jak dopravit osádku na Mezinárodní vesmírnou stanici (ISS, *International Space Station*), a to pomocí ruské vesmírné lodi Sojuz TMA-M (2010 až 2016) a Sojuz MS (2016 až do současnosti).

Americkou náhradou za vyřazené raketoplány se měly stát lodě soukromých společností v rámci programu *Commercial Crew* zahájeného roku 2011 – CST-100 Starliner od společnosti Boeing s nosnou raketou Atlas V N22 a Dragon 2 s nosnou raketou Falcon 9 Block 5 od společnosti SpaceX. S prvními starty se dle původního harmonogramu počítalo již roku 2017, avšak z důvodu podfinancování programu a technických obtíží se první pilotovaný/testovací let udál až 30. května 2020. Pomyslný závod o prvenství v soutěži o plavidlo, v němž se astronauti NASA poprvé od roku 2011 podívají na Mezinárodní kosmickou stanici bez potřeby použití ruských lodí Sojuz, vyhrála společnost SpaceX se svou lodí Dragon 2 (Crew Dragon). V současnosti (polovina března 2022) má společnost SpaceX za sebou šest úspěšných startů lodi Dragon (dva demo lety, tři lety s čtyřčlennou posádkou dopravenou na ISS a jeden další let na oběžnou dráhu). Nejbližší další starty se mají odehrát na konci března a v polovině dubna 2022. Společnost Boeing v tomto závodě nezmohla první start své lodi Starliner plánuje po několika odkladech až na březen 2023.

### Dragon 2

Dragon 2 je druhá generace lodí společnosti SpaceX, jedná se o evoluční vývoj lodi Dragon, která byla využívána mezi lety 2010 až 2020 v první fázi programu *Commercial Resupply Services*, jenž měl za úkol zajistit zásobování Mezinárodní vesmírné stanice.

Lod' Dragon 2 byla poprvé veřejnosti představena 29. května 2014. Po opravdu značném počtu testů se tato loď poprvé podívala do vesmíru a k Mezinárodní kosmické stanici v březnu 2019. V rámci programů *Commercial Crew* (lety s posádkou, Crew Dragon) a druhé fáze programu *Commercial Resupply Services* (lety se zásobami, Cargo Dragon 2) bude dopravovat astronauty a zásoby na ISS. Je schopna pojmout až 7 astronautů, pro mise a lety s astronauty NASA se však bude využívat pouze konfigurace se čtyřmi místy pro astronauty.



Tato loď sestává z hermetizované a nehermetizované části. Hermetizovaná část má objem 9,3 metru krychlového a nehermetizovaná část má objem 37 metrů krychlových. Celková výška lodi činí 8,1 metru a průměr v nejširším místě má 4 metry. Dragon 2 je schopen k ISS vynést až 6 000 kilogramů nákladu.

Hermeticky uzavřená část lodi Dragon 2, neboli kapsle, je určena pro přepravu astronautů, zásob a vědeckých experimentů, které nemohou, či nesmějí být vystaveny vesmírnému prostředí. Pro orbitální manévry je určeno 8 motorů SuperDraco, které taktéž slouží jako únikový systém během startu. Spalují směs monometylhydrazinu (MMH) a oxidu dusičitého (okysličovadlo)  $\text{NO}_2$  s výtokovou rychlostí plynů z trysky 2,3 km/s. O správnou orientaci se starají trysky Draco, které využívají stejnou pohonnou směs jako motory SuperDraco, avšak rychlost výtokových plynů z jejich trysek je 2,9 km/s.

Nehermetizovaná část lodi Dragon 2 zásobuje celou loď elektrickou energií. Polovina této části je pokryta solárními panely, zbylá polovina je pokryta radiátory (vyzařují teplo), které zajišťují korigování teploty. Tato nehermetizovaná část zůstává s kapslí spojena po celou dobu pobytu u stanice, k jejímu oddělení dojde krátce před vstupem do atmosféry, kde shoří.

Dráha lodi se liší pro verzi s posádkou a bez ní. Pro verzi s posádkou je nižší a méně strmá než pro verzi pouze s nákladem. Jedná se o bezpečnostní opatření pro případ nouzového přerušení probíhajícího letu. Jedině z takové dráhy je následný vstup do atmosféry slučitelný se životem posádky uvnitř lodi. Ze stejného důvodu bylo nutné pro loď CST-100 Starliner od společnosti Boeing znovu zavést druhý stupeň raket Atlas V poháněný dvěma motory RL-10.

## Crew Dragon Demo-1

První testovací let vesmírné lodi Crew Dragon C204 trval od startu do přistání celkem 6 dní, 5 hodin, 56 minut a 5 sekund. Start se uskutečnil dne 2. března 2019 v čase 07:49:03 (UTC), spojení



**Raketoplán** – Space Shuttle (oficiálně Space Transportation System) byl americký pilotovaný kosmický letoun provozovaný pro lety do vesmíru agenturou NASA. Firma Rockwell International Space Systems Group (nyní Boeing North American) raketoplán vyprojektovala a postavila pět plně provozuschopných exemplářů. První let proběhl v roce 1981. Raketoplán startoval za pomoci nosné rakety, samostatně se pohyboval ve vesmíru a samostatně přistával. Lety byly řízeny z Johnsonova kosmického střediska v texaském Houstonu. Lety raketoplánu byly ukončeny v roce 2011. Obdobný sovětský projekt raketoplánu Buran nebyl dokončen, došlo k jedinému startu v roce 1988.

Zásobovací loď Cargo Dragon (nalevo) a obytná loď Crew Dragon (napravo). Zdroj: SpaceX.







Loď Crew Dragon během mise Demo-1, nalevo před zakončením u Mezinárodní vesmírné stanice dne 3. března 2019, napravo po úspěšném přistání ve vodách Atlantiku dne 8. března 2019. Zdroj: NASA, SpaceX.

**Boeing** – společnost, jejíž kořeny sahají do roku 1916, kdy byla založena americkým průkopníkem letectví Williamem Edwardem Boeingem a fregatním kapitánem Georgem Conradem Westervellem. Pod názvem Boeing funguje od roku 1917. Dnes jde o jednoho ze dvou největších výrobců letadel na světě. Podstatnou část obratu společnosti zajišťuje vývoj a prodej zbraňových systémů, Boeing je třetí největší dodavatel zbraní na světě. Společnost je orientována nejen na letectví, ale i na kosmonautiku. Boeing se podílí na vývoji celé řady družic a nosných raket. Za zmínku stojí například největší budovaná raketa SLS, komerčně prodávaná družice 702X či právě vyvíjená dopravní loď Starliner, která zajistí lety k Mezinárodní vesmírné stanici.

s ISS proběhlo 3. března v 10:51 (UTC) a k odpoutání došlo 8. března 2019 7:32 (UTC), tedy po 4 dnech, 20 hodinách a 41 minutách. Poprvé v dějinách společnosti SpaceX proběhlo připojení vesmírné lodě Dragon k Mezinárodní vesmírné stanici plně automaticky. Doposud byly během jednotlivých misí lodě připojovány pomocí kanadského manipulačního ramene. Crew Dragon přistál do vod Atlantického oceánu 8. března 2019 ve 13:45:08 (UTC).

Jako náklad během tohoto letu posloužila figurína ve skafandru společnosti SpaceX pojmenovaná Ripley podle postavy z filmu Alien a přibližně 180 kilogramů zásob. Mise měla za cíl otestovat let lodí Crew Dragon na raketě Falcon 9 Block 5, provádění orbitálních manévru pomocí motorů SuperDraco, automatické dokování u ISS a správnou funkci tepelného štítu a padáků.

Mise skončila úspěšně, všechny potřebné systémy fungovaly, a tak bylo možné pomýšlet na start s lidskou posádkou, avšak 20. dubna se během testování motorů SuperDraco vyskytla anomálie, která vyústila ve ztrátu lodí C204. Kvůli této poruše došlo k posunutí pilotovaného letu na jaro 2020. Bylo také nutné otestovat únikový systém za letu, a to pro případ, že by došlo k selhání nosné rakety.

Test únikového systému proběhl úspěšně 19. ledna 2020 na lodí C205. Byl proveden 84 sekund po startu, ve fázi letu, kdy na raketu působí nejvyšší aerodynamický tlak. Loď Crew Dragon C205 úspěšně přistála 544 sekund po startu ve vzdálenosti 34 kilometrů.

## Crew Dragon Demo-2

Crew Dragon Demo-2 byla první pilotovaná mise programu Commercial Crew a společnosti SpaceX. Šlo o 85. start Falconu 9, 52. přistání prvního stupně a osmou misi SpaceX v roce 2020. Tato mise si právem získala značnou mediální pozornost, neboť se mimo jiné jednalo o první pilotovaný let z území Spojených států po téměř devítileté pauze. Symboličnost tohoto okamžiku podtrhuje skutečnost, že poslední let raketoplánu i první let Crew Dragonu s lidskou posádkou se uskutečnily ze stejného místa, startovací rampy LC-39A na mysu Canaveral. Samotná rampa LC-39A je místo, odkud startovaly vyjma Apollo 10, všechny mise raket Saturn V programů Apollo a Skylab.

Jelikož se jedná o testovací let, tak posádku tvořili pouze dva astronauti Robert Behnken a Douglas G. Hurley, přezdívaní Bob a Doug. Stejně početnou osádku měly i první mise raketoplánů v letech 1981 až 1982. V obou případech byly především testovány nové technologie. První startovací okno se otevřelo 27. května ve 20:33 (UTC), avšak kvůli špatnému počasí došlo k zastavení startovací sekvence v čase T -16 minut a 53 sekund. Druhé startovací okno, které již bylo využito ke startu, se otevřelo 30. května v 19:22 (UTC). V tento čas došlo ke startu a loď Crew Dragon C206, která byla pokřtěná jménem Endeavour, se vydala na svou devatenáct hodin trvající cestu k Mezinárodní vesmírné stanici, kam dorazila 31. května ve 14 hodin a 16 minut (UTC). Během letu byla dodržena tradice započatá u mise Gemini 6, kdy posádka lodi je ráno probuzena skladbou, kterou vyberou samotní astronauté nebo jejich rodinní příslušníci. Během tohoto letu byly astronauti probuzeni skladbou Planet Caravan od skupiny Black Sabbath.

## Další mise lodí Crew Dragon

Po letu DEMO-1 s figurínou a DEMO-2 s dvojčlennou posádkou už následovaly lety se čtyřčlennými posádkami. První plnohodnotnou misi k ISS s označením Crew-1 zajistila loď C207 (byl to její první let). Start proběhl 16. listopadu 2020 a loď zůstala u ISS půl roku. Druhá mise nesla označení Crew-2 a zajišťovala ji loď C206 (byla použita již pro DEMO 2). Start proběhl 23. dubna 2021 a mise byla opět půlroční. Zatím poslední mise k ISS s názvem Crew-3 (loď C210) v době psaní této knížky probíhá. Čtyřčlenná posádka odstartovala dne 11. listopadu 2021 a vrátit na zem by se měla na konci dubna 2022. Za zmínku stojí dvě další mise, které nesouvisí s Mezinárodní vesmírnou stanicí.

**SpaceX** – Space Exploration Technologies Corporation, soukromá společnost působící v aerokosmickém průmyslu. Byla založena Elonem Muskem v roce 2002 z peněz za prodej jeho podílu v systému PayPal. V současné době provozuje rakety Falcon 9 a Falcon Heavy. SpaceX také provozovala kosmickou loď Dragon, která dovážela zásoby k ISS. Vylepšená verze této lodi Dragon 2 dopravuje nejen zásoby, ale i astronauty na Mezinárodní vesmírnou stanici v rámci programu Commercial Crew. V současné době SpaceX pracuje na svém ambiciózním projektu s názvem Starship.

Americká NASA dokonce počítá s dokováním dvou kosmických lodí Crew Dragon u Mezinárodní kosmické stanice. Zdroj: SpaceX, NASA.





*Připojování prototypu lodi Starliner společnosti Boeing k nosné raketě Atlas V aliance ULA před prvním letovým testem. Snímek lodi byl pořízen dne 21. listopadu 2019 v montážní hale VIF (Vertical Integration Facility) na startovacím komplexu 41 floridského mysu Canaveral. Zdroj: NASA, Cory Huston.*

Dne 16. září 2021 startovala mise Inspiration4. Posádka konala na oběžné dráze po tři dny vědecké a lékařské experimenty. Na konci března 2022 by měla startovat mise Axiom k ISS. Dva vesmírné turisty z významných investičních společností budou doprovázet dva profesionální astronauti. Na polovinu dubna 2022 je potom plánována další, už čtvrtá plnohodnotná mise k Mezinárodní vesmírné stanici.

Program Commercial Crew běží na plné obrátky. Zatím zajišťuje mise s lidskou posádkou loď Crew Dragon společnosti SpaceX. Pro cesty do vesmíru, jejichž cílem není dokování u ISS, je spojovací

uzel nahrazen plexisklovou kupolí s výhledem 360°. Poprvé byla tato kupole využita u mise Inspiration4 a počítá se s jejím použitím zejména pro vesmírnou turistiku. Po zapojení lodí Starliner společnosti Boeing budou existovat už dvě alternativy, jak mohou Spojené státy dostat člověka do vesmíru, aniž by byly závislé na ruských lodích Sojuz.

■ Vilém Boušek, aktualizováno 2022, AB 23/2020



## Postavme si raketu

V současné době, na začátku dvacátých let 21. století, se opět starty raket a lety do vesmíru přesouvají do popředí veřejného zájmu. Můžeme jen spekulovat, nakolik je to díky novým objevům či různým sociálním sítím. Nemůžeme však popřít, že raketový průmysl se probouzí na celém světě. Čína vyvíjí rakety Dlouhý pochod druhé generace, Japonsko konstruuje nový raketový nosič s názvem H3, Rusko věnuje úsilí své nové raketě Angara, v Evropě probíhá vývoj raket Vega C a Ariane 6. Oblastí samou pro sebe jsou Spojené státy, kde probíhá překotný vývoj nové generace raketových nosičů všech kategorií:

Společnost Boeing připravuje raketu SLS, která by měla dopravit člověka zpět na Měsíc, snad již roku 2024. ULA – společná aliance společností Boeing a Lockheed Martin, která zastřešuje výrobu a požívání raket rodin Delta a Atlas, vyvíjí novou raketu Vulcan-Centaur, která by měla výhledově obě jmenované rodiny raket nahradit. Northrop Grumman, provozovatel raket Antares, vyvíjí novou raketu Omega.

Živo je i v soukromém sektoru. SpaceX miliardáře Elona Muska nejspíše nemusíme nikomu představovat, v současné době tato společnost pracuje na velmi ambiciózním projektu rakety Starship. Další ze soukromých společností vyvíjející raketové nosiče je Blue Origin miliardáře Jeffa Bezose s jejich připravovanou raketou New Glenn. Ani to není vše, ve hře jsou se svými raketami i společnosti Virgin Orbit a Virgin Galactic miliardáře Richarda Brandsona.

### ULA

*United Launch Alliance*, zkráceně ULA, je společný podnik společností Boeing a Lockheed Martin. Historie aliance se začala psát dne 1. prosince 2006, kdy byla oficiálně založena. V současné době provozuje rakety Atlas V a Delta IV Heavy. V minulosti provozovala

**ULA** – *United Launch Alliance*, aliance společností Boeing a Lockheed Martin, jejímž cílem je především vývoj raket pro kosmický průmysl. Aliance byla založena v roce 2006. Mezi zákazníky patří americká NASA, americké Ministerstvo obrany i další subjekty. V současnosti aliance využívá rakety Delta IV Heavy a Atlas V. Ve vývoji je raketa Vulcan Centaur. Aliance se pyšní precizností a spolehlivostí. Má za sebou přes 145 startů bez jediného selhání.

*Umělecká představa nové nosné rakety Vulcan aliance ULA se čtyřmi pomocnými raketovými motory – boostery. Zdroj: United Launch Alliance.*







Měsíční přistávací modul Peregrine vyvíjený společností Astrobotic Technology. Zdroj: Astrobotic, ULA.

**Northrop Grumman** – nadnárodní společnost se sídlem v americkém Los Angeles, jejímž hlavním cílem je prodej zbraňových systémů, námořních plavidel a letecké a raketové techniky. Společnost byla založena v roce 1939 americkým leteckým návrhářem Jackem Northropem. Společnost vyvinula lunární modul, který v roce 1969 přistál na Měsíci, podílela se na výrobě vesmírného dalekohledu Jamese Webba, provozuje rakety Antares a vyvíjí novou nosnou raketu OmegA.

**Blue Origin** – Blue Origin Federation, LLC, soukromá společnost působící v aerokosmickém průmyslu. Sídli ve městě Kent ve státě Washington. Byla založena 8. září 2000 Jeffem Bezosem. V současné době je výkonným ředitelem této společnosti (CEO) Bob Smith. Společnost provozuje suborbitalní raketu New Shepard, dále vyvíjí raketu New Glenn a v rámci programu Human Landing System vyvíjí (ve spolupráci s dalšími firmami Draper, Lockheed Martin a Northrop Grumman) možný budoucí přistávací modul pro program Artemis.

rakety Delta IV Medium (vyřazeny 22. srpna 2019) a Delta II (vyřazeny 15. září 2018). Od září 2014 je výkonným ředitelem společnosti Tory Bruno. Tato společnost sídlí v coloradském městě Centennial. V současné době vyvíjí novou raketu Vulcan, na kterou se podíváme blíže. Termín je neustále odkládán, nyní se hovoří o druhé polovině roku 2022. Při tomto letu by raketa Vulcan měla vynést měsíční přistávací modul Peregrine společnosti Astrobotic Technology, který bude v rámci programu *Commercial Lunar Payload Services* dopravovat na měsíční povrch náklady o hmotnosti do 35 kilogramů. Při svých dalších letech by měla raketa sloužit jako nosič pro nepilotovaný raketoplán Dream Chaser společnosti *Sierra Nevada Corporation*, který bude dopravovat zásoby na Mezinárodní vesmírnou stanici v rámci druhé fáze programu *Commercial Resupply Services*.

## Vulcan-Centaur

První zmínky o nové raketě se začaly objevovat na počátku roku 2014, oficiálně byla raketa Vulcan představena dne 13. dubna 2015. Hlavními důvody pro vývoj a stavbu nového typu rakety byly: snaha o vyřešení některých problémů raket Atlas V a Delta IV, vysoká cena stávajících raket a závislost kriticky důležitých součástí (například motory RD-180 u Atlasu V) na zahraničním dodavateli. Dalšími důvody byla snaha o zkrácení doby výroby. Dle vyjádření ředitele ULA Toryho Bruna by stavba rakety Vulcan měla trvat méně než 10 měsíců oproti 14 měsícům potřebným pro výrobu rakety Atlas V. Snaha o zvýšení konkurenceschopnosti v době, kdy dochází ke vstupu soukromých společností na pole raketového průmyslu, je nezbytnou podmínkou úspěchu. Od 21. srpna 2002 do května 2020 došlo celkem k 137 startům raket Atlas V a Delta IV, z toho bylo 84 startů Atlasu V a 40 startů Deltu IV. Společnost SpaceX provedla v období od 4. června 2010 do června 2020 celkem 87 startů své rakety.

Samotná výroba rakety Vulcan probíhá v továrně ULA u města Dekatur ve státě Alabama. Raketa bude startovat z mysu Canaveral na Floridě nebo z Vandenbergovy letecké základny v Kalifornii. Alabama je vnitrozemský stát, přeprava raket probíhá na lodi, nejprve po řece Mississippi do Mexického zálivu a z něj loď s raketou směřuje buď na východní pobřeží Floridy, nebo Panamským průplavem do Kalifornie.

## První stupeň rakety Vulcan

První stupeň rakety bude 33,5 metru vysoký a bude mít průměr 5,4 metru. Nádrže prvního stupně pojmu 368 tun pohonných látek. Jako pohon byla zvolena dvojice motorů BE-4 společnosti Blue Origin. Motory BE-4, spadají do kategorie motorů s uzavřeným cyklem bohatým na okysličovadlo, využívají ke svému pohonu směs kapalného metanu a kapalného kyslíku jako okysličovadlo. Tato dvojice motorů má celkový tah 4 800 kN. K prvnímu stupni bude možno dále připojit dva, čtyři nebo šest pomocných raketových motorů GEM 63XL na tuhé pohonné látky od společnosti Northrop Grumman.

Jako základ pro tělo prvního stupně raket Vulcan slouží pláty hliníkové slitiny s příměsí zinku. Šířka jednoho plátu je bezmála 3,4 metru a k vytvoření jedné válcové sekce je potřeba pět plátů. Dvě sekce tvoří tělo prvního stupně rakety Vulcan. Hliníkové pláty je nejprve třeba zpracovat a dodat jim před dalším použitím požadované zakřivení.

U raket Delta IV a Atlas V se používá technologie *Isogrid* – jedná se o odstraňování vrstev plátu za pomoci CNC stroje, který do plátu vyfrézuje pevně daný vzor, čímž vytvoří trojúhelníkovou strukturu nosných žebírek. Touto metodou dojde k odlehčení samotného plátu o téměř 90 procent za cenu mírného poklesu původní úrovně pevnosti. U rakety Vulcan se používá technologie *Orthogrid*. Od předchozí metody se liší tím, že namísto trojúhelníkové struktury bude výsledný vzor obdélníkový, což urychlí samotný proces výroby a sníží výrobní cenu.

**Atlas V** – nosná raketa NASA vyvinutá společností Boeing, od roku 2006 vyráběná aliancí United Launch Alliance. Celková výška Atlasu s druhým stupněm Centaur III je 60 m. Vzletová hmotnost je 333 000 kg. Připojením až pěti pomocných raketových motorů na tuhé palivo GEM 63 hmotnost vzroste až na 590 000 kg. První stupeň rakety Atlas V je poháněn jedním motorem RD-180 s tahem 3,8 MN a druhý stupeň – Centaur III je poháněn jedním motorem RL10C-1 o tahu 102 kN nebo dvěma motory RL10A-4-2 o celkovém tahu 198 kN.

Raketoplán Dream Chaser vyvíjený společností Sierra Nevada Corporation. Zdroj: SNC.



**Blue Engin 4** – BE-4, raketový motor vyvíjený společností Blue Origin. Patří do kategorie motorů s uzavřeným cyklem bohatým na okysličovadlo, palivem je zkapalněný metan. Je navržen tak, aby podskytl tah 2,4 meganewtonů. Vývoj motoru započal v roce 2011, v roce 2015 došlo při testu k explozi motoru, první úspěšný test proběhl v roce 2017.

Motor BE-4 pro raketu Vulcan, který vyrábí společnost Blue Origin. Zdroj Blue Origin.



Pláty mají vytvořit válcový plášť prvního stupně, proto je nutné je zakřivit. Tato úprava se provádí pomocí nárazového lisu. Zajímavé je, že o samotné ovládání lisu se nestará počítač, ale člověk, který zároveň kontroluje i správnost zakřivení, lidově řečeno od „oka“. Takto zpracované hliníkové pláty se posouvají do další části výrobního procesu, kde získají antikorozi vlastnosti tzv. *eloxováním* – na povrchu hliníku se vytvoří vrstva oxidu hliníku, jež brání následné oxidaci zbytku materiálu. Před započítím tohoto procesu je nutné všechny hliníkové části důkladně očistit, aby se předešlo následným nežádoucím chemickým reakcím. Při eloxování se hliníkové části ponořují do nádrží s kyselinami a poté se omyjí. Nejprve dojde k ponoření do kyseliny sírové, kde zůstane po přesně danou dobu, následně je součástka vyjmuta a očištěna (osprchována) de-ionizovanou vodou. Poté se tento proces opakuje s kyselinou dusičnou. Nakonec je každá část budoucího těla rakety podrobena důkladné prohlídce. Pokud jsou všechny parametry v pořádku, válcové segmenty se kompletují. Samotné spojení se provádí pomocí podélného třecího svařování s mísením. Díky tomuto postupu se nemění fyzikální vlastnosti materiálu v okolí sváru.

Následně dojde ke kompletaci nádrží pro palivo a okysličovadlo. U raket Atlas V či Delta IV se jedná o čtyři kopule. U rakety Vulcan se obě nádrže sestávají jen ze tří kopulí, což je možné díky podobným teplotám varu u tekutého kyslíku ( $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a tekutého metanu ( $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Výsledkem je snazší chlazení a jednodušší konstrukce nádrží. Okysličovadlo může být vedeno nádrží s palivem až k motorové sekci (dvojice motorů BE-4). Je to významné zjednodušení oproti raketě Atlas V, kde musí být okysličovadlo vedeno k sekci s motorem (rakety Atlas V jsou osazovány kvalitními ruskými motory RD-180) po plášti rakety.



## Druhý stupeň rakety Vulcan

Druhý stupeň rakety Vulcan se nazývá Centaur V, má průměr 5,4 metru a délku 15,4 metru. Nádrže Centauru V, s celkovou délkou 11,7 metru, jsou schopny pojmout 54,4 tuny pohonné směsi – jedná se o kapalný vodík a kapalný kyslík. O pohon se starají dva motory RL10-C-1-1 s kombinovaným tahem 212 kN a s výtokovou rychlostí 4,45 km/s. Pro později vyvíjenou verzi Heavy se počítá s motory RL10-CX s prodloužením výtokových trysek.

Jako konstrukční materiál je, z důvodu úspory hmotnosti, zvolena nerezová ocel. Tloušťka stěn druhého stupně se pohybuje od 0,675 do 1 milimetru. Bez patřičných opatření by konstrukce 2. stupně zkolabovala vlastní vahou, proto se během kompletace používá podpůrná struktura. Po zkompletování je třeba konstrukci natlakovat, aby se zabránilo destrukci. Kvůli nízké tloušťce stěn je nutné postupovat odlišně než při konstrukci 1. stupně, neboť značná část ocelových částí, ze kterých je sestavován druhý stupeň, by nevydržela svou vlastní váhu. Také není možné použít třecího svařování s promísením, používá se svařování elektrickým obloukem. V celém procesu tvarování, kompletace a svařování je v maximální možné míře užito robotizace.

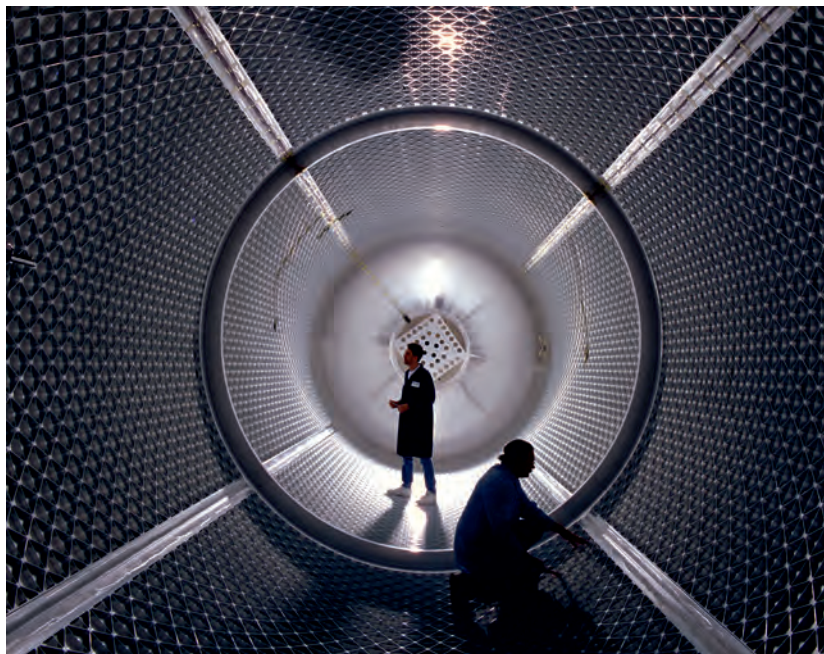
Finální kompletace druhého stupně, instalace elektroniky, motorů, nádrží s heliem a dalších důležitých částí probíhá v „čisté místnosti“, kde je koncentrace částic ve vzduchu uměle řízena a která je konstruována a využívána takovým způsobem, aby se minimalizovalo zanesení, generování a zadržování částic uvnitř tohoto prostoru.

## SMART Reuse

Pro raketu Vulcan se počítá s určitou mírou znovupoužitelnosti, pracovní filosofie je v tomto případě odlišná od raket Falcon 9 společnosti SpaceX nebo raket New

**Třecí svařování s mísením** – Friction Stir Welding, metoda svařování, která byla objevena v roce 1991 v Anglii v Ústavu svařování TWI. Podél spoje se pohybuje rotující nástroj, který vyvíjí třecím teplem. Materiál změkne a spojí se, aniž by došlo k jeho tání. Nástroj se otáčí kolmo na linii spoje, čímž dochází k mísení obou částí kovu.

Vnitřek válcového segmentu, který po kompletaci tvoří tělo rakety Atlas V. Uvnitř každého čtyřúhelníku je přepážka, která ho dělí na dva trojúhelníky (technologie Iso-grid). Zdroj: SmarterEveryDay, ULA.







Svařování svrchní kopule druhého stupně nazývaného Centaur. Zdroj: SmarterEveryDay, ULA.

Sheppard společnosti Blue Origin, jejichž první stupně přistávají pomocí raketových motorů. United Launch Alliance přišla se svou ideou nazvanou „SMART Reuse“, jejíž princip je následující: poté, co se oddělí druhý stupeň, první stupeň se ocitne na balistické dráze. Před vstupem do atmosféry se oddělí sekce s motory, u níž ochrání motory během nadzvukového vstupu do pozemské atmosféry nafukovací štít. V hustších vrstvách atmosféry se aktivují padáky, které let zpomalí natolik, že motorovou sekci zachytí helikoptéra ještě dříve, než se dotkne mořské hladiny.

Po této operaci bude sekce s raketovými motory podrobně prohlédnuta. Po provedení případných oprav bude sekce připravena k dalšímu letu. Finanční úspory budou značné, protože motorová sekce tvoří 2/3 ceny celého prvního stupně. Obdobný princip zachycení prvního stupně pomocí helikoptéry je testován pro rakety Elektron společnosti Rocket Lab.

V posledním desetiletí jsme svědky vstupu soukromého sektoru do dobývání kosmu. Kromě zlevnění raketové dopravy, které už nelze přehlédnout, je asi největším přínosem rozmanitost. Vidíme, jak se realizují různé zdánlivě slepé větve plánů z počátků éry kosmonautiky, stejně tak jako žasneme nad neotřelými návrhy uskutečňujícími se přímo před našima očima. Sotva Elon Musk naučil své rakety přistávat na raketovém plameni, už se rýsuje snad úspěšnější projekt zachytávání vyhořelých stupňů ještě za letu. Je zřejmé, že další fantastická řešení již klepou na dveře.

**Rocket Lab** – americko-novozélandský výrobce menších raket a družic. Společnost byla založena v roce 2006. V listopadu 2009 se stala první společností, která dosáhla z jižní polokoule oběžné dráhy. V roce 2017 začaly testy rakety Elektron, která by měla mít první start v roce 2022.

■ Vilém Boušek, aktualizace 2022, AB 29/2020

# Vesmírný dalekohled Jamese Webba

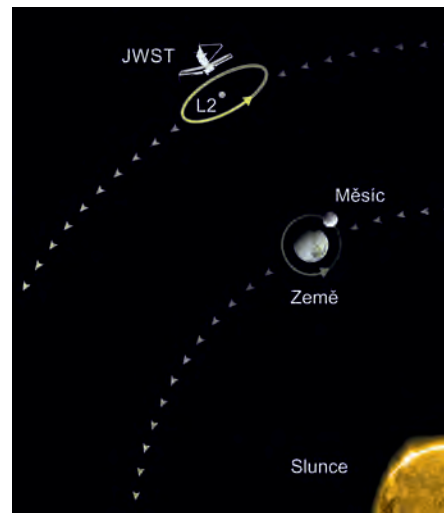
Po neustálých odkladech se astronomická obec konečně dočkala a dne 25. prosince 2021 se do vesmíru vydal dalekohled Jamese Webba pojmenovaný po druhém řediteli americké NASA. Přestože se často říká, že jde o následovníka Hubbleova dalekohledu, není to tak docela pravda. Hubble pozoruje vesmír na oběžné dráze Země, Webb pozoruje z Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, tedy 1,5 milionu kilometrů od Země, a to směrem od Slunce. V tomto místě je rušení Zemí minimální. Ale něco za něco: Hubbleův dalekohled nezářídka využíval k různým opravám a úpravám servisní mise, u Webba jsou vzhledem k jeho umístění takové mise vyloučené. Dalším podstatným rozdílem je spektrální obor. Hubble pozoruje ve vizuálním oboru s malým přesahem do ultrafialového a blízkého infračerveného oboru. Kvalitní optické dalekohledy dnes ale umíme postavit na zemském povrchu a není nutné je posílat do vesmíru. Proto vesmírný dalekohled Jamese Webba pozoruje v blízkém a středním (tepelném) infračerveném oboru. Většinu těchto vlnových délek atmosféra nepropouští, a pozorování infračervených zákoutí vesmíru je proto z povrchu Země nemožné. Oba dalekohledy tak v nejbližších letech nebudou soupeřit, ale naopak, vzájemně se při pozorování vesmíru doplňovat.

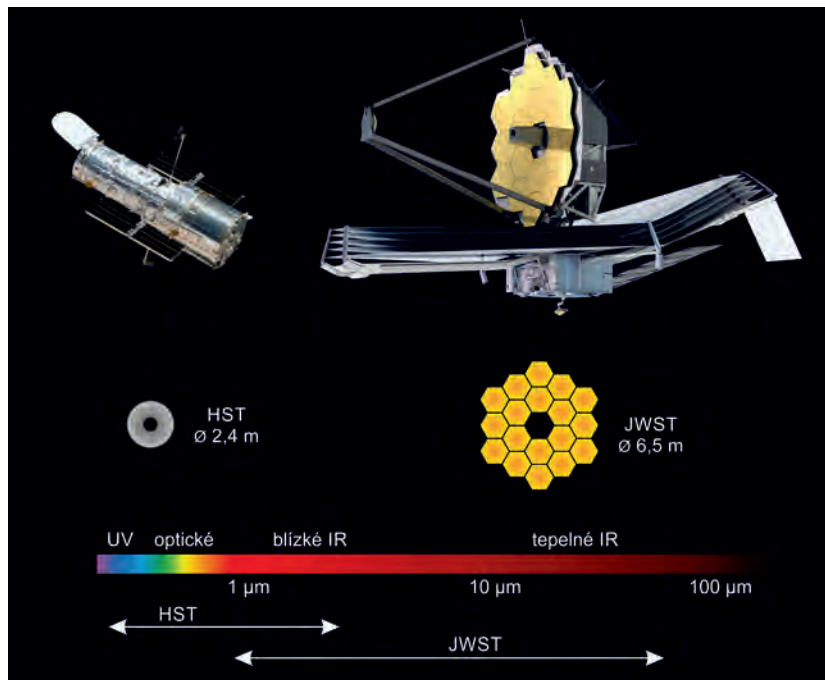
## První okamžiky

Největší podíl na neustálých zpožděních měla zejména zdoluhavá kontrola kvality zpracování a testování jednotlivých komponent. Velký problém byl například se slunečním štítem, u kterého bylo při testování zjištěno, že se tenké kaptonové fólie trhají a vznikají na nich malé prasklinky. Další problém byl odhalen při akustickém zátěžovém testu, kde se zjistilo, že některé šrouby a jejich podložky, které drží pohromadě sluneční štít se servisním modulem, se při testu povolily. Když vezmeme v úvahu, že těmito a v mnoha ohledech i horším nepříznivým podmínkám bude Webb vystaven při startu i za provozu, tak by jakákoli drobnost mohla mít fatální následky a mohlo by to znamenat neúspěch celé mise. Proto nemůžeme mít NASA za zlé, že na misi JWST pracovala tak dlouhou dobu. Preciznost a minimalizace poruchovosti celého zařízení byla v tomto případě klíčová.

**Ariane** – nosná raketa využívaná Evropskou kosmickou agenturou. Její název pochází z francouzského přepisu jména mytologické postavy Ariadne. Nosič byl vyvíjen od 70. let dvacátého století. První úspěšný start Ariane 1 proběhl v roce 1979. Dnes je k dispozici nosič Ariane 5 ECA s výškou 59 metrů, průměrem 5,4 metru, celkovou hmotností 770 tun a užitečným nákladem 10 tun. Právě tento nosič vynesl na orbitu dalekohled Jamese Webba. Rakety startují z kosmodromu Guayanského kosmického centra v blízkosti Kourou ve Francouzské Guyaně.

Dalekohled Jamese Webba obíhá kolem Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce a spolu s ním kolem Slunce. Zdroj: STScl.





Porovnání velikosti zrcadel a pozorovacího spektra HST a JWST. Zdroj: NASA.

**Guayanské kosmické centrum** – kosmodrom Evropské kosmické agentury, nacházející se v blízkosti městečka Kourou ve Francouzské Guayaně v Jižní Americe. Kosmodrom má velmi výhodnou polohu v blízkosti rovníku, startující rakety totiž získají v okamžiku startu bez jakéhokoli paliva oběžnou rychlost Země v daném místě (zde 460 m/s), která je na rovníku nejvyšší. Kosmodrom leží přibližně 500 km severně od rovníku na 5° 8' severní šířky a funguje od roku 1968. V současnosti se zde nachází pět odpalovacích ramp a montážní hala.

Nakonec jsme se dočkali. Šestitunový kolos odstartoval na palubě evropské rakety Ariane V ECA z kosmodromu Guayanského kosmického centra Evropské kosmické agentury v blízkosti Kourou ve Francouzské Guayaně. Stalo se tak o vánočních svátcích, 25. prosince 2021. Startu přenášenému po internetu přihlížely miliony lidí po celém světě. Start proběhl na výbornou a složený dalekohled se vydal na pouť k Lagrangeovu bodu. Po měsíci, 24. ledna 2022, byly již veškeré komponenty kompletně rozloženy: pětivrstvý sluneční štít, segmenty zrcadla i vše ostatní. Celá sestava vstoupila na orbitu kolem Lagrangeova bodu L2. Dne 18. února skončila první fáze (ze sedmi plánovaných) uvádění dalekohledu do provozu. Každé z 18

zrcadel samostatně zobrazilo hvězdu HD 84006. Do 25. února proběhly oživovací fáze 2 a 3 a segmenty začaly fungovat současně, i když ještě ne jako jeden celek. Několik týdnů se dalekohled bude chladit na pracovní teplotu. Celá kalibrace, kompletní nastavení a veškeré testy budou trvat pět měsíců, teprve pak začne plnohodnotný vědecký program dalekohledu, pravděpodobně tedy v době, kdy se tato knížka dostane na pulty knihkupectví.

## JWST a jeho specifikace

Primární zrcadlo o průměru 6,5 metru, sběrné ploše 25,4 m<sup>2</sup> a ohniskové vzdálenosti 131,4 m je složeno celkem z osmnácti šestiúhelníkových segmentů a díky tomu je velice snadné dle potřeby upravovat jeho zakřivení. Každý segment má hmotnost zhruba 20 kilogramů. Jsou vytvořeny z berylia a následně prošly povrchovými úpravami, a to včetně nanesení stonanometrové vrstvy zlata pro co možná nejlepší odrazivost infračerveného záření. Právě v infračerveném spektru

bude Webb zkoumat vesmír, a to zejména v jeho ranných stádiích, což nás posune o krok blíže ke komplexnímu pochopení toho, jak se například formovaly první galaxie po velkém třesku.

Aby teleskop podával ty nejlepší výsledky a aby se zabránilo nepříjemným rušivým jevům, je JWST vybaven pětivrstevným slunečním štítem o délce dvaceti metrů a šířce až sedmi metrů. Štít účinně tepelně izoluje dalekohled od slunečního žáru a umožňuje udržet pracovní teplotu dalekohledu 45 kelvinů, která je pro pozorování v infračerveném oboru nutností. Štít je vyroben z tenkých vrstev kaptonu, což je vlastně polyimidová fólie, která dokáže odolávat extrémním vnějším vlivům ve vesmíru. Srdcem celého teleskopu je servisní modul, který krom nezbytností, jimiž jsou fotovoltické panely, komunikační zařízení a manévrovací systémy, spojuje také dohromady sadu pěti vědeckých přístrojů a celou optickou soustavu se slunečním štítem. Tyto přístroje tvoří hned několik zařízení, která budou interpretovat snímání obraz přijatý z optické soustavy. Konkrétně jde o kameru pro blízký infračervený obor NIRCarn, což je něco jako hlavní oko JWST, které bude v infračerveném spektru zkoumat ty nejchladnější a nejvzdálenější hlubiny vesmíru. Další součástí je spektrograf NIRSpec, který umožní pořizovat spektra molekul v blízkém infračerveném oboru a zabývat se mezihvězdnou chemií. Pro střední infračervený obor bude sloužit přístroj MIRI, díky kterému se dozvíme něco více o zrození hvězd. Pomůže nám také prozkoumat detailněji objekty v Kuiperově pásu. Nesmíme zapomínat ani na naváděcí systém FGS (*Fine Guidance System*), který slouží ke správnému nasměrování teleskopu. Stará se nejen o pohyb celého dalekohledu, ale i o přesné formování primárního zrcadla. Zařízení aktualizuje data o své poloze ve vesmíru šestnáctkrát za každou sekundu. Bezšterbinový spektrograf NIRISS je určen především pro pozorování exoplanet v blízkém infračerveném oboru.

Webbův dalekohled obíhá kolem Lagrangeova bodu L2 soustavy Země – Slunce ve vzdálenosti necelých 400 000 kilometrů (zhruba vzdálenost Měsíce od Země). Jeden oběh trvá přibližně 6 měsíců. Na drahách kolem bodu L2 je řada dalších sond. Z funkčních sond jde o evropskou astrometrickou observatoř Gaia a americko-německou observatoř pro výzkum kosmického záření Spektr-RG. U Webbova dalekohledu by jakákoliv servisní mise byla velmi komplikovaná a drahá a není ani jasné, zda by se současnými technologiemi byla vůbec možná. Proto se se servisními misemi k dalekohledu nepočítá.

**Kuiperův pás** – oblast malých těles za drahou Neptunu. Vnitřní okraj pásu se nachází ve vzdálenosti asi 30 a vnější minimálně ve vzdálenosti 500 astronomických jednotek od Slunce. Je „položen“ do roviny ekliptiky. Dnes známe tisíce objektů Kuiperova pásu a předpokládá se, že existuje přes 100 000 objektů s velikostí větší než 100 kilometrů. Průměry těles nepřesahují (až na ojedinělé výjimky) 400 km. Celková hmotnost všech těles se odhaduje na 0,1 hmotnosti Země. Nejznámějším tělesem Kuiperova pásu je Pluto.

**Oortův oblak** – také Oortovo-Öpikovo mračno. Jedná se o jakousi zásobárnu kometárních jader, která se nachází ve vzdálenosti zhruba 20 000 až 100 000 astronomických jednotek od Slunce. Obsahuje velké množství nepravidelných těles s drahami o skloněch v rozmezí 0 až 90°. Jedná se většinou o slepence zmrzlých plynů, vodního ledu a úlomků hornin, které se dostávají do blízkosti Slunce vlivem gravitačních poruch. Jejich počet se odhaduje na jeden bilión při celkové hmotnosti do 10 Zemí.

Příprava vesmírného dalekohledu Jamese Webba – vibrační test. Zdroj: NASA, Chris Gunn.





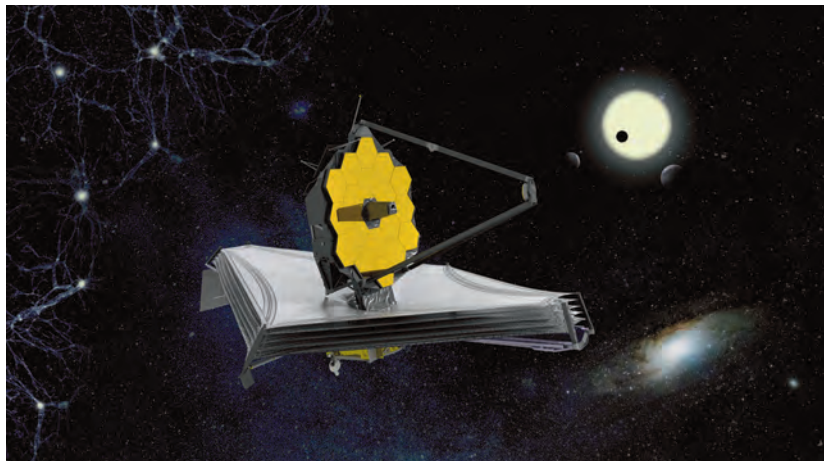


## Zajímavé cíle

Vědecký program dalekohledu bude ovlivněn zejména schopností dalekohledu pozorovat v infračerveném spektru. Svit dávných galaxií a prvních hvězd je expanzí vesmíru posunut právě do infračerveného oboru, a tak jedním z nejdůležitějších objektů pro pozorování budou velmi vzdálené galaxie a hvězdy pozorované v období jejich zrodu. Taková pozorování umožní sledovat vznik a vývoj hvězd a galaxií mnohem podrobněji, než jak to umožňuje jakýkoli dosud postavený dalekohled, a možná i pochopit roli a podstatu temné hmoty ve vesmíru. Infračervené světlo proniká prachoplennými oblaky mnohem lépe než viditelné, proto budou dalším cílem hvězdné porodnice, rodící se planetární systémy a mlhoviny. Spektrografy budou schopny podle charakteristického podpisu v infračerveném oboru vyhledávat organické molekuly v těchto systémech. Dalekohled Jamese Webba se ale nebude dívat jen ke vzdáleným objektům. Může pozorovat chladná zákoutí vesmíru – a taková zákoutí se nacházejí i v naší Sluneční soustavě, proto se jedním z prvních cílů dalekohledu Jamese Webba stane i Kuiperův pás a Oortův oblak.

Primární mise dalekohledu je plánována na 5,5 roku. Bude-li vše v pořádku, počítá se s prodloužením mise na deset let. Není ale vyloučeno, že by dalekohled Jamese Webba mohl poskytovat kvalitní vědecká data po dvě desítky let. Nezbyývá, než se těšit nejen na krásné fotografie, ale především na nové objevy, kterými nás Webbův dalekohled nepochybně zahrne.

■ **Martin Špírk, Petr Kulháněk, aktualizace 2022, AB 33/2020**



*Možné cíle pozorování dalekohledu Jamese Webba. Zdroj: ESA.*

← Nákres rakety Ariane 5 s dalekohledem Jamese Webba na palubě (nalevo); Ariane 5 na startovací rampě (napravo); kosmodrom ESA v Kourou (dole). Zdroj: ESA.

**Kerosin** – bezbarvá kapalina složená z uhlovodíků, podobná naftě. V domácnostech se používal v petrolejových lampách pod názvem petrolej. Používá se jako palivo v letadlech s tryskovým pohonem. Jeho výhřevnost je 43,1 MJ/kg. Kerosin spalovaný spolu s kyslíkem slouží jako raketové palivo. Kerosin (petrolej) má ale i další použití: je výborným rozpouštědlem, používal se při odstraňování vší z vlasů a v roce 1905 byl v New Orleans použit k ošetření vodních ploch, aby se zamezilo rozmnožování komárů přenášejících žlutou zimnici.

## Raketové motory

Nejslavnější raketa všech dob, Saturn V, která dopravila člověka na Měsíc, měla první stupeň poháněný pětici obřích motorů F-1 na kerosin a kapalný kyslík. Celkový tah motorů byl 34 meganewtonů. V současných raketových motorech může jako palivo posloužit kerosin, kapalný vodík a kapalný metan. Samotné palivo ale nestačí, druhou a neméně důležitou složkou je okysličovadlo. Ve většině chemických raketových motorů se používá jako okysličovadlo kapalný kyslík. Pojdme se seznámit s obecnými principy raketových motorů. Podrobněji si povšimneme zejména velikosti trysek a chlazení motorů. Poté se zaměříme na konkrétní konstrukce některých motorů.

### Princip motoru a velikost trysek

V raketových motorech probíhá chemická reakce, jejímž základem je hoření směsi paliva (kerosin, tekutý vodík nebo tekutý metan) a okysličovadla (kapalného kyslíku). Spálením této směsi ve spalovací komoře vznikne vysokotlaký horký výtokový plyn pohybující se podzvukovou rychlostí, který je následně tryskou odváděn ven a dle třetího Newtonova zákona akce a reakce raketu urychluje.

Aby raketa dosáhla nízké oběžné dráhy, potřebuje být urychlena minimálně na 1. kosmickou rychlost – 7,9 km/s (pro výšku 400 km nad povrchem při zanedbání vlivů atmosféry). Toho nedosáhneme jen prostým vypouštěním plynu z rakety. Aby byla účinnost motoru vysoká, je třeba, aby se výtokový plyn, procházející tryskou, pohyboval rychle. K „urychlení“ plynu se využívá jednoduchý fyzikální princip.

Mějme obyčejnou zahradní hadici, kterou protéká konstantní objem vody za jednotku času. Ve chvíli, kdy na hrdlo hadice přiložíme palec, zmenší se plocha, kterou voda teče ven. Aby protekl zúženým hrdlem za jednotku času stejný objem, musí se voda pohybovat rychleji a my pak můžeme bez námahy zalít i vzdálené záhony (ve fyzice hovoříme o rovnici kontinuity). Stejný princip funguje i s výtokovými plyny v trysece. Pokud zmenšíme

Různé varianty tétož motoru Merlin 1D společnosti SpaceX. Menší provedení trysek slouží pro starty ze země, větší je určené pro pohon ve vakuu. Zdroj: SpaceX.



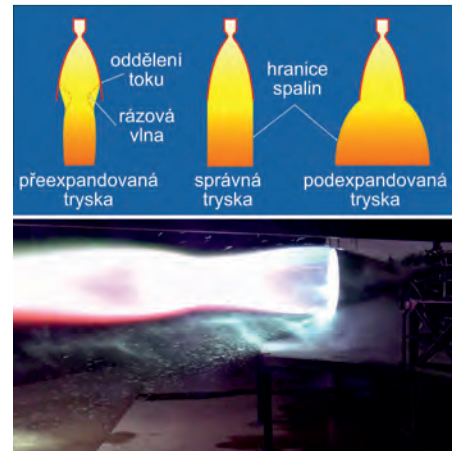


plochu, kterou plyn směřuje do trysky, zvýší se jeho rychlost na nadzvukovou a motor má vyšší účinnost.

Primární úlohou trysky je převést tepelnou energii horkého plynu, který vznikl při spalování paliva, na kinetickou. S rozšiřující se tryskou klesá tlak výtokových plynů a roste jejich rychlost. Pokud uděláme trysku dostatečně velikou, vyrovná se tlak výtokových plynů okolnímu tlaku vzduchu, což je pro činnost motoru ideální. Ve výšce hladiny moře dosahuje tlak vzduchu hodnoty přibližně 100 000 pascalů (newtonů na jeden metr čtvereční). Pokud tlak výtokového plynu dosahuje na konci trysky této hodnoty, říkáme o takovém motoru, že je optimalizovaný pro práci „u hladiny moře“. Problém však nastává ve chvíli, kdy raketa začne stoupat a tlak okolní atmosféry bude klesat. Za každých pět kilometrů výšky klesne přibližně na polovinu. A ve chvíli, kdy se raketa dostane na oběžnou dráhu, nachází se prakticky ve vakuu, takže k tomu, aby se tlak výtokových plynů alespoň přiblížil tlaku okolí, by byla potřebná tryska o nekonečné velikosti, tudíž musíme vzít za vděk kompromisem v podobě trysky s několikanásobným průměrem oproti trysce uzpůsobené pro fungování na úrovni mořské hladiny.

Jako příklad uveďme dvoustupňovou raketu Falcon 9, jejíž první stupeň (booster) je poháněn devíti motory Merlin 1D sl (písmena sl znamenají „sea level“, tedy mořskou hladinu) a druhý stupeň jedním motorem Merlin 1D vac (vakuum). Jak je patrné z obrázku, je tryska Merlinu optimalizovaná pro práci ve vakuu několikrát větší než Merlinu optimalizovaného pro práci u hladiny moře.

A co když nemá tryska v dané nadmořské výšce velikost odpovídající okolnímu tlaku? Pak hovoříme o *přeexpandované* nebo *podexpandované* trysce. U přeexpandované trysky mají výtokové plyny nižší tlak, než je tlak okolního vzduchu. Okolní vzduch stlačí výtokové plyny natolik, že se oddělí od povrchu trysky a v tomto místě vznikne charakteristická rázová vlna. Jevu lze zabránit zkrácením trysky. Naopak, u podexpandované trysky je tlak okolního vzduchu nižší než tlak výtokových plynů a plyn pokračuje v expanzi i po opuštění trysky. Energie na tuto expanzi se nevyužije na pohon rakety. Jevu lze zabránit prodloužením a zvětšením trysky. V obou dvou případech dojde ke snížení účinnosti konverze tepelné energie na pohybovou. Pokud chceme, aby byl náš motor co nejúčinnější ve vyšší nadmořské výšce, můžeme při startu použít přeexpandovanou trysku a smířit se s faktem, že prvních pár sekund letu bude mít motor nižší účinnost.



U přeexpandované trysky převyší tlak okolí tlak výtokových plynů a stlačí je. U podexpandované trysky je tomu naopak. V dolní části obrázku jsou testy metanového raketového motoru Raptor společnosti SpaceX. Tryska motoru se na povrchu Země chová jako přeexpandovaná. Zdroj: Rocketdyne, SpaceX.

**Okysličovadlo** – látka dodávající kyslík, který umožní hoření raketového paliva, tj. exotermickou reakci, při níž se uvolňuje energie v podobě tepla a dochází k rozpínání spalín. Nejčastějším okysličovadlem je kapalný kyslík nebo kapalný oxid dusičitý ( $N_2O_4$ ). Pevná raketová paliva mívají okysličovadlo jako svou součást.

**Zákon akce a reakce** – jeden ze tří Newtonových pohybových zákonů. V uzavřené soustavě je součet všech sil nulový, proto v případě jakékoli síly (akce) vzniká stejně velká reakce opačného směru. Princip akce a reakce se využívá například v raketových motorech.





Otázkou je, jak moc přeexpandovanou trysku lze udělat. Při zvětšování trysky se bude snižovat tlak výstupního plynu, až dojde k rozdělení toku, vzniku příčných rázových vln a ke snížení účinnosti motoru. K tomuto nežádoucímu jevu dochází, pokud je tlak výstupních plynů z trysky nižší než 40 % hodnoty tlaku okolí. Proto je vhodné pro starty s motory s přeexpandovanou tryskou používat kosmodromy ve vyšších nadmořských výškách, kde je nižší tlak vzduchu a dosáhne se v průběhu celého letu vyšší účinnosti přeměny tepelné energie na pohybovou.

## Bez chlazení není ježdění

Když už jsme si řekli něco málo o fungování raketových motorů, je třeba si říci o jistém problému, jenž provází fungování raketových motorů, a tím je uvolňované teplo. Každý, kdo si někdy hrál se sirkami, zjistil, že po jejím úspěšném zapálení vydává kromě světla i teplo, je to kvůli tomu, že hoření je exotermická reakce, při které dochází k uvolňování energie ve formě tepla. Teplota plynů ve spalovací komoře je několik tisíc stupňů Celsia a nutně dochází ke kontaktu plynu se stěnami spalovací komory a trysky. Těmto součástkám předá plyn část své energie v podobě tepla. Aby se předešlo poškození motoru, je nutné jej chladit. Způsobů je ve skutečnosti celá řada. Uvedeme si nejčastější z nich spolu s jejich klady a zápory.

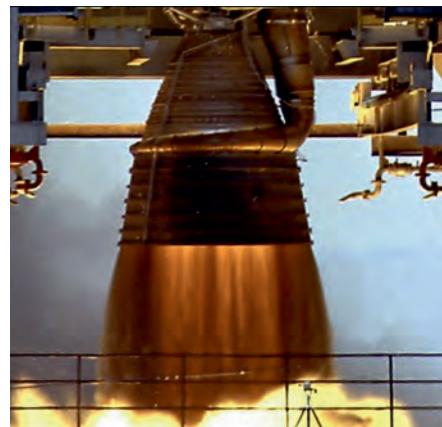
**Ablativní chlazení.** Tento typ chlazení využívají motory RS-68A, jež pohánějí rakety Delta IV Heavy. Princip je podobný jako u tepelného štítu, spočívá ve vrstvě grafitu uvnitř trysky a spalovací komory, která v průběhu letu sublimuje, a odletující částice grafitu s sebou odnáší část tepla, a tím se motor chladí. Kladem je relativní jednoduchost řešení. Hlavním záporem je fakt, že tyto motory jsou jen na „jedno použití“, neboť jakmile o grafit přijdeme, motor se chladit přestane. Navíc grafit nesublimuje v celém motoru rovnoměrně.

**Chlazení pomocí spalín a paliva.** Přenesme se nyní do druhé poloviny 60. let, kdy Spojené státy americké a Sovětský svaz soupeřily o to, kdo první pošle člověka na Měsíc. Sovětský svaz sázel na svou raketu N-1 a Spojené státy na raketu Saturn V a první stupeň této ikonické rakety poháněly motory F-1, které využívaly právě tento typ chlazení, jehož základem je vytvoření chladnější izolační vrstvy mezi výtokovými plyny a stěnami spalovací komory či trysky.

**Delta IV Heavy** – americká nosná raketa pro velké náklady. Vyvíjena byla společností McDonnell Douglas, později United Launch Alliance. Verze Heavy rakety Delta IV vznikla sdružením tří prvních stupňů raket Delta IV, označovaných jako CBS (Common Booster Stage), každý poháněný jedním motorem RS-68A s celkovým tahem 9,4 MN. Druhý stupeň označovaný jako DCSS (Delta Cryogenic Second Stage) pohání jeden raketový motor RL-10-B-2 s tahem 110 kN. Její rozměry jsou následující: výška 72 metrů, průměr 5 metrů (jeden CBS má průměr 5 metrů) a hmotnost 733 tun. Raketa je schopná vynést na nízkou oběžnou dráhu 28 tun nákladu a na geostacionární dráhu 14 tun nákladu. V roce 2014 vynesla kabinu Orion (test pro budoucí lety k Měsíci) a v roce 2018 sluneční sondu Parker Solar Probe.

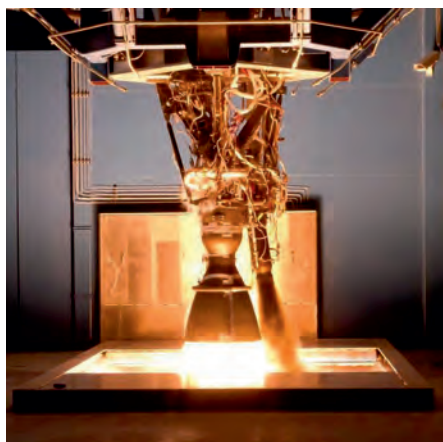
← Start rakety Delta IV Heavy, žlutooranžové zbarvení výtokových plynů je způsobeno přítomností grafitu. Zdroj: NASA, ULA, Rocketdyne.

Testovací zážeh motoru F-1. Dobře patrná je trubka na povrchu trysky, která slouží k jejímu chlazení za pomoci spalín z motoru. Zdroj: NASA.



**Černé těleso** – idealizované těleso, které absorbuje veškeré záření na něho dopadající. Těleso je v termodynamické rovnováze, takže je veškerá absorbovaná energie opět vyzařena, ale pouze povrchem. Střední volná dráha fotonů je natolik malá ve srovnání s rozměry tělesa, že foton z vnitřku tělesa nemůže uniknout. Na vyzařování se podílejí jen fotony v těsném okolí povrchu. Černé těleso vyzařuje spojitě spektrum záření (záření černého tělesa). Maximum vyzařování je na vlnové délce, která souvisí s teplotou povrchu. Čím vyšší je teplota, tím těleso vyzařuje na kratších vlnových délkách.

Test motoru Merlin 1D s otevřeným cyklem v texaské raketové zkušebně McGregor. Zdroj: SpaceX.



Motor F-1 se řadí do kategorie tzv. motorů s otevřeným cyklem (viz dále), používají směs okysličovadla a kerosinu. Aby mohla turbočerpadla dodávat palivo do spalovací komory, je nejprve nutné roztočit turbínu, která je poháněná, a aby došlo k roztočení turbíny, je potřeba část paliva odděleně spálit v plynovém generátoru. Takto vzniklé spaliny jsou ve většině případů odváděny mimo motor. Motor F-1 je ale výjimkou, neboť spaliny byly odváděny do trysky, kterou chladily – vytvářely vrstvu chladnějšího plynu, jež oddělovala stěnu trysky a výtokové plyny přicházející ze spalovací komory. Podivná trubka na povrchu trysky na obrázku na předchozí straně slouží k odvodu spalin z plynového generátoru do samotné trysky. Stejný princip využívá i motor Merlin 1D optimalizovaný pro fungování ve vakuu.

Chlazení trysky spaliny je jen jeden z důvodů proč na fotografiích ze startů Saturnů V vidíme výtokové plyny podivně zbarvené. Dalším důvodem je princip chlazení spalovací komory. Komora se chladí podobně jako tryska, jen namísto spalin je využíváno palivo. Ke stěnám spalovací komory je vstřikován kerosin, který se nespálí a funguje jako chladnější vrstva mezi výtokovými plyny a stěnou.

**Chlazení pomocí proudění paliva.** V anglosaské terminologii se tento princip označuje jako regenerativní chlazení (*regenerative cooling*). V principu jde o proudění kapalného paliva (kerosinu, vodíku či metanu) stěnami spalovací komory a trysky, čímž dochází k jejich chlazení na principu tepelného výměníku. K motorům chlazeným tímto způsobem patří například americké RS-25 či ruské (ex-sovětské) RD-180.

**Chlazení pomocí záření absolutně černého tělesa.** Absolutně černé těleso dokonale pohlcuje veškeré dopadající elektromagnetické záření a poté ho znovu vyzařuje. V rovnováze se jeho teplota ustálí a vyzařování v důsledku tepelné excitace atomů má charakteristický průběh intenzity v závislosti na vlnové délce popsany Planckovým vyzařovacím zákonem. Záření účinně ochlazuje vnitřní prostor „tělesa“. Množství unikající energie roste se čtvrtou mocninou rovnovážné teploty.

U tohoto druhu chlazení absorbuje tryska teplo, jež následně vyzařuje v podobě elektromagnetického záření do prostoru. V praxi tento princip můžeme vidět na motoru Merlin 1D vac, jenž pohání druhý stupeň rakety Falcon 9. Tento typ motoru Merlin využívá současně i chlazení pomocí spalin, které jsou odváděny do trysky.



Zaměříme se nyní na druhy klasických chemických raketových motorů, které dělíme podle způsobu spalování na motory s otevřeným cyklem, motory s uzavřeným cyklem (bohatým buď na palivo, nebo na okysličovadlo) a hybridní motory kombinující více přístupů.

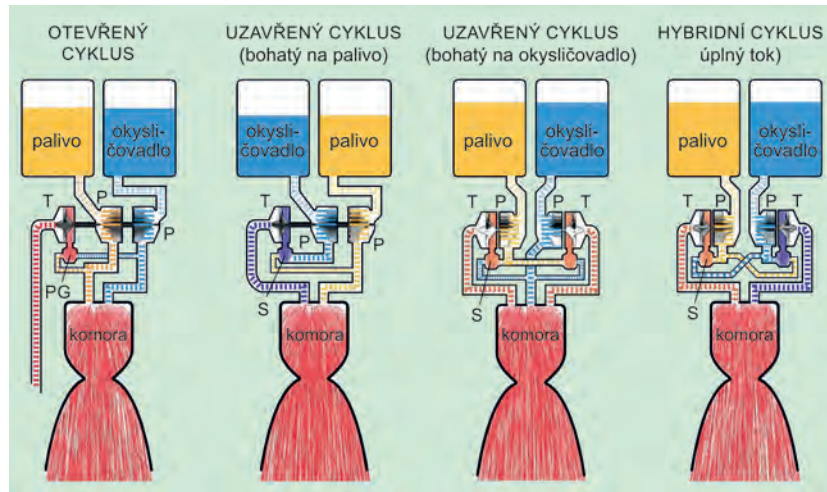
## Otevřený cyklus

Motor s otevřeným cyklem je nejjednodušším typem raketového motoru. Pracuje s kerosinem a okysličovadlem. Zjednodušeně lze činnost motoru popsat takto: součástí motoru je turbína, která spouští turbočerpadlo dodávající palivo do spalovací komory. Jak se ale turbína s turbočerpadly roztáčí? V tomto typu motoru se část paliva a okysličovadla spálí v plynovém generátoru a vzniklá energie se použije k roztáčení turbíny, která pohání turbočerpadlo. Vzniklé spaliny jsou odvedeny mimo motor a vypuštěny do atmosféry. Právě to je nevýhodou tohoto typu motoru, neboť je část paliva bez užítu vypouštěna pryč, a tím se účinnost motoru snižuje.

Asi nejznámějšími představiteli tohoto technického provedení jsou motory F-1, jež poháněly první stupeň legendární rakety Saturn V (spaliny z plynového generátoru byly využívány k chlazení trysky), dalším příkladem je motor Merlin, jež pohání nosné rakety rodiny Falcon. Motor Vulcain s otevřeným cyklem používá také Evropská kosmická agentura na svých raketách Ariane. Motor Vulcain má jako palivo kapalný vodík a jako okysličovadlo kapalný kyslík. Spaliny z plynového generátoru se u tohoto motoru používají částečně k chlazení dolní části trysky, kam jsou vedeny.

## Uzavřený cyklus (bohatý na okysličovadlo)

První použitelný motor s uzavřeným cyklem byl NK-15, jež byl vyvinut pro Sovětskou raketu N-1, která měla dopravit sovětské kosmonauty na Měsíc. Později byla vyvinuta vylepšená verze NK-33, jejíž derivát RD-180 pohání americké rakety Atlas V.

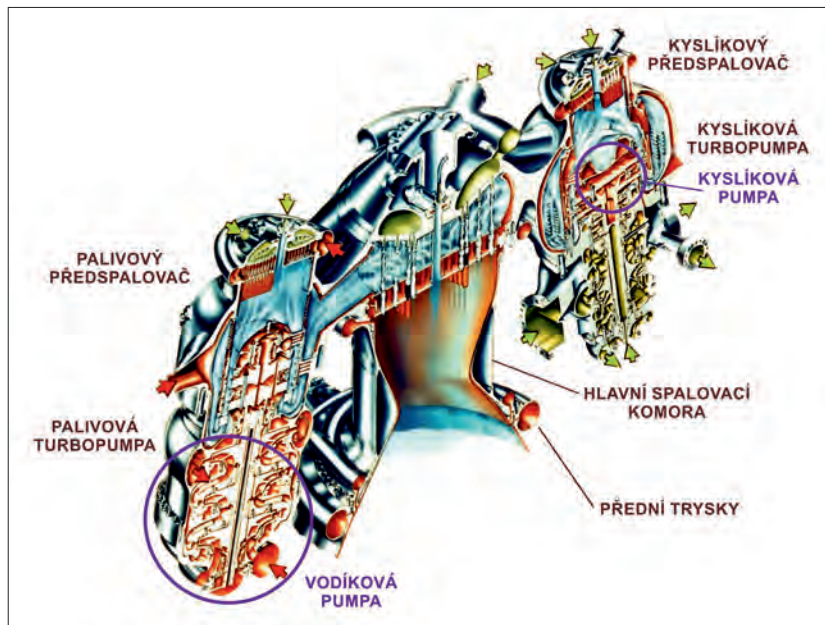


Typy raketových motorů. Symboly: T – turbína, P – pum-pa (turbodmychadlo), PG – plynový generátor, S – před-spalovač. Zdroj: Everyday Astronaut.

Převoz motoru RS-25 do testovací haly Stennisova středis-diska. Zdroj: NASA.







Americký vodíkový motor s uzavřeným cyklem, který potřebuje ke své činnosti dvě turbočerpadla a dva předspalovače. Zdroj: NASA, Rocketdyne.

Špičkový ruský raketový motor RD-180 využívají i američané v raketě Atlas V. Zdroj: NASA.



Jak se sovětské motory dostaly do současných amerických raket? Abychom na tuto otázku odpověděli, musíme se nejprve seznámit s konstrukcí motorů s uzavřeným cyklem. Při konstrukci kerosinového motoru s uzavřeným cyklem se musí vyřešit co udělat se spaliny, které vznikají v plynovém generátoru. Je jasné, že sloučeniny uhlíku z předspalovače není možné vést přímo do spalovací komory, neboť ji znečistí. Do předspalovače proto musí vtékat mnohem více okysličovadla než paliva. Jedině tak se výrazně sníží koncentrace sloučenin uhlíku, které vznikají při spalování kerosinu. Zahřátý tekutý kyslík, jenž je pod enormním tlakem, se následně využije k ro-

točení turbíny pohánějící turbočerpadla a poté je kyslík nasměrován dále do spalovací komory. Podmínky v turbíně jsou vskutku extrémní. Aby se zabránilo její destrukci, je vyrobena ze speciální slitiny. Vyrobit takovou slitinu se snáz řekne, než udělá. Vědci ve Spojených státech si mysleli, že je to zhora nemožné. Sovětským konstruktérům se ale podařilo vyvinout slitinu, která tyto podmínky vydrží. Po rozpadu Sovětského impéria koupila licenci na výrobu motorů společnost Rocketdyne, a tak se stalo, že sovětské motory pohánějí americké rakety.

### Uzavřený cyklus (bohatý na palivo)

Jelikož se ve Spojených státech nedařil vývoj motoru s uzavřeným cyklem pro kerosin, bylo rozhodnuto jako palivo použít kapalný molekulární vodík. Při spalování vodíku a kyslíku vzniká voda, která nepoškozuje spalovací komoru ani trysku, a tak se zrodil americký motor s uzavřeným cyklem založeným na vodíkovém palivu. Vzhledem k tomu, že je potřeba přibližně 2,7 litru kapalného vodíku na jeden litr kapalného kyslíku a navíc je tekutý vodík mnohem řidší než kyslík, jsou nutná dvě turbočerpadla a dva předspalovače.

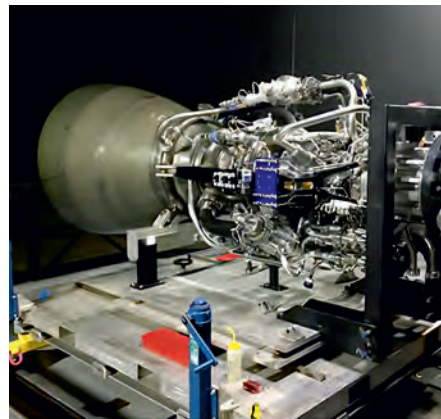
Pokud by došlo při úniku kapalného vodíku ke kontaktu s kapalným kyslíkem nebo hydroxylovými ionty OH, výsledkem by byl výbuch s fatálními následky. Proto jsou tyto motory extrémně komplikované a náročné na údržbu. Hlavním představitelem jsou motory RS-25, které poháněly raketoplány a v dnešní době se jimi budou pohánět rakety SLS pro program Artemis (obnovené lety s lidskou posádkou na Měsíc). Na rozdíl od raketoplánu, kde se motor využíval opakovaně, se u rakety SLS s jeho výlovem a opětovným využitím nepočítá.

### Uzavřený cyklus s úplným tokem

Anglicky se tento typ motoru nazývá „*Full Flow Staged Combustion cycle*“. Co se skrývá pod tímto „šileným“ názvem? V podstatě jde o předešlé dva typy motorů s uzavřeným cyklem v jednom. Motor má dva předspalovače a hlavní spalovací komoru. Ve dvou předspalovačích, jejichž plyny pohánějí turbíny pro turbočerpadla, se spaluje jak směs bohatá na palivo, tak směs bohatá na okysličovadlo. Motor v sobě kombinuje nejen výhody obou typů, ale především má vysokou účinnost. Aby motor vydržel pracovní podmínky, je opět zapotřebí velmi odolná slitina. Metalurgický tým SpaceX vyvinul superslitinu SX500, která vydrží působení horkého kyslíkového plynu i při tlaku přes 80 megapascalů. Elon Musk to komentoval slovy: „*Bylo to obtížné. Téměř všechny kovy za těchto podmínek shoří.*“

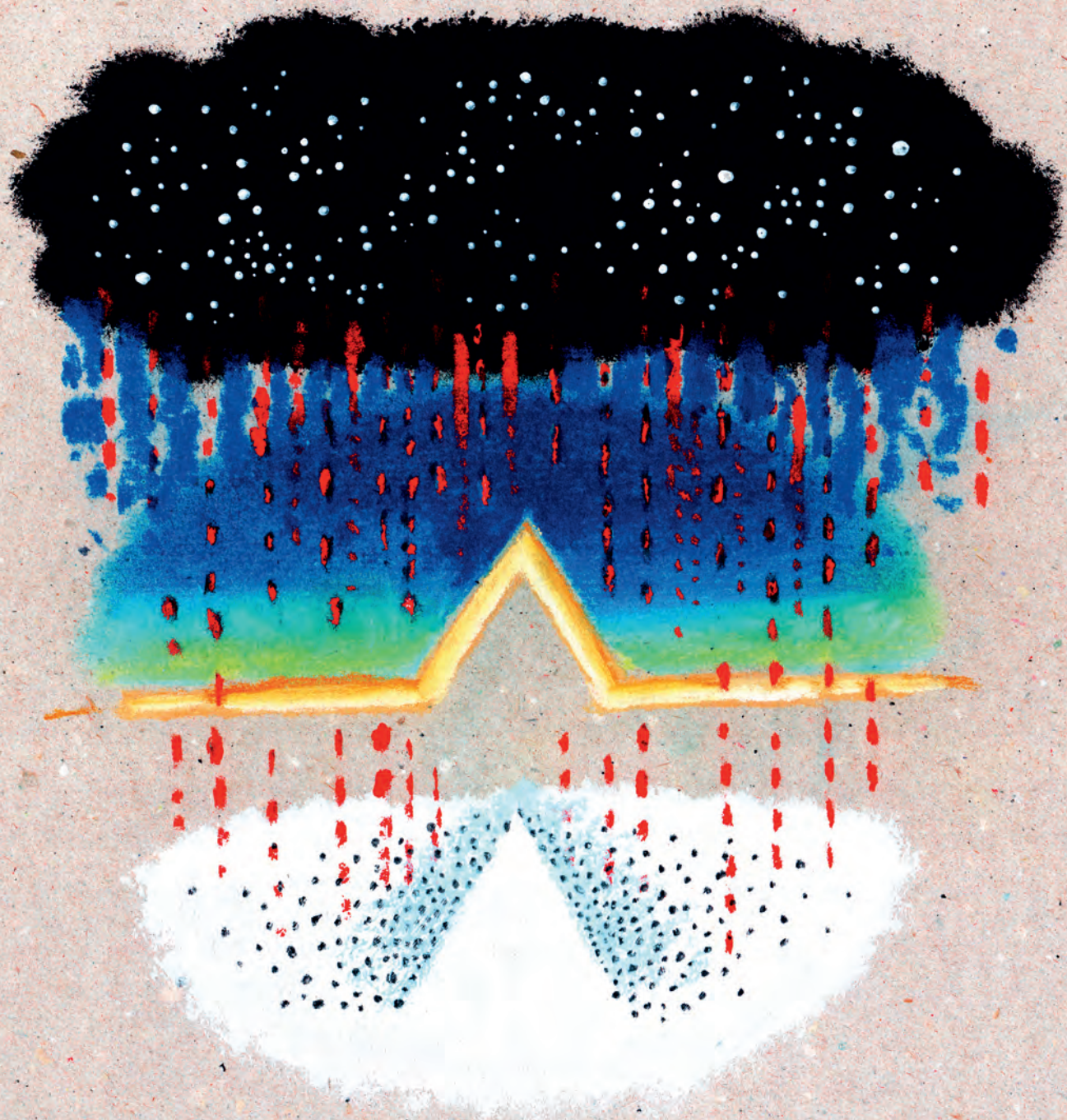
V historii byly pouze tři pokusy o vytvoření tohoto typu motoru a jedinou použitelnou konstrukcí je nyní motor Raptor od společnosti SpaceX využívající jako palivo kapalný metan. Motor Raptor bude pohánět novou generaci nosičů této společnosti.

■ Vilém Boušek, 7. 2. 2020, AB 5, 6/2020



Metanový motor Raptor společnosti SpaceX. Nahoře test samotného motoru, dole start lodi Starhopper s motorem Raptor. Zdroj: SpaceX.





## V. TECHNOLOGIE



## Optická pinzeta a příbuzné jevy

**Optická pinzeta** – laserové zařízení pro manipulaci s průsvitnými mikroskopickými objekty. Fokuseovaný laserový paprsek vytváří v ohnisku optickou past, ve které lze objekt držet jako v pinzetě. Ať se pohne kamkoli, vznikne síla vracející objekt zpátky do ohniska. Posunováním paprsku se přemísťuje i vybraný objekt. Optická pinzeta umožňuje manipulaci na buněčné úrovni.

Lom světla vede ke změně hybnosti světelného paprsku a tomu odpovídající síle. Dle zákona akce a reakce působí na kuličku síla opačného směru. Kromě této síly působí na kuličku rozptylové síly a gravitace. Správná pinzeta je navržena tak, aby při každém vychýlení kuličky z ohniska vznikla síla, která ji bude vracet. Zdroj: AGA.

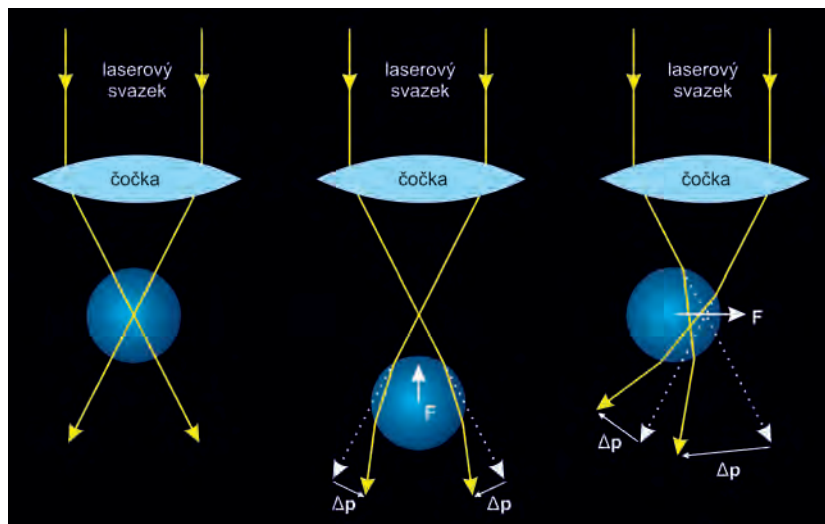
Může světlo působit na hmotu silou? Víme, že ano. Běžně se mluví o tlaku světla formujícím prachoplynné mlhoviny, kometární ohon je slunečním zářením vytlačován směrem od Slunce, sluneční plachetnice využívají tlaku záření ke svému pohybu, na zpomalených záběrech ze zkoušek laserových zbraní vidíme úlomky letící ve směru útočného paprsku... Všechny tyto jevy mají jedno společné: světlo působí na hmotu odpudivě, jako vítr, směrem od svého zdroje. Někdy to však může být i naopak.

### Objev pinzety

Nejznámější aplikací, ve které světlo působí i jinými silami, než odpudivými, je optická pinzeta. Optická pinzeta je zařízení umožňující uchopit do fokusovaného laserového paprsku mikroskopický objekt o velikosti desítek nanometrů až jednotek mikrometrů. Síly, o kterých je řeč, měříme v pikonewtonech (biliontinách newtonu).

Optickou pinzetu objevil americký vědec Arthur Ashkin, který již od 60. let 20. století pracoval na úkolu, který zní jako námět ze sci-

fi filmu: chtěl pomocí laseru pohybovat věcmi. Uvědomil si, že v laseru se na rozdíl od normálního světelného zdroje pohybuje světlo koherentně a není směsicí různých vlnových délek, které se rozptylují do všech stran. Proto má i ten nejostřejší laser intenzitu snižující se směrem od středu ke krajům, a tak vyvíjí různý radiální tlak na částice, které mu stojí v cestě v různých místech. Výsledek je překvapivý: laser tlačí objekty směrem do středu svazku a může s nimi pohnout. Pokud laserový svazek ještě fokusujete, jsou částice tlačeny a drženy v bodě s nejvyšší intenzitou



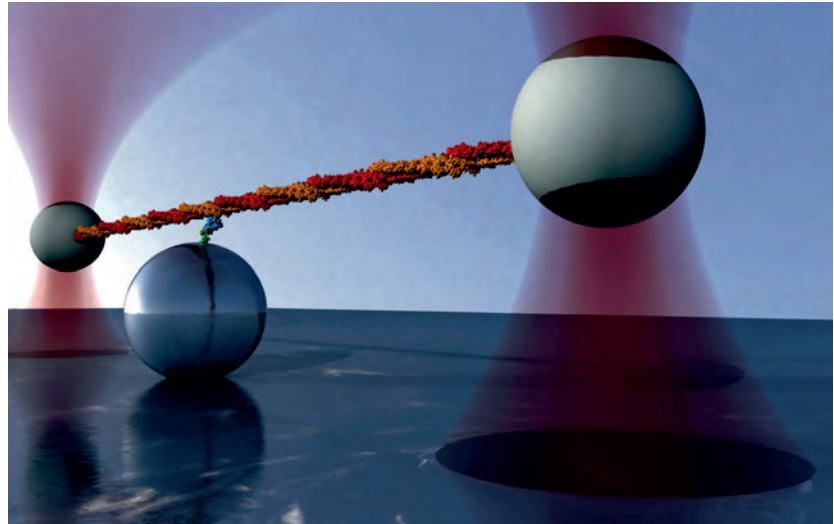
svazku (v jeho zúžení) a vytvoříte tak vlastně světelnou past. To se Ashkinovi skutečně podařilo a v roce 1985 vyvinul optickou pinzetu, která se dnes využívá k manipulaci částic, virů i celých buněk. Za tento objev v roce 2018 získal Nobelovu cenu za fyziku. V době převzetí ceny mu bylo 96 let a stal se tak nejstarším nositelem Nobelovy ceny za fyziku vůbec.

Princip optické pinzety je jednoduchý. Uplatňuje se při něm elektrická složka elektromagnetického vlnění. Ta je schopna polarizovat dielektrikum a následně ho silově ovládat. Je to obdobné, jako když tyčové magnety podléhají magnetickému poli, ale v tomto případě jde o pole elektrické a elektrický dipól. Světlo laseru dopadající na přemísťovaný objekt se v opticky hustším prostředí láme a na rozhraní ohýbá. Elektrická složka záření doslova obtéká objekt, čímž vzniká boční gradient elektrického pole a vytváří optickou past držící objekt.

## Živé objekty ve světelné pasti

Využití optické pinzety v biologii byla vlastně náhoda. Při pokusech s menšími částicemi nechal Ashkin experiment v laboratoři přes noc a ráno si všiml, že se v něm objevily bakterie. Kontaminace bakteriemi byla nežádoucí, fascinující ale bylo, že optická pinzeta zachycovala i bakterie. K velkému posunu došlo v roce 1987, kdy se poprvé podařilo zachytit bakteriální buňku bez jejího poškození. To otevřelo cestu ke zkoumání živých biologických systémů po jejich zachycení. Dokonce bylo zjištěno, že lze zachycovat molekuly přímo uvnitř živé buňky, a to bez poškození buněčné membrány.

Ashkinova technologie našla využití v mnoha experimentálních laboratořích. Například se pomocí ní zkoumala dynamika molekulárních motorů, jakým je kinezin. Ten nechali vědci pohybovat po sféře, která byla pomocí optické pinzety držena na místě, a bylo tak možné přesně změřit dráhu a způsob, jakým se kinezin pohybuje.



Částice jsou drženy v zúžení laserového svazku a lze s nimi relativně snadno manipulovat. Zdroj: Nature.

**Kineziny** – třída motorických proteinů v eukaryotických buňkách (buňkách obsahujících jádro a jiné organely oddělené membránami). Pomocí kráčivého pohybu po orientovaných lineárních tubulovitých mikrotubulech realizují nitrobuněčné pohyby například při dělení buněk či transportu vakuol.

**Polarizace dielektrika** – jev, při kterém se působením elektrického pole z neutrálních atomů a molekul stanou elektrické dipóly, tedy část kladného náboje jedinců se přesune ve směru pole a část záporného náboje proti směru pole.

## Příbuzné technologie

Použijeme-li kruhově polarizovaný paprsek, dokážeme na dálku přenášet na nesymetrické objekty i moment hybnosti. Díky tření přenášejí roztočené částice svůj pohyb na okolí, což vyvolává proudění. Tohoto efektu se využívá při konstrukci světlem řízených mikropump. V současnosti je známo a aktivně využíváno široké spektrum modifikací principu optické pinzety. K dispozici jsou optické natahovače využívající vstřícných laserových paprsků, optické pikotenzometry k měření nepatrných sil v řádu pikonewtonů nebo ramanovská pinzeta kombinující mikromanipulační metody se spektroskopickými technikami, díky nimž můžeme měřit vibrační spektrum chemických vazeb bez nutnosti modifikovat vzorek fluorescenčními metodami. To je výčet pouze nejvýznamnějších aplikací.

## Okolí černého tělesa

V nedávné době proběhl pokus, který potvrdil, že na polarizované mikroobjekty může působit nejen světlo koherentního monochromatického laserového paprsku, ale i širokopásmové záření absolutně černého tělesa. Síly, které tu vznikají, působí směrem ke zdroji a mohou být dokonce silnější než gravitační síla (asi dvacetkrát) a překonají i tlak záření. Ve výsledku se pak částice mohou pohybovat směrem ke zdroji, proti toku záření. Profesor Helmut Ritsch s manželkou a Mathiasem Sonnleitnerem z Innsbrucké univerzity připravili pokus, který probíhal

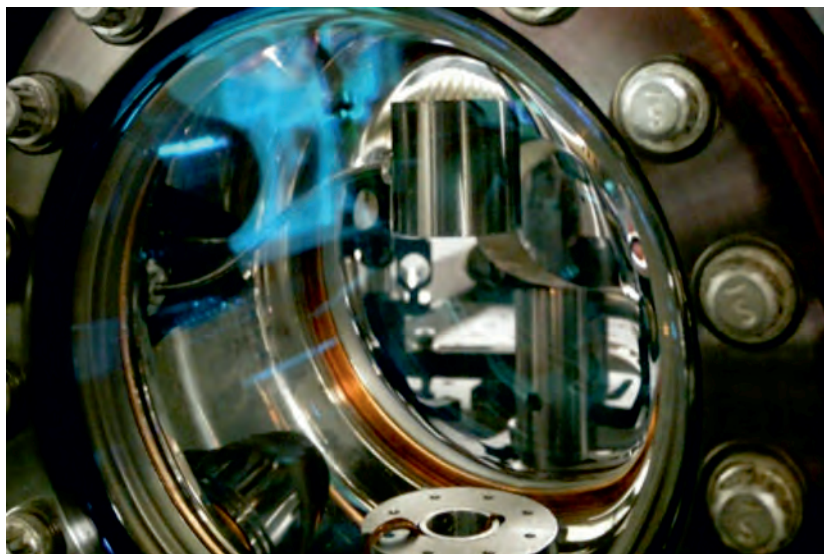
ve vakuované nádobě s cesiovými atomy. Cesiové atomy byly pro pokus výhodné pro svůj nezájem o elektromagnetické záření. Pro záření o teplotě do 500 K je cesium prakticky průhledné. Aby průběh pokusu nerušil ani tepelný šum, byly atomy vychlazeny metodou laserového ochlazování na pouhých 300 nK.

V horní části komory umístili experimentátoři absolutně černé těleso reprezentované dutým wolframovým válcem, který opakovaně zahřívali laserem na 460 K

*Molekulární motor – kinezin – kráčí po mikrotubulu a vleče za sebou buňku. Pohyby kinezinů byly zkoumány pomocí optických pinzet. Zdroj: John-Liebler, Art of the Cell.*



a pak nechali šest hodin chladnout až na pokojovou teplotu, aby získali údaje v širokém teplotním rozsahu. Atomy cesia vynášeli vzhůru laserovými impulsy v intervalech 65 ms. Jejich délkou a intenzitou rozhodovali, zda bude atom vynešen, či ne. Dále nahlíželi na atomy jako na hmotnostní vlny a studovali jejich fázový posun. Systém se choval jako atomový interferometr, s jehož pomocí přesně změřili zrychlení cesiových atomů. Naměřené hodnoty dobře souhlasily s teoretickou předpovědí. Gradient nutný k tomu, aby vznikly potřebné síly, je zde důsledkem blízkosti zdroje záření (3,7 mm). Výsledné zrychlení směřovalo ke zdroji, klesalo s třetí mocninou vzdálenosti a stoupalo s rostoucí teplotou. Z výpočtů dále plyne, že při teplotě v řádu tisíců kelvinů se síla vytrácí a později se mění na odpudivou.



*Pohled do komory s cesiem. V horní části je vidět wolframový válec v roli absolutně černého tělesa, jehož záření silově působí na polarizované mikroobjekty. Zdroj: Innsbrucká univerzita.*

## Mlhoviny a tvorba planet

Očekává se, že v blízké budoucnosti budeme muset přehodnotit některé modely procesů v prachoplynných mlhovinách. Ukazuje se, že nejmarkantněji se přitažlivé síly absolutně černého tělesa projevují u drobných prachových zrn a plynu. Takové síly by mohly mít zásadní význam při formování mlhovin a tvorbě planet. Zůstává otevřená otázka, jak se efekt projevuje v astrochemii. Je však jisté, že se dotkne všech metodik měření, kde se pracuje s nepatrnými silami. Typicky měření základních konstant, gravitace nebo testování teorie relativity. Na závěr dobrá zpráva pro příznivce jachtingu na Sluncem poháněných plachetnicích. Sluneční plachetnice budou nadále urychlovány světlem pryč od Slunce. Při teplotách záření kolem 6 000 °C už přitažlivost mizí, nehledě na to, že ve vzdálenostech, ve kterých sluneční plachetnice mohou operovat, je již gradient záření zanedbatelný.

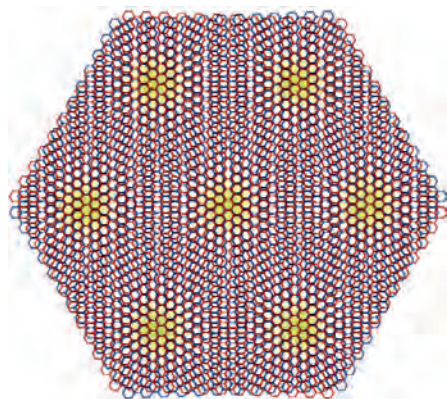
■ Lucie Kulhánková, Rudolf Mentzl. 2018, AB 3, 36/2018



**Supravodivost** – vedení elektrického proudu za nulového odporu. Supravodivost objevil v roce 1911 Kamerlingh-Onnes, který zjistil, že při ochlazení rtuti pod teplotu 4,2 K dochází k prudkému poklesu elektrického odporu až na milióntinu původní hodnoty. Za tento objev obdržel v roce 1913 Nobelovu cenu za fyziku, ale ještě dlouho trvalo, než se podařilo vysvětlit, proč se elektrony v ochlazeném materiálu pohybují bez odporu.

**Vysokoteplotní supravodivost** – supravodivost keramických materiálů za teplot vyšších než 30 K. Nový typ supravodivosti objevili Karl Alex Müller a Johannes George Bednorz v roce 1986. Poté následoval objev supravodičů za teplot vyšších, než je teplota zkapalnění dusíku (77 K). Většinou jde o různé oxidy mědi kombinované se vzácnými kovy. Karl Müller a Johannes Bednorz za objev získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1987.

Moaré obrazec vzniklý pootočením dvou šestiúhelníkových sítí o malý úhel. Zdroj: MIT, Pablo Jarillo-Herrero.



## Kroutíme, kroutíme aneb twistronika na scéně

Pokud skládáme dva rovinné periodické obrazce, které jsou si blízké, dostaneme jako výsledek kvaziperiodickou strukturu, jíž se říká moaré (z francouzského slova *moiré*). Na doprovodném obrázku jsou sloučeny dvě šestiúhelníkové sítě, které byly dány nad sebe a jedna z nich pootočena. Moaré je často na obtíž, zejména při fotografování. Fotografie jemně kostkované košile může díky interferenci s mřížkou optického čipu fotoaparátu dopadnout prachbídne. Moaré obrazce nejsou vždy jen na škodu, můžeme je někdy využívat i v našich technologiích. V roce 2018 proběhly první experimenty s dvěma pootočenými grafenovými listy. Každý z nich je v jednom směru dobře vodivý a v druhém se chová jako izolant. Ale kombinace dvou pootočených vrstev do moaré obrazce je při určitých úhlech supravodivá. O pouhý rok později ukázali vědci ze Šanghajske dopravní univerzity, že moaré obrazec může dokonce změnit rozbíhavý laserový paprsek v soliton. Tento objev by mohl mít značný význam pro technologie přenosu informací světlem na velké vzdálenosti. Technologie založené na pootočení (zkroucení) dvou vrstev dokonce získaly své jméno – *twistronika*.

### Grafenový supravodič

Objev grafenu (atomární monovrstva či dvojvrstva složená z atomů uhlíku seskupených do šestiúhelníků) přinesl materiál zcela mimořádných vlastností. Je ohebný, takže se z něho dají vyrábět displeje, které stočíte do ruličky, je extrémně pevný, takže ho lze využít na namáhané konstrukční prvky a má silně anizotropní tepelnou vodivost, takže může sloužit jak pro odvod tepla, tak jako tepelná izolace. Aplikace tohoto relativně nového materiálu se jen hrnou. V roce 2018 se ukázalo, že se grafen za určitých okolností stává supravodičem.

Každá grafenová vrstva je tvořena sítí šestiúhelníků, v jejichž vrcholech jsou atomy uhlíku. Tyto atomy jsou velmi silně vázány v rámci jedné vrstvy grafenu, vazba mezi sousedními vrstvami je výrazně slabší, což umožňuje snadno na sebe umisťovat jednotlivé vrstvy (někdy se také říká listy) grafenu. Elektrony pohybující se v takové šesteřečné mříži mají nezvyklé vlastnosti. Skupina vědců z americké MIT zkoumala pod vedením Pabla Jarillo-Herrera vlastnosti dvou vzájemně

pootočených listů grafenu. Při velmi malých úhlech (kolem jednoho stupně) se objevují typické periodické obrazce, tzv. *moaré*. Moaré vytváří periodickou krajinu, kterou mohou elektrony cestovat, a jejich pohyb lze snadno ovládat přímo na atomární úrovni natočením dvou sousedních vrstev vůči sobě. Elektrony jsou na změnu obrazce moaré mimořádně citlivé.

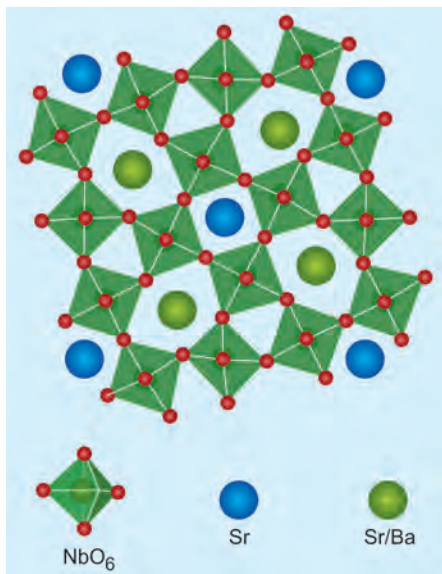
Doktor Jarillo-Herrero se svou skupinou zjistil, že při úhlu natočení dvou sousedních vrstev přibližně o  $1,1^\circ$  vykazuje dvojice vrstev supravodivé vlastnosti, tj. odpor kladený pohybu elektronů klesá k nule. Supravodivé vlastnosti extrémně závisí na úhlu natočení vrstev. Při úhlu  $1,16^\circ$  se supravodivost objevuje při teplotě desetin kelvinů. Ale při úhlu  $1,05^\circ$  se supravodivost udrží až do 1,7 kelvinu! Je to dobře patrné v horní části fázového diagramu (viz obrázek na následující straně). Supravodivé oblasti jsou tmavě modré, kovové vlastnosti odpovídají bílé barvě a izolátor (odpor v jednotkách kiloohmů) je označen červeně. Nejde o klasický izolátor, ale o tzv. *Mottův izolátor*. Tak jako u každého supravodiče je i zde oblast supravodivosti závislá na přítomném magnetickém poli a při vyšších hodnotách pole supravodivé vlastnosti mizí. Fázový diagram supravodivých vlastností je podobný jako u vysokoteplotní supravodivosti (zejména blízkosti supravodivé a Mottovy fáze), což dává naději, že by i zde mohlo jít o obdobný mechanismus. Důvody vysokoteplotní supravodivosti jsou známy jen v hrubých obrysech. Supravodivost vysokoteplotních keramik souvisí s pohyby elektronů v sousedních krystalických vrstvách. Za párování elektronů jsou pravděpodobně zodpovědné spinové excitace, které se chovají jako výrazně anizotropní rovinné kvazičástice lokalizované v Cu-O rovinách. Mechanismus grafenového supravodiče by mohl být obdobný, ale na definitivní soudy je ještě příliš brzy.

Skupině doktora Jerillo-Herrera se podařilo připravit velmi exotický supravodič, jehož vlastnosti extrémně závisí na úhlu pootočení dvou sousedních grafenových vrstev a samozřejmě také na elektrickém poli, magnetickém poli a na teplotě. Pokud se prokáže, že mechanismus objevené supravodivosti je blízký vysokoteplotní supravodivosti, není vyloučeno, že pro některé parametry půjde vytvořit supravodivý materiál i za podstatně vyšší teploty než dosavadních 1,7 kelvinu. Pokud se tak stane, umožní to zcela nové technologie výroby levných supravodičů a není ani vyloučeno, že jsme se konečně přiblížili snu o stabilním supravodiči za pokojové teploty.



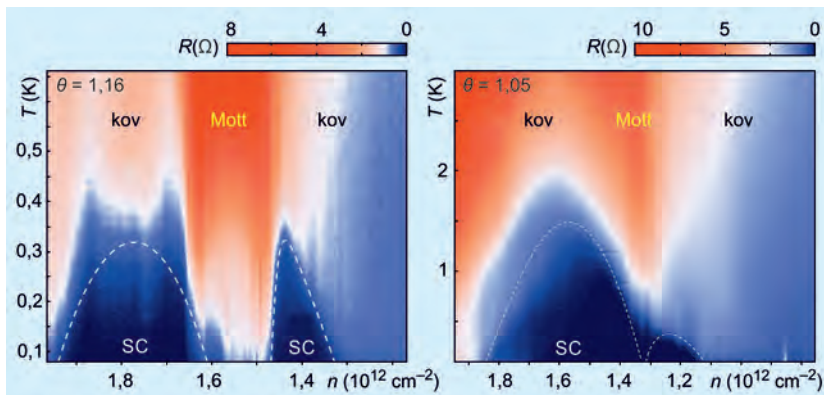
Grafenový list. Zdroj: Spektrum.

**Mottův izolátor** – skupina nevodivých materiálů, které by podle standardní pásové teorie měly být vodiči. Jev je způsoben párovými interakcemi elektron-elektron, které pásová teorie neuvažuje. Jev se vyskytuje za nízkých teplot například u sloučenin NiO nebo CoO. Chování těchto látek vysvětlil až model z roku 1977.



Při laserových experimentech byly použity krystaly SBN tvořené stronciem, baryem a niobátem  $\text{NbO}_6$ . Zdroj: Yi Li a kol., Computational Materials Science.

Fázový diagram dvou pootočených vrstev grafenu. Supravodivá fáze je označena SC. Na vodorovné ose je koncentrace elektronů. Zdroj: MIT, Pablo Jarillo-Herrero.

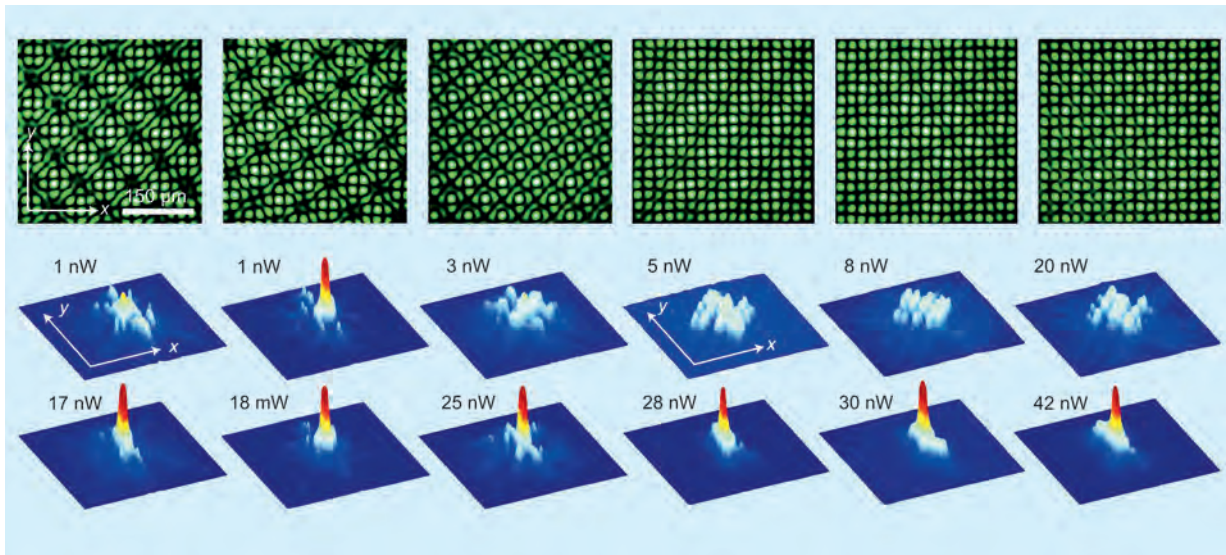


## Solitony a moaré

Za normální situace vykazují každý vlnový balík disperzi a postupně se rozplývá, tedy rozšiřuje se a slábne. V některých situacích ale zafungují nelineární jevy, které naopak vlnový balík komprimují a zvětšují jeho výšku. Pokud se oba jevy přesně vyrovnají, vznikne *soliton* – osamocená vlna, která se velmi dlouhou dobu šíří beze změny tvaru a velikosti (viz str. 167). Některé solitony se dokonce mohou potkat, projít jeden druhým a pokračovat v pohybu dál v nezměněné podobě. Dnešní fyzika zná velké množství solitonů vznikajících za nejrůznějších podmínek. A vůbec už nemusí jít o vzedmutou vodní hladinu, jak tomu bylo u prvních pozorování. Například v plazmatu mohou vznikat jakési dutiny, v nichž je pole slabší než v okolí. Tyto dutiny se šíří plazmatem beze změny tvaru a velikosti. Solitony známe také v kmitajících krystalech a solitonem je i světelný impulz šířící se světelným vláknem na velké vzdálenosti.

Skupina vědců ze Šanghajske dopravní univerzity, kterou vede čínský fyzik Fangwei Ye, konala experimenty s laserovým světlem procházejícím dvěma tenkými krystalickými vrstvami. Jako látku použili krystaly SBN:61 (stroncium, baryum, niobát) s kubickou podmřížkou. Laserové světlo se ohýbalo na dvou pootočených krystalických mřížkách. Následné spojení obou částí svazku vedlo při vhodném úhlu vzájemného pootočení k solitonovému chování. Jde o vůbec první pozorování solitonu vzniklého na moaré struktuře dvou tenkých vrstev. Ukázalo se, že při určitých úhlech pootočení jsou fotony natlačeny do úzkého pásu energií a v moaré struktuře vzniknou excitace (světelné módy), u nichž je disperze velmi malá, a proto postačí jen nepatrné nelineární jevy, které disperzi kompenzují do solitonového řešení. Vhodnou geometrií lze snadno měnit parametry konfigurace a ovlivňovat fyzikální vlastnosti vzniklého solitonu. Zajímavé je, že existuje určitý prahový výkon laseru, pod nímž se solitony nevytvorí. Experimenty se dvěma pootočenými vrstvami nějaké periodické struktury nabírají na obrátcích





a lze očekávat, že v brzké budoucnosti povedou k dalším zajímavým a možná i exotickým vlastnostem různých látek. Před našima očima tak v těchto letech vzniká zcela nová disciplína, které se říká *twistronika*. Slovo vzniklo obdobně jako elektronika (využívá elektrický náboj) nebo spintronika (využívá spin částic). Twistronika využívá potočení či zkroucení (*twist*) dvou tenkých periodických struktur nad sebou. Na další twistronické objevy se můžeme jen těšit.

*Vznik solitonů. V horní části jsou moaré obrazce, v dolní tvary impulzu v závislosti na jeho výkonu. Vyšší výkony v poslední řadě mají vždy solitonový charakter. Zdroj: Qidong Fu a kol., Šanghajská univerzita, Nature Photonics.*

■ Petr Kulhánek, 25. 12. 2020, AB 21/2019, 41/2020

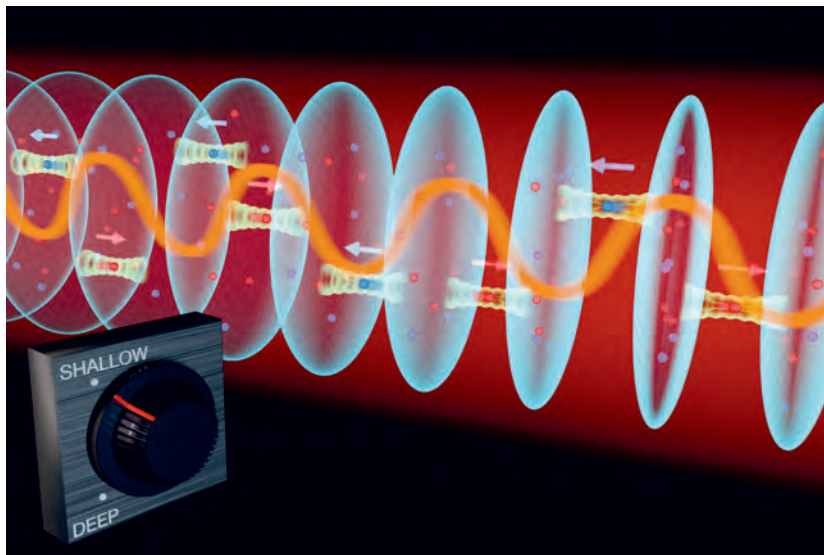


## Atomové hodiny útočí na optické frekvence

**UTC** – *Universal Time Coordinated*, univerzální koordinovaný čas. Časová stupnice získaná průměrováním měření mnoha desítek cesiových atomových hodin pracujících v řadě metrologických laboratoří po celém světě. Od ní je odvozen občanský pásmový čas a také známé časové signály šířené rozhlasovým vysíláním.

**NIST** – *National Institute of Standards and Technology*, americký Národní institut pro standardy a technologie. Založen byl v roce 1901. Jeho laboratoře se nacházejí v Boulderu (Colorado) a v Gaithersburgu (Maryland).

Atomy stroncia uvězněné v optické mříži vytvářené laserem (oranžová vlna). Dva stavy atomů jsou označeny červenou a modrou barvou. Zdroj: JILA.



Současné technologie jsou mnohdy závislé na extrémně přesném měření času. Dosavadní časový standard UTC (*Universal Time Coordinated*) je založen na globální síti cesiových atomových hodin. Časový signál je získáván průměrováním jejich „tikotu“. Cesiové hodiny fungují v mikrovlnné oblasti na frekvenci 9 GHz. Dlouhodobou snahou je vyvinout atomové hodiny v optické oblasti, tj. na terahertzových frekvencích, které by umožnily vyšší přesnost časového signálu. Bohužel s sebou změna frekvence přináší řadu problémů. Časový signál není možné odečítat trvale, mezi měřeními je tzv. *mrtvý čas*, měření jsou zatížena Dickovým šumem a nově konstruované hodiny zatím nejsou schopné opustit brány laboratoří. Špičkou v této oblasti je americký Národní institut pro standardy a technologie (NIST), který více než metrologický ústav připomíná výjimečnou kvantovou laboratoř, v níž pracovala a pracuje řada nositelů Nobelových cen. V laboratoři JILA, která je společná NIST a Coloradské univerzitě, vyvíjejí optické atomové hodiny založené na ytterbiu a stronciu. Jinou perspektivní mož-

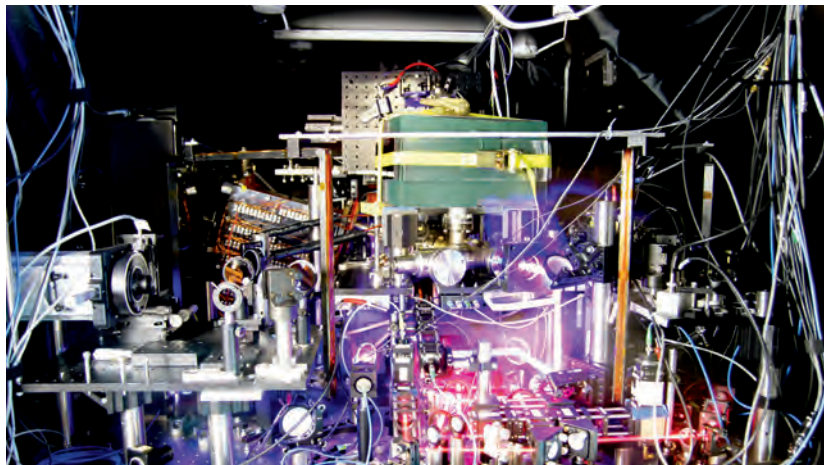
ností je využití přechodů atomového jádra namísto přechodů v celém atomu. V roce 2019 bylo dosaženo desetinásobně vyšší stability stronciových hodin oproti běžným cesiovým standardům a zdá se, že přesnost a stabilitu signálu bude možné ještě o řád zvýšit.

### Na cestě k optickým frekvencím

Jako nejvhodnější pro využití optických frekvencí se jeví hodiny fungující na kvantových přechodech v ytterbiu či stronciu. Základem jsou dva lasery. První z nich vytváří periodické prohlubně potenciálu, v nichž jsou zachyceny

tisícovky atomů (hovoříme o lineární optické mříži atomů) a druhý laser zajišťuje excitaci těchto atomů do vyššího energetického stavu. Měření frekvence nemůže bohužel být kontinuální, existuje mrtvý čas, v němž se systém zotavuje, a atomy jsou opětovně buzeny do vyššího energetického stavu. Dalším problémem je Dickův šum, který lze částečně eliminovat chlazením hodin na velmi nízkou teplotu.

První varianty optických hodin využívaly v mrtvých časech vodíkový maser – obdobné zařízení jako klasický laser, ale pracující v mikrovlnném oboru spektra. Ten nahradil časový signál v periodách, kdy nebylo možné provádět měření optického signálu přicházejícího z hodin. Takové řešení je sice možné, ale není ideální, protože mikrovlnný signál snižuje přesnost a stabilitu hodin (přesnost určuje, o kolik se signál odchýlí od reality za danou dobu; stabilita určuje, zda je interval mezi různými „tiknutími“ shodný i po dosti dlouhé době). Cílem bylo vytvořit plně optické hodiny, které by i v období mrtvého času využívaly optickou frekvenci. Takové řešení se podařilo při spolupráci tří subjektů: Národního institutu pro standardy a technologie v Boulderu, Coloradské univerzity (tamtéž) a německé laboratoře PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) v Braunschweigu. Složený vědecký tým zkonstruoval hodiny založené na atomech stroncia  $^{87}\text{Sr}$  zachycených v optické mříži, jejichž „tikot“ v mrtvých časech supluje lokální oscilátor – diodový laser, jehož světlo je uvězněno až po dobu 100 sekund v křemíkové optické dutině chlazené na teplotu 124 kelvinů. Schema tohoto zařízení naleznete na následující stránce. Nové hodiny dosáhly chyby určení času jen 48 pikosekund za období 34 dní, což je desetinásobně lepší než u stávajících cesiových hodin. Ukázalo se, že při několikaměsíčním průměrování je možné dosáhnout stability  $10^{-17}$  a v budoucnosti je realistické stabilitu ještě o řád zlepšit. Mohlo by se zdát, že jde o přesnost daleko za hranici lidských potřeb. Pro vědecký výzkum na hranici lidského poznání je taková přesnost nutná a časem bude nepochybně ještě překonána.



Celkový pohled na stronciové atomové hodiny vyvíjené v JILA. Zdroj: NIST.

**Dickův šum** – změna sledované průměrné frekvence pasivního frekvenčního standardu způsobená interakcí s měřicím zařízením, které v pravidelných cyklech měří frekvenci oscilátoru. Měřicí zařízení je zpravidla realizováno jako zpětnovazební smyčka, která měří a průměruje frekvenci oscilátoru v nějakých cyklech. Do měření zanášá šum v okolí periody měřících cyklů a jejich vyšších harmonických. Šum se přenáší do samotného oscilátoru a ovlivňuje měřenou hodnotu. Dickův jev je největším omezením pro stabilitu frekvenčního zdroje. Objevil ho George John Dick z Kalifornského institutu technologií v roce 1987.

**JILA** – Joint Institute for Laboratory Astrophysics, americká laboratoř založená v roce 1962. Je společným pracovištěm Národního institutu pro standardy a technologie NIST a Coloradské Univerzity (v Boulderu). Výzkum se zabývá ultrachladnými atomy a kvantovou fyzikou, nanofyzikou, biofyzikou, laserovou technikou a astrofyzikou. Laboratoře se nacházejí na úpatí Skalistých hor a jsou součástí kampusu Coloradské univerzity. Z JILA pochází 6 nositelů Nobelových cen.

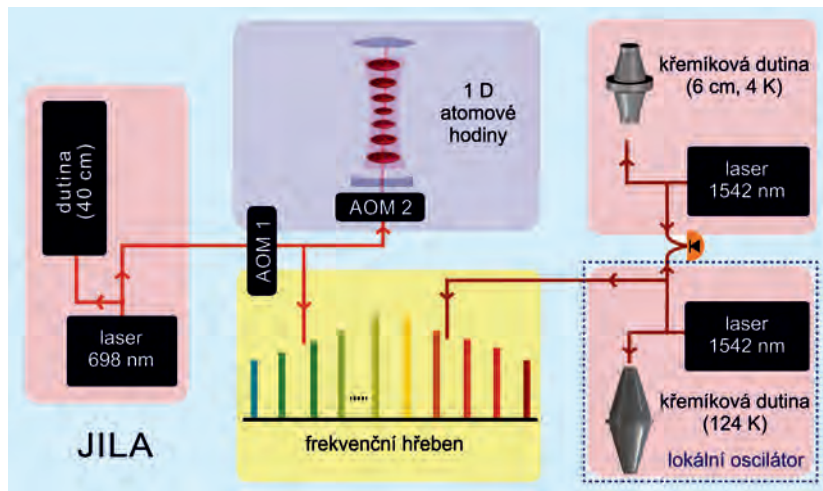


Schéma nového prototypu optických atomových hodin. Atomové hodiny komunikují s lokálním oscilátorem tvořeným křemíkovou dutinou (21 cm, 124 K). Frekvenční hřeben přenáší stabilitu lokálního oscilátoru na laser s vlnovou délkou 698 nm, který spektroskopicky vyhodnocuje kmitý hodin. Akusticko-optické modulátory (AOM, Braggovy cely) posouvají frekvence tak, aby bylo dosaženo rezonance s atomovým oscilátorem. Zdroj: Nature, JILA, NIST, PTB.

teleskopů s celkovou sběrnou plochou jeden kilometr čtvereční. Extrémně přesné hodiny by mohly umožnit detekovat i zakřivení času při průletu hmotných objektů v naší blízkosti. Tím se otevírají možnosti využití v základním fyzikálním výzkumu, například při sledování temné hmoty v našem bezprostředním okolí. A není ani vyloučena redefinice sekundy, která je dosud založena na velmi jemném přechodu atomů cesia. Je patrné, že atomové hodiny v optické oblasti mohou zasáhnout do nejružnějších sfér lidské činnosti.

■ Petr Kulháněk, 1. 11. 2019, AB 43/2019

# Ve vesmíru je zima zdarma

Fyzika rozděluje přenos tepla do tří zvláštních kategorií. Ohřívát či ochlazovat můžeme vedením, prouděním (konvekci) nebo vyzařováním a pohlcováním. Na těchto třech základních principech stojí všechna technická řešení chladniček od starořeckých vinných amfor až po laserové ochlazování vyvinuté před několika málo desetiletími. Ať je již použita ta či ona metoda, jedno mají společné. Vždy je třeba využít tepelný spád. Při aktivním ochlazování spád vytváříme uměle (kompresor chladničky stlačí a následně ohřeje pracovní médium), pasivní režim vyžaduje chladnější entitu, do které teplo samo teče. Má-li to být hmotné médium, nemusí být vždy po ruce. Pokud vsadíme na přenos tepla vyzařováním, je na dosah okolní vesmír. Mluvit o teplotě kosmického prostoru je sice ošidné, ale pro všechny praktické účely ji můžeme považovat za absolutní nulu. Využít tohoto fenoménu se pokoušejí týmy vědců, například z Coloradské a Stanfordovy univerzity.

## Přenos zářením

Zatímco je princip přenosu tepla pomocí hmotných médií většinou chápán bez nesnází, při přenosu zářením (radiací) chybí každodenní zkušenost a intuitivní představy bývají podhodnocené nebo selhávají zcela. Tepelné záření jsme ochotni připustit, pokud se vystavíme slunečním paprskům, případně při úpravě masa na elektrickém grilu. Úvahy o vyzařování při pokojových teplotách však budí nedůvěru.

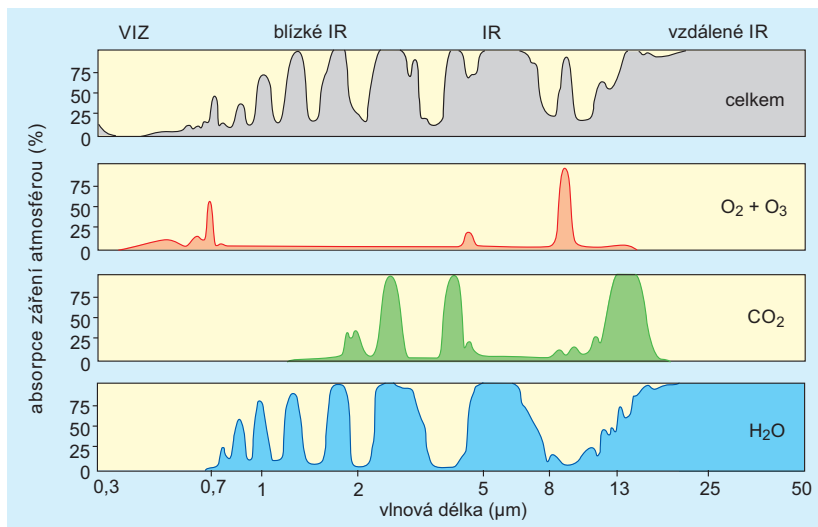
Je to tím, že intenzita vyzařování se mění se čtvrtou mocninou termodynamické teploty. Tepelné vyzařování při teplotách kolem pouhých tří set kelvinů (cca 30 °C) je tedy opravdu malé, nikoli však zanedbatelné. Těleso zahřáté na tuto teplotu vyzařuje každým svým metrem čtverečním bezmála 400 J za sekundu. To už je výkon, který evokuje otázku, proč jsou lednice

**Teplota** – míra neuspořádaného pohybu v látce. Absolutní stupnice ztotožňuje nulu se stavem s minimálním množstvím pohybu, které umožní zákony kvantové teorie (s minimální entropií). Absolutní nuly nelze dosáhnout konečným počtem procesů, lze se jí ale libovolně přiblížit. Absolutní teplota se měří v kelvínech. Jeden stupeň kelvina je roven jednomu stupni Celsia. Kelvinova stupnice má jiný počátek než Celsiova stupnice, 0 K = -273,15 °C.

Tato stavba se nachází v Íránu a nazývá se yakhchal. Starým Peršanům sloužil k uchovávání potravin a ledu. Led se vyráběl venku v bazénku. Voda vystavená mrazivému vesmíru vyzářila své teplo a změnila se v led. Ten se pak skladoval uvnitř budovy, jejíž stěny slouží jako izolace. Zdroj: World History Encyclopedia.







Atmosférická okna v oblasti infračerveného záření. Nejvíce záření pohlcují vodní pára a oxid uhličitý. Zdroj: Dongliang Zhao, Appl. Phys. Rev.

**Foton** – základní kvantum energie elektromagnetického záření, polní částice elektromagnetické interakce. Má nulovou klidovou hmotnost a nemá elektrický náboj. Jeho energie a hybnost jsou přímo úměrné frekvenci záření. Stav fotonu zahrnuje také polarizaci, protože jde o příčné vlnění, které má dva nezávislé módy. Kvantování energie poprvé zavedl Max Planck při pokusech o vysvětlení záření černého tělesa. Albert Einstein dal těmto kvantům reálný význam v roce 1905 při vysvětlení fotoelektrického jevu. Samotný název foton poprvé pro tuto částici použil až americký fyzikální chemik Gilbert Lewis v dopise časopisu Nature z roku 1926.

tak složitá zařízení. Odpověď je záření. Těleso ho nejenom emituje, ale také absorbuje. Pokud je okolí zahřáté na stejnou teplotu, je systém v rovnováze. Aby došlo k ochlazení, je třeba natočit zářič tam, odkud přichází méně energie. Nabízí se kosmický prostor.

Tento efekt známe z hodin zeměpisu, kde se učíme o velkých výkyvech teploty na pouštích. Zatímco přes den se písek rozpaluje na desítky stupňů celsia, v noci klesá teplota až k bodu mrazu. Tak rychlé ochlazení by nebylo možné, kdyby se naakumulovaná energie nemohla vytratit zářením.

## Černé těleso a naše atmosféra

Pro popis vyzařování tělesa zahřátého na určitou teplotu byla již před více než sto lety vymyšlena abstrakce s názvem absolutně černé těleso. Je to těleso, které pohlcuje veškeré elektromagnetické záření. Proto tedy černé. To však neznamená, že by nemohlo samo elektromagnetické záření generovat. Například Slunce se chová jako absolutně černé těleso rozpálené na teplotu asi 5 500 °C. Obrovské masы plazmatu pohltní veškeré záření dopadající z okolního vesmíru – v tomto ohledu je to těleso opravdu černé. Na druhou stranu je samo Slunce intenzivním zdrojem elektromagnetického záření, které nelze přehlédnout. Maximum vyzařování spadá při této teplotě do viditelné oblasti světla. Velkou část tohoto záření Země pohltní a přemění na teplo.

V oblastech, kde je žádoucí ochlazovat obydlí, pokud možno s malými náklady na investice, provoz a údržbu, se zemský povrch chová jako absolutně černé těleso zahřáté na přibližně 30 °C. V praxi se střechy domů natírají reflexními nátěry, což je zatím nejúčinnější způsob, jak se pasivně chránit před přehřátím. Je však zřejmé, že tímto způsobem nelze dosáhnout teplot nižších, než je teplota okolí. To by bylo možné jedině černým zářičem namířeným do kosmického prostoru. Řešení sice snadno pochopitelné, ale ne vždy technicky realizovatelné.

Černý zářič je označení pro systém, který bude zároveň absorbovat sluneční záření a celková tepelná bilance bude kladná. Zastínit zářič před Sluncem a nechat mu přitom volný výhled do vesmíru je myšlenka stejně osvěžující, jako obtížně realizovatelná.

Důležité je, že se vyzařovací křivka Slunce (většina energie se nachází v rozmezí vlnových délek 0,3 až 2,5  $\mu\text{m}$ ) významně nepřekrývá s vyzařovací křivkou zemského povrchu (2,5 až 50  $\mu\text{m}$ ). Je tedy alespoň teoreticky možné vyvinout povrch, který sluneční paprsky odráží a tepelné současně vyzařuje.

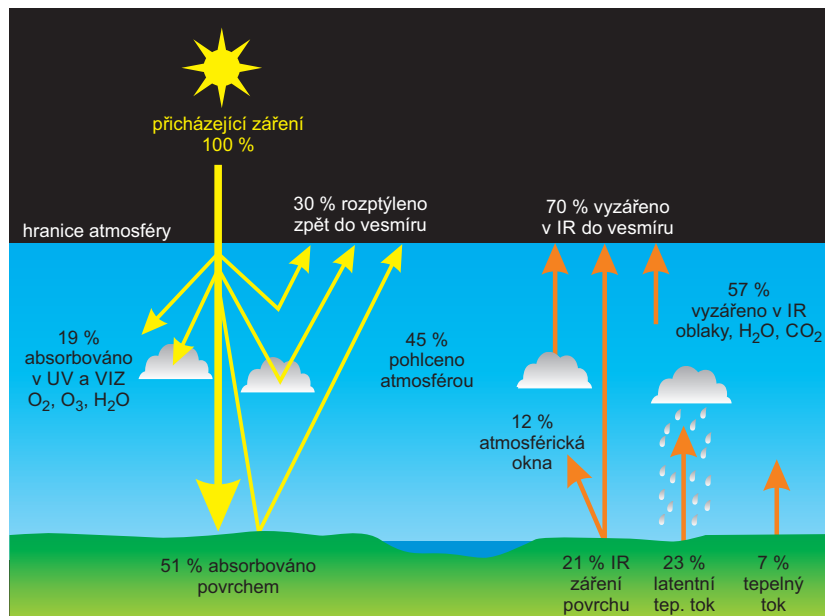
Koncepce kosmické chladničky je jasná, nicméně jeden důležitý detail jsme dosud opomíjeli. Neuvažovali jsme vliv naší atmosféry. Zatímco pro viditelné světlo je dobře průhledná, tepelné záření propouští jen v některých pásmech. V pásmech, která jsou pro infračervené záření neprůhledná, zároveň atmosféra sama vyzařuje, což jinými slovy znamená, že je schopna zpětně ohřívat zářič a celý zemský povrch. Je to jev známý pod poetickým názvem *skleníkový efekt*.

Neprůhlednost atmosféry pro tepelné paprsky jde na vrub především vodní páře, která má od vlnové délky 0,7  $\mu\text{m}$  jen několik málo oken a od 20  $\mu\text{m}$  je pro tepelné paprsky prakticky souvisle neprůhledná. S výjimkou suchých oblastí pouští je i dominantní, co se týče množství v atmosféře. Zanedbat nemůžeme ani vliv oxidu uhličitého, jehož dvě ze tří velkých maxim pohltivosti se téměř kryjí se dvěma okny vodní páry. Z ostatních plynů má spíše jen okrajový význam ozón s úzkým pásem pohltivosti (absorptivity) na 9,6  $\mu\text{m}$ . Vlivem všech složek atmosféry pak lze reálně počítat s jediným atmosférickým oknem mezi 8 až 13  $\mu\text{m}$ . Pohltivost atmosféry pro jednotlivé složky je však jen jedním z více faktorů. Energetická bilance záleží také na aktuálním počasí, množství oblaků a na morfologii zemského povrchu.

**Fonon** – kvazičástice vibrací krystalové mříže, vibrační kvantum šířící se krystalovou mříží. Pomocí fononů lze popisovat šíření zvukových vln v pevných látkách. Samotný název fonon vznikl jako analogie k fotonu. Foton je částicí elektromagnetického pole, fonon je kvazičásticí netlumeného zvukového pole šířícího se v pevné látce.

**Nanofotonika** – vědní obor na rozhraní nanotechnologie a optiky. Studuje struktury na nanometrových škálách a jejich interakce se světlem.

Bilance přichozího a odchozího elektromagnetického záření na Zemi. Zdroj: Oclahoma Climatological Survey.





Tělo stříbrných mravenců je pokryto dutými chloupky trojúhelníkového průřezu. Kromě výborných tepelně-izolačních vlastností vynikají chloupky vysokou odrazivostí viditelných paprsků (0,4 až 1,7  $\mu\text{m}$ ) a emisivitou v infračerveném oboru (2,5 až 16  $\mu\text{m}$ ). Zdroj: Norman Nan Shi, Nanfang Yu, Columbia Engineering.

**Viditelné záření** – elektromagnetické spektrum s vlnovými délkami od 380 nm do 750 nm. Viditelné světlo prochází atmosférou, proto se jako první vyvinula optická astronomie. Také lidské oko se za miliony let přizpůsobilo zpracování viditelného záření. Typickými útvary s rozměry odpovídajícím vlnovým délkám vizuálního záření jsou jednoduché bakterie, například příčný rozměr *Escherichia Coli* nebo průměr koků či diplokoků (300 až 700 nm).

## Kosmické chlazení

Pro problematiku kosmického chlazení je příjemným faktem, že vlnové délky infračerveného atmosférického okna náhodou odpovídají maximu vyzařované intenzity tělesa zahřátého na 30 °C a ochlazování je tedy relativně účinné. V uvedeném radičním okně se dá za dobrých podmínek počítat s chladičím výkonem přibližně 140 W/m<sup>2</sup>. Pokud je dostatečně suchý vzduch, otevírá se ještě jedno okno mezi 16 až 25  $\mu\text{m}$ . To je však tak daleko od vyzařovacího maxima, že toto okno dokáže uchladit nejvýše 10 až 20 W/m<sup>2</sup>. Zvláštní kapitolou

jsou mraky. Ty jsou neprůhledné v celém uvažovaném spektrálním pásu, a tak záleží na jejich aktuální teplotě, jsou-li schopny záření absorbovat, nebo naopak vlastní radiací zemský povrch ještě ohřívat.

Již z prvního náhledu je zřejmé, že při nočním chlazení dosáhne nejvyššího chladičím výkonu širokopásmový zářič. Zároveň je však jasné, že tudy cesta nevede, pokud chceme ochlazovat na teploty nižší, než má okolí. Toho je schopen až úzkopásmový zářič vyzařující jen na vlnových délkách atmosférického okna. Ten má však z principu malý výkon, takže ochlazování trvá delší dobu. Z toho plyne i další slabina – je zapotřebí důkladné tepelné izolace od okolí. Menší problém je izolace od spodu. Stačí vybrat ze široké nabídky izolačních materiálů. Izolace vlastního zářiče musí splňovat několik kritérií. Kromě samozřejmých tepelně-izolačních vlastností musí být materiál dokonale transparentní na příslušné vyzařovací frekvenci. Jako samozřejmost berme trvanlivost a mechanickou odolnost. To vše se musí vejít do rozumného finančního limitu. Ne vždy je snadné vyhovět všem požadavkům. Jako dobrý kompromis například uveďme polyetylenovou fólii. Je laciná, dobře průhledná a do jisté míry i odrazivá pro sluneční záření. Bohužel doporučená tloušťka 30  $\mu\text{m}$  je sama o sobě dost výmluvná při posuzování mechanických vlastností. Náhrada dobře propustným selenidem zinku je zase neúměrně dražší.

Materiály pro selektivní vyzařování jsou intenzivně zkoumány. Velkou komplikací je eliminace slunečního záření. Proto se bojuje na dvou frontách. Vytvářejí se materiály pro noční a denní chlazení.

## Noční chlazení

Jako první krok v řešení radiálního chlazení je nalézt vhodný selektivně vyzařující materiál. Tyto pokusy začaly již v šedesátých letech a přinesly první slibné úspěchy. Neřešily však problémy spojené s přehříváním materiálu Sluncem, a tak byly vhodné jen pro použití v noci. To je asi hlavní důvod, proč práce upadly v zapomnění. Většinou je třeba ochlazovat obydlí přes den, nicméně některé zajímavé technologie stojí za zkoumání i dnes.

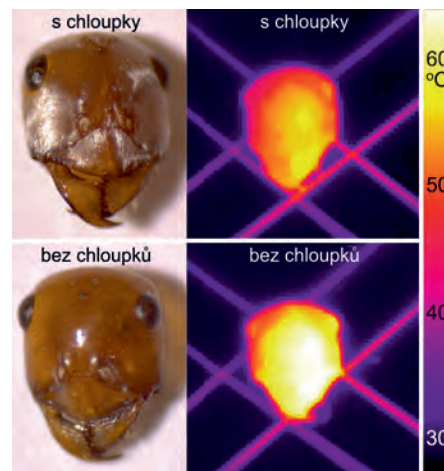
K první skupině patří polymery nanesené na hliníkovou podložku. Jako polymer poslouží například PVC, PVF (*polyvinylfluorid*) a další. Experimentuje se s obohacováním polymerů nanočásticemi. Například polyetylenová fólie (za běžných podmínek průhledná) po doplnění nanočásticemi SiC rezonujícími s fonony (zvukovými kvanty) absorbuje či vyzařuje v požadovaném atmosférickém okně. Účinné jsou také anorganické fólie SiO, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> nanesené na hliníkové desce. Fólie z MgO silná 1,1 mm se dokázala za jasné suché noci ochladit proti okolí o 20 °C. Velmi nadějně jsou experimenty s infračerveně vyzařujícími plyny, které jsou uzavřené v průhledném kontejneru. Toto řešení má konstrukční výhodu – není třeba další médium do výměníku tepla. Plynné uhlovodíky s dvojnou vazbou mezi uhlíky absorbují a vyzařují infračervené světlo mezi 10 až 12,5 μm. Pro noční chlazení pod teplotu prostředí jsou vhodné plyny jako NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> nebo C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O ve vrstvě o tloušťce několika centimetrů.

## Denní chlazení

Nalézt vhodný materiál s úzkopásmovým vyzařováním pro noční ochlazování není snadný úkol. Přidáme-li požadavek odrážení denních slunečních paprsků spalujících Zemi plošným výkonem 1,4 kW/m<sup>2</sup>, leží před námi výzva hodná vědeckého kolektivu. Přitom víme, že řešení existuje. Vysokou odrazivost a infračervené vyzařování řešila již před námi evoluce a dosáhla pozoruhodných výsledků. Stříbrní saharští mravenci (*Cataglyphis bombycina*) raději volí žár pouště, než jistou smrt na lepkavém jazyku dravých ještěrek. Proto vylézají na povrch teprve při teplotách nad 47 °C, kterou ještěrky již nevydrží. Až do

**Infračervené záření** – elektromagnetické záření s delší vlnovou délkou, než má viditelné světlo, v rozsahu od 0,75 μm do 400 μm. Infračervené záření objevil v roce 1800 William Herschel při rozkladu slunečního světla hranolem. Zjistil, že za červenou barvou existuje další záření, které zahřeje teploměr. Infračervené záření využíváme v infrazářičích, v infralampách, při infraterapii, v dálkových ovladačích, v termovizi, v čidlech proti zlodějům, v dálkových teploměrech a při dálkovém průzkumu Země. V astronomii se využívá infračervené záření k výzkumu meziplanetární hmoty, planetárních atmosfér, plynu a prachu v galaxiích, hnědých trpaslíků, červených veleobrů, exoplanet, protoplanetárních disků a mlhovin. Toto záření prochází zemskou atmosférou jen částečně, v tzv. oknech.

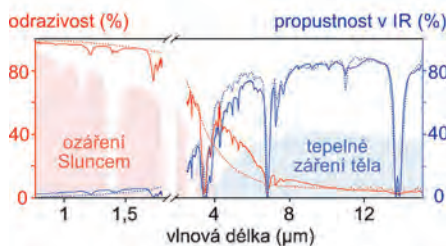
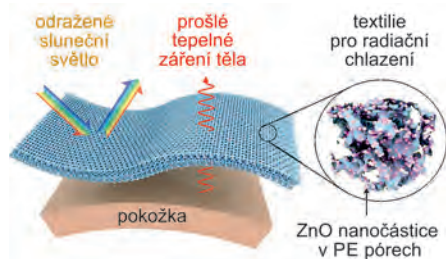
Teplotní mapa čela mravence s chloupky a bez nich. Ochlupení pomáhá snížit tělesnou teplotu. Zdroj: Norman Nan Shi, Columbia Engineering.





**Bilance slunečního záření** – Slunce produkuje celkový výkon  $2 \times 10^{30}$  wattu, z toho na každý metr čtvereční orientovaný kolmo na sluneční záření dopadá nad atmosférou Země 1,4 kilowattu (tzv. sluneční konstanta). Na atmosféru ale dopadá sluneční záření šikmo, atmosféra je v průměru zasažena tokem  $340 \text{ W/m}^2$ . Z toho se 30 % odrazí od atmosféry, oblaků a povrchu, 70 % projde a je absorbováno povrchem a poté vyzářené zpět v infračerveném oboru.

Speciálně navržená nanolátka, která ve vizuálním oboru záření odráží a v IR propouští. Látka je určena k radiálnímu ochlazování těla. Zdroj: L. Cai, Advanced Matter.



teploty  $53^\circ\text{C}$  se pak mohou v klidu věnovat sběru všelikých uhynulých tvorečků. Zvládat vysoké teploty jim pomáhá mnoho evolučních vylepšení. Jedním z nich je i vysoká odrazivost slunečního světla (pro svůj lesk a rychlý pohyb bývají připodobňováni ke kapkám rtuti) a emisivita infračervených paprsků, která jejich těla dokáže ochladit o  $5$  až  $10^\circ\text{C}$ . Podobnou ochranu před žářem mají i kukly bource morušového nebo křídla motýla *Bistonias biston*.

Cesta k vývoji potřebných materiálů vede přes mikroskopické struktury. Jako nadějně se tradičně považují struktury čtyřvazných prvků, jako jsou křemík a uhlík. S nanofotonickou strukturou SiC na stříbrném substrátu bylo dosaženo čistého chladicího výkonu  $100 \text{ W/m}^2$ . Jiné struktury, založené na střídajících se vrstvách  $\text{SiO}_2$  a  $\text{HfO}_2$  dokázaly na přímém slunci (s výkonem  $850 \text{ W/m}^2$ ) dosáhnout chladicího výkonu  $40 \text{ W/m}^2$ . Další nanofotonické struktury mají na sobě malé kuželíky nebo sloupky ze střídajících se vrstev hliníku, germania a jiných látek. Spolu s vrstvou odrážející sluneční paprsky dosáhnou chladicího výkonu  $117 \text{ W/m}^2$ .

Seznam uvedených materiálů a struktur nutí k zamyšlení nad cenou takto ošetřených ploch o velikostech v řádech desítek metrů čtverečních. V tomto ohledu došlo v roce 2017 k průlomů. Yao Zhai z Colorado State University v Boulderu se svým týmem oznámil výrobu polymeru PMP (*polymethylpenten*) s rozptýlenými mikrokuličkami  $\text{SiO}_2$  na  $200 \text{ nm}$  tlusté stříbrné fólii. Mikrokuličky díky svým jedinečným rozměrovým a hmotnostním parametrům umožňují materiálu velice dobře vyzařovat v celém atmosférickém okně. Na plném slunci poskytuje chladicí výkon  $93 \text{ W/m}^2$  a lze ho vyrábět v celých rolích. Tento úspěch odstartoval závody v hledání podobných materiálů. Již následujícího roku uviděl přímé sluneční světlo porézní nátěr s bublinkami rozptylujícími světlo, který snižuje teplotu asi o  $6^\circ\text{C}$  pod teplotu okolí.

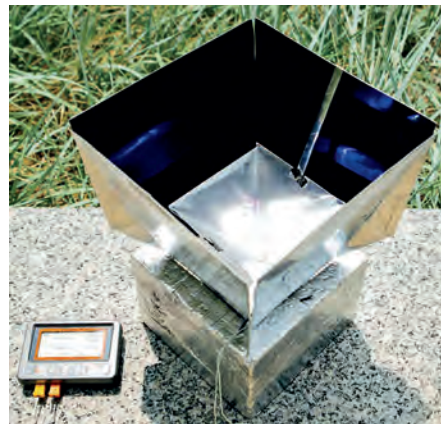
## Kudy dál?

Jakkoli vypadají dosažené úspěchy nadějně, zdaleka není ještě vyhráno. Nyní je třeba se soustředit na stabilitu. Odrazivé kovové vrstvy mají tendenci oxidovat. Dipankar Mandal z Jadavpurské univerzity v indické Kalkatě ukázal, že místo kovu lze jako reflexní elementy využít mikropóry a nanopóry v polymerech, které dokážou světlo účinně odrážet a rozptylovat. Na druhou stranu mají polymery jinou slabinu. Velice dobře víme, jak devastující účinky na ně má ultrafialové záření.

Uvedené nedostatky sice vypadají jako technický detail, ale dokud nebude úspěšně vyřešen, nelze počítat s hromadným natíráním obydlí chladicími polymerovými nátěry. Jsou však jiné oblasti, kde by se nové materiály daly využít. Uvažuje se například o aplikaci ve fotovoltaických elektrárnách. Je známo, že účinnost článků klesá s teplotou. Pasivní chlazení (a stačilo by i jen na teplotu okolního prostředí) by mohlo zvýšit jejich výkon.

Je však ještě jedno odvětví, kde by vidina i malého teplotního zisku otevírala peněženky zákazníků. Módní a oděvní průmysl. Je jen málo komodit, za které jsou lidé ochotni vyházet peníze tak ochotně, jako za módu. U oděvů navržených z takových materiálů by nevadilo, že po jedné či dvou sezónách degradují. Do té doby by se staraly o tepelnou pohodu svého nositele. Při teplotě lidského těla by bylo chlazení účinné i v krajích, kde teploty vzduchu zdaleka nedosahují pouštních hodnot. A tak by marnivost zase jednou mohla posloužit vědě a pomoci financovat výzkum hledaných materiálů.

■ Dana a Rudolf Mentzlovi, 31. 10. 2020, AB 43/2020



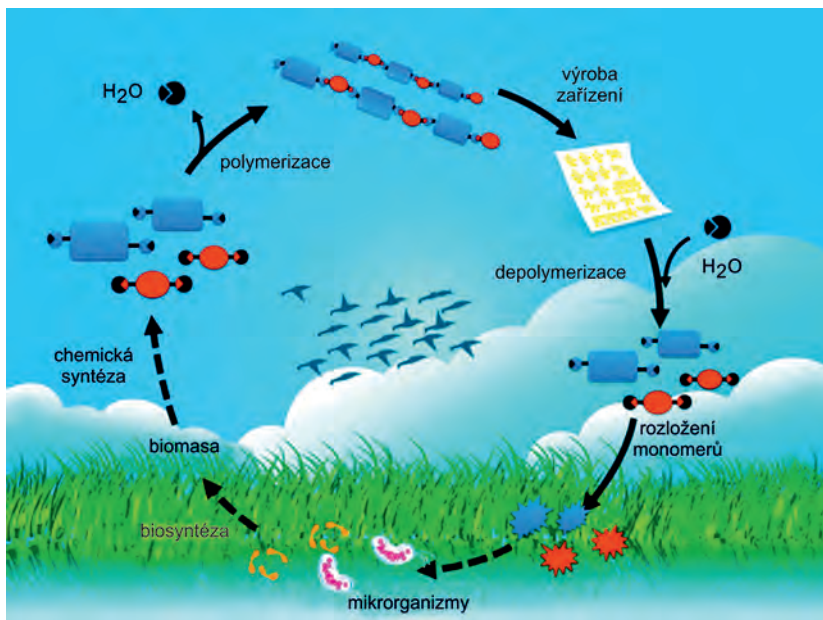
Test systému radičního ochlazování vyvinutého na Univerzitě v Buffalu. Jde o speciální film z polymeru a hliníku, který je schopen ochlazovat okolí. Uvažuje se o využití při chlazení budov – materiál může být na stěnách či pokrývat střechy. Zdroj: Univerzita v Buffalu.

## Poživatelná elektronika

**FET** – Field Effect Transistor, tranzistor řízený elektrickým polem (tzv. unipolární tranzistor). Tvar a vodivost kanálu mohou být ovlivněny napětím přiloženým k řídící elektrodě. Součástí patentoval v roce 1930 Julius Edgar Lilienfeld, americký inženýr rakousko-uherského původu.

**MOSFET** – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, polem řízený tranzistor, ve kterém je vodivost kanálu mezi elektrodami S (Source) a D (Drain) ovládána elektrickým polem vytvářeným ve struktuře kov–oxid–polovodič (MOS, Metal-Oxid-Semiconductor) napětím přiloženým mezi řídící elektrodu G (Gate) a elektrodu S.

Životní cyklus přechodné ekologické elektroniky založené na biodegradabilním polymeru. Zdroj: Ting Lei, PNAS.



Každoroční celosvětový nárůst prodeje technického spotřebního zboží s sebou nese mnoho negativních důsledků. Jedním z hlavních problémů je recyklace těchto zařízení, které jsou v naprosté většině případů chemicky či mechanicky odolné, jsou složeny z mnoha komplexních součástí a mohou dokonce obsahovat nebezpečné látky. To činí jejich bezesbzytkové odstranění či opětovné použití velmi obtížným, ne-li nemožným. Východisko z této situace by mohla nabídnout tzv. *přechodná elektronika*. Životní cyklus jednoduchého zařízení je založen na bázi biodegradabilního polymeru. Přechodná elektronika má být konstruována z odbouratelných, rozpustných a netoxických látek, jejichž životnost by byla omezená a až skončí využívání by došlo k jejich bezesbzytkovému „návratu do přírody“. V ideálním případě by měla být tato zařízení složena jen z látek, které jsou požitavlné. Dala by se tedy snadno odbourat v trávicím traktu a mohla by i částečně sloužit jako nutriční zdroj. Tento typ elektroniky bývá označován jako tzv. *požitavlná elektronika*. Vědní obor zabývající se touto tematikou

je aktuálně v plenkách, a tak se nedá očekávat, že by se v dohledné době na trhu objevila běžná elektronika se zmíněnými vlastnostmi. Nicméně výzkum vhodných materiálů je již v plném proudu a pomalu se začínají objevovat první jednoduchá zařízení určená především pro biomedicínské aplikace. Směřování současných prototypů k biomedicině má hned několik důvodů: a) diagnostika lidského těla s sebou často nese invazivní zákroky, které by aplikace miniaturní samovstřebatelné elektroniky značně omezila; b) pro diagnostiku základních zdravotních parametrů stačí velmi jednoduchá zařízení; c) v rámci lidského těla se dá velmi efektivně testovat toxici-

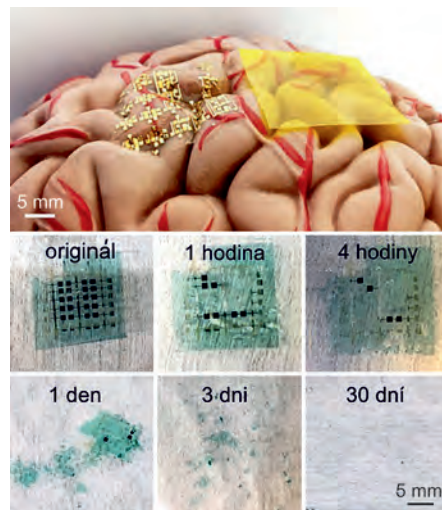
ta a vstřebatelnost látek určených pro tento typ elektroniky; d) svou roli hraje také ekonomické hledisko. Medicínský průmysl má finanční možnosti jak spolufinancovat nákladný rozvoj této technologie.

O současném stavu přechodné, respektive požitavé elektroniky by se dalo napsat mnohé. Zaměříme se jen na aktuálně nejzajímavější směr jejího využití, a to konstrukce zařízení, která mají být použita přímo v zažívacím traktu. Tato elektronika by v budoucnosti mohla diagnostikovat a případně i neinvazivně a cíleně léčit nepřebornou řadu neduhů sahajících od refluxu žaludečních tekutin, rakoviny, rozšíření žilních cév, zánětlivá onemocnění střev, zácpu, syndrom dráždivého tračníku až po Crohnovu chorobu. Nejprve si ukážeme, které látky jsou vhodné pro konstrukci požitavé elektroniky, a poté popíšeme konstrukci jednotlivých součástek, které jsou nutné pro stavbu kompletních zařízení (odpor, cívka, kondenzátor atd.). Nakonec se seznámíme s nejzajímavějšími funkcemi prototypy.

## Materiály pro požitavou elektroniku

Materiály vhodné pro požitavou elektroniku můžeme dle jejich funkce rozdělit do dvou větších skupin: funkční materiály a materiály pro substráty a obaly.

Látky pro první skupinu musí vykazovat vhodné elektrické vlastnosti, aby mohly fungovat jako vodiče, izolátory atd. Tyto látky byly primárně hledány mezi dobře stravitelnými materiály. Bylo prokázáno, že velmi dobré izolační vlastnosti vykazuje například sušená zelenina, ovoce, maso nebo i chléb/mouka (měrná elektrická vodivost  $\sim 10^{-11}$  až  $10^{-12}$  S/m, relativní permitivita  $\sim 5$  až 20). Pro elektronické aplikace se ukázal vhodný také sýr (izolační materiál s dobrou prostupností iontů). Žádná z běžných potravin však přirozeně nevykazuje dobré vodivé vlastnosti. Významného zlepšení vodivosti lze u běžných látek nicméně dosáhnout jejich karbonizací (tepelná úprava bez přístupu vzduchu). Hodnota měrné elektrické vodivosti na úrovni přibližně 10 S/m byla pozorována například u aktivního uhlí, karbonizovaného hedvábí nebo bavlny a také u cukrové vaty. Zajímavé aplikační vlastnosti byly prokázány u různých organických biopigmentů a jim podobných látek. Přestože až na výjimky nevykazují významnou hodnotu vodivosti, byla na nich měřena vysoká hodnota pohyblivosti volných nosičů náboje, a jsou tedy vhodné pro konstrukci tranzistorů (plní funkci polovodiče), senzorů a kondenzátorů. Mezi tyto látky patří především chlorofil,



Jednoduché zařízení založené na CMOS obvodech na modelu lidského mozku. Dole je fotografie jednotlivých fází rozkladu takového zařízení ve vodním prostředí. Zdroj: Ting Lei, PNAS.

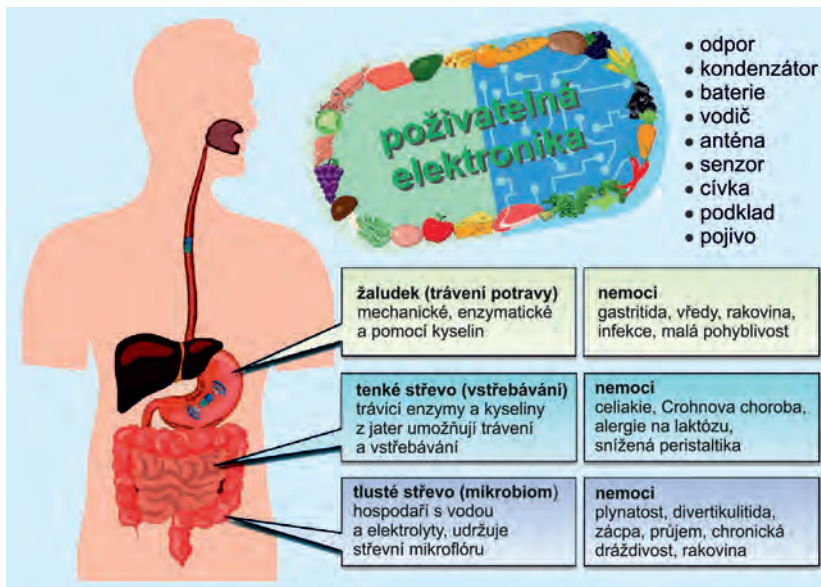
**OFET** – Organic Field Effect Transistor, tranzistor řízený elektrickým polem, který využívá organický polovodič. Technologie přípravy jsou různé, často jde o organickou vrstvu nanesenou na podklad. OFET tranzistory se využívají v biologicky odbouratelné elektronice.

**CMOS** – Complementary Metal Oxid Semiconductor, technologie, která využívá tranzistorů MOSFET obou typů vodivosti (NMOS a PMOS). CMOS technologií se v současnosti vyrábí většina elektronických integrovaných obvodů včetně procesorů, pamětí a v posledních letech také obrazové senzory digitálních fotoaparátů (alternativa k CCD). CMOS součástky vynikají nízkou spotřebou a vysokou hustotou integrace. Technologie samotná je poměrně laciná a dobře technologicky zvládnutá.



**DNA** – Deoxyribonucleic acid, deoxyribonukleová kyselina. Jde o nukleovou kyselinu, jejíž cukernou složkou je 2'-deoxyribóza. Báze jsou tvořeny především čtveřicí adenin, thymin, guanin a cytosin; vzájemně komplementární jsou nukleotidy s adeninem a thyminem, a nukleotidy s cytosinem a guaninem. DNA vytváří dvoušroubovici z navzájem komplementárních opačně orientovaných řetězců, pracovního a paměťového. Její hlavní funkcí je uchovávání genetické informace.

Seznam součástek sloužících ke konstrukci požitelné elektroniky a aplikace výsledných zařízení v zaživacím traktu. Zdroj: Ch. Steiger, Nature Reviews Materials.



$\beta$ -karoten, indigo nebo různé typy melaninu. Poslední jmenované mohou navíc po tepelné úpravě vykazovat vodivost přesahující 104 S/m, což je jen o tři řády méně, než mají běžné kovy. I přesto se stále nedá při konstrukci požitelné elektroniky vyhnout použití anorganických látek. Jedná se především o materiály k vytvoření vodivých spojů a vhodných elektrod. K těmto látkám řadíme především požitelné Au, Zn, MgO, ZnO, Fe a Si. Jejich množství však musí být minimální, protože jejich rozpustnost je velmi omezená a navíc se často musí jednat o nanostrukturní formy dané látky. Rychlost rozpustnosti těchto materiálů se ve vodě pohybuje od 1 do 100 nanometrů za hodinu.

Mnoho výše zmíněných látek není schopno samostatně udržet vhodný tvar pro konstrukci součástek, a tak musí být pro správnou funkčnost podpořeny vhodným pojivovým materiálem. Celé zařízení musí být navíc naneseno na substrát a obaleno ochranným materiálem. Vlastnosti a tloušťka tohoto obalu často navíc definují životnost dané součástky. Po jejím kompletním natravení totiž většinou končí i její funkčnost. Mezi nejperspektivnější strukturní materiály požitelné elektroniky patří polypeptidy, polysacharidy nebo lipidy. Do první zmíněné kategorie můžeme zahrnout například hedvábí a kolagen.

Hedvábí se v medicíně využívá již dlouhou dobu a kolagen má dobré chemické i mechanické vlastnosti. Dá se snadno připravit a jeho složením se dá dobře regulovat rozpustnost ochranné vrstvy, která se v trávicím traktu pohybuje mezi pěti a sedmi hodinami. Ze skupiny polysacharidů patří mezi velmi dobrá pojiva především škrob a cukry z ovocných šťáv. Škrob může být navíc použit i jako obalový materiál, je výživný a dle přípravy se doba jeho rozpuštění v trávicím traktu pohybuje od dvou do devíti hodin. Do poslední zmíněné skupiny patří především přírodní vosky, které jsou odolnější vůči degradaci než předešlé materiály a jako oba-

lový materiál mohou v těle pacienta vydržet i několik dní. Mimo tyto velké skupiny vhodných látek se také osvědčily mléčné a sojové proteiny a vaječný bílek, který slouží jako organické lepidlo. Nejzajímavější zástupce všech zmíněných skupin uvádíme v následující tabulce:

| ELEKTRO-SOUČÁSTKA | FUNKČNÍ SLOŽKA                                                   | STRUKTURNÍ SLOŽKA                                  |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| vodič             | zlato, melanin, karoten, karbonizovaná bavlna                    | rýže, cukr, mouka, rýžový papír                    |
| odpor             | aktivní uhlí, karbonizovaná bavlna, hedvábí, cukrová vata, zlato | bramborový škrob, mouka, sušené ovoce a zelenina   |
| cívka             | aktivní uhlí, karbonizovaná bavlna, hedvábí, cukrová vata, zlato | bramborový škrob, mouka, sušené ovoce a zelenina   |
| kondenzátor       | zlato, melanin a jiný biopigment, karbonizované materiály        | želatina, sušené ovoce a zelenina                  |
| tranzistor        | zlato, β-karoten, požitelné polymery, adenin a guanin            | želatina, rýže                                     |
| anténa            | aktivní uhlí, zlato, karbonizovaná bavlna, melanin               | cukrový prášek, mouka, vaječný bílek, rýžový papír |
| baterie           | ovocný výtažek, aktivní uhlí, glukóza                            | olivový, kukuřičný a sezamový olej                 |
| senzor            | zlato, oxid zinečnatý, brokolicevý prášek                        | želatina                                           |



Ampule s elektronikou a geneticky upravenými bakteriemi, kterou lze spolknout. Elektronika snímá reakce bakterií na vnější podněty a vysílá je do chytrého telefonu. Zatím bylo testováno na zvířatech, pro člověka musí dojít k miniaturizaci. Zařízení je vhodné pro detekci krvácení střev, diagnostiku rakoviny střev a podobně. Zdroj: MIT.

**Piezelektrický jev** – vznik napětí při deformaci určitých druhů krystalů. Piezelektrický jev se využívá ke konstrukci různých snímačů vibrací. V domácnosti ho známe z piezelektrického zapalovače plynu, ve kterém deformace krystalu způsobí přeskocení elektrické jiskry.

## Konstrukce součástek požitavelné elektroniky

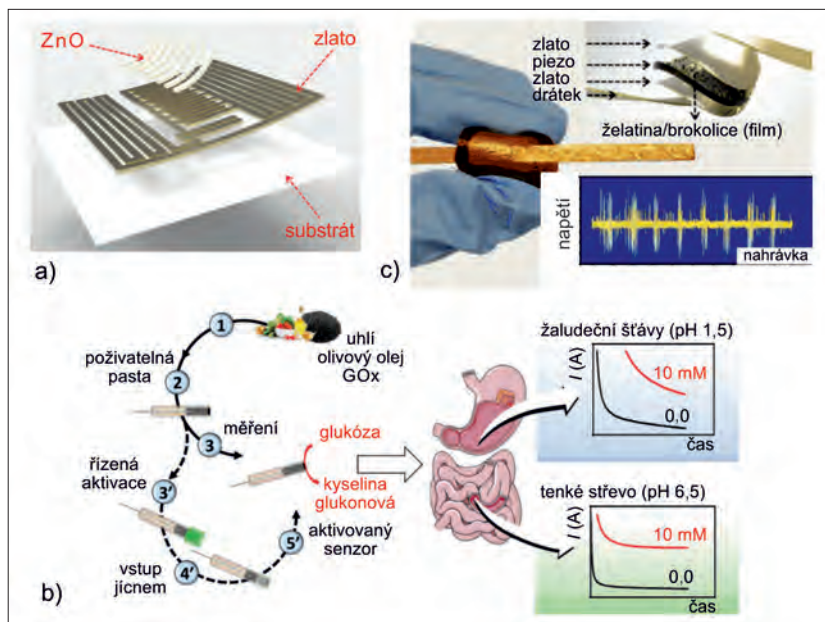
K úspěšné konstrukci elektronických zařízení plnicích různé úkoly uvnitř lidského těla je nutné zvládnout přípravu některých základních elektronických prvků. Jedná se o vodivé kontakty, odpory, cívky, kondenzátory, antény, senzory a pro komplikovanější zařízení je nutné zařadit i zdroje energie, tedy baterie.

**Vodiče, odpory a cívky.** U samostatných vodičů není v současné době mezi použitými materiály příliš velká konkurence. Přestože již byla prokázána dobrá vodivost tepelně upraveného melaninu, primárně se využívá jedlé zlato v kombinaci se strukturální látkou, jako například rýžovým papírem, moukou nebo samotnou rýží. Z důvodů dobré požitavelnosti však tloušťka zlata nesmí přesahovat přibližně 100 nm. Pro přípravu odporů již není vysoká vodivost nutností, a tak byly úspěšně připraveny požitavelné odpory na bázi jedlého zlata (odpor 5 až 20  $\Omega$ ), aktivního uhlí, škrobu a cukrové vaty (odpor 500 až 2000  $\Omega$ ), melaninu/karotenu a vhodného polymeru nebo dokonce nanoodpory využívající jedné molekuly DNA a želatiny (odpor přibližně 10 G $\Omega$ ).

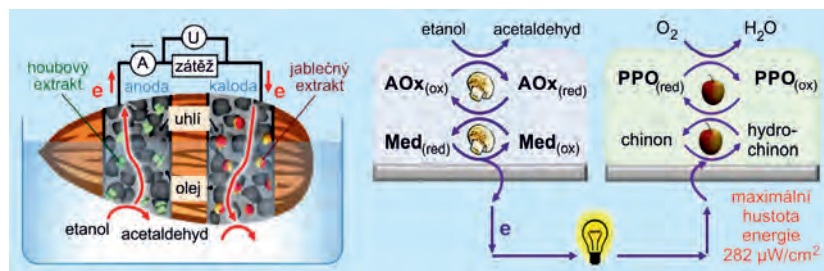
Obdobné materiály se využívají i na konstrukci cívek, zde se musí pouze dosáhnout spirálového nebo šroubovicového tvaru vodiče. Pro tento účel se často využívá karbonizované hedvábí.

**Kondenzátory.** Mnoho uplatnění našly v běžné elektronice právě kondenzátory. U požitavelné elektroniky plní především roli zásobárny energie. Bylo vytvořeno velké množství funkčních kondenzátorů, jejichž specifická kapacita sahá od 1 do 10<sup>3</sup> F/g a jejichž hustoty energie přesahují 10 mW/cm, čímž se mohou srovnávat s klasickými součástkami. Jsou často založeny na aktivním uhlí, různých biopigmentech, požitavelném zlatě,

a) Konstrukce funkčního zařízení na měření pH na bázi změny rezonanční frekvence RC obvodu. b) Princip fungování požitavelného pH detektoru založeného na aktivním uhlí a olivovém oleji určeného k detekci množství cukru v žaludku a ve střevech. c) Ukázka konstrukce a zvukový záznam požitavelného mikrofonu založeného na piezelektrickém jevu v brokolicovo-želatinové vrstvě. Zdroj: Advanced Materials Technology.



celulóze a široké škále iontových zdrojů, jako je například ionty dopovaný agar. Konstrukce jednoho z nejzdařilejších a plně požitelných kondenzátorů je na obrázku (str. 296 dole). Kondenzátor využívá jako elektrody aktivní uhlí, proudové kolektory jsou z požitelného zlata. Jako dielektrikum, které vykazuje současně dobrou prostupnost iontů a vysoký elektrický odpor, je použita mořská řasa. Jako elektrolyt je použit iontový nápoj Gatorade. Při konstrukci kondenzátoru byly testovány i další typy energetických a iontových nápojů, ale žádný jiný nevykazoval tak vhodné složení iontů. Celá součástka je obalena v želatině. Pro zvýšení životnosti kondenzátoru byly navíc mezi želatinu a kolektory umístěny plátky sýra, které zabráňují úniku elektrolytu do želatiny. Součástka vykazovala specifickou kapacitu 80 F/g, hustotu proudu 1 A/g. K jejímu naprostému rozložení v destilované vodě došlo za 2,5 hodiny.



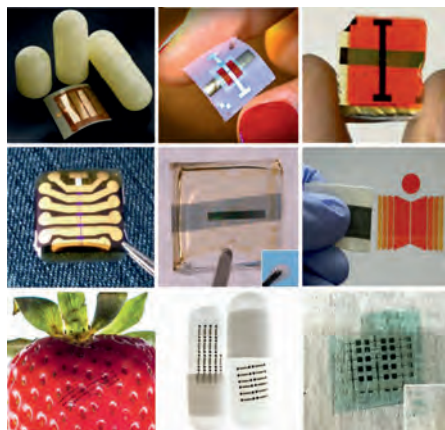
Konstrukce a princip fungování požitelné elektrické baterie založené na žampionovém a jablečném extraktu. Zdroj: Advanced Materials Technology.

**Tranzistory.** Mezi základní logické součástky každé elektroniky patří tranzistory, které mohou sloužit k detekci, zesilování, napěťové stabilizaci a dalším funkcím (diody, triody, tranzistory řízené elektrickým polem – FET). Z pochopitelných důvodů se v rámci požitelné technologie navázalo na konstrukci organických FET, tzv. OFET. První funkční tranzistory byly složeny ze zlata (vodič), adeninu a guaninu (izolátory) a  $\beta$ -karotenu a indanthrenových barviv (polovodiče). Několik funkčních OFET bylo také vytvořeno z požitelných polymerů, nicméně jejich výčet je omezený a rozsah fungování má velké mezery. Jako perspektivní se pro další rozvoj této technologie jeví využití melaninu, indiga a podobných látek jako požitelných polovodičů.

**Senzory.** Pokud má být součástka schopna sledovat chemické, fyzikální nebo fyziologické změny v lidském těle, musí mít funkční složku, která tyto změny převede na elektrický signál. Mezi nejjednodušší cesty patří zařazení prvku s piezoelektrickými vlastnostmi, který v závislosti na mechanické změně generuje elektrický proud. Toho může být využito například k měření tlaku nebo ke konstrukci mikrofону. Dobré piezoelektrické vlastnosti vykazují celulóza. Jako vhodný materiál pro

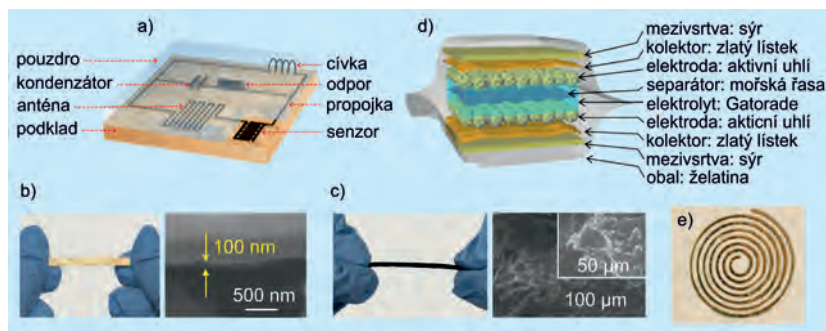
**Melanin** – skupina biologických pigmentů, zodpovědných například za barvu kůže, vlasů a očí. Díky svým fotochemickým vlastnostem zajišťuje ochranu organismů před poškozením zejména ultrafialovým zářením. Rozlišujeme hnědý až černý eumelanin, podmiňující například zbarvení hnědých či černých vlasů, žlutý až červenohnědý feomelanin, zodpovědný za zbarvení rtů či prsních bradavek u bělochů a zrzavých vlasů, a neuromelanin, vyskytující se ve specializovaných strukturách mozku. Relativní nadbytek feomelaninu u žen vysvětluje odlišný odstín kůže žen oproti mužům z téže populace. Tvorba melaninu v organismu je stimulována ozářením ultrafialovým zářením typu B.





Ukázky jedlé elektroniky. Zdroj: Online Library, Willey.

a) Konstrukce běžného zařízení požitelné elektroniky.  
b) Fotografie a mikroskopický snímek vodiče (zlato/rýžový papír). c) Fotografie a mikroskopický snímek rezistoru (aktivní uhlí/škob/cukrová vata). d) Konstrukce požitelného kondenzátoru. e) Fotografie požitelné antény.  
Zdroje: Advanced Materials Technology.



piezosenzory se jeví brokolice nebo růžičková kapusta. Piezozařízení složené z prášku z brokolice a želatiny vykazovalo jen o řád nižší piezo signál než běžně používaný oxid ZnO s obdobnou konstrukcí. Ke snímání pH se dá využít i kondenzátor, který v závislosti na pH mění kapacitu, čímž se ve spojení s cívkou mění rezonanční frekvence obvodu. Jednoduché součástky vykazující polovodivé vlastnosti se dají použít na měření teploty, případně na zjištění složení okolních plynů.

**Antény.** Jelikož není možné získávat detekované informace přes připojený kabel, každé zařízení musí obsahovat anténu, která přenesla naměřená data mimo trávící trakt. Přestože byly navrženy i komplikované systémy, konstrukčně se často jedná o velmi jednoduchá zařízení, složená z vodivé složky a obalu ve tvaru cívky, která umožňují přenos signálu z lidského těla do přijímacího zařízení.

**Baterie.** Zařízení určená k monitorování jednoduchého parametru nemusí být opatřena dodatečnou baterií. Opačná situace nastává u komplikovanější konstrukcí. V současnosti populární lithium je nejen nepoživatelné, ale i toxické, a tak i tato součástka musí být připravena z výše zmíněných materiálů. Jeden z prvních prototypů byl vytvořen na bázi polymeru, stříbrných nanovláken a sodíkových iontů (napětí  $U = 0,6$  V). Další prototyp založený na spotřebovávání cukrů vykazoval sice nízkou hustotu proudu, ale vzhledem ke své hmotnosti měl vyšší hustotu uskladněné energie než lithiová Li-ion baterie. Mezi nejnovější a nejzajímavější požitelné baterie patří součástka založená na bioanodě (etanol/ $O_2^+$  a extrakt ze žampionů) a katodě složené z extraktu z jablka, švestek a banánové hmoty. Zbytek baterie byl vytvořen

z aktivního uhlí a olivového, kukuřičného a sezamového oleje, které byly použity pro vytvoření nosné matrice. Během fungování přecházejí elektrony ze žampionové do jablečné elektrody. Při běžné zátěži je baterie schopna dávat energii až 4 hodiny. Obrázek jedné takové typické baterie, která je plně požitelná, naleznete na předchozí straně 295 nahoře.

## Příklady prvních funkčních prototypů

Do dnešního dne byla úspěšně testována jen hrstka plně funkčních požitelných zařízení. Jedním z prvních bylo zařízení na měření pH v žaludku založené na změně rezonanční frekvence v obvodu s odporem a kondenzátorem. Výrazně komplexnější zařízení založené na aktivním uhlí a olivovém oleji taktéž měří změnu pH v žaludku a ve střevech, ovšem využívá tyto hodnoty k určení hodnoty cukru. Dopusud byl také prezentován plně funkční mikrofón založený především na piezo senzoru (brokolice/želatina) schopný efektivně monitorovat zvuky spojené s trávením. Pomocí nich je následně možno určovat některé zažívací problémy pacienta. Jedním z nejnovějších prototypů je zařízení sledující teplotu v žaludku pomocí polovodivých vlastností požitelných látek. Výjimečností tohoto zařízení je, že je obaleno v hydrogelu, který v žaludku vstřebá velké množství vody, čímž dojde k jeho významnému nabobtnání. Zařízení tedy tělo nemůže posunout dále v trávicím traktu, a proto může docházet k dlouhodobějšímu monitorování teploty žaludku (v horizontu dnů), než je hydrogel natráven. Z průběhu teploty se dá určit například množství přijaté potravy.

Jak je vidět, technologie spojená s požitelnou elektronikou je teprve v plenkách. Mezi hlavní současné výzvy patří především nahrazení anorganických složek pro vodivé kontakty dobře stravitelnou složkou a rozšíření spektra plně funkčních prototypů.

■ Pavel Galář, 22. 1. 2021, AB 3/2021



Různé suroviny pro součástky požitelné elektroniky.  
Zdroj: Online Library Willey.

**Kosmické záření** – proud částic nejrůznějšího původu přilétající z vesmíru. Kosmické záření je majoritním zdrojem antihmoty na naší planetě. Může vznikat v supernovách, pulzarech, aktivních galaktických jádrech atd. Naprostá většina částic kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, přibližně 10 % jsou jádra hélia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření má nejširší spektrum energií ze všech do dnes známých jevů. Mnohé částice, které se dnes vědci pokoušejí nalézt v moderních urychlovačích, se mohou nacházet právě v kosmickém záření. Kosmické záření bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Victorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 300 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry, a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku. Při interakci s atmosférou vzniká sekundární sprška milionů i miliard částic, mezi nimi je značné množství těžkých elektronů (mionů) a různých mezonů.

→ V horních vrstvách atmosféry vznikají ve výšce 10 až 15 kilometrů sekundární spršky kosmického záření (tzv. Augerovy spršky). Jsou zdrojem intenzivního toku mionů na zemském povrchu (10 000 mionů na metr čtvereční za minutu), který lze využívat v různých technologiích. Zdroj: National Nuclear Laboratory, Velká Británie.

## Od egyptských pyramid k mionovému tomografu

Zkoumání vnitřní struktury látky za pomoci elementárních částic se v průběhu 20. století stalo naprostým standardem. Svým způsobem sem patří i zobrazovací metody založené na rentgenovém záření (proudu fotonů s vysokými energiemi). Neutronová difraktoimetrie umožňuje sledovat stavbu krystalických struktur díky tomu, že neutrony mají i vlnové vlastnosti a na periodické struktuře dochází k jejich ohybu. Z ohybového obrazce se potom vyhodnocuje krystalografické uspořádání. Dalším příkladem může být elektronový mikroskop, bez něhož si dnes už práci v některých typech laboratoří nedokážeme vůbec představit. Všechny tyto technologie jsou závislé na zdroji určitého druhu částic (fotonů, neutronů nebo elektronů). V poslední době se stále častěji provádí výzkum vnitřní struktury rozměrných objektů za pomoci *mionů* – těžkých elektronů. Jde v tuto chvíli o jedinou metodu, pro níž nemusíme konstruovat zpravidla drahý zdroj elementárních částic. Neustálý přísun mionů na zemský povrch totiž zajišťuje interakce kosmického záření s horní vrstvou atmosféry. Při srážkách částic kosmického záření s atomy a molekulami atmosféry ve výšce deset až patnáct kilometrů vzniká obrovské množství mionů. Na povrchu Země jich za každou minutu dopadá 10 000 na každý metr čtvereční. Využití těchto mionů pro detekci vnitřní struktury nejrůznějších vzorků se stává hitem několika posledních let.

### Miony

Elektron existuje ve třech variantách: jako běžný stabilní elektron, těžký elektron neboli *mion* a supertěžký elektron neboli *taunon*. Těžký elektron objevil v sekundárních sprškách kosmického záření vynikající americký experimentátor Carl David Anderson. Bylo to v roce 1936 – v roce, kdy přebíral Nobelovu cenu za objev pozitronu z roku 1932. Obě částice objevil za pomoci stop, které zanechávají v mlžné komoře. Mion má hmotnost přibližně rovnou 207 hmotnostem elektronu a je nestabilní. Jeho střední doba života je dvě mikrosekundy. Rozpadá se slabou interakcí na běžný elektron, elektronové antineutrino a mionové neutrino. Dvě mikrosekundy se mohou z lidského hlediska zdát jako krátká doba, ale ve světě elementárních částic jde o celou věčnost.





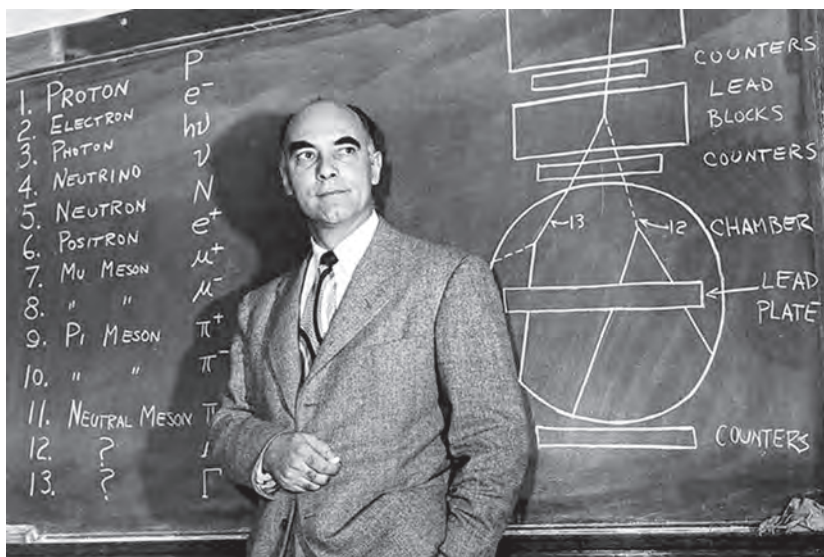


**Mionová spektroskopie** – experimentální technika, při které je na vzorek vyslán svazek mionů s preferovanou orientací spinu (spinově polarizovanými miony). Změny spinu mionu přináší informace o prostředí, kterým mion právě prolétá. Jde o techniku podobnou magnetické rezonanci (at jaderné nebo elektronové).

Miony dopadají na zemský povrch jedine díky relativistickým efektům. Za dvě mikrosekundy by totiž k povrchu nedoletěly ani v případě, že by putovaly nejvyšší možnou rychlostí – rychlostí světla. Z pohledu pozorovatele na povrchu Země dochází k dilataci času a střední doba života rychle letících mionů se mnohonásobí – proto mají dostatek času na to, aby doletěly na zemský povrch. Z hlediska souřadnicové soustavy spojené s mionem se sice nemění doba života, ale zato se zkrátí vzdálenost, kterou mion musí k povrchu uletět. Dopad mionů na zemský povrch je krásným příkladem fungování Einsteinovy speciální teorie relativity.

Energetické miony reagují s běžnou látkou méně než jiné běžné částice, velká část z nich prolétne i mnohapatrovou budovou. Všude přítomný tok mionů (10 000 jedinců na metr čtvereční za minutu) je pro některé experimenty extrémně rušivý. Proto se často laboratoře s detektory temné hmoty či neutrin umísťují hluboko pod zemí. Nejhlubší evropská laboratoř je v blízkosti francouzského městečka Modane, v hloubce 1 700 metrů pod horou Fréjus Peak. Největší podzemní laboratoř na světě v italském Gran Sasso nad sebou má 1 500 metrů zeminy. Toto množství horniny odstraní naprostou většinu mionů a do podzemních laboratoří projdou jen neutrina a částice temné hmoty.

Americký fyzik Carl David Anderson, objevitel pozitronu a těžkého elektronu (mionu), vysvětluje princip identifikace částic v mlžné komoře. Za objev pozitronu získal Nobelovu cenu za fyziku v roce 1936. Zdroj: archiv Kalifornského institutu technologií.



## Pátrání v pyramidách

Neustálý tok mionů přicházejících z oblohy proniká překážkami na povrchu Země. Platí obecné pravidlo: čím kompaktnější překážka, tím více mionů pohltí či rozptýlí. Nejúčinnější jsou v tomto smyslu jádra těžkých prvků, například olova, uranu či plutonia. Ale zatím zůstaňme při zemi a konstatujme jen, že kámen pohltí více mionů než vzduch. Amerického částicového fyzika Louise Alvarize v šedesátých letech 20. století napadlo, že by takto bylo možné hledat skryté místnosti v pyramidách. V jedné ze spodních komor Rachefových

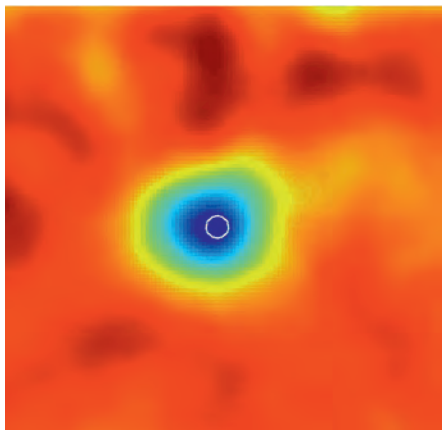
pyramidy v Gíze umístil mionový detektor a prokázal, že v pyramidě nejsou žádné další větší dutiny. Ty by se totiž projevíly zvýšeným tokem mionů oproti okolí. V roce 1968 získal Louiz Alvarez Nobelovu cenu za objev řady částicových rezonancí (velmi krátce žijících elementárních částic).

Metoda poprvé použitá Alvarezem byla úspěšná u Cheopsovy pyramidy – největší egyptské pyramidy považované za jeden ze sedmi divů světa. Kolaborace „Scan Pyramids Mission“ vědců z Egypta, Japonska a Francie využila tok mionů k zobrazení vnitřní struktury pyramidy. Tým použil několika druhů detektorů, zejména plastové scintilátory, které jsou standardem v detekci těchto částic. V roce 2016 byla připravena pro zamýšlený výzkum speciální chemická emulze. Emulzi vyvinuli v japonské Nagojské univerzitě, kde mají s detekčními emulzemi bohaté zkušenosti a patří ke světové špičce v jejich vývoji. Emulze připomíná fotografický film, v němž jsou zaznamenávány stopy mionů, a snadno lze vyhodnotit směr, ze kterého přilétly. Vědci emulzi uložili na několik míst v nejnižší umístěné komoře Cheopsovy pyramidy. Z dvojrozměrných obrazů pořízených v různých místech byla počítačem rekonstruována třírozměrná vnitřní struktura pyramidy. Kromě známých komor byla v roce 2017 objevena do té doby neznámá dutina o délce 30 metrů. Již dříve se na základě dispozic místností v pyramidě uvažovalo o tom, že by podobná komora měla v pyramidě existovat. Na první pohled se zdálo, že do nově objevené místnosti nebude možné vkročit bez použití vrtáků či jiné destruktivní techniky. Nagojský tým ale také objevil strukturu podobnou chodbám, které by mohly v budoucnosti přístup do nové místnosti zajistit. Metoda se rychle šíří. V současnosti je mionový detektor také umístěn pod známou pyramidou Slunce v mexickém Teotihuacánu. Jde o třetí největší pyramidu na světě a druhou největší ve střední Americe.



*Rachefova pyramida. V Egyptě ji vybudoval král Rachef, základna má 215 metrů, výška je 136 metrů. Je jen nepatrně menší než Cheopsova pyramida. Před pyramidou je známá Velká sfinga, obří socha ležícího lva s hlavou panovníka. Louis Alvarez v této pyramidě konal první pokusy s mionovým zobrazováním vnitřní struktury pyramid. Zdroj: Wikipedia, CC BY-SA 3.0.*

**Mionová tomografie** – zobrazovací technika využívající tok mionů ze sekundárních spršek kosmického záření. Miony procházejí objektem a jejich tok se mění na dutinách a kompaktních tělesech. Je-li objekt obložen mionovými detektory, stačí v několika úhlech vyhodnotit změny toku mionů a počítačově vytvořit třírozměrnou mapu nehomogenit uvnitř objektu. Metoda připomíná klasickou rentgenovou tomografii. Poprvé byla použita při hledání neznámých prostor v pyramidách.



Mionový stín způsobený Měsícem. Takto zobrazil detektor IceCube v roce 2010 stín v toku mionů způsobený přítomností Měsíce. Barvy jsou kódovány podle toku mionů (červená nejvyšší, modrá nejnižší). Skutečná velikost a poloha Měsíce je označena bílým kroužkem (průměr 0,5°). Východ je vlevo, západ vpravo. Zdroj: IceCube Col.

Typická kontejnerová loď ZIM New York. Loď byla postavena v roce 2002 a pluje pod Hongkongskou vlajkou. Na loď se vejde 4 800 normalizovaných kontejnerů na zboží (6×2,4×2,4 m), dlouhá je 294 metrů a šířku má 32 metrů. Foto: Patrick Denker.



## Ve stínu Slunce a Měsíce

Měsíc i Slunce odstíní kosmické záření, takže ze směru, kde se nacházejí, přichází snížený tok jak primárních částic kosmického záření, tak částic ze sekundárních spršek, které vznikají až v atmosféře. Vodní neutrinové detektory jsou citlivé na miony vznikající interakcí neutronů s vodou i na miony ze sekundárních spršek, takže ve směru Měsíce a Slunce „vidí“ mionový stín, jinými slovy snížený tok mionů pozadí. Měsíc je k Zemi blíže než Slunce, proto je jeho stín ostřejší. Mionový stín vrhaný Měsícem byl pozorován neutrinovým detektorem IceCube už v roce 2008. IceCube je největším neutrinovým detektorem vůbec, fotonásobiče zamrzlé v antarktickém ledu zaujímají objem jednoho kilometru krychlového. Ukázalo se, že mionový stín není neužitečný jev, jak by se mohlo na první pohled zdát, ale lze ho velmi dobře využít ke kalibraci úhlové rozlišovací schopnosti detektoru pro různé energie. V současnosti se úhlové rozlišení takto zjišťuje rutinně. Mionový stín Slunce byl prokázán v roce 2015 mexicko-americkým detektorem HAWC (*High-Altitude Water Cherenkov Observatory*) a v roce 2019 podrobně zobrazen detektorem IceCube.

## Mionový tomograf a kontejnerové lodě

Současná globalizace obchodu vede k přepravě zboží ve velkém. Oceány brázdí kontejnerové lodě, u nichž je obsah kontejnerů v podstatě nekontrolovatelný, neboť otevírání jednotlivých boxů není možné. Běžné detekční metody jsou u robustních ocelových kontejnerů neúčinné a například malá schránka s plutoniem určeným pro konstrukci jaderných zbraní je nezjistitelná. Nějakou dobu se uvažuje o využití mionů ze sekundárních spršek kosmického záření. Mionový tok je totiž výrazně stíněn atomy s velkými jádry (olovem, uranem, plutoniem atd.), takže by mionové detektory byly schopné schránku se strategickým materiálem objevit, aniž by došlo k otevření kontejneru. Práce dosavadních detektorů byla ale natolik pomalá, že by paralyzovala světový trh snad ještě více



než pandemie covidu-19. Italská skupina vědců z Katánské univerzity našla pod vedením profesora Francesca Riggiho pravděpodobně schůdné řešení. Vícevrstvé scintilační detektory umístěné nad a pod kontejnerem umožní pomocí počítače rychle vyhodnotit i drobné změny v toku mionů. Následná počítačová 3D rekonstrukce je schopná dle úvodních testů objevit olověnou schránku o velikosti pouhých 20 centimetrů. Metoda je v podstatě analogií klasické tomografie, která rekonstruuje obraz z několika rovin. Nová mionová tomografie je sice zatím v plenkách, ale v budoucnosti by mohla zabránit pašování strategických materiálů ve velkoobjemových kontejnerech. Technologie by jistě našla uplatnění i v dalších oblastech lidské činnosti.

■ Petr Kulháněk, 12. 3. 2021, AB 9/2021

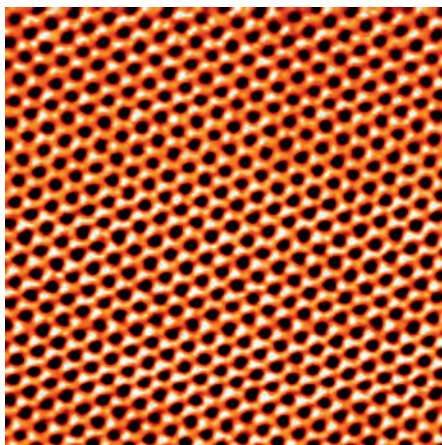


**Katánská univerzita** – Katánská univerzita má hlavní sídlo v druhém největším městě Sicílie – Katánii. Celkem 18 fakult je ale rozeseto v mnoha dalších městech. Univerzita byla založena králem Alfonsem v roce 1434 a je 29. nejstarší univerzitou na světě. Studuje zde 60 000 studentů. Univerzita je zaměřena na humanitární obory, medicínu, politologii, ekonomii, právo, architekturu i přírodní vědy. Součástí univerzity je Katánská astrofyzikální observatoř, která byla založena v roce 1890, a proslulá botanická zahrada Hortus Botanicus Catinensis založená v roce 1858.



**Brownův pohyb** – neuspořádaný pohyb malých částíček v kapalině nebo v plynu, jehož příčinou jsou nárazy molekul na tyto částíčky. Pohyb Brownovy částice je důsledkem neuspořádaného pohybu molekul prostředí. Střední rychlost Brownovy částice roste s teplotou, se zmenšením viskozity prostředí a se zmenšením rozměru částic. Tento pohyb poprvé pozoroval pod mikroskopem skotský botanik Robert Brown v roce 1827 jako náhodný pohyb pylových zrn v kapce vody. Albert Einstein tento pohyb interpretoval v roce 1905 jako vliv náhodných nárazů molekul vody a jako první průkazný důkaz existence atomů.

Snímek grafenového listu pořízený řádkovacím tunelovým mikroskopem. Zdroj: Paul Thibado, Univerzita v Arkansasu.



## Vlnící se grafenové listy – klíč k čisté energii

Fyzikové na Univerzitě v Arkansasu objevili nanogenerátor, který by se mohl využít k výrobě čisté a dlouhodobě získatelné energie z tepelných pohybů listu grafenu. Vědecká skupina mechanismus pojmenovala VEH (*Vibration Energy Harvest*), doslova „sběr vibrační energie“. Ukázalo se, že dvojrozměrné materiály se mohou využít jako významný zdroj pro získávání energie.

### Vlnění dvourozměrného materiálu

Grafen je materiál, který vzniká oddělením jedné vrstvy atomů uhlíku z grafitu. Dlouho se zdálo, že samotná vrstva nemůže bez podpory substrátu existovat, ale nakonec se její příprava podařila v roce 2004 Andreji Geimovi a Konstantinu Novoselovi na Manchesterské univerzitě. Za objev získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2010, neboť se ukázalo, že jimi objevený materiál má naprosto výjimečné vlastnosti a znamená průlom v mnoha technologiích.

Objevený materiál ve skutečnosti není přesně dvourozměrný, probíhá v něm Brownův pohyb, což je malé kolísání atomů uhlíku tvořících grafen. Materiál se snaží zvlítnout do třetí dimenze, podobně jako se vlny pohybují na povrchu oceánu. Od té doby, kdy skotský botanik a lékař Robert Brown pozoroval v roce 1827 Brownův pohyb, uvažovali vědci o tom, zda by nešlo tento pohyb využít pro získávání energie.

### Lévyho lety

Vědce Paula Thibada, profesora fyziky na Univerzitě v Arkansasu, napadla myšlenka dvourozměrného generátoru energie poté, co jeho tým studentů zaznamenal podivné mikroskopické pohyby listu grafenu. Thibado se svými studenty podložil při pozorování pohybů list grafenu měděnou mřížkou. Pohyby sledoval pomocí tunelovacího rastrovacího mikroskopu. Mikroskop skenuje povrch materiálu za pomoci mimořádně ostrého mikroskopického hrotu a vytváří snímky s atomovým rozlišením. Pomocí této techniky shromáždil tým dostatek informací o pohybech volně ležícího grafenu. Obrázky z řádkovacího tunelového mikroskopu byly ale poněkud překvapivé a na první pohled nebylo jasné, o jaké pohyby jde. Příliš veliká

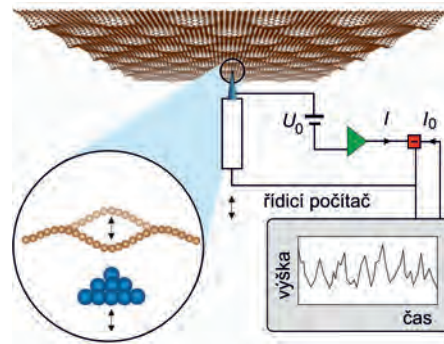
oblast materiálu znamenala, že se jednotlivé typy pohybů nedaly od sebe oddělit. Proto každý obrázek rozdělili na menší úseky. Plochu skenovanou mikroskopem zužovali tak dlouho, dokud neviděli jen jedno jediné zvlnění. Nakonec úplně zastavili skenovací hrot a jednoduše měřili pohyby v jednom jediném místě, jako by se dívali na bójku, která se v oceánu pohybuje pouze nahoru a dolů. Jednalo se o nové použití skenovacího mikroskopu a v tomto výzkumu znamenalo zásadní obrat.

Když tým začal analyzovat data „v bodovém režimu“, objevil dva typy pohybů: malý Brownův pohyb kombinovaný s většími koordinovanými pohyby. Při těchto větších pohybech se zvlnění překlápělo jako tenký kus kovu, který se opakovaně ohýbá. Malé náhodné pohyby kombinované s většími náhlými pohyby jsou ve statistické fyzice známé jako tzv. *Lévyho lety*. Tento jev lze pozorovat v různých souvislostech. Příkladem mohou být biomedicínské signály, klimatická dynamika, chování zvířat při shánění potravy a dokonce i davy lidí v Disneyho světě. Thibado je první, kdo pozoroval tyto samovolné Lévyho lety v atomárním měřítku u anorganické látky.

## Čistý a dlouhodobý zdroj energie

Kdysi vědci uvažovali o tom, že zakřivení grafenu by mohlo být využito jako zdroj energie. Thibadovy experimenty šly mnohem dále. Ukázaly, že grafen má přirozeně se vyskytující módy vlnění, které jsou odezvou na teplotu okolního prostředí. V listech grafenu jsou atomy uhlíku provázány, proto vibrují v tandemu, což jejich pohyby odlišuje od náhodných vibrací, které byste pozorovali například u molekul kapaliny. A právě to je klíčem k využití dvourozměrného materiálu jako zdroje energie. K jejímu získání lze použít nejnovější nanotechnologie.

Profesor Paul Thibado začal vyvíjet zařízení, které přemění energii Lévyho letů vrstvy grafenu na elektrinu. Množství aplikací takového zařízení může být obrovské. Thibado získal předběžný patent na tento vynález označovaný zkratkou VEH (*Vibration Energy Harvest*), což znamená „sběr vibrační energie“. Jeho zařízení obsahuje záporně nabitou vrstvu (list) grafenu, která je zavěšená mezi dvě kovové elektrody. Když se grafen prohýbá nahoru, indukuje kladný náboj v horní elektrodě a když se prohýbá dolů, nabije naopak spodní elektrodu, a vytváří tak střídavé elektrické napětí, které bude dovedeno ke spotřebiči, jímž bude procházet střídavý elektrický proud.



Sledování zvlněného listu grafenu řádkovacím tunelovým mikroskopem. Zdroj: PRL, Paul Thibado, Univerzita v Arkansasu.

**Lévyho lety** – typické pohyby dané statistickým rozdělením, jehož vysokorychlostní část (chvost rozdělení) neubývá exponenciálně, jak je tomu u Gaussova rozdělení, ale pouze mocninně. Výsledkem jsou běžné chaotické pohyby kombinované s občasnými náhlými pohyby na delší vzdálenost. Lévyho lety se objevují v teorii chaosu, při zemětřeseních, v biologii (náhodné hledání potravy jedincem), v astronomii, ale i ve finančních tocích, kryptografii a jinde. Pojmenovány jsou podle francouzského matematika Paula Lévyho.

**Řádkovací tunelový mikroskop** – zařízení mapující po řádcích povrch vodivého materiálu pomocí wolframového hrotu pohybujícího se nad ním. Množství elektronů, které tuneluje z materiálu do hrotu, se projeví jako elektrický proud, pomocí něhož lze vykreslit mapu povrchu. Ve směru povrchu je rozlišení řádově  $10^{-10}$  m, v kolmém směru k povrchu je však rozlišení řádově lepší v důsledku velmi nelineární (exponenciální) závislosti velikosti proudu na vzdálenosti od povrchu. Na špičce wolframového hrotu je v ideálním případě jediný atom, podle toho, jak se hrot podaří vyleptat. Řádkovací tunelový mikroskop umožňuje nejenom zviditelnit jednotlivé atomy, ale pokud se pomocí přiloženého elektrického napětí překoná chemická vazba, také měnit jejich polohy a atomy pomocí hrotu přenášet z místa na místo.

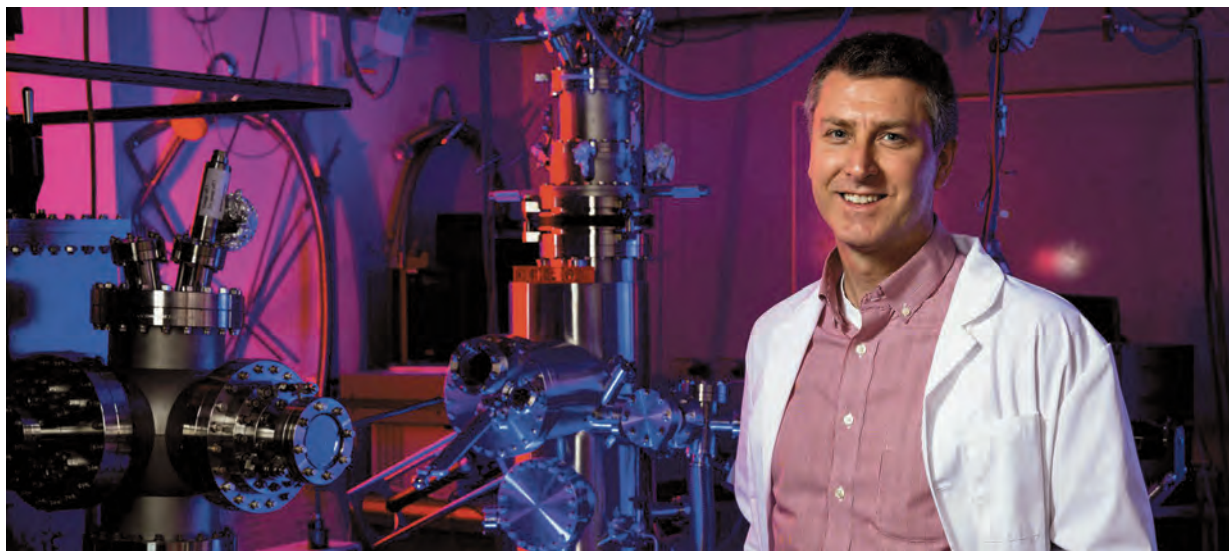
Profesor Paul Thibado ve své unikátní vědecké laboratoři.  
Zdroj: Univerzita v Arkansasu.

Kousky grafenu v Thibadově laboratoři měří něco okolo deseti mikrometrů. Jsou tak malé, že by se jich na hlavičku špendlíku vešlo více než 20 000. Každý Lévyho let měří jen 10 nanometrů a mohl by přitom vyprodukovat výkon 10 pikowattů. To znamená, že každá z těchto „mikromembrán“ může například generovat dostatek energie k napájení náramkových hodinek, které se nikdy nevybijí a nemusí se proto nabíjet z vnějšího zdroje.

Vědci navrhli miniaturní generátor, který by mohl zcela změnit náš přístup k čisté a dlouhodobě získatelné energii. Mohl by umožnit odesílat, přijímat, zpracovávat nebo ukládat informace, pokud by v okolí byla udržována pokojová teplota. To by mělo významné důsledky pro úsilí spojit fyzické objekty s digitálním světem, známé jako „Internet věcí“, anglicky „Internet of Things“. Nový zdroj energie by se tak dal využít pro pozoruhodné a velmi různorodé aplikace.

## Fantastická technologie

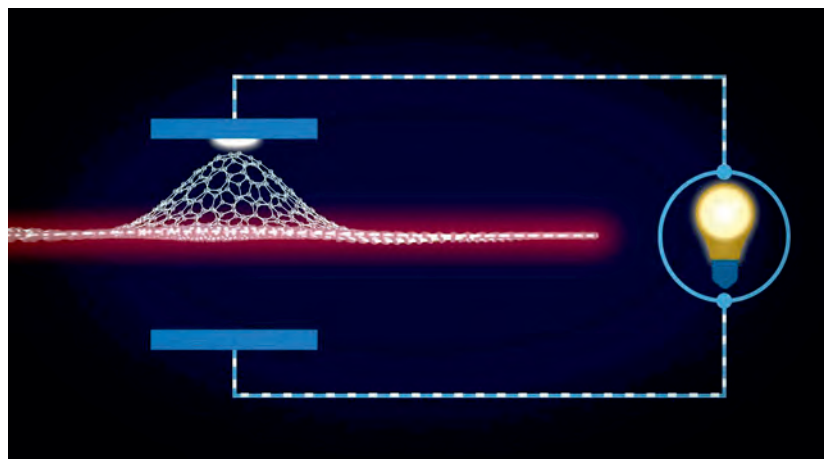
Thibado požádal o patent a tvrdí, že jeho generátor je životaschopný. Budeme si ale muset počkat na testy prototypu tohoto miniaturního elektrického generátoru. Pokud se myšlenka Thibadova týmu ukáže jako reálná, pak by to znamenalo revoluci nejen ve vytváření ener-



gie, ale i ve velikosti generátorů energie. Samočinně se nabíjející mikroskopický zdroj energie by mohl pohánět miniaturní součásti v inteligentních zařízeních, například čidla v chytrých textiliích i jinde. Jednou z možných aplikací jsou zdravotnické přístroje. Současné lékařské implantáty, které často vyžadují baterie, by mohly fungovat jen s pomocí mikroskopických pohybů grafenu a samočinně se nabíjet. Díky tomu by mohly vzniknout malé a účinné inteligentní bioimplantáty. Mikroskopické samočinné nabíjení by mohlo být mimořádně užitečné pro sluchové implantáty, kardiostimulátory a nosné senzory by se mohly díky této technologii zdokonalit. Zajímavým využitím jsou také ušní překladače a další zařízení, která by zdokonalila naše smysly.

Thibado a jeho tým budou nadále zkoumat potenciál grafenu jako jedinečného zdroje čisté a dlouhodobě získatelné energie. Takový zdroj energie by nemalou mírou vylepšil technologie, které jsou blízké biologickým pochodům v lidském těle.

■ Petr Panchártek, 25. 1. 2019, AB 4/2019



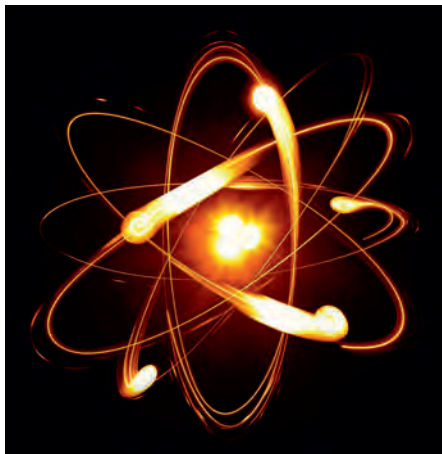
*Princip sběru vibrační energie z pohybů listu grafenu.  
Zdroj: Paul Thibado, Univerzita v Arkansasu.*



## Uran, deuterium nebo thorium?

**Štěpení** – způsob získávání energie štěpením těžkých atomových jader. Je základem současných atomových elektráren, ve kterých jsou jádra štěpena nalétávajícími neutrony. Produktem rozpadu jsou další neutrony, které štěpí další jádra (dojde k tzv. řetězové reakci). První štěpný reaktor postavil Enríco Fermi v roce 1942 v Chicagu. Nejlépe jsou vázaná jádra železa. Energii lze získat buď štěpením těžších jader, nebo slučováním lehčích jader (termojaderná fúze).

Energii lze z atomů získávat štěpením těžkých jader nebo slučováním lehčích jader (fúzi). Hranici mezi oběma cestami je nejlépe vázané jádro železa. Zdroj: ITER.



Nároky na přísun elektrické energie se celosvětově za posledních čtyřicet let zdvojnásobily a dále rostou v čase přibližně lineárně, přičemž výraznou část elektrické energie lidstvo stále vyrábí za pomoci klasického spalování (uhlí, ropa, plyn). Není proto divu, že se vědci na poli energetiky snaží přicházet se stále novými řešeními získávání energie z přírodních zdrojů, které by byly levné, bezpečné a nezanechávaly tak velkou uhlíkovou stopu. Mezi největší naděje na tomto poli patří dnes už klasické jaderné štěpení uranu 235 v jaderných elektrárnách a termojaderná fúze (ať už v tokamacích, stelarátorech nebo při inerciální fúzi), do které se už přes sedmdesát let vkládají nemalé naděje. Tuto dvojici se pokouší v posledním desetiletí velmi svižně dohnat thoriový reaktor na bázi roztavených solí.

### Reaktory na bázi roztavených solí

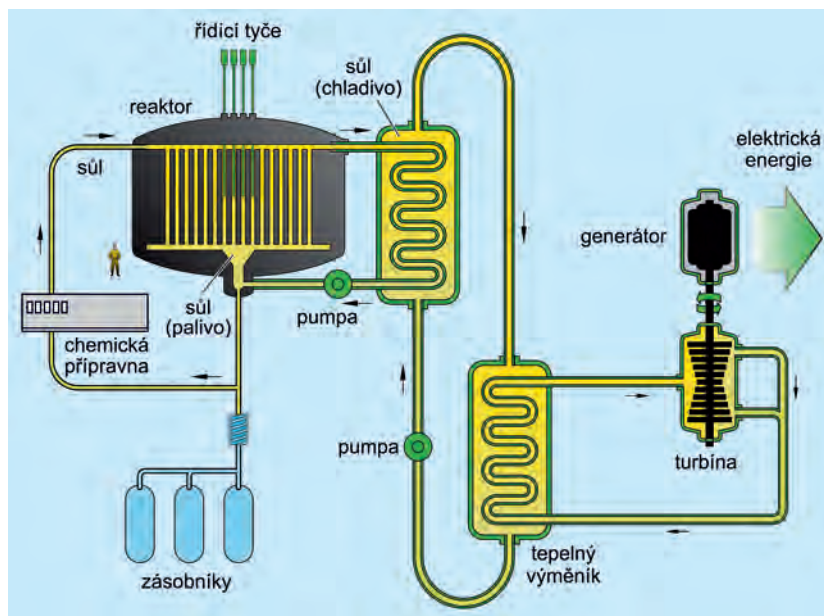
Současné jaderné reaktory využívají k získávání energie uranu 235, který je jediný v přírodě přirozeně se vyskytující štěpný izotop, což z něj v minulosti učinilo primární zdroj energie jaderného štěpení. Mezi další důvody patřila především ekonomicky a technicky výhodnější cesta vodních/tlakovodních reaktorů a taky bohužel v té době výrazný fakt, že lze tento proces jednoduše zneužít k výrobě nukleárních zbraní. Problémy klasických reaktorů však lidstvo buď už zažilo v podobě havárií jaderných elektráren, nebo je stále zažívá při hledání nových míst ke skladu jaderného odpadu. V neposlední řadě můžeme zmínit například i stále stoupající ceny uranu 235.

Reaktory na bázi tekutých (či roztavených) solí se od klasických vodních reaktorů liší především v tom, že jaderné palivo je součástí roztavené soli, která je náplní primárního okruhu jaderného reaktoru. Tato směs slouží i k přenosu tepla do sekundárního okruhu. Největší složku celé směsi tvoří většinou fluoridové soli (částečně byly testovány i chloridové soli), které jsou často dvousložkové nebo třísložkové – například  $\text{LiF-KF}$ ,  $\text{LiF-BeF}_2$  nebo  $\text{LiF-NaF-RbF}$ . Dvousložkové soli se volí kvůli nižší teplotě tání směsi oproti jednotlivým složkám a trojsložková směs může mít lepší i některé další parametry (například cenu). K moderaci reakce lze použít standardní grafitové bloky.

Princip chodu reaktoru je pak takový, že se v něm standardní cestou zažehne štěpná reakce (většinou za použití uranu 235 nebo uranu 233) a takto vzniklé neutrony pak přeměňují další jaderné palivo, kterým je běžný neštěpitelný izotop (například thorium 232 nebo uran 238) na uran 233, který je možné okamžitě dále rozštěpit. Uvolněná energie ohřívá směs uvnitř reaktoru, která svým oběhem vede teplo do tepelného výměníku – těch může být podle konceptu jeden nebo více. No a dál už je cesta v podobě turbínového generátoru známa všem.

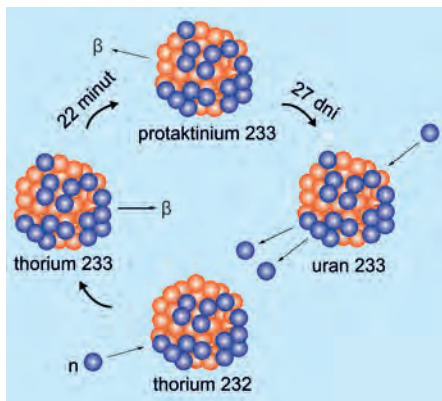
Mezi základní nevýhody takto konstruovaných reaktorů patří nutnost zajistit trvalý oběh směsi/chladiwa, které tuhne už při teplotě kolem 500 °C. Pracovní teplota může dosahovat až 850 °C, což klade značné nároky na materiály primárního okruhu. Právě z důvodů plynoucích z požadavků materiálového inženýrství byl tento koncept v sedmdesátých letech utlumen, jelikož v té době známé materiály nedokázaly dlouhodobě zajistit celistvost reaktoru. Mezi další nevýhody můžeme zařadit například nutnost průběžného čištění směsi, jelikož při štěpných reakcích vznikají i další nechtěné produkty, které by mohly způsobit především pohlcení volných neutronů.

K výhodám pak patří bezesporu vysoká výtěžnost energie z jaderného paliva nebo například schopnost fungovat jako tzv. *množivé reaktory*. Zatímco standardní vodní/tlakovodní a jim podobné reaktory dokážou využít jen zlomek energie jaderného paliva, reaktory na bázi roztavených solí mohou fungovat jako množivé reaktory, čili nejen, že dovedou kompletně využít energetický potenciál paliva, ale dokážou si vlastní palivo vygenerovat, a to až nad rámec vlastní potřeby. Další bezespornou výhodou je vyšší bezpečnost z hlediska možné jaderné havárie. V primárním okruhu je, na rozdíl od reaktorů chlazených vodou, minimální tlak, a proto se do atmosféry i při porušení celistvosti



Základní schéma reaktoru MSR na bázi roztavených solí.  
Zdroj: US DOE NERAC.

**Termojaderná fúze** – jaderná syntéza, při které se slučují lehčí prvky na prvky těžší a uvolňuje se energie. Jaderná fúze může probíhat tehdy, když jádra překonají odpuzivé coulombovské síly a přiblíží se na dosah jaderných sil. K tomu je zapotřebí vysokých tlaků a teplot. Přírodním způsobem probíhá fúze v nitru hvězd. K praktickému využití na Zemi přicházejí v úvahu dvě reakce: slučování deuteria na helium nebo tritium a slučování tritia a deuteria na helium.



Dvojitý rozpad thoria je základem nového typu reaktoru.  
Zdroj: C&N, ACS.

**Uran** – radioaktivní chemický prvek, kov, patří mezi aktinoidy. Prvek objevil v roce 1789 Martin Heinrich Klaproth, v čisté formě byl uran izolován roku 1841 Eugenem-Melchiiorem Peligotem. Izotop 235 se využívá jako palivo v jaderných elektrárnách. Je pojmenován po planetě Uran.

**Thorium** – druhý člen řady aktinoidů, radioaktivní kovový prvek. Díky velmi dlouhému poločasu rozpadu jader thoria nacházíme tento prvek v horninách zemské kůry v množství 8 až 12 mg/kg. Thorium je potenciálním palivem v jaderné energetice. Objevil jej již roku 1828 švédský chemik Jöns Jakob Berzelius a pojmenoval ho po Thórovi, bohu hromu v severské a germánské mytologii.

primárního okruhu neuvolní žádné radioaktivní páry a naopak tekutá solná směs by při úniku poměrně rychle ztuhla, což by mohlo způsobit maximálně škodu lokálního významu.

Další výhody a nevýhody pak plynou z typu použitého jaderného paliva, na což se v případě thoria zaměříme dále. Jaderné reaktory na bázi roztavených solí byly začleněny mezi jaderné reaktory IV. generace a jsou často označovány jako MSR (*Molten Salt Reactor*).

## Thoriový reaktor

O možném využití thoriových reaktorů na bázi roztavených solí se spekuluje přinejmenším posledních deset až patnáct let, přičemž prvotní myšlenky a experimenty patří přibližně do období sedmdesátých let minulého století, kdy v americké národní laboratoři Oak Ridge experimentovali s jadernými reakcemi, které využívaly právě roztavené soli thoria. Světová energetika se však tehdy ubírala cestou uranu, a tak byl další vývoj především i kvůli řadě technologických a konstrukčních problémů, které jsme již zmínili, ne-li pozastaven, tak přinejmenším hodně upozaděn.

V podstatě všechno thorium, které se na Zemi vyskytuje, je v podobě izotopu  $^{232}\text{Th}$ , přičemž tento izotop sám o sobě štěpný není (má sudý počet neutronů), ale po absorpci neutronu se přemění nejprve na  $^{233}\text{Th}$ . Pak jádro prodělá dvojitý beta rozpad. Po prvních 22,3 minutách se rozpadne na protaktinium a za dalších 27 dní na uran 233. Tímto způsobem si množivý reaktor, který se označuje zkratkou LFTR (z anglického *Liquid Fluoride Thorium Reactor* – občas „lidově“ označovaný jako „*Lifter*“) generuje vlastní palivo. Problém je však ten, že je potřeba vzniklé protaktinium včas z reaktoru odebrat a nechat rozpadnout na uran 233 mimo reaktor. Jinak by totiž jádro mohlo v reaktoru absorbovat další neutron a přeměnit se tak v izotop se sudým počtem neutronů, který by se ke štěpné reakci nehodil. Nutnost odebrání radioaktivního protaktinia má i blahodárné účinky na bezpečnost celého zařízení, jelikož se radioaktivní materiál ve velkém množství nehromadí přímo v reaktoru, což sebou přináší i menší množství uvnitř obsaženého zbytkového tepla.

Mezi další výhody spojené s použitím thoria patří fakt, že odpad z jaderného paliva je nutné skladovat přibližně „pouze“ 500 let, což je mnohem méně, než v případě odpadu při využití uranu 235, kde se skladování počítá řádově na tisíce až desetitisíce let. Navíc při thoriové

štěpné reakci nevznikají těžké transurany, které jsou obvykle nejnebezpečnější složkou následného vyhořelého paliva. V neposlední řadě je proces štěpení za využití thoria velmi obtížně zneužitelný k jakémukoli výrobě jaderných zbraní.

Z hlediska celosvětových zásob je thorium v zemské kůře zastoupeno přibližně tři až pětkrát více než uran (ze kterého tvoří štěpný izotop  $^{235}\text{U}$  pouze 0,7 %). Velké zásoby thoria má především Austrálie (přibližně 18 % všech celosvětových zásob), Indie, skandinávské země, Spojené státy, Čína a Brazílie.

Otázkou tedy nyní zůstává, proč už lidstvo dávno thoriové reaktory na bázi tekutých solí nevyužívá? Odpověď může být různorodá – především jsme dlouho čekali na objev kvalitních materiálů, ze kterých by mohl být zkonstruován reaktor a primární okruh. Poté je potřeba přiznat, že až do dnešních dní nikdo nezkonstruoval prototyp thoriového reaktoru na bázi roztavených solí a nezačal ho testovat. Tím pádem není ani zpracována kvalitativní analýza rizik, které by se při provozu reaktoru mohly vyskytnout a existuje tak řada otevřených otázek typu *co-když*. Například se jedná o možné zatuhnutí směsi v primárním okruhu, možné problémy při čištění paliva nebo při odebrání protaktinia ze směsi nebo například možná difundace tritia stěnami reaktorové nádoby. Na tyto a další otázky musí odpovědět právě až testovací provoz reaktoru. Posledním argumentem může být i holý fakt, že má lidstvo v současné době velmi dobře komerčně zpracované procesy v systému výroby elektřiny pomocí klasických jaderných elektráren a především z obchodních důvodů není velká vůle tyto procesy měnit. Ve směru vývoje prototypu se ale v poslední době nejvíce posunula Čína se svým konceptem malého thoriového reaktoru. Poměrně daleko ve využití thoria je rovněž Indie, která má velmi omezené zásoby uranu a naopak ohromné zásoby thoria. Indové se však vydali jinou cestou, než je MSR.

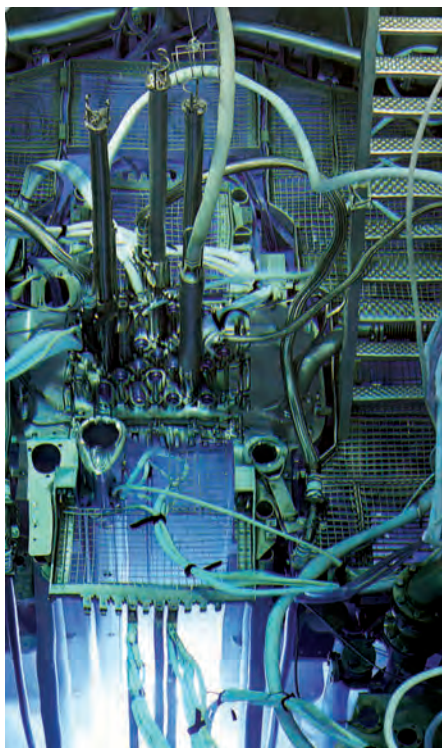
**Moderace** – zpomalení neutronů na tepelné rychlosti. Jako moderátor může posloužit grafit, bór nebo voda. Tepelné neutrony jsou schopné štěpit další jádra uranu v jaderných reaktorech a jejich existence zajišťuje rozvinutí řetězové reakce.

**Štěpný izotop** – izotop, u něhož k rozpadu na dceřinná jádra postačí zachyt tepelného neutronu. Příkladem je uran 235. Naopak u štěpitelných jader, například uranu 238, je třeba vyšší energie a k cíli vede například ostřelování rychlými neutrony.

Thoriové palivo  $^{232}\text{Th}$  je natolik málo radioaktivní, že ho lze bezpečně držet v rukou. Zdroj: Pallava Bagla, Corbis.







*Pohled do prvního thoriového reaktoru, který vyvinula skupina vědců z holandské výzkumné skupiny NRG (Nuclear Research and Consultancy Group). Jeho vývoj trval 45 let, probíhal ve spolupráci s německým Institutem pro transuranové prvky se sídlem v blízkosti Karlsruhe. Zdroj: NRG, Thorium Energy World.*

## Čína a poslední dny

Čínu k vývoji thoriového reaktoru na bázi tekutých solí vede především snaha zajistit ekonomicky a také ekologicky přijatelný energetický zdroj pro svoji početnou populaci – tento projekt by měl totiž výrazně přispět ke splnění vlastní uhlíkové neutrality do roku 2050 (některé zdroje uvádějí rok 2060). A právě v tomto závodu o uhlíkovou neutralitu by měly podle názorů mnoha vědců sehrát významnou roli právě minireaktory. Už v roce 2011 proto zahájili čínští vědci výzkum thoriového jaderného reaktoru na bázi roztavených solí s cílem postavit prototyp do konce roku 2020.

V posledním roce zaznávají z Číny zprávy ohledně dokončení vývoje takového reaktoru s tepelným výkonem 2 MW, který se vejde „běžnému uživateli“ do garáže. Samozřejmě se v rámci velikosti jedná o nadsázku, jelikož i přes to, že rozměry reaktoru jsou  $3 \times 2,5$  metru, k výrobě elektřiny je potřeba ještě něco málo tepelných výměníků, turbín a chlazení. Tyto, oproti standardním reaktorům miniaturní, rozměry jsou důležité jak z hlediska výroby reaktoru mimo stavbu elektrárny (v tzv. čistých podmínkách), tak z hlediska jednoduché dopravy (nízkoprahový export do zahraničí). Podobné reaktory samozřejmě vyvíjí i jiné světové velmoci – Čína je však první, která se fyzickou stavbou thoriového reaktoru výrazně přiblížila k jeho komerčnímu využití. Navíc se jedná o první reaktor na bázi roztavených solí, který bude spuštěn do testovacího provozu od roku 1969, kdy byly opuštěny experimenty v Oak Ridge. Za tento průlom může, dle čínských vědců, právě v poslední době výrazný pokrok na poli materiálového inženýrství.

Čína by v současné době měla tento typ reaktoru začít testovat, přičemž podle prohlášení provinční vlády v Gansu bychom uvedení do komerčního provozu měli očekávat přibližně kolem roku 2030. K tomuto datu také Čína plánuje postavit větší, 373 MW reaktor, což je v současné době podmíněno především úspěšnými testy prototypu.

■ Radek Beňo, 15. 10. 2021, AB 37/2021

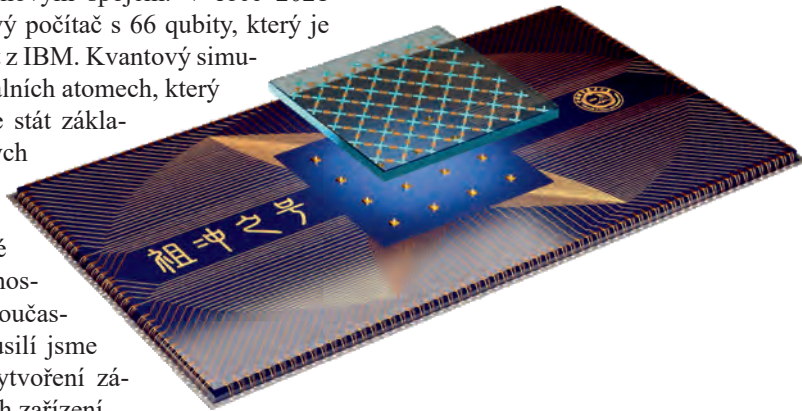
# Kvantové technologie

Elektronická revoluce, jejímiž výdobytky je naše civilizace doslova zaplavena, v posledních třech desetiletích přerostla v revoluci kvantových technologií. Nové technologie nevyužívají jen náboj elektronu, ale také jeho spin a veškeré kvantové vlastnosti mikrosvěta. První spintronická zařízení se okrajově začala objevovat v 80. letech 20. století. Objev obří magnetorezistence v roce 1987 vedl o pouhých deset let později ke skokovému nárůstu kapacity pevných disků o několik řádů. Nové pevné disky začaly využívat interakce spinu elektronu s magnetickým materiálem a elektronická revoluce začala zažívat druhé, kvantové období. Kvantová teleportace přestala být neuskutečnitelným snem a první experimenty z počátku 21. století dospěly až k teleportaci fotonů z povrchu Země na čínskou družici Micius v roce 2017. Kvantová kryptografie nabídla zcela novou míru bezpečnosti přenosu zpráv. V roce 2015 se objevil gravimetr měřící gravitační pole na základě superpozice dvou stavů iontů, které současně vylétly do dvou výšek, v nichž reagovaly na různé gravitační pole. Z interference obou kvantových stavů bylo možné změřit gravitaci s bezprecedentní přesností. Nejvíce je ale kvantová revoluce v povědomí lidí spojená se vznikem kvantových počítačů. První qubity byly realizovány jako chladné ionty držené v elektromagnetické pasti. Postupně se ale prosadily další konstrukce qubitů. V roce 2017 obletěla svět zpráva, že společnost IBM začíná prodávat kvantové počítače s 50 qubity založenými na dvou stavech průchodu elektronů Josephsonovým spojem. V roce 2021 oznámila Čína, že má funkční kvantový počítač s 66 qubity, který je neporovnatelně rychlejší než konkurent z IBM. Kvantový simulátor s 256 qubity založenými na neutrálních atomech, který vyvinula harvardská skupina, se může stát základem procesoru další generace kvantových počítačů. V neposlední řadě se konají i pokusy s prvky budoucího kvantového internetu. Je zřejmé, že kvantové technologie už nejsou hudbou budoucnosti, ale stávají se žhavou realitou naší současnosti. Jako dva příklady současného úsilí jsme vybrali nový kvantový simulátor a vytvoření základního prvku budoucí sítě kvantových zařízení.

**Qubit** – kvantová verze bitu neboli kvantový bit, základní jednotka informace podléhající kvantové logice. Klasický bit je buď ve stavu  $|0\rangle$ , nebo  $|1\rangle$ . Qubit zahrnuje navíc všechny superpozice  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ . Konkrétní hodnotu  $|0\rangle$ , nebo  $|1\rangle$  nabude teprve v okamžiku měření.

**Micius** – čínská družice pro kvantové technologie, která byla na oběžnou dráhu vynesena dne 17. srpna 2016 na palubě nosné rakety Dlouhý pochod 2D. Oficiální název družice je QUESS (QUantum Science Experiment Satellite). V červenci 2017 se podařila kvantová teleportace fotonů na vzdálenost 1 400 kilometrů. Alternativní název Micius je odvozen ze jména čínského filosofa ze 4. století před naším letopočtem. Další družice tohoto typu by měly následovat a do roku 2030 vytvořit základ kvantové sítě a budoucího kvantového internetu.

Pohled na procesor čínského kvantového počítače Zuchongzhi s 66 qubity. Zdroj: University of Science and Technology of China.



**Josephsonův jev** – jev, při kterém dva supravodiče oddělíme tenkou vrstvou izolantu tak, aby Cooperovy páry mohly tunelovat izolantem. Rozhraním poteče elektrický proud, jehož velikost závisí na vnějším magnetickém poli a teplotě. Využívá jej například senzor magnetického pole SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Součástka založená na Josephsonově jevu se nazývá Josephsonův spoj.

## Nový kvantový simulátor

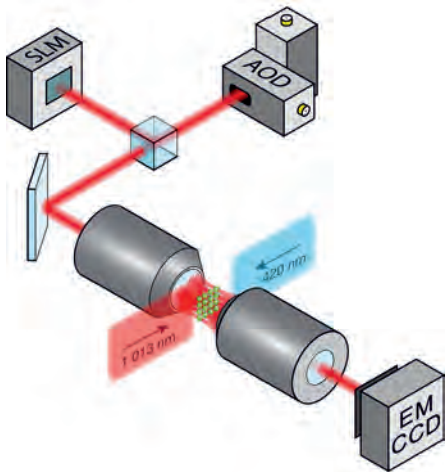
Skupina vědců na Harvardově univerzitě, která spolupracovala s řadou dalších špičkových pracovišť, v roce 2021 informovala, že se jí podařilo zkonstruovat dvojrozměrné pole čítající 256 qubitů tvořených neutrálními atomy excitovanými do vysokých kvantových stavů. Skupina vyvinula technologii pro manipulaci s jednotlivými qubity. Každý qubit je současně elementárním magnetem, takže se qubitová mříž chová jako magnetický materiál. Skupina pozorovala jak fázové přechody známé teoreticky, tak objevila nové fázové přechody. Vzniklá qubitová mříž může také sloužit jako programovatelný kvantový simulátor a v budoucnu otevřít cestu novým kvantovým technologiím včetně nové generace kvantových počítačů, jejichž qubity budou mít odlišnou konstrukci od současných systémů založených většinou na Josephsonově jevu.

Výzkum tohoto druhu odstartoval na Harvardově univerzitě ve druhém desetiletí 21. století. Vědci zde prováděli experimenty s poli neutrálních atomů excitovaných do vysokých kvantových stavů. V roce 2017 se jim podařilo vytvořit a ovládat lineární řetězec 51 qubitů realizovaných chladnými rubidiovými atomy ( $^{87}\text{Rb}$ ). V další etapě se k výzkumu připojili i vědci ze Stanfordovy univerzity, Kalifornské univerzity v Berkeley, Rakouské akademie věd a dalších institucí. V roce 2021 skupina oznámila vytvoření úspěšného prototypu rovinného pole s 256 qubity. Popíšeme si jejich kvantový simulátor podrobněji.

Základem jsou ultrachladné neutrální atomy rubidia  $^{87}\text{Rb}$ . Vlnoplocha laserového paprsku je upravena modulátorem SLM (Spatial Light Modulator, viz obrázek) tak, aby ve vakuové komoře, kde probíhají experimenty, vznikla statická dvojrozměrná optická mříž – pole optických pinzet, v nichž se usadí rubidiové atomy. Do takto připraveného statického pole potenciálových minim jsou náhodně rozmístěny rubidiové atomy. Na scénu přichází druhá sada optických pinzet, která je ovládána dvojicí navzájem kolmých akustických optických odchylovačů AOD (Acoustic Optical Deflector). Tato sada rozmístí atomy pravidelně do mříže tak, aby nikde nebyla prázdná místa či jiné poruchy. Konfiguraci mříže lze během řádově 100 ms změnit ze čtvercové na trojúhelníkovou nebo šestiúhelníkovou.

Qubity z neutrálních rubidiových atomů pracují se dvěma kvantovými stavy: základním  $|g, 5\rangle$  a vysoce excitovaným Rydbergovým stavem  $|r, 70\rangle$ . Mezi oběma stavy existuje dvoufotonový přechod

Schéma kvantového simulátoru, který vznikl na Harvardově univerzitě. Význam zkratk: SLM (Spatial Light Modulator), AOD (Acoustic Optical Deflector), EM CCD (Electron Multiplying CCD). Zdroj: Harvard, Nature.

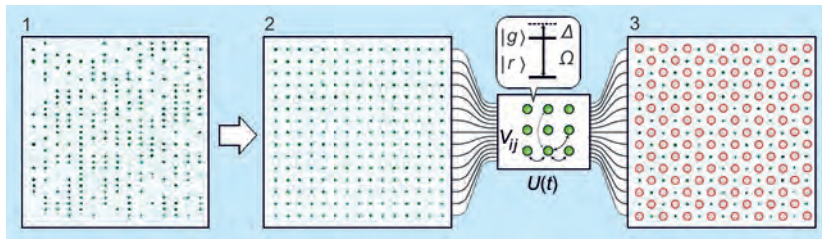




( $\Delta$ ,  $\Omega$ ). Proto jsou do vakuové komory z obou stran namířeny dva lasery s vlnovými délkami 420 nm (modrofialové světlo) a 1 013 nm (infrachervené záření), které umožňují přechody mezi oběma stavy. Každý z rubidiových atomů se chová jako magnet s příslušnými dvěma stavy. Za pomoci obou laserů je vytvořena antiiferomagnetická mříž, v níž se střídají atomy s oběma stavy. Taková antiiferomagnetická qubitová mříž má zajímavé vlastnosti jak z hlediska magnetické látky samotné, tak z hlediska uložené informace. Stav qubitů je zobrazován fluorescenčně (základní stav se zobrazí, Rydbergův nikoli).

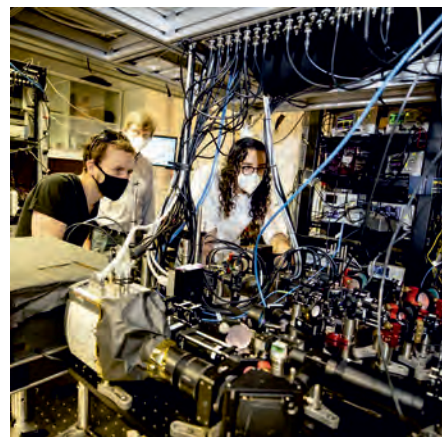
Rydbergovy atomy mají extrémně excitovaný stav, což znamená, že vnější elektron je od jádra velmi vzdálený a silně interaguje s okolím. V antiiferomagnetických systémech existuje i dalekodosahová interakce, takže je snadné realizovat kvantovou provázanost i velmi vzdálených qubitů. Nahrazení dříve používaných iontů Rydbergovými atomy s sebou nese zásadní průlom v možnostech, jak ovládat vzniklé qubity. Nové uspořádání umožní provádět s qubity operace podle pravidel kvantové logiky a vytvořit tak plně programovatelné qubitové pole, což je zajímavé nejen pro kvantové počítače, ale i pro různé kvantové simulátory a různé prvky nových technologií.

Kvantový simulátor vyvinutý na Harvardu je jen jedním z mnoha kamínek revoluce kvantových technologií, která se na nás hrne ze všech stran. Jako využití se na prvním místě se nabízí výzkum fázových přechodů v nových magnetických materiálech a technologický posun pro materiálové vědy. Samozřejmě je jen otázkou času vytvoření třírozměrné mříže qubitů. Ale více dimenzí nemusí vždy znamenat pokrok kupředu. Nezapomínejme, že dvoudimenzionální systémy mají některé specifické vlastnosti, které ve třech dimenzích neexistují. Nová pole qubitů mohou být využita ke konstrukci optických atomových hodin. Přesné měření času může ovlivnit další obory, zejména metrologii. Za nejdůležitější je ale považována programovatelnost koherentně se chovajícího pole qubitů. Výzkum pravděpodobně povede k novému hardwaru pro účinné kvantové algoritmy. Ty pak umožní simulovat složité problémy v chemii a ve fyzice a dají vzniknout zcela novým metodám ve výpočetní technice.

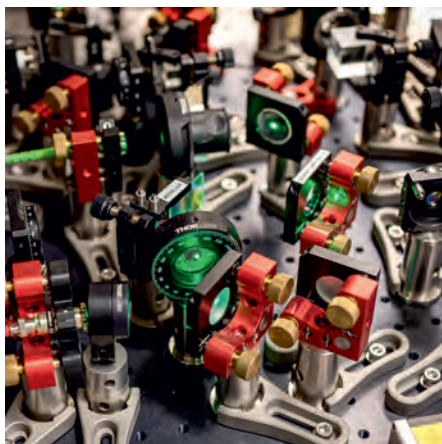


Jednotlivé fáze manipulace: 1 – náhodné rozmístění rubidiových atomů do pole potenciálových minim; 2 – pravidelné rozmístění atomů pomocí sady optických pinzet; 3 – vytvoření antiiferomagnetické mříže ze dvou různých excitovaných stavů. Zdroj: Harvard, Nature.

Pohled do laboratoře na Harvardově univerzitě, kde nový kvantový simulátor vznikl. Zleva doprava: Dolev Bluvstein, Mikhail Lukin a Sepehr Ebadi. Zdroj: Harvard.







Optická lavice kolem jednoho uzlu sítě. Zdroj: QuTech.

Kvantový internet propojí kvantová zařízení do celosvětové sítě. Zdroj: Elektor.



## Kvantový internet

Právě před třiceti lety, v srpnu 1991, předal anglický počítačový expert Tim Berners-Lee světu k užívání protokol *www* (*World Wide Web*), který umožnil vznik celosvětové sítě internet. Stalo se tak v částicovém komplexu CERN, kde vyvstala potřeba sdílení dat mezi jednotlivými počítači. Asi nikdo tenkrát netušil, k jakým převratným technologiím nová počítačová síť povede. Vznik internetu nepochybně posunul naši civilizaci zcela novým a netušeným směrem. A právě o třicet let později jsme svědky počátků kvantové sítě, jejímž cílem bude spojit na velké vzdálenosti různá kvantová zařízení – kvantové počítače, kvantové senzory a další kvantové objekty. Situace se opakuje: tušíme, že nám kvantový internet otevře řadu nevídaných možností a vzniknou zcela nové technologie, ale sotva si dokážeme představit, kam civilizaci kvantový internet za několik desetiletí dostane. Počáteční krok byl učiněn. Nizozemský vědecký tým pod vedením profesora Ronalda Hansona vytvořil první kvantovou síť ze tří uzlů pojmenovaných Alice, Bob a Charlie (personifikace nahrazuje suchopárné označení A, B a C), která propojuje dvě laboratoře výzkumného centra QuTech – společného pracoviště Delftské technologické univerzity a Centra aplikovaného vědeckého výzkumu TNO.

Připomeňme si nejprve, že qubit je kvantovou jednotkou informace, která ve dvou kvantových stavech udržuje současně informace typu 0 a 1. První qubity byly vytvořeny jako superpozice dvou energetických stavů iontů rubidia či cesia, které byly drženy v elektromagnetické pasti. Dnes se qubity realizují většinou jako *superpozice* dvou stavů Josephsonova spoje, případně jako superpozice dvou stavů nějaké struktury v pevné látce. Další z kvantových triků je *provázanost*. Jsou-li dva qubity provázané (mají společnou vlnovou funkci), můžeme určit měřením na jednom z nich některé vlastnosti druhého qubitu, aniž bychom u něho fyzicky měření provedli. Na první pohled to připomíná šíření informace neko-

nečnou rychlostí, ale musíme si uvědomit, že k provázání vlastností těchto objektů došlo zpravidla na jednom místě, a teprve poté byly podsvětelnou rychlostí dopraveny na dvě různá místa. Provázanost je možné navodit laserovým nebo mikrovlnným impulzem.

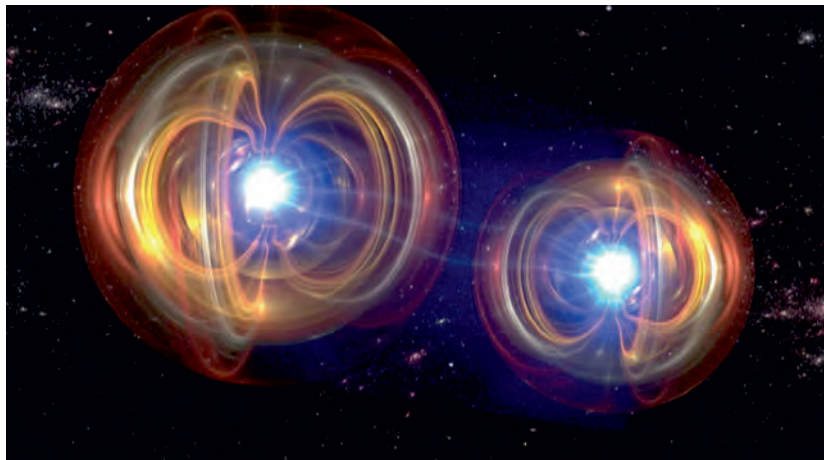
Nejjednodušší kvantová síť se dvěma uzly vznikne, pokud jsme schopni nějak dopravit qubit z jednoho místa na druhé. Zpravidla se tak děje po optických vláknech, ale ztrátovost qubitů je značná. V experimentech prováděných ministerstvem energetiky Spojených států se podařilo qubity dopravovat do vzdálenosti necelých 100 kilometrů. Řešením kvantového spojení na větší vzdálenost je právě provázanost. Pokud vytvoříme dva provázané qubity, dopravíme je nějak do dvou různých míst, například optickými vlákny s kvantovými opakovači, raketou, či nějakou formou kvantové teleportace, a podaří se nám provázanost dlouhodobě udržet, máme vyhráno. Pro další funkci takové qubity už fyzickou linku, která by je spojovala, nepotřebují. Jakmile se podaří vytvořit infrastrukturu provázaných qubitů, kouzlo kvantové sítě začíná. Dosud se dařilo takto kvantově propojit jen dva uzly. Nejdelší vzdálenosti dosáhl čínský kvantový experiment z roku 2017, kdy se podařilo vytvořit a udržet dva provázané qubity na vzdálenost až 1 400 kilometrů. Jeden byl v pozemní stanici a druhý v družici Micius určené pro kvantové experimenty.

Cílem mnoha vyspělých zemí je zvládnout klíčové kvantové technologie natolik, aby bylo možné vytvořit kvantovou síť s mnoha uzly, nejprve v rámci jednotlivých zemí a poté celosvětově. Takové experimenty se konají v USA, Číně, Evropské unii i v dalších územních celcích. Většinou se hovoří o časovém horizontu dvou a více desítek let. Rozsáhlá kvantová síť bude obdobou současného internetu, ale sotva ho kdy nahradí. Kvantové operace s informacemi vůbec nepřipomínají to, na co jsme zvyklí, a poslat obyčejný email po kvantové síti nebude možné. Kvantový internet bude určen pro speciální technologie, které jsou klasickými

**Kvantový počítač** – počítač využívající k zápisu informace kvantové mechanické vlastnosti částic, například spin elektronů, spin atomových jader nebo jiné vlastnosti kvantově se chovajících objektů. Kvantový počítač nese současně informaci o všech možných hodnotách kvantované veličiny, a tím provádí paralelně výpočet všech možností, které mohou nastat. Výpočet je mnohem efektivnější než u klasického počítače. Základní jednotka informace se nazývá qubit (kvantový bit). První kvantový počítač prodala společnost IBM v roce 2017. V roce 2021 byl v Číně vyroben kvantový počítač Zuchongzhi s 66 provázanými qubity.

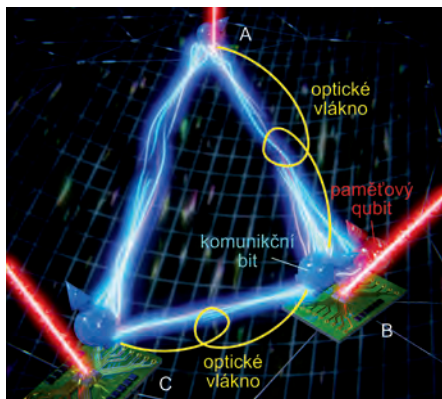
**Fluorescence** – jev, při kterém je v důsledku absorpce světla látkou vyzářeno světlo na jiné, zpravidla delší vlnové délce. Pohlcené fotony excitují elektrony v atomárních obalech a ty poté při přechodu na nižší hladinu vyzáří opět světlo. Při pohlcení dvou fotonů naráz může být vyzářeno i světlo kratší vlnové délky. Jevo poprvé pojmenoval v roce 1852 George Gabriel Stokes.

*Umělecká představa dvou provázaných kvantových objektů (například qubitů). Zdroj: Peter Jurik, Adobe Stock.*



**Rydbergův atom** – atom excitovaný do vysokého hlavního a vedlejšího kvantového čísla. Rydbergovy atomy jsou velmi citlivé na okolní elektrická a magnetická pole. Elektronová vlnová funkce může být u těchto atomů aproximována klasickým pohybem elektronu po kružnici. Vysoce excitované atomy jsou pojmenovány podle švédského fyzika Johannea Roberta Rydberga (1854–1919).

Síť se třemi uzly vytvořená v nizozemském QuTech. Komunikační qubity jsou vykresleny modře, paměťový qubit červeně. Modré spojnice představují kvantovou provázanost jednotlivých uzlů, červené linie jsou laserové impulzy ovládající qubity. Zdroj: QuTech.



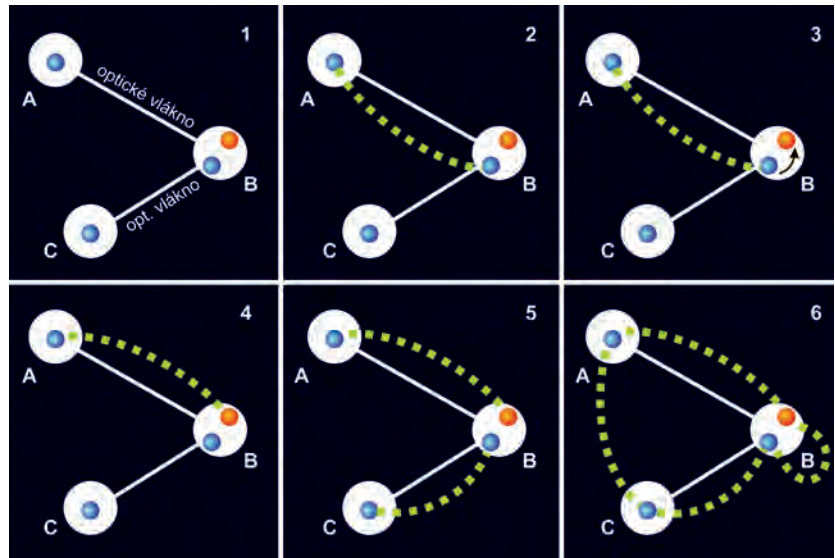
prostředky z principu nedosažitelné. Pravděpodobně tak budou vedle sebe koexistovat jak klasické, tak kvantové sítě. Uveďme dvě typické oblasti využití rozsáhlých kvantových sítí. První z nich je vytvoření kvantového superpočítače. Mnoho kvantových procesorů bude spojených kvantovými linkami. I kdyby měl každý z kvantových procesorů „jen“ 50 provázaných qubitů, kvantová síť umožní vytvořit superpočítač s několika tisíci provázanými qubity. Takový superstroj bude schopen například dělat komplikované výpočty struktur látky složené z mnoha atomů a molekul, které jsou nerealizovatelné jak klasickými, tak samostatnými kvantovými počítači. Druhou často zmiňovanou technologií je kvantové šifrování. Klasicky šifrovaná zpráva potřebuje klíč distribuovaný od odesílatele k příjemci. Takový klíč je vždy v principu možné dekodovat, i když to může být natolik složité, že to agent – škůdce nezvládne. Bezpečnost je dána pouze kvalitou zakódování zprávy. Kvantově šifrované zprávy z principu nemůže dešifrovat třetí osoba. Kvantový klíč může být realizován jako provázané páry qubitů, z nichž je jedna část distribuována od odesílatele k příjemci. Přečtení klíče vždy znamená výběr jednoho stavu z celé superpozice, tedy likvidaci této superpozice. Jeho přečtení je proto pro odesílatele snadno zjištěitelné, a pokud klíč přečetl někdo jiný, prostě zprávu neodešle. Kvantové kódování bude užitečné například pro bankovní sektor. Uvedené dva příklady jsou ukázkami v současnosti představitelných kvantových technologiích. Kvantový internet ale zcela jistě přinese tisíce nových technologií, které si dnes ještě vůbec představit nedokážeme a které využívají vlastnosti částic na elementární úrovni.

## Delftský experiment

První víceuzlovou kvantovou síť se podařilo zprovoznit v roce 2021 v nizozemském výzkumném centru QuTech týmu pod vedením profesora Ronalda Hansona. Jako qubity posloužily dva stavy dusíkové vakance (krystalová porucha, kde je jeden uhlíku nahrazen dusíkem a v sousedství je prázdné místo) v krystalické mříži diamantu. Qubity jsou spolu s malým kouskem diamantu umístěny na třech deskách plošných spojů, které představují jednotlivé uzly sítě. Alice a Charlie (A, C) mají po jednom qubitu, který zajišťuje komunikaci (tzv. komunikační qubit). Bob (B) má dva qubity, jeden komunikační a jeden paměťový – ten umožňuje zapamatování konkrétního spojení pro další využití. Desky plošných spojů umožňují přivést elektrický signál.

Qubity jsou ovládány lasery, které dokážou s qubity provádět operace a číst jejich stav. Uzel Alice je umístěn v jedné místnosti, uzly Bob a Charlie v druhé místnosti.

Uzly Alice a Bob jsou umístěny v různých místnostech a jsou spojeny optickým vláknem (situace 1 na obrázku), které v první fázi zajistí provázanost komunikačních qubitů Alice a Boba (2). Jako další krok je v Bobovi zkopírována informace z komunikačního do paměťového uzlu (3). V tu chvíli je provázán komunikační qubit Alice s paměťovým qubitem Boba (4). Uvolněný Bobův komunikační qubit je v dalším kroku provázán s komunikačním qubitem Charliho (5). Děje se tak opět prostřednictvím optického vlákna, které spojuje Boba s Charliem. Posledním krokem je provázání komunikačního a paměťového qubitu v Bobovi (6). Jakmile se tak stane, jsou provázány všechny čtyři qubity a dokonce existuje kvantové spojení mezi Alicí a Charliem, aniž by mezi nimi bylo spojení fyzické. Mezi Alicí a Charliem žádné optické vlákno není. Zkonstruovaný prototyp kvantové sítě se třemi uzly slouží k ověřování funkčnosti základních principů kvantových sítí. Jde o jeden z dílčích kroků, které ve finále povedou k plnohodnotnému kvantovému internetu, jehož možnosti si dnes sotva dokážeme představit.



Jednotlivé fáze Delftského experimentu: 1 – základní konfigurace. 2 – provázání komunikačních qubitů A, B. 3 – Kopírování informace do paměťového qubitu. 4 – provázání komunikačního qubitu A a paměťového qubitu B. 5 – provázání komunikačních qubitů B, C. 6 – provázání obou qubitů v B. Výsledek: všechny qubity jsou navzájem provázané a tvoří kvantovou síť. Bílé linie představují optická vlákna, tj. fyzickou komunikaci. Kresba autor.

■ Petr Kulháněk, 5. 11. 2021, AB 25, 40/2021



## Nekrolog za Arecibo (1963–2020)

**ARPA** – *Advanced Research Projects Agency*, americká agentura založená v roce 1958, jejímž hlavním úkolem bylo udržet technologický náskok USA nad ostatním světem, zejména v oblasti zbraňových systémů. V roce 1972 byla agentura přejmenována na **DARPA** (*Defense ARPA*), v letech 1993 až 1996 se na krátkou dobu vrátil původní název ARPA. Rozpočet agentury je přes tři miliardy amerických dolarů ročně.

Arecibo s přístrojovou plošinou vznášející se 150 metrů nad povrchem radioteleskopu. Zdroj: NAIC, NSF.



Obří radioteleskop Arecibo se stal ikonou rádiové astronomie na více než půl století. Nepřekonal ho ani sovětské pokusy ze 70. let 20. století, které vyústily ve stavbu radioteleskopu RATAN 600 o průměru 600 metrů. Přístroj měl ale odrazné plochy jen po obvodu a Arecibu nikdy konkurovat nemohl. Arecibo bylo uvedeno do provozu v roce 1963 a fungovalo 57 let. Sférická odrazná plocha byla složena ze 40 000 hliníkových desek o rozměru  $1 \times 1,5$  metru, které byly uloženy s přesností 2,2 milimetru. Radioteleskop vyplňoval přirozenou proláklinu (kráter bývalé sopky) na ostrově Portoriko a měl průměr 305 metrů. Nad ním se na laněch vznášela pohyblivá ohnisková plošina s přístroji, jejímž posunem se zajišťoval pohled až  $20^\circ$  od zenitu. S využitím otáčení Země tak bylo možné sledovat na obloze pás široký 40 stupňů. Rozsah vlnových délek radioteleskopu byl od 2,5 centimetru do jedno-

ho metru. Arecibo fungovalo jako radioteleskop přijímající signály z vesmíru i jako radar schopný aktivně odeslat rádiový signál. Rozsáhlou rekonstrukcí prošel přístroj v 90. letech. V roce 2017 byl poškozen hurikánem Maria. V srpnu 2020 se vysmeklo jedno z prorezlých pomocných lan, které následně prasklo a poškodilo částečně plochu radioteleskopu. Následné diskuze o opravě ukončilo prasknutí jednoho z hlavních nosných lan dne 7. listopadu 2020. Ukázalo se, že plošinu s přístroji nelze bezpečným způsobem sundat dolů. Dne 1. prosince 2020 prasklo další lano a přístrojová plošina se z výšky 150 metrů zřítila přímo na plochu radioteleskopu a dokonala dílo zkázy. Příčinami nehody, rozsahem

a možnostmi likvidace zbytků radioteleskopu se zabývá závěrečná zpráva vyšetřovací komise ze 3. března 2021. Součástí zprávy je i analýza, za jakých podmínek by bylo možné ponechat zbytek observatoře (dvanáctimetrový pomocný radar a LIDAR) v činnosti.

## Trocha historie

Stavbu obřího radioteleskopu na ostrově Portoriko uspíšila studená válka mezi Spojenými státy a Sovětským svazem. Velmi důležitým strategickým úkolem byla detekce nepřátelských střel prolétajících ionosférou. Proto Ministerstvo obrany USA spolu s přidruženou agenturou ARPA přistoupilo ke stavbě radioteleskopu, který by byl schopen zkoumat za tímto účelem ionosféru. Nový radioteleskop byl uveden do provozu v roce 1963. V roce 1969 předalo americké Ministerstvo obrany financování radioteleskopu národní vědecké nadaci NSF. Ta pověřila řízením Cornellovu univerzitu. V 70. letech 20. století se na financování radioteleskopu začala podílet i americká kosmická agentura NASA, která radioteleskop využívala pro své planetární mise. V 21. století začalo být financování radioteleskopu stále problematictější. NASA razantně snížila tok peněz a radioteleskop se dostal do vleklých finančních problémů. V roce 2006 se poprvé začalo uvažovat o jeho odstavení z provozu. V roce 2018 převzala řízení radioteleskopu Středofloridská univerzita (University of Central Florida). Historie radioteleskopu končí v roce 2020 jeho nevratným poškozením.

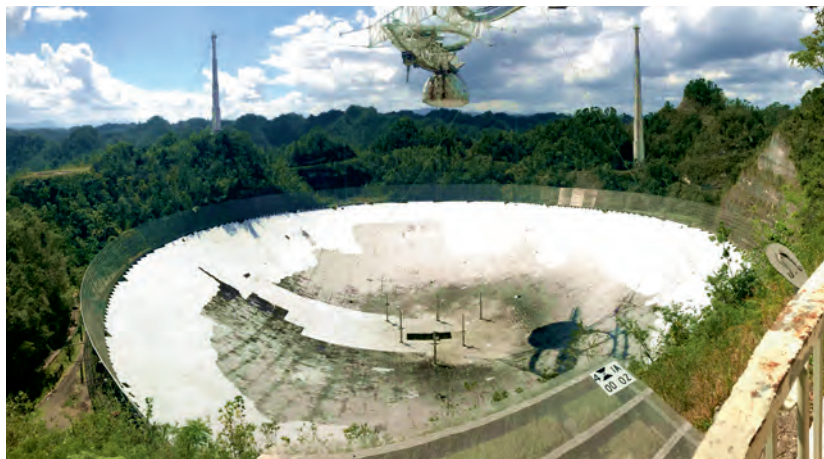
## Velké objevy

Hned v prvních letech provozu se Arecibu podařilo změřit rotační periodu Merkuru. V roce 1968 Arecibo změřilo periodu pulzaru v Krabí mlhovině, pozůstatku po explozi supernovy z roku 1054. Asi k nejvýznamnějším objevům vůbec patří nalezení podvojně neutronové hvězdy PSR 1913+16 v roce 1974. Jedna ze dvou neutronových hvězd je pulzarem. Systém je skvělou relativistickou laboratoří. Russell Hulse a Joseph Taylor změřili



Mapa umístění radioteleskopu Arecibo. Jeho poloha je označena červeným kroužkem. Zdroj: AGA.

Stav poškození radioteleskopu Arecibo po hurikánu Maria v roce 2017. Zdroj: Gizmodo, Ryan F. Mandelbaum.





**NSF** – National Science Foundation. Nezávislá nadace vytvořená americkým kongresem v roce 1950. Jejím základním cílem je podpora vědy za účelem zlepšení prosperity, blaha a zdraví národa. Roční rozpočet je 5,5 miliardy amerických dolarů.

**LIDAR** – Light-Imaging Detection and Ranging, detekce a určování vzdálenosti za pomoci laseru. Jde o metodu zjišťování vzdálenosti a vlastností objektu na základě analýzy rozptýleného světla laseru. Analogii v rádiovém oboru jsou radary. Vzdálenost objektu se určí z časové prodlevy odraženého signálu. Lidary se využívají hojně v geologii, seismologii a při sledování vlastností atmosféry.

**Jarkovského jev** – ovlivnění dynamiky pohybu malých těles Sluneční soustavy zářením. Těleso absorbuje na přivrácené straně ke Slunci záření, které pak tepelně vyzáří i na straně odvrácené. V padesátých letech dvacátého století byla tato myšlenka poprvé detailně zpracována ruským inženýrem Jurijem Jarkovským. V květnu 2003 byl tento jev poprvé pozorován radioteleskopem v Arecibu u planety Golevka.

změnu periody oběhu obou složek způsobenou vyzařováním gravitačních vln. Vyneslo jim to Nobelovu cenu za fyziku v roce 1993. Nepřímá detekce gravitačních vln v Arecibu zintenzívnila snahy o přímou detekci, které byly korunovány úspěchem v roce 2015, kdy zachytil první gravitační záblesk nově rekonstruovaný detektor LIGO. V roce 1982 objevilo Arecibo první milisekundový pulzar B1937+21. V roce 1994 byl v datech z Areciba nalezen pulzar B1257+12, u něhož byla o pouhé čtyři roky později detekována první exoplaneta. Nalezení planety mimo naši Sluneční soustavu byl objev, na který jsme čekali mnoho století. Později byly objeveny i planety v okolí hvězd podobných našemu Slunci.

V roce 2003 potvrdilo Arecibo platnost Jarkovského jevu u planety Golevka. Negravitační síly působící na planety a komety jsou mimořádně důležité, neboť komplikují výpočty trajektorií těchto těles. Arecibo se také podílelo na rozsáhlém hledání organických molekul v mlhovinách. Rotační spektra molekul se nacházejí právě v rádiové oblasti. Například v roce 2008 byly poprvé Arecibem ve vesmíru detekovány hydrokyanidové molekuly.

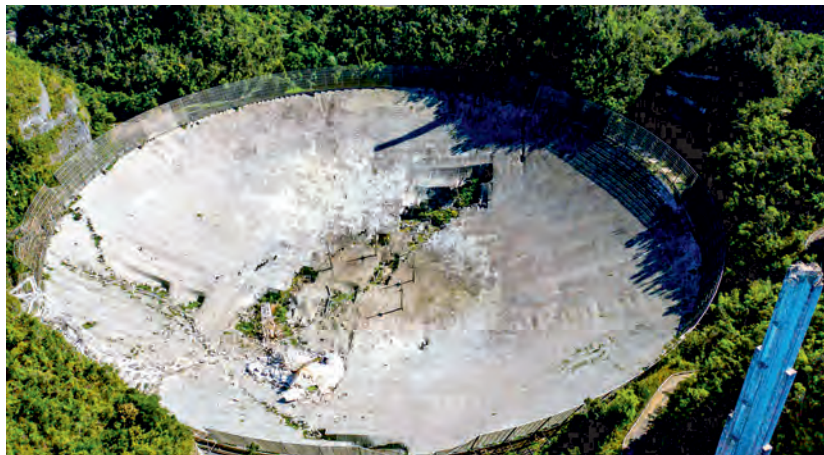
V souvislosti s Arecibem se často připomínají jeho snahy o zachycení signálů mimozemských civilizací. V roce 1974 byl dokonce vyslán signál směrem ke kulové hvězdokupě M13 ze souhvězdí Herkula. V signálu byly zakódovány základní informace o naší Sluneční soustavě a její poloze. Takový čin samozřejmě upoutal pozornost médií

a snad přivedl k Arecibu něco peněz. Skutečný význam takového poselství je minimální. Není jasné, zda by nahrávku byla příslušná civilizace schopná dekodovat. Není ani jasné, zda by taková civilizace mohla v kulové hvězdokupě být. Obrovské množství hvězd neumožňuje stabilní dráhy planet potřebné ke vzniku života. Navíc je tato hvězdokupa ve vzdálenosti přes 25 tisíc světelných roků, takže by přišla případná odpověď nejdříve po 50 tisících letech. To už ale na naší Zemi asi nebude nikdo, kdo

Arecibo po prasknutí nosného lana. Zdroj: NSF.



by o tomto zoufalém činu předků věděl. Přesto mělo hledání mimozemských civilizací i svůj pozitivní dopad. V roce 1999 odstartoval projekt SETI@home, který distribuuje výpočty na miliony počítačů běžných uživatelů. V době, kdy na PC nepracujete, se provádí analýza balíčku dat zaslaných z Areciba. Takovéto distribuované výpočty jsou užitečné v mnoha oborech vědy a byly největším přínosem hledání mimozemšťanů.



## Co dál?

Arecibo byl bezesporu jedním ze nejúspěšnějších radioteleskopů v dějinách lidstva. Teleskop si dokonce zahrál v celé řadě filmů. V roce 1995 to byla bondovka *Zlaté oko*, ve stejném roce si radioteleskop také zahrál ve filmu *Mutant*. V roce 1997 se radioteleskop objevil ve snímku *Kontakt* a v roce 2003 u něho byl natočen televizní sci-fi film *Encuentros* (Setkání). Posledním větším celkem byla epizoda *Místo v prostoru a čase* natočená v roce 2014 pro seriál *Člověk a vesmír*. Na úvahy, zda v místě, kde stojí Arecibo, vznikne nějaké muzeum, je ještě příliš brzy. Jedno je ale jisté. Arecibo má důstojné nástupce. V Číně od roku 2016 funguje pětisetmetrový radioteleskop FAST, bude se radioteleskopické pole SKA se sběrnou plochou kilometr čtvereční a ve vzdálenější budoucnosti se uvažuje o vybudování radioteleskopu na odvrácené straně Měsíce.

Dne 1. 12. 2020 prasklo další lano a plošina s přístroji o hmotnosti 900 tun se z výšky 150 metrů zřítila na mísu radioteleskopu. To byl definitivní konec radioteleskopu. Zdroj: National Science Foundation.

**FAST** – Five hundred meter Aperture Spherical Telescope, čínský radioteleskop o průměru 500 metrů, který byl zprovozněn v roce 2016. Celkem 4 600 odrazných segmentů je zavěšených v krasové proláklíně na unikátní lanové konstrukci, která umožňuje přesné tvarování odrazné plochy. Ohniskové přístroje pro devět pásem jsou zavěšeny nad mísou na lanech v pohyblivé kabině. Přístroj pokrývá frekvenční rozsah 0,07 až 3 GHz (0,1 až 4 m).

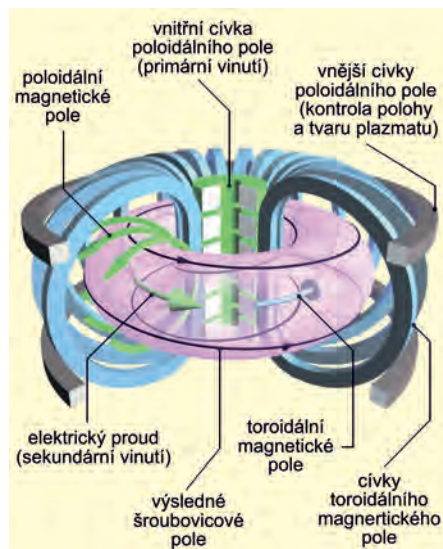
■ Petr Kulhánek, 27. 11. 2020, AB 46/2020



**Jouleův ohřev** – ohřev vodivého prostředí způsobený jeho nenulovým odporem. Nositelem elektrického proudu jsou elektrony a ionty, jejichž energie je při srážkách převáděna na teplo. Jev je pojmenován podle anglického fyzika Jamese Prescottta Joulea (1818–1889).

**Pinč** – pinč neboli plazmové vlákno patří snad k nejběžnějším útvarům v plazmatu. V nejjednodušší konfiguraci (z-pinč) teče proud v ose a kolem se vytváří azimutální magnetické pole, které vlákno stlačuje. Stabilnější jsou helikální pinče, které mají nenulovou jak azimutální, tak osovou složku pole.

Princip tokamaku – základní uspořádání cívek pro rovnovážné udržení vysokoteplotního plazmatu a složky magnetického pole v plazmatu. Zdroj: EFDA, JET.



## Stručná historie tokamaků

Tokamak je zařízení konfigurující magnetické pole pro stabilní rovnovážné udržení vysokoteplotního plazmatu. V této konfiguraci je značná energie statického magnetického pole obětována stabilitě. Z tohoto důvodu je poměr objemové tepelné energie udržovaného plazmatu k objemové energii magnetického pole poměrně nízký (jen několik procent). Mechanismus svazující nabitě částice plazmatu (elektrony a ionty) lze v zásadě chápat jako důsledek Lorentzovy síly, v tokamaku je směr elektrického proudu v prvním přiblížení podobný směru indukčních čar magnetického pole (dále siločar magnetického pole). Nejlepší poměr energií pole a plazmatu mají pinče – ve kterých je proud kolmý na siločáry – pinče jsou ovšem notoricky nestabilní konfigurací. Stabilitu zajištěnou intenzivním magnetickým polem ve směru proudu si lze představit jako stabilitu dosaženou vysokým předpětím ocelových lan. Perturbace plazmatu (ta může být perturbací magnetického pole nebo tlaku plazmatu) pak vede k oscilaci pomyslných lan (siločar), jejíž energie se pak zpravidla disipuje na teplo.

### Jak se utváří stabilní magnetického pole?

Minimální konfigurace cívek pro ustavení rovnováhy mezi magnetickým polem a vysokoteplotním plazmatem v pracovní komoře tokamaku potřebuje tři sady cívek:

**Cívky toroidálního magnetického pole**, čili solenoid stočený do prstence. V praxi se dnes tyto cívky vinou ve svazcích závitů, aby byly mezi svazky dostatečné mezery pro pozorování plazmatu a pro jeho ohřev. Mezery způsobují lokální poklesy pole (jeho tzv. *ripple*) – ten má pozorovatelné, ale nijak zásadní efekty na udržení plazmatu.

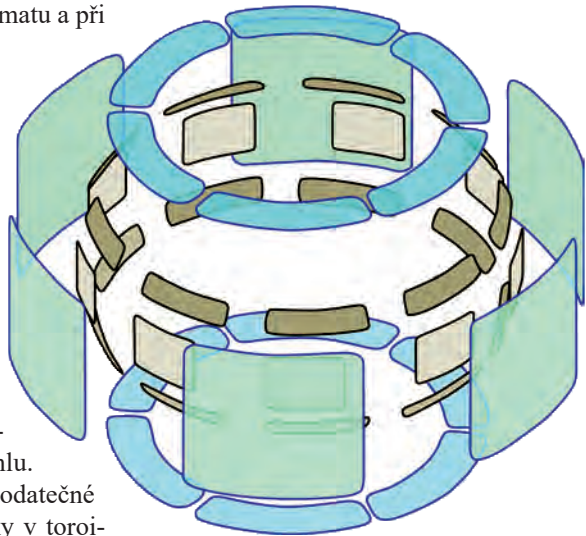
**Centrální solenoid**, který změnou proudu, tj. dynamickou změnou magnetického pole umožňuje indukování intenzivního elektrického proudu v prstenci plazmatu. Jde tedy fakticky o primární vinutí transformátoru, ke kterému je tokamak často přirovnáván. Ne všechny tokamaky mají centrální solenoid se vzduchovým jádrem (JET má feromagnetické jádro, GOLEM má dokonce primární vinutí vně toru). Klíčovou rolí proudu v plazmatu dodnes zůstává vytváření poloidálního magnetického pole, a tím stáčení siločar kolem plazmatu. Role

Jouleova ohřevu má dnes velký význam jen při průrazu plazmatu a při provozování nového tokamaku.

**Velké cívky poloidálního magnetického pole.** Z hlediska rovnováhy je principiálně nezbytná jen vertikální složka magnetického pole, která spolu s elektrickým proudem v plazmatu zamezuje přirozenému rozpínání plazmatu. Fakticky se dnes používají celé sady těchto cívek, které slouží ke zpětnovazebnému řízení polohy v radiálním a vertikálním směru a ke tvarování plazmatu.

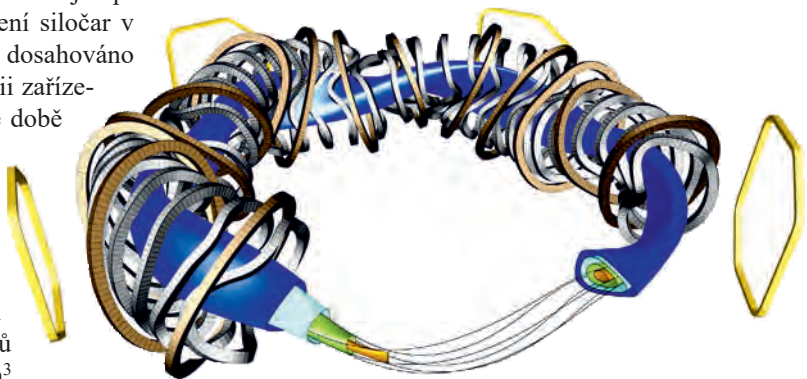
Zásadní vlastností tokamaku je – jak z hlediska teorie, tak z hlediska experimentu – jeho osová (rotační) symetrie. Až na výjimky rychlých a periodických perturbací se nepředpokládá závislost fyzikálních veličin na toroidálním úhlu. U většiny moderních tokamaků se ovšem ještě instalují dodatečné sady cívek, které tuto symetrii narušují a mohou periodicky v toroidálním směru modifikovat složku magnetického pole kolmou na směr proudu a toroidálního pole. Jde jednak o sety korekčních cívek, které mají opravit případné nepřesnosti základního rovnovážného pole, a jednak o sedlové cívky, které mají čistě experimentální účel.

Ve světě konfigurací siločar pro magnetické udržení plazmatu má k tokamaku zdaleka nejbližší uspořádání zvané stelarátor, ten totiž také sází na silné stabilizační pole v toroidálním směru. Ve stelarátoru je úplná konfigurace magnetického pole definována zvenčí (tj. jen statickým magnetickým polem) pomocí cívek – tj. v plazmatu není indukován elektrický proud. Potřebné stáčení siločar v poloidálním směru je dnes u stelarátoru dosahováno periodickou poruchou v rotační symetrii zařízení. První stelarátory vznikaly ve stejné době jako tokamaky v americkém Princetonu. Nejmodernějším stelarátorem je dnes supravodivý W7-X v německém Greifswaldu. Plazmový prstenec má průměr 11 metrů a tloušťku zhruba metr. Plazma ve stelarátoru má objem  $30 \text{ m}^3$ , teplotu až 100 milionů kelvinů a koncentraci  $3 \times 10^{20}$  částic v jednom  $\text{m}^3$ .



Rozmístění korekčních (modře a zeleně) a sedlových (šedě) cívek na tokamaku ITER. Zdroj: General Atomics, GA-A27135.

Geometrie cívek na stelarátoru W7-X. Zdroj: MPI, W7-X.



**Tokamak** – *TO*roidnaja *K*Amera s *MA*gnitnymi *K*atuškami, jedná se o obří transformátor, jehož sekundární obvod je tvořen velmi horkým ionizovaným plynem – plazmatem. Plazma je drženo v pracovním prostoru toroidálního tvaru. Zařízení je používáno k udržení plazmatu pro termojadernou fúzi. Princip tokamaku navrhli po druhé světové válce Igor Tamm a Andrej Sacharov v bývalém Sovětském svazu. Největší tokamak (ITER) je budován v jižní Francii v blízkosti hradu Cadarache, průměr komory bude mít šest metrů, se spuštěním se počítá po roce 2025.

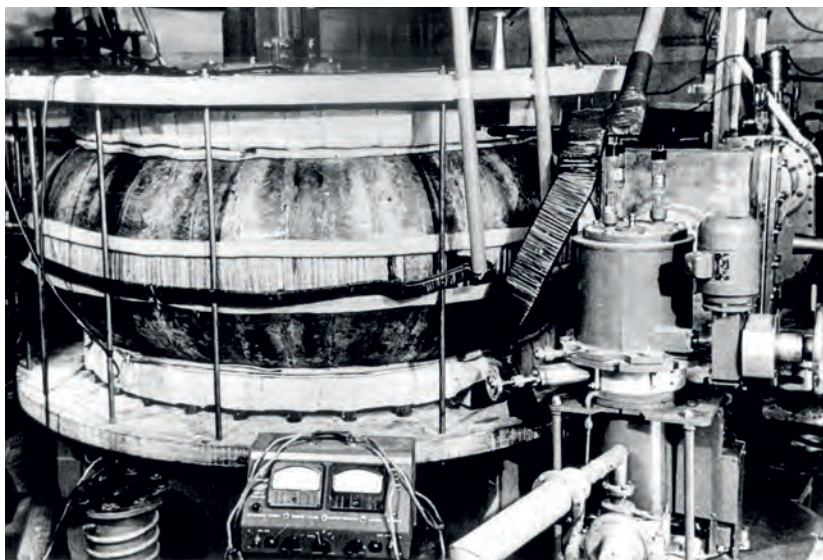
## Pravěk tokamaků

V následujícím textu budeme pro lepší představu u jednotlivých zařízení uvádět velký poloměr  $R$  (vzdálenost středové kružnice toru od hlavní osy symetrie) a vedlejší poloměr  $a$  (zhruba řečeno poloměr kolmého řezu toru, při složitější geometrii polovina nejširší vzdálenosti vakuových stěn v horizontálním směru).

Tak jako v každém oboru, i v tom našem je pravěk poněkud temný. Tím spíše, když se odehrával v poválečné Moskvě. Oficiální prameny se lehce liší od vyprávění pamětníků, které se mi občas podařilo zachytit a bohužel i trochu pozapomenout. Dle oficiální verze jsou ideovými otci tokamaků nobelisti Igor Tamm a Andrej Sacharov, kteří spolu po válce s mimořádným vypětím pracovali na vodíkové pumě. Trochu světla do toho vnáší článek Leonida Zacharova z Princetonu, který vyšel v roce 2019 v časopise *Plasma Physics Reports* a v němž se uvádí, že Tamm ještě před válkou uvažoval o úplném pokrytí toru jedinou siločárou a Sacharov po válce (nezávisle na něm) uvažoval o realizaci takové myšlenky. Ve stejné době (na samém počátku 50. let) vznikla také tzv. *Kruskalova – Šafranovova teoretická podmínka*, podle které se ke stabilizaci smyčkové (proudové) nestability v toroidálním uspořádání stanovuje potřebná velikost silného toroidálního pole. Podle

vyprávění pamětníků byly první tokamaky v moskevském Institutu pro jadernou energii (od roku 1955 Institut I. V. Kurčatova) budovány hlavně nadšenci vedenými Nataniem Aronovičem Javlinským za účelem ověření Šafranovovy teorie a začínaly jako malé table-top experimenty s keramickou vakuovou nádobou. V té době byly vedením fúzní divize ústavu protežovány jako potenciální termojaderné reaktory pinče. První větší tokamak s kovovou nádobou byl spuštěn nejspíše v roce 1958 a ten také poprvé dostal dodnes známou zkratku Tokamak T-1 ( $R = 40$  cm,  $a = 10$  cm). Zkratku „*TO*roidal'naja *K*Amera

Tokamak T-1. Zdroj: AN SSSR.



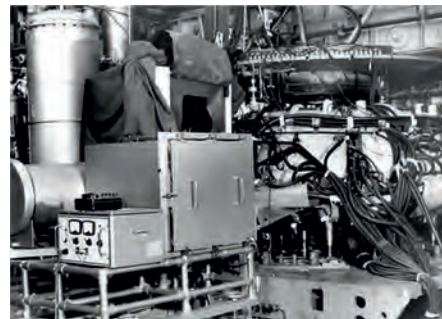


s *Magnitnimi Katuškami*“ podle všeho navrhl Igor Nikolajevič Golovin, nejprve snad ve verzi Tokamag (kde se autoři údajně zalekli možné reakce vedení na spojení s MAGií). Označení tokamak se nicméně ukázalo jako velmi šťastné z hlediska všech možných jazyků snad s výjimkou japonštiny, kde ještě dlouho přežíval chybný přepis „tokomak“.

Přechod na větší zařízení s kovovou stěnou byl celkem logický. Keramické nádoby plazma velmi znečišťovaly a jeho radiační ochlazování pak bylo příliš velké. Kovová nádoba navíc stabilizovala vířivými proudy vysokofrekvenční poruchy magnetického pole. Tokamak T-2 byl zřejmě dvojčetem tokamaku T-1, u kterého byla dále zdokonalena čistota vakua například zavedením vypékání vakuové komory.

Začátkem 60. let byly v Kurčatovově institutu zkonstruovány dva stejně velké malé tokamaky TM-1 a TM-2 ( $R = 60$  cm,  $a = 12$  cm). První je významný hlavně tím, že se v podstatě zachoval a je nyní provozován na FJFI ČVUT v Praze jako studentský tokamak GOLEM. Základní význam pro historii měl TM-2, na kterém se doktorandce Ksenii Aleksandrovně Razumové při studiu závislosti stability na velikosti toroidálního pole podařilo dosáhnout skutečně stabilního rovnovážného provozu tokamaku, který vedl ke strmému nárůstu teploty plazmatu. Na základě původních článků není dnes úplně snadné říci, co se vlastně stalo. Nejspíše Razumová zvýšila toroidální pole natolik, že vyhasly i vnitřní smyčkové nestability plazmatu, které mohou v plazmatu existovat, pokud poloidální pole uzavře při plném toroidálním úhlu také plný úhel a siločára se vlastně uzavře sama do sebe po jediném oběhu.

Natan Aronovič Javlinskij v roce 1962 bohužel tragicky zahynul při letecké katastrofě v Soči, vedení překvapivě úspěšného programu tokamaků se pak osobně ujal samotný šéf fúzní divize Institutu Lev Andrejevič Arcimovič, který dotáhl spouštění nového, v té době největšího tokamaku T-3 ( $R = 100$  cm,  $a = 12$  cm) do vítězného konce. Větší velikost T-3 byla podle mě opět motivována hlavně přáním dále snížit radiační ochlazování. Nejspíš šlo o to dosáhnout snadnější ionizace základních nečistot „až na holá jádra“ – brzdné záření je pak mnohem a mnohem slabším kanálem výkonových ztrát než v případě atomových procesů (tj. deexcitace a rekombinace po srážkové excitaci a ionizaci). T-3 proto dosáhl (prostým Jouleovým ohřevem, v naší komunitě spíše známým jako ohmický ohřev) do té doby nepředstavitelných teplot 10 milionů stupňů při relativně klidném plazmatu po dobu řádově desítek milisekund.



Tokamak T-3. V popředí britský systém pro měření Thomsonova rozptylu. Zdroj: AN SSSR, EUROfusion.

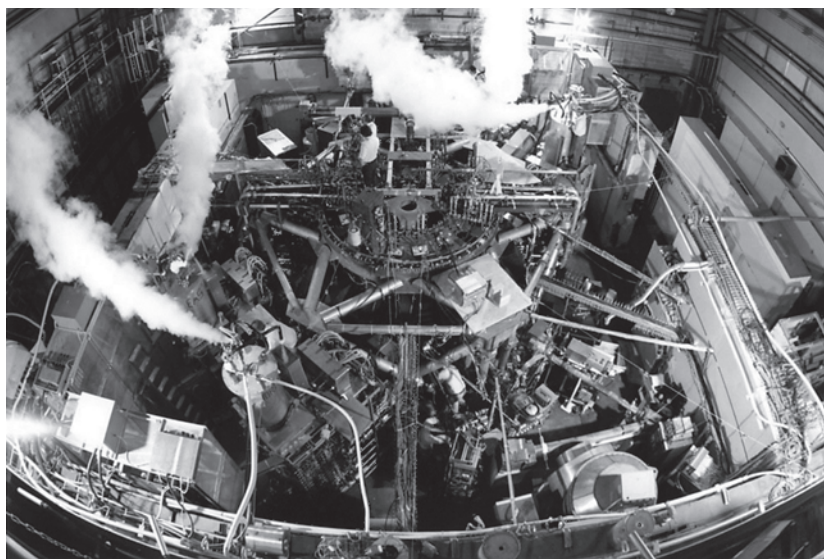
**Stelarátor** – toroidální zařízení pro udržení plazmatu za účelem zažehnutí termojaderné fúze, v němž je magnetická konfigurace zcela definována vnějšími cívkami. První stelarátor vybudoval Lyman Spitzer v Princetonu na počátku 50. let 20. století. Jeho název je zkratkou z latinského stella a anglického generator, tedy generátor hvězd. Název měl připomínat, že se tyto experimenty pokoušejí uskutečnit na Zemi reakce probíhající ve hvězdách. K největším současným stelarátorům patří W7-X v německém Greifswaldu a LHD (Large Helical Device), který funguje od roku 1998 v Japonsku.





Tokamak CLEO (Closed Line Electron Orbit) v britském Culhamu. Zdroj: Oxford Mail.

Tokamak PLT v americkém Princetonu. Dým vzniká odpařováním dusíku z rychlých vymrazovacích vakuových pump na ústí neutrálních svazků k ohřevu plazmatu. Zdroj: Princeton Plasma Physics Laboratory.



Sověti teplotu plazmatu měřili pouze pomocí diamagnetizmu plazmatu, což je měření diskutabilní, s poměrně velkou chybou. Proto v roce 1968 do Moskvy zamířil i tým z nového střediska fúzního výzkumu v britském Culhamu, aby ověřil diamagnetická měření pomocí Thomsonova rozptylu laserového světla (tj. pomocí dopplerovského rozšíření barvy laseru kvůli pohybu elektronů). Jejich výsledky potvrdily překvapivě vysoké hodnoty teploty a po publikaci v časopise Nature se tokamakům otevřely dveře do celého světa.

### Cesta tokamaku

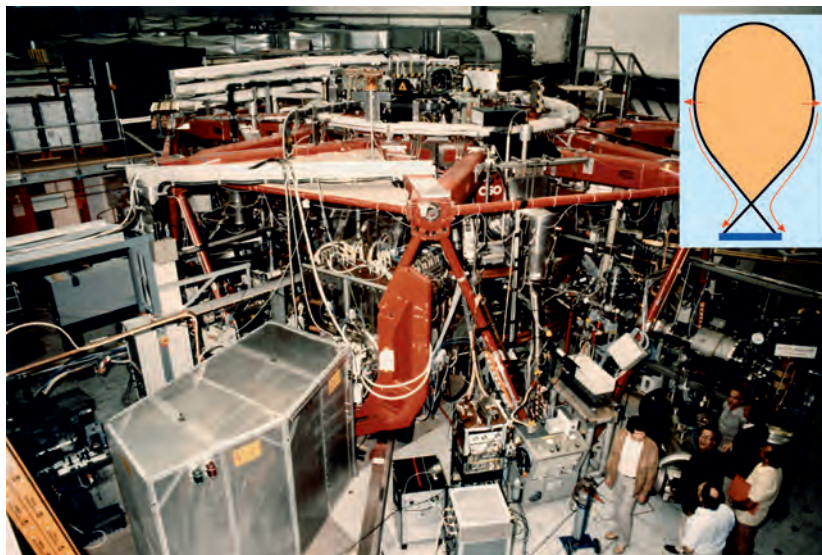
Vůbec prvním tokamakem, který byl postaven mimo území Sovětského svazu, byl zřejmě ST tokamak (*Symmetric Tokamak*,  $R = 101$  cm,  $a = 13$  cm), který vznikl krátce po úspěchu T-3 přestavbou stelarátoru Model C v americkém Princetonu. Ten definitivně prokázal reprodukovatelnost výsledků T-3. Jen dva roky nato hlásí spuštění tokamaků opravdu hodně laboratoří, a to nejen v Sovětském svazu a USA. V britském Culhamu je spouštěn první evropský tokamak CLEO ( $R = 90$  cm,  $a = 13$  cm), který již – podobně jako další ruský tokamak TO-2 ( $R = 60$  cm,  $a = 13$  cm) – experimentoval s řízením polohy plazmatu. Dva roky nato byl spuštěn v Japonsku tokamak JFT-2 ( $R = 60$  cm,  $a = 12$  cm), zaměřený zejména na čistotu plazmatu, který prokázal mimořádně dobrou tepelnou izolaci plazmatu v tokamacích (neboli dobrou dobu udržení tepelné energie). Kontinentální Evropa poprvé hlasitěji do výzkumu promluvila od roku 1973 díky francouzskému tokamaku TFR (*Tokamak Fontenay-aux-Roses*,  $R = 100$  cm,  $a = 20$  cm). Ten nejenže potvrdil velmi spolehlivé dosahování velmi vysokých teplot, ale také poprvé zápolil s betatronově urychlovanými ubíhajícími elektrony, které mohou získat i značnou energii a jsou nebezpečné jak pro samotnou komoru, tak další součásti.

Pro další vývoj byla směřovatná strategie Spojených států, které se správně zaměřily na ohřev plazmatu pomocí dodatečných systémů ohřevu, zejména pomocí energetických svazků neutrálního vodíku (krátce „neutrálních svazků“). Ohmický ohřev nebyl perspektivní, protože ke zvýšení teploty vyžadoval elektrické proudy, které by vedly k příliš vysokému poloidálnímu magnetickému poli, a tedy k porušení Kruskalovy-Šafranovy podmínky stability. První ohřev pomocí neutrálních svazků (s výkonem 340 kW) byl zřejmě instalován na tokamaku ORMAK (Oak Ridge, 1971,  $R = 80$  cm,  $a = 23$  cm). Skutečným přeborníkem v dosahování termojaderných teplot se stal až americký tokamak PLT (*Princeton Large Torus*,  $R = 132$  cm,  $a = 40$  cm). Ten bohužel změřil hroznou věc, a sice, že izolace tepla (doba udržení tepla) se s narůstajícím ohřevem zhoršuje. Tento výsledek šel proti teoretickému očekávání, podle kterého se tepelná vodivost plazmatu s růstem teploty plazmatu měla snižovat, protože se nabitě částice mýjejí rychleji, a tedy srážková frekvence klesá. Dnes je, po mnoha a mnoha letech, jisté, že příčinou velmi nepříznivého výsledku je spuštění konvektivního přenosu tepla turbulencemi podobně, jako třeba v nitrech hvězd (jejich hlavním spouštěčem je také příliš strmý gradient teploty).

Kompenzací zklamání se stal až v roce 1982 objev první transportní bariéry, tzv. H-modu (*High Confinement*) na německém tokamaku ASDEX ( $R = 154$  cm,  $a = 40$  cm) v uspořádání s divertorem. Konfigurace s divertorem je vlastně konfigurace s X-bodem (nulovým magnetickým polem) na okraji poloidálního magnetického pole. Tato konfigurace umožňuje úplné oddělení plazmatu od stěny komory. X-bod se vytvoří velkou poloidální cívkou pod plazmatem se směrem proudu souhlasným s proudem v plazmatu. Divertor byl původně přirozenou součástí konfigurace stellarátorů a na tokamaku se začal zkoumat hlavně s ohledem na zlepšení čistoty

**Divertor** – konfigurace pole a vnitřní stěny, která slouží k oddělení plazmatu od stěny a následně k odčerpávání nabitých částic unikajících z horkého plazmatu. Jedná se zejména o helium nebo nečistoty způsobené interakcí částic plazmatu se stěnami reaktoru. Proces odčerpávání nečistot probíhá během výboje. Částice unikající z plazmatu jsou vedené toroidálním magnetickým polem kolem tzv. X-bodu – místa nulového poloidálního magnetického pole vytvořeného dodatečnými cívkami. V komoře se divertor z praktických (konstrukčních) důvodů realizuje zpravidla na dně vakuové nádoby. Protože je podél siločárek magnetického pole konstantní tlak, je v oblasti chladnějšího divertoru výrazně vyšší hustota plazmatu, a proto jde o oblast ideální z hlediska vakuového čerpání.

Německý tokamak ASDEX. Vpravo nahoře je zobrazeno schéma poloidálního magnetického pole s X-bodem (tj. uspořádání s divertorem). Zdroj: EUROfusion.





**JET** – Joint European Torus, zařízení postavené v anglickém Culhamu. Stavba byla započata v roce 1978 a byla dokončena v roce 1983. První řízená termojaderná syntéza byla díky použití směsi deuteria a tritia uskutečněna v roce 1991 (1 MW), v roce 1997 byl dosažen fúzní výkon 16 MW. V prosinci 2021 bylo dosaženo s DT směsí fúzního výkonu 11 MW po dobu pěti sekund.

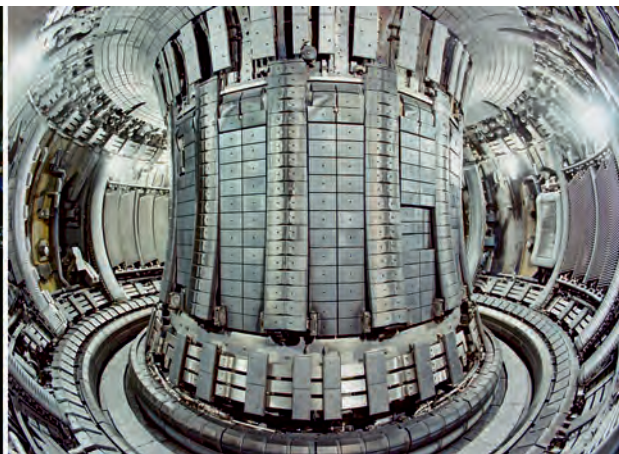
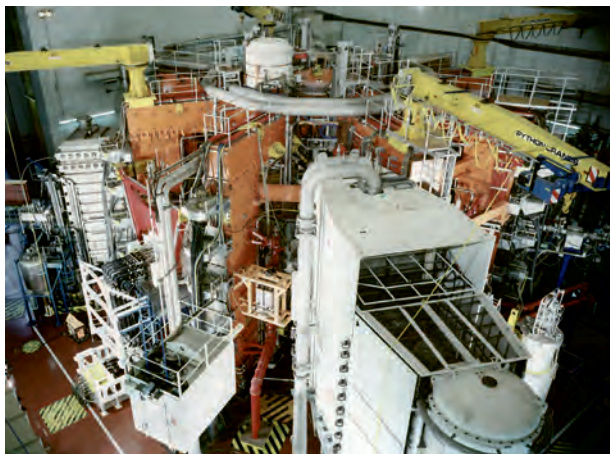
**EURATOM** – European Atomic Energy Community, mezinárodní společenství zabývající se využitím atomové energie v Evropě. Vzniklo na základě balíku smluv mezi poválečnými západoevropskými státy. Dnes je zcela integrováno do Evropské unie. Založené bylo v roce 1957.

*Tokamak JET. JET má již centrální solenoid, ale ještě feromagnetické jádro (oranžové). V popředí levé fotografie je zdroj neutrálních svazků. Na pravém snímku je pohled do vakuové komory. Vidět jsou vlevo i vpravo antény iontového rezonančního ohřevu, vpravo za anténami iontového ohřevu (kolem 40 MHz, celkem 8 MW) je v rámečku i anténa mikrovlnného dolněhybridního vlecení proudu (3,7 GHz, až 7 MW). Zdroj: EUROfusion, JET.*

plazmatu, experimentálně se ovšem ukázalo, že vede také ke vzniku velkých střížných toků na okraji plazmatu, které likvidují turbulentní přenos tepla, a tedy vytvářejí transportní bariéru. Jak bylo od té doby proměřeno, vlastnosti tepelné vodivosti iontů se v transportní bariéře blíží teoretické předpovědi.

## Velké tokamaky

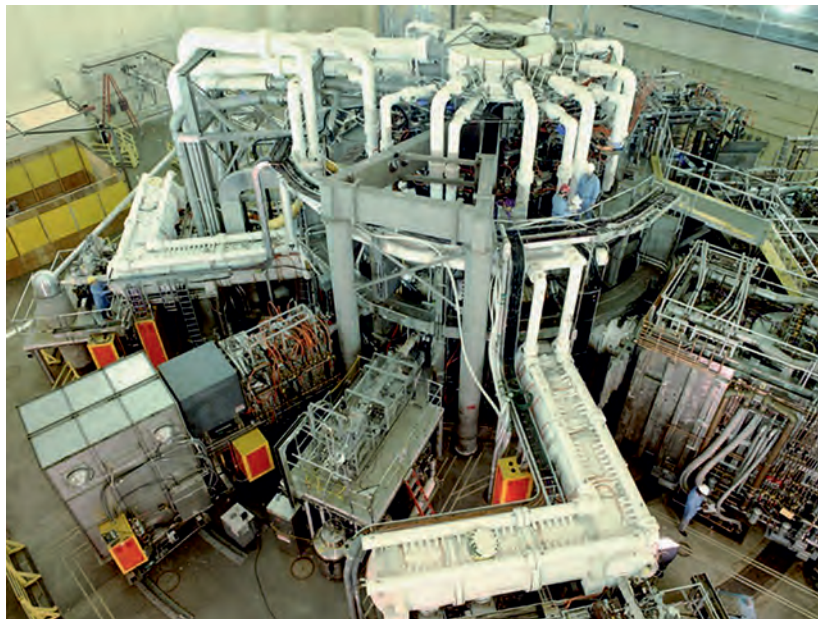
Už na samém počátku uvažování o tokamakách jako o perspektivních reaktorech bylo zřejmé, že fúzní reaktor typu tokamak by musel být především velký. Překvapivě už úvahy z počátku 70. let směřovaly k velikostem blízkým k dnešním předpokladům (reaktor o velikosti kolem 40 m) – a to ještě nebyly známy problémy s turbulentním přenosem tepla. Hlavním důvodem pro velikost byla tenkrát potřeba stínit supravodivé cívky (o těch později) před ohřevem od přechetných fúzních neutronů. Jednoduchý odhad ukazuje, že mezi termojaderným plazmatem a cívkami musí být zhruba 1,2 m stínění z oceli a vody. Je třeba počítat i s objemem plazmatu, který zajistí potřebný výkon pro energetický reaktor (zpravidla se uvažuje více než 1 GW tepelného výkonu) – už v sedmdesátých letech byl přitom znám vztah mezi magnetickou indukcí a hustotou plazmatu. Tokamaky podle ní udrží hustoty plazmatu, které jsou odhadem jen milióntinou hustoty vzduchu. Význam velikosti tokamaku ještě vzrostl, když se ukázalo, že přenos tepla je v plazmatu turbulentní. Dnes je velikost reaktoru odvozována



především od toho, aby tokamaky měly z hlediska Lawsonova kritéria dostatečnou dobu udržení tepla.

Již v 70. letech 20. století byly odstartovány závody o stavbu velkých tokamaků. Do soutěže jako první vstoupilo tehdejší Evropské společenství s až nečekaně štedrou podporou EURATOM – smlouvou, která je dodnes považována za jeden z historických pilířů Evropské unie. Tak vznikl projekt tokamaku JET (*Joint European Torus*,  $R = 296$  cm,  $a = 96$  cm), který byl po značných peripetiích spuštěn v britském Culhamu roku 1983. JET měl jako jediný od počátku vertikálně protažené plazma tvaru písmena „D“, všechny ostatní velké tokamaky měly jednoduchý kruhový průřez. Tvar „D“,

který je už zhruba třicet let standardním tvarem řezu vakuové nádoby, vznikl původně kvůli optimalizaci tečných mechanických sil na cívky toroidálního magnetického pole, ale díky této šťastné volbě nebyl později problém najít ve vakuové komoře místo na konfiguraci plazmatu s divertorem. Na americké straně byl koncem sedmdesátých let v Princetonu vybudován tokamak TFTR (*Test Fusion Tokamak Reactor*, 1982,  $R = 240$  cm,  $a = 80$  cm). Oba tokamaky, TFTR i JET, počítaly ve své konstrukci s využitím směsi deuteria a tritia (což s ohledem na přirozenou aktivitu tritia představuje dost vážnou provozní komplikaci), ale jen JET nakonec zrealizoval i provoz s průběžnou kryodestilací izotopů vodíku. Díky těmto investicím se JET stal dosud nepřekonaným rekordmanem v uvolnění fúzního výkonu na úrovni 16 MW (byť jen v tranzientním případě) a rekord uvolněné fúzní energie v jednom výboji 59 MJ (v roce 2021, výboj trval 5 sekund). Zajímavé je, že při těchto výkonech se již podařilo spolehlivě prokázat i samoohřev plazmatu od alfa částic produkovaných fúzními reakcemi (energetické neutrony, které nemají náboj, nejsou magnetickým polem nijak udržovány a plazma tedy neohřívají).



Princetonský tokamak TFTR (byl demontován v roce 2002). Zdroj: Princeton Plasma Physics Laboratory.

**TFTR** – Test Fusion Tokamak Reactor, tokamak v Princetonské laboratoři plazmové fyziky (PPPL) ve Spojených státech, fungující od roku 1982 do roku 1997. V tomto reaktoru byla dosažena rekordní teplota plazmatu – 510 milionů stupňů Celsia. Jeho teplotní rekord byl překonán, byť jen o pár procent, tokamakem JT-60U. Jde již o teploty, které jsou z hlediska rezonanční reakce deuteria s tritiem až příliš vysoké, reaktivita  $DT$  plazmatu při teplotách nad 150 milionů stupňů klesá vzhledem k nižší pravděpodobnosti vzniku složeného jádra  $^3\text{He}$ . Tokamak TFTR byl spolu s JET jediný, který použil v experimentech směs deuteria a tritia, se kterou se počítá v budoucích termojaderných elektrárnách.



**Tore Supra** – supravodivý tokamak postavený v blízkosti hradu Cadarache ve Francii. Stavba byla započata v roce 1982 a první plazma bylo v tokamaku vytvořeno v roce 1988. Průměr komory tokamaku je 2,25 metru. V roce 1996 se zde dosáhlo rekordní doby trvání výboje 2 minuty a v roce 2003 dokonce 6,5 minuty. Po výměně divertoru za wolframový byl v roce 2016 přejmenován na tokamak WEST (protipól čínského tokamaku EAST).

Další zemí, která soutěžila, je Japonsko. Jejich tokamak JT-60 (*Japan Torus*, objem plazmatu  $60 \text{ m}^3$ , 1985,  $R = 300 \text{ cm}$ ,  $a = 100 \text{ cm}$ ) se stal prvním zařízením, které nijak netrpělo nedostatkem výkonu na ohřev plazmatu. V pozdější přestavěné verzi JT – 60U (Upgrade) získal tokamak i divertor a začal dosahovat rekordních teplot (půl miliardy stupňů iontové teploty) i rekordních hodnot tzv. ekvivalentního Lawsonova součinu (ekvivalentní znamená: kdyby místo polovičního množství deuteria bylo tritium, měli bychom vyšší fúzní výkon než JET...).

Posledním významným hráčem byl samozřejmě Sovětský svaz, odkud tokamak pochází. Jejich vědečtí stratégové správně tlačili na vývoj supravodivých tokamaků, ale velký tokamak T-15 (1988,  $R = 240 \text{ cm}$ ,  $a = 70 \text{ cm}$ ) s rekordně velkými supravodivými cívkami se s ohledem na historické události v druhé polovině osmdesátých let a na s tím související podfinancování oboru nepodařilo nikdy řádně zprovoznit.

## Supravodivé tokamaky

Dalším zásadním mezníkem při systematickém výzkumu tokamaků jako potenciálních fúzních reaktorů bylo umožnit studium nejpomalejšího procesu při ustavování rovnováhy energetických toků, a sice studium rovnováhy mezi vysokoteplotním plazmatem a (samozřejmě

chlazenou) stěnou vakuové nádoby vystavenou plazmatu (tzv. *první stěnou*). K tomu účelu ale již obyčejné cívky z obyčejných (zpravidla měděných) vodičů nestačily, protože se během generování intenzivního magnetického pole poměrně rychle přehřívaly. Proto se konstruktéři nejprve v Sovětském svazu, a to poprvé na menším tokamaku T-7 (1979,  $R = 120 \text{ cm}$ ,  $a = 31 \text{ cm}$ ) vydali cestou použití supravodičů alespoň pro generování nejsilnějšího, stabilizujícího toroidálního magnetického pole. Stejnou cestou se pak vydali i konstruktéři dalších částečně supravodivých tokamaků, z nichž asi nejú-

První supravodivý tokamak T-7, když pracoval v čínském Hefei jako HT-7 (demontován 2013). Zdroj: ASIPP.



spěšněji pracoval francouzský tokamak Tore Supra (1988,  $R = 225$  cm,  $a = 70$  cm, pracuje dodnes po rekonstrukci jako tokamak WEST s wolframovým divertorem). Motivací k použití supravodičů tedy nebyla úspora elektrické energie, ale v první řadě možnost generování dlouhotrvajícího intenzivního magnetického pole.

O plně supravodivých tokamacích mluvíme v případě, kdy jsou supravodivé všechny cívky nutné pro dosažení rovnováhy tlaku plazmatu s tlakem magnetického pole – připomeňme, že jde o cívky toroidálního pole, o centrální solenoid a o velké vnější cívky poloidálního pole. Jak jsme také v úvodu zmínili, tokamaky mívají i řadu pomocných cívek, které mohou být i u tzv. plně supravodivých tokamaků z měděných vodičů. Konstrukce prvního plně supravodivého tokamaku byla záhy identifikována rychle se rozvíjejícími asijskými tygry jako další soutěžní kolbiště. Pomyslný závod nakonec vyhrála Čína s plně supravodivým tokamakem EAST (2008,  $R = 175$  cm,  $a = 43$  cm), brzy následována Korejskou republikou (tj. jižní Koreou) s plně supravodivým tokamakem K-STAR (2008,  $R = 180$  cm,  $a = 50$  cm).

Na internetu dnes není těžké dohledat, co zkratky obou tokamaků WEST a EAST mají znamenat, ale těžší je zjistit, že se Francouzi skutečně nechali inspirovat při volbě jména pro svůj rekonstruovaný tokamak kontrastem západu a východu, a s tokamakem EAST je fakticky váže dost úzká spolupráce.

Dalším plně supravodivým tokamakem, který momentálně čeká na menší opravu a následně na zprovoznění, je velký společný japonsko-evropský tokamak JT-60SA (SA pro *Super-Advanced*, číslo 60 již dávno nic neznamená, 2022?,  $R = 316$  cm,  $a = 102$  cm), který vyrostl přímo na místě tokamaku JT-60U a který bude využívat řadu z jeho systémů, včetně některých systémů ohřevu. Podle mezinárodních dohod jde o tzv. satelitní tokamak, který má testovat různé navrhované provozní režimy pro



První plně supravodivý tokamak, čínský EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak), který pracuje v čínské Hefei. Zdroj: VCG.

Tokamak Tore Supra ve středisku jaderných výzkumů CEA Cadarache (v těsném sousedství ITER). Dobře jsou vidět žluté koaxiální vodiče výkonného ohřevu plazmatu elektromagnetickým rezonančním polem. Zdroj: CEA.





**ITER** – mezinárodní termojaderný pokusný reaktor. Předpokládaný výkon reaktoru je 500 MW, stavba probíhá v blízkosti francouzského hradu Cadarache. Reaktor bude mít průměr šest metrů. Kryostat tokamaku ITER je válcová nádoba, která má průměr i výšku téměř přesně 30 metrů. Tento dosud největší tokamak ITER by měl být uveden do provozu po roce 2025. Předpokládá se, že půjde o poslední pokusný reaktor před stavbou první skutečné termojaderné elektrárny.

zařízení ITER. Nebude však schopen používat při provozu tritium. Skutečně prvním velkým tokamakem, který bude plně supravodivý a zároveň vybavený systémy pro používání směsi deuteria a tritia, se tak stává tokamak ITER (2025?,  $R = 620$  cm,  $a = 200$  cm). Jde o mezinárodní projekt, budovaný ve francouzské Provence, kterého se vedle Evropské unie, Japonska, Ruské federace a Spojených států účastní také Čína, Korejská republika a Indie. Investičně jde o větší projekt než CERN, ale menší než ISS. Ustálený výkon fúze v ITER má dosáhnout typicky 500 MW (z toho přibližně 400 MW jde do neutronů, 100 MW do alfa částic. Podmínkou tepelné rovnováhy zůstává vnější ohřev plazmatu na úrovni 50 MW, proto se uvádí, že ITER má mít faktor zesílení výkonu 10). Jaderný provoz reaktoru ITER bude ale povolen až po deseti letech spolehlivého provozu bez produkce ionizujícího záření, v ideálním případě tedy až od roku 2035.

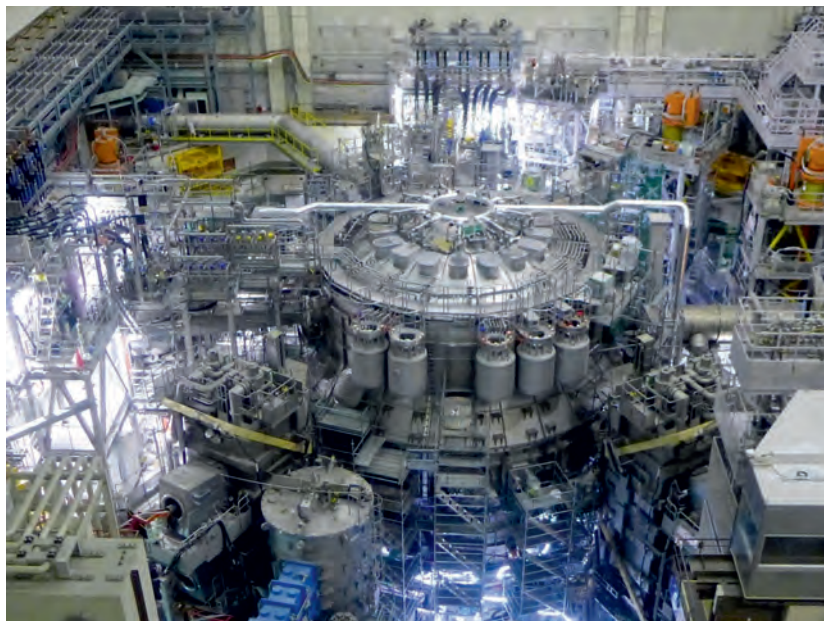
Protože hustota plazmatu roste se čtvercem indukce magnetického pole, není divu, že heslem dne se dnes stává konstrukce tokamaků s vysokým magnetickým polem. Tímto směrem již tradičně míří i Itálie, která plánuje ve svém středisku ve Frascati u Říma vybudovat v několika

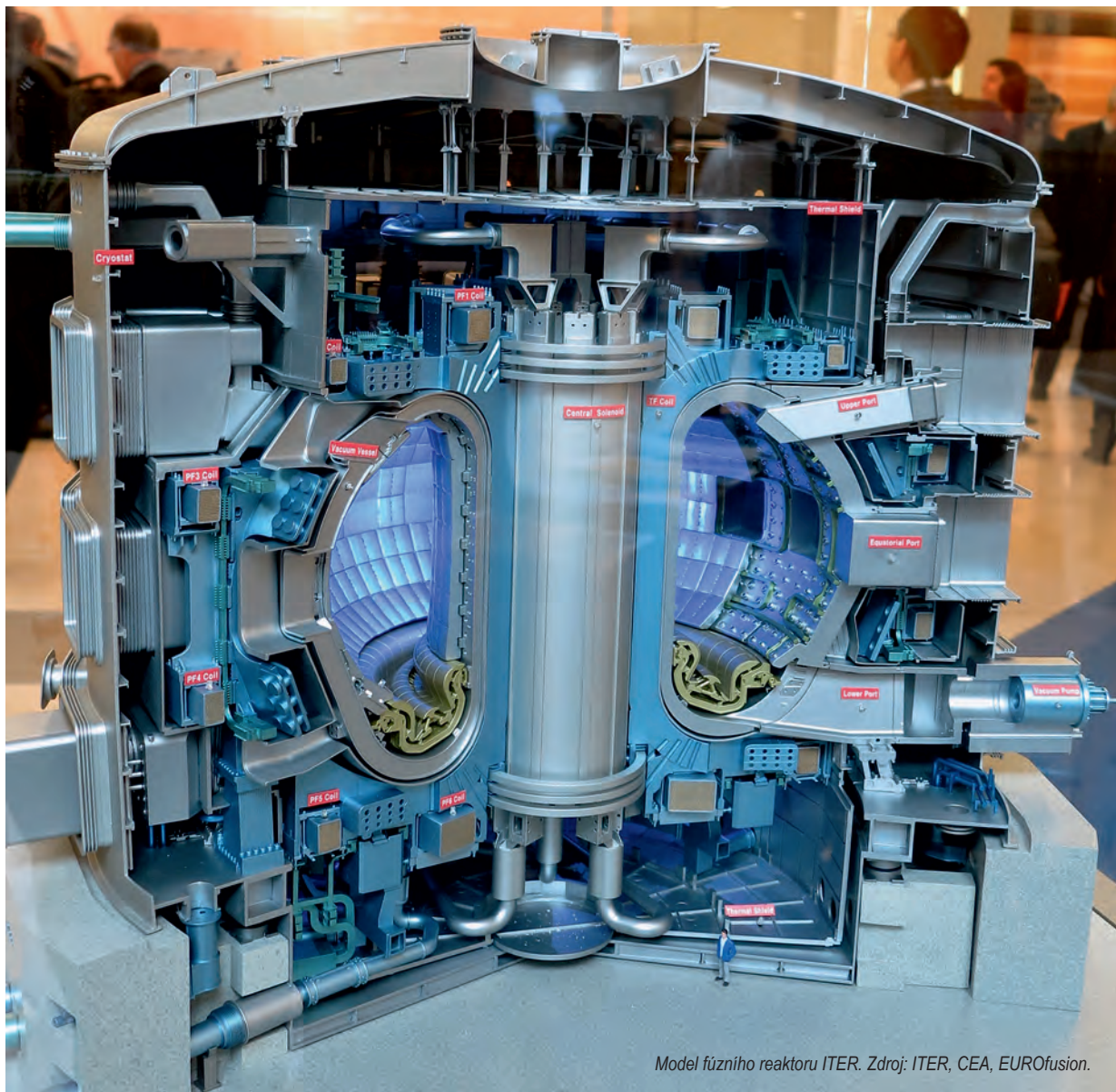
příštích letech první evropský plně supravodivý tokamak DTT (*Divertor Tokamak Test facility*, 2026?,  $R = 214$  cm,  $a = 65$  cm, magnetické pole až 6 T).

Podobně je i strategii USA dosáhnout v malém reaktoru na bázi tokamaku SPARC ( $R = 165$  cm,  $a = 50$  cm) pomocí hluboce chlazených vysokoteplotních supravodivých magnetické pole až 12 T.

V Evropské unii je zatím další strategie konvenční, tj. po experimentálním studiu materiálů na zařízení IFMIF-DONES vybudování většího plně supravodivého tokamaku DEMO (zhruba  $R = 9$  m,  $a = 3$  m,  $P_{\text{fus}} = 2$  GW) jako prototyp první demonstrační elektrárny, pokud bude ITER úspěšný.

Nový, velký a plně supravodivý tokamak JT-60SA v japonském Naka u Tokia. Zdroj: JT-60SA, QST.





Model fúzního reaktoru ITER. Zdroj: ITER, CEA, EUROfusion.



**CASTOR** – Czech Academy of Sciences TORus, tokamak v České republice, který byl postaven v Kurčatovově institutu v SSSR v roce 1961. Od roku 1977 byl umístěn v Praze a sloužil pro vědecké a výukové cíle Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. V roce 1983 prošel rekonstrukcí a získal novou komoru. Jeho provoz byl ukončen v roce 2006. Poloměr tokamaku byl 40 cm, maximální pole 1,5 T. V současnosti funguje pod názvem GOLEM na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. **GOLEM** – malý tokamak provozovaný na FJFI ČVUT. Od roku 1977 do roku 2006 fungoval v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd, nejprve pod názvem TM-1-MH, od roku 1985 do roku 2006 pod názvem CASTOR. Velký poloměr je 0,4 metru, vedlejší 0,085 metru. Tokamak může být ovládán vzdáleně po internetu.

Rozlučka s tokamakem COMPASS před demontáží, po více než 10 letech úspěšného provozu v pražském Ústavu fyziky plazmatu v areálu AV ČR Mazanka (autor je třetí zprava). Zdroj: ÚFP, AV ČR, v. v. i.



## Pražské tokamaky

Jak se to vlastně stalo, že je dnes Praha nejvýznamnějším střediskem výzkumu fúze mezi německým Mnichovem a Moskvou (s určitým respektem i k Charkovu, kterému do značné míry vděčíme za možnost rezonančního ohřevu elektronů v tokamacích)?

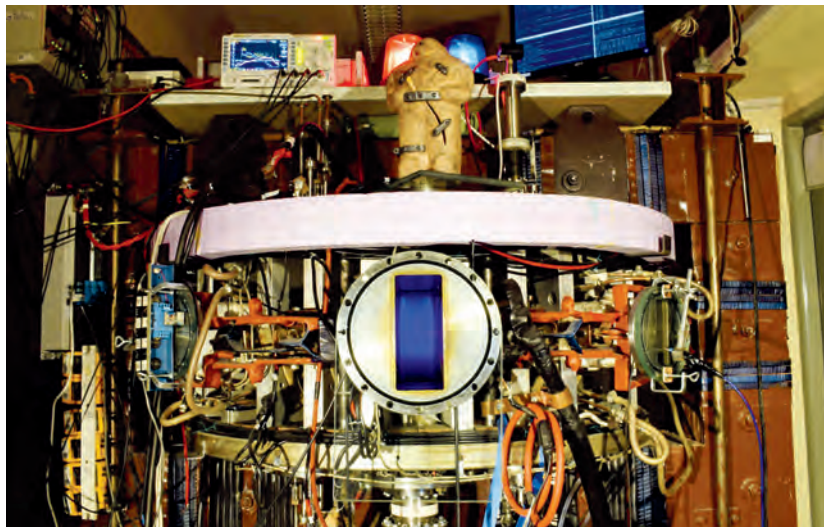
Na úspěch bylo založeno už v šedesátých letech 20. století, kdy právě v Praze vznikl jeden z nejuznávanějších týmů na teoretické studium interakce vysokofrekvenčních vln s horkým plazmatem. Sovětské vedení se tenkrát rozhodlo našemu Ústavu fyziky plazmatu věnovat tokamak TM-1 (kterému přibyla do zkratky písmena VČ pro „vysokofrekvenční – vysokofrekvenční“), aby u nás sloužil i k experimentálnímu studiu tohoto fyzikálního jevu. Tokamak byl v Praze od roku 1977, záhy byl ale kompletně rekonstruován a přejmenován na CASTOR (Czech Academy of Sciences TORus). V nové podobě se pak čím dál tím více prosazoval i nový, experimentálně progresivnější směr výzkumu – výzkum okraje horkého plazmatu. Zajímavé je, že v osmdesátých letech se vážně uvažovalo o převzetí prvního supravodivého tokamaku T-7, což se naštěstí nezrealizovalo s tím, že nemáme techniky se zkušeností se supravodiči a kryotechnikou. Záhy totiž přišla pro naši vědu dosti temná devadesátá léta. Situace se v oboru zlepšila až s přistoupením naší země do koordinovaného výzkumu v rámci EURATOM, který především umožnil tolik potřebnou mobilitu pro naše mladé talenty.

V Anglii se počátkem tisíciletí z různých důvodů (především však s ohledem na změnu strategie jejich výzkumu a odklonu k tzv. sférickým tokamakům) ukončil provoz tokamaku COMPASS-D (1989,  $R = 56$  cm,  $a = 21$  cm). EURATOM, který výzkum spolufinancuje výměnou za koordinaci laboratoří, usiloval o zprovoznění tokamaku COMPASS-D v jedné z nových zemí Evropské unie. S ohledem na naše unikátní zkušenosti v oboru a díky překvapivému pracovnímu nasazení řady kolegů se nakonec podařilo tokamak COMPASS

v Praze velmi úspěšně zprovoznit. Malý tokamak CASTOR byl pro změnu díky hrstce nadšenců transportován na FJFI ČVUT, kde pod jménem GOLEM (přes ulici je pohřben rabi Löw) pracuje s možností řízení přes internet dodnes.

Mladý tým, který v ÚFP AV ČR s podporou ČVUT a jiných univerzit vyrostl za deset let provozu tokamaku COMPASS, se dnes s maximálním vypětím připravuje na konstrukci prvního, skutečně českého tokamaku prozatím pojmenovaného prostě COMPASS-Upgrade (2025?,  $R = 84$  cm,  $a = 28$  cm). Ten má být z důvodů

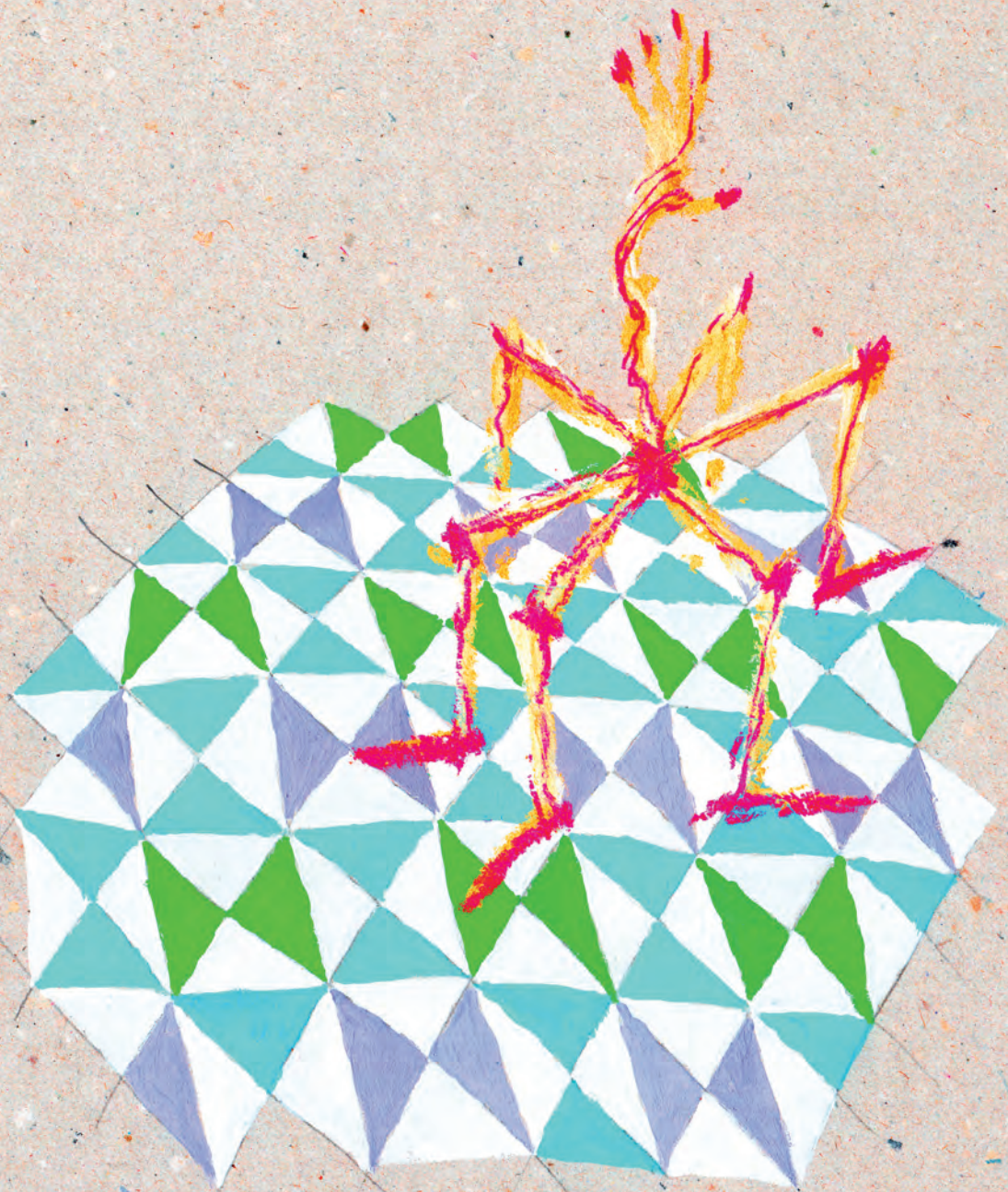
výše uvedených zaměřen hlavně na zvýšení magnetického pole až na 5 T a také na provoz s relativně vysokou teplotou první stěny. To jsou z hlediska projektu hodně ambiciózní cíle, a to tím spíše, že jde o první zkušenost s konstrukcí vlastního zařízení. A tak i když projekt probíhá za přísného dohledu zkušených zahraničních kolegů, je celému týmu třeba řádně držet palce.



*Vývoj v tokamaku GOLEM instalovaném na FJFI ČVUT. Dobře jsou vidět i (modré) vodiče primárního vinutí (místo centrálního solenoidu) na feromagnetickém jádře tokamaku. To je asi jedinou dodnes nezměněnou součástí původního sovětského tokamaku TM-1. Zdroj: FJFI, ČVUT v Praze.*

■ Jan Mlynář, 8. 10. 2021, AB 36/2021







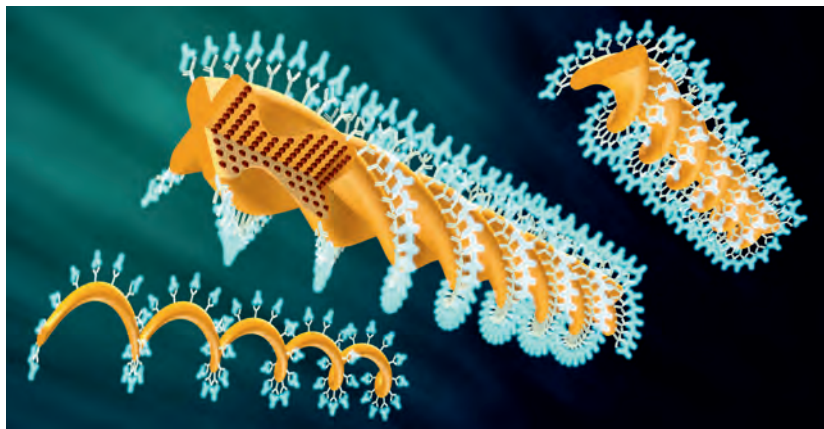
## VI. BIONIKA

**EPFL** – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švýcarský federální technologický institut v Lausanne. Jde o výzkumnou univerzitu ve švýcarském Lausanne, jejíž kořeny sahají do roku 1853. Má 14 000 zaměstnanců a přes 9 000 studentů (2018). Řadí se do první dvacítky nejprestižnějších univerzit světa.

**ETH** – prestižní švýcarská polytechnika, viz str. 48.

**Nanotechnologie** – obor zabývající se aplikováním výsledků nanofyziky. Zkoumá možnosti, jak vytvářet zařízení molekulových rozměrů a jak manipulovat s jednotlivými atomy tak, aby se dosáhlo žádaných vlastností. Protože u zařízení vyrobených pomocí nanotechnologie můžeme jejich činnost předurčit polohou a druhem jednotlivých atomů, můžeme dosáhnout maximální účinnosti, efektivitu a výkonu, při dodržení malých rozměrů.

V roce 2014 vědci z curyšského ETH vymysleli mikroroboty ve tvaru šroubovice, kteří jsou poháněni kroucením, něco jako umělý bičík. Vědci dokážou směřovat mikroroboty pomocí externích magnetických polí. Mikrorobot obsahuje mikroaktuátory a na povrchu aktivní senzory. Zdroj: PNAS, Advanced Functional Materials.



## Inteligentní mikroroboti

Vědci z EPFL a z ETH v Curychu vyvinuli malé elastické roboty, kteří mění svůj tvar v závislosti na okolním prostředí. Tvar robotů je inspirován mikroorganismy a jsou plně biologicky kompatibilní s lidským organismem. Tito roboti optimalizují své pohyby tak, aby se dostali do těžko přístupných oblastí lidského těla. Může to znamenat revoluci pro cílenou dopravu léčiv do konkrétního místa v těle.

### Inspirací je mikroorganismus

*Trypanosoma brucei* je patogenní mikroorganismus, který způsobuje spavou nemoc. Má chytrý a zákeřný trik, který mu pomáhá pohybovat se uvnitř těla hostitele téměř bez zábran. Dokáže změnit svůj tvar v závislosti na okolním prostředí. Ve fázi života, kterou mikroorganismus tráví v tělních tekutinách, zaujímá dlouhý a velmi úzký tvar. K pohybu dopředu mu slouží bičík připomínající ocas, který rotuje jako vývrtka. V jiných fázích života, kdy mikroorganismus nepotřebuje takovou pohyblivost, se smrští do hrudky. Pro Bradleyho Nilsona, inženýra z curyšského ETH, byla schopnost *Trypanosomy brucei* měnit svůj tvar nejen velkým překvapením, ale také zdrojem inspirace.

### Flexibilita

Skupina vědců, vedená Selmanem Sakarem z EPFL a Bradleyem Nilsonem z ETH, se inspirovala africkou *Trypanosomou* a navrhla in-

teligentní a biokompatibilní mikroroboty, kteří jsou vysoce flexibilní. Tato zařízení jsou schopná plavat v tekutinách a v případě potřeby měnit svůj tvar. Mohou projít úzkými cévami a složitými systémy, aniž by to mělo dopad na jejich rychlost a schopnost manévrování. Roboti budou vyrobeni z hydrogelových nanokompozitů, které obsahují magnetické nanočástice a díky tomu půjde tato zařízení ovládat elektromagnetickým polem. Vědci vytvořili studii, v níž řeší, jak „na-

programovat“ tvar robota tak, aby mohl snadno procházet kapalinami, které jsou husté, viskózní a pohybují se různou rychlostí.

## Integrovaná inteligence

Co se nám vybaví pod pojmem robot? Většinou nás napadne nějaký objemný stroj vybavený komplexními systémy elektroniky, snímači, bateriemi a aktuátory. V mikroskopickém měřítku je tomu ale úplně jinak. Výroba miniaturních robotů představuje řadu výzev a neotřelých řešení. Vědce oslovila i metoda založená na japonském origami. Roboti mají zvláštní složení a strukturu, která jim umožní přizpůsobit se vlastnostem tekutiny, kterou procházejí. Pokud se například ocitnou v prostředí s odlišnou viskozitou nebo koncentrací osmoticky aktivních látek, upraví svůj tvar tak, aby i nadále zůstal jejich pohyb pod kontrolou a co možná nejméně se změnila jejich rychlost a schopnost manévrování v daném prostředí.

„Origami robot“ obsahuje samonabíjecí mikromotor vyrobený z hydrogelu, který optimalizuje svůj tvar podle viskozity a teploty prostředí. V řadě experimentů se mikromotor dokázal pohybovat roztokem cukru za pomoci bičíku připomínajícího ocas. Roboti mohou být řízeni elektromagnetickým polem, nebo je jejich pohyb určen interakcí dutin (kavit) s proudící tekutinou. V obou případech se při pohybu automaticky transformují do nejúčinnějšího tvaru. Deformace robotů lze předem „naprogramovat“ tak, aby se maximalizoval výkon bez použití speciálních snímačů nebo akčních členů.

Sakar a Nelson navrhuji stále menší a menší roboty, kteří mají potenciál zasáhnout do různých oblastí medicíny. Jejich rozměry se pohybují od několika milimetrů až po jednotky mikrometrů. Cílem výzkumu je těmito mikroroboty bezpečně zaplavit tělo hostitele. Tam diagnostikují nebo monitorují v reálném čase různá onemocnění, třeba Alzheimerovu chorobu. Také jsou schopni měřit různé parametry, například hladinu glukózy u osob s cukrovkou. Celý roj mikrorobotů může cíleně léčit zhoubné nádory nebo vykonávat přesné zákroky v oku nebo dokonce v mozku.

*„Jednoho dne bude naše tělo schopno přijmout malé roboty, kteří dopraví léky přímo do nemocné tkáně.“*

■ Petr Panchártek, 15. 2. 2019, AB 7/2019

**Aktuátor** – elektrostatický nebo hydraulický prvek. Takové prvky se využívají jak v nanotechnologiích, tak v klasických technologiích. V nanotechnologiích převádí prvek zaslanou informaci na mechanickou akci. V makrosvětě jde například o systém aktivní optiky – pod zrcadlem je sada aktuátorů, která provádí jeho tvarové změny v závislosti na řídicím signálu. Podmínkou je, aby změny tvaru zrcadla probíhaly s vyšší frekvencí než změny v obrazu, který je korigován.

*Africké Trypanosomy plující mezi červenými krvinkami.  
Zdroj: Health Jade Team.*





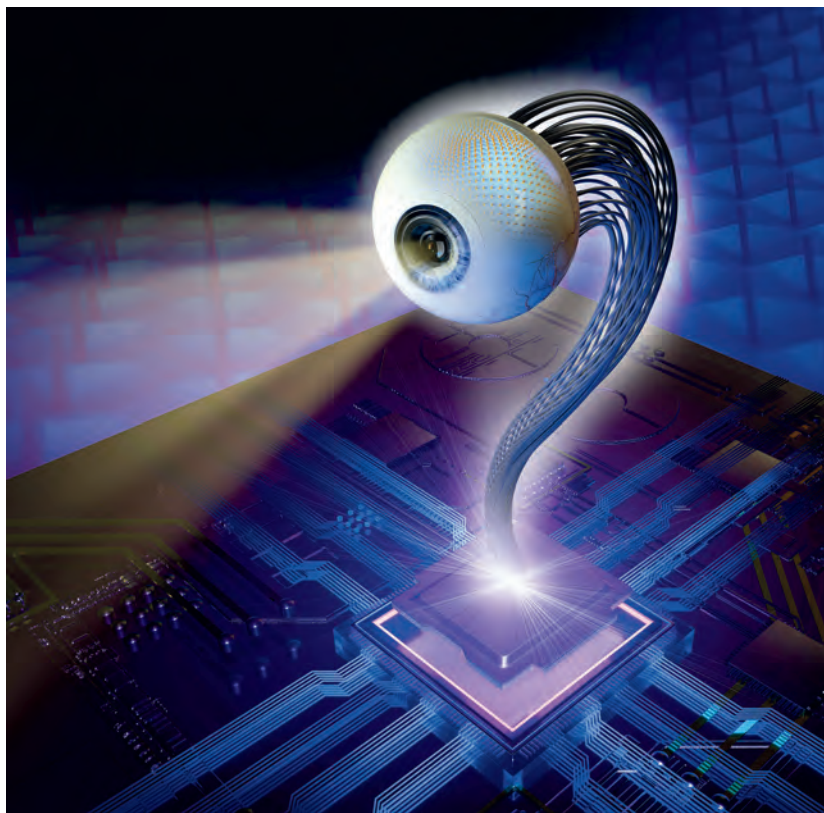
## Nejmocnější bionické oko

**Bionika** – hraniční obor, který je zaměřený na systematické uplatňování poznatků ze stavby a funkcí živých organismů a jejich struktur při vývoji nových technologií. Spojuje biologii s technikou.

**Biomimetika** – vědní obor, který zkoumá živé organismy, jejich konstrukční řešení a nabyté poznatky uplatňuje v moderních technologiích.

Umělecká představa bionického oka. Zdroj: Yaying Xu, oFantastic Color Technology Co., Ltd, Daily Mail.

Lidské oko je neuvěřitelně složitý orgán, takže není divu, že jsme jen s obtížemi postupně poznávali jeho vlastnosti. Vědci nyní představili první umělé oko na světě s 3D obrazovým snímačem, které může nejen překonat doposud známá protetická zařízení, ale má potenciál vidět mnohem lépe než skutečné lidské oko. Bionická oční bulva je kompatibilní s člověkem a v blízké budoucnosti bude mít téměř padesátkrát více „snímacích“ nanodráťů, než je optických buněk v lidské sítnici. Vědci naznačují, že případný produkt by mohl vidět předměty dále a detailněji než lidské oko. Bude tak možné obnovit lidský zrak a nebo dokonce překonat zdravý normální zrak, a to včetně vidění ve tmě.



### Současnost a vize

Bionické oči ukázaly způsob, jak obnovit zrak lidem, kteří jej ztratili a možná i těm, kteří ho nikdy neměli. V současné době jsou nejpokročilejší verze od společností Bionic Vision Australia a Second Sight, které byly již implantovány pacientům jako protézy. Obě tyto verze mají stejnou základní formu: jde o brýle s fotoaparátem umístěným uprostřed. Data z brýlí jsou zpracována malou jednotkou mimo tělo a poté odeslána do implantátu na sítnici uživatele. Odtud jsou signály přenášeny do vizuálního centra mozku.

A ono to funguje. Uživatelé hlásili, že jsou schopni znovu vidět záblesky světla, poprvé za poslední roky. Tato technologie bohužel není dostatečně citlivá na to, aby se na ni uživatel mohl spolehnout při pohybu venku. Studie ukázaly, že tyto druhy bionických očí mohou

vytvářet pruhované obrazy a jsou bohužel příliš pomalé na to, aby zachytily rychlejší pohyby.

Skupina vědců z Hongkongské vědecko-technologické univerzity (HKUST) vyvinula zařízení, kterému se říká elektrochemické oko. Nový koncept biomimetického oka by mohl znamenat významné zlepšení parametrů bionického oka. Nové biomimetické zařízení s názvem EC-EYE (*ElectroChemical EYE*) je široké asi jako palec a bylo postaveno vědci z Hogkonngu a Spojených států.

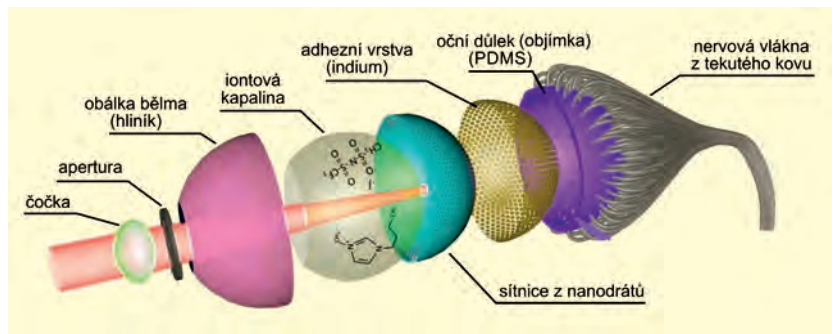
Nové oko nepoužívá dvourozměrný obrazový snímač jako fotoaparát. Tvar snímače kopíruje konkávní křivku skutečné sítnice lidského oka. Tento povrch je posetý řadou malých senzorů detekujících světlo, které napodobují přirozené fotoreceptorové buňky na lidské sítnici. Senzory jsou poté připojeny ke svazku drátů z tekutého kovu, které fungují jako optický nerv ve skutečném oku. To vše je zabaleno do membrány z hliníku a wolframu, která je tvarovaná do polokoule napodobující lidskou sítnici.

Biomimetické oko má velikost srovnatelnou s lidským okem, jen o něco více než dva centimetry v průměru. Může být použito jako vizuální protéza pro pomoc nevidomým a zrakově postiženým lidem. Unikátní design může poskytnout lepší rozlišení než lidské oči. Toho lze docílit zvýšením hustoty nanosenzorů na více než desetinásobek hustoty fotoreceptorových buněk v přirozeném lidském oku. Biomimetické oko by mohlo obnovit zrak nevidomým nebo slabozrakým lidem, kterých je po celém světě odhadem 285 milionů. Je zjevné, že medicína ve světle nových technologií, jejichž vývoj probíhá extrémně rychle, bude schopna již za několik desetiletí nahradit i ty nejspisložitější orgány v lidském těle.



Bližší pohled na systém Bionic Eye od společnosti Bionic Vision. 1) Fotoaparát pořizuje snímky v reálném čase. 2) Vnější jednotka zpracovává odeslané informace. 3) Viditelné podněty jsou zakódovány a jsou přeneseny pomocí bezdrátového rozhraní do implantátu umístěného pod pokožkou hlavy. Implantát předává pomocí elektrod elektrické signály do suprachoroidálního prostoru. Signály dále putují až k sítnici. Zdroj: Bionic Vision.

Schéma jednotlivých částí nově vyvinutého biomimetického oka EC-EYE. Zdroj: HKUST.



**Oční čočka** – průhledná bikonvexní (ve tvaru čočky) struktura v oku, která spolu s rohovkou láme světlo tak, aby mohlo být zaměřeno na sítnici.

**Čípek** – fotoreceptorická buňka v oční sítnici, která umožňuje barevné vidění. Vyskytuje se v určité podobě u většiny obratlovců, ačkoliv chybí například u paryb či u některých nočních obratlovců. Čípek je pojmenován podle tvaru této buňky.

**Tyčinka** – fotoreceptorická buňka v oční sítnici obratlovců, která obecně umožňuje vnímání kontrastů (černobílé mlhavé vidění při nízkém osvětlení). Tyčinka je pojmenována podle protáhlého až vláknitého tvaru.

**Sítnice** – vnitřní tenká vrstva oka obratlovců. Její hlavní funkcí je snímání a předzpracování světelných signálů, které na sítnici nasměruje čočka.

**Sklivec** – průhledné, čiré, bezbarvé, rosolovité těleso s řidkou vláknitou strukturou, která vyplňuje 2/3 vnitřního prostoru oční bulvy (bulbus oculi) za oční čočkou a jejím závěsným aparátem, tzv. řasnatým tělískem (corpus ciliare).

Na první pohled možná děsivé biomimetické zařízení EC-EYE (ElectroChemical EYE) je široké něco přes dva centimetry a bylo vyrobeno vědci z Hongkongu a USA. Zdroje: Gu et al., Nature, Daily Mail a New Atlas.



## Popis bionického oka

Lidské oko má důmyslnější optické uspořádání než ploché obrazové snímače ve fotoaparátech. Jeho jedinečná kopulovitá sítnice umožňuje zaostření světla procházejícího čočkou. Výroba syntetických verzí, které kopírují tyto přirozené vlastnosti, byla doposud nemožná. Profesor Zhiyong Fan a jeho kolegové z HKUST připravili novou ornou půdu pro vývoj fotosenzorů s vysokou hustotou, které fungují jako sítnice. Jsou vytvořeny přímo uvnitř pórů oxidu hlinitého, což je chemikálie tvrdá téměř jako diamant. Tenké, pružné vodiče vyrobené z tekutého kovu jsou uzavřené v hadičkách z měkké gumy a přenášejí signál do vnějších obvodů za účelem zpracování, což napodobuje neuronová nervová vlákna ve skutečném oku.

Umělá sítnice je uchycena objímkou vyrobenou ze silikonového polymeru PDMS (polydimetylsiloxan). V přední části je umístěna čočka se simulovanou duhovkou, která dodává vzhled oční bulvy. Vnitřní komora je naplněna iontovou kapalinou, která láme světlo podobně jako sklivec u skutečných očí. Gel mezi čočkou a sítnicí slouží pro chemický provoz nanovodičů. Celkové strukturální uspořádání poskytuje široké zorné pole 100°. Statické lidské oko dokáže zvládnout až 160°, ale vědecký tým EC-EYE tvrdí, že jejich oko ještě „nejede na plný plyn“ a lze tedy očekávat další vývoj.

Lidské oči mají široké zorné pole, vynikající rozlišení a jsou vysoce citlivé na světlo. Je to díky klenutému tvaru sítnice a obrovskému počtu fotoreceptorových buněk, až kolem deseti miliónů na centimetr čtvereční. Vytvoření syntetických očí, které napodobují tyto vlastnosti, je velmi zajímavá oblast pro robotiku a pro vývoj protetických vizuálních zařízení v medicíně.

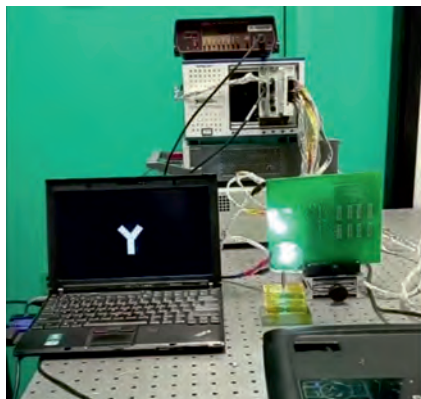
Tým testoval umělé oko EC-Eye a ukázal, že dokáže zachytit snímky relativně jasně. Zařízení bylo umístěno před monitorem počítače, na němž se ukazovala jednotlivá velká písmena, a dokázalo je zobrazit natolik kvalitně, že bylo možné je přečíst. V experimentech se ukázalo, že umělé oko zvládlo rozlišit obrazy písmene „E“, „I“ a „Y“ zobrazené v nízkém rozlišení na monitoru počítače, přestože se prototyp skládá z pouhých 100 pixelů, každý pixel se třemi nanovodiči. Vědci samozřejmě plánují rozlišení zvýšit. Biologické oči jsou pravděpodobně nejdůležitějším snímacím orgánem pro většinu zvířat na této planetě. Ve skutečnosti naše mozky získávají více než 80 % informací o našem okolí právě očima, ostatní smysly mají výrazně menší podíl.



## Vzorem pro zlepšení je zvířecí oko

Živočichové, včetně lidí, mají v očích celou řadu složitých struktur, které jim umožňují vidět. Zornice se smršťuje, aby omezila, kolik světla se dostane dovnitř, podobně jako clona v objektivu fotoaparátu. Většina zvířat má v oční sítnici jako fotoreceptory jak čípky, tak tyčinky. Čípky umožňují vidět barvu a tyčinky jsou citlivé na nízkou hladinu světla, což umožňuje vnímat šedou stupnici mezi černou a bílou. Lidé a mnoho zvířat mají tři typy čípků, z nichž každý absorbuje různé vlnové délky světla. Čípky pro krátkou, střední a dlouhou vlnovou délku umožňují rozsah vidění, který zahrnuje celé viditelné spektrum. To obsahuje barvy mezi červenou a modrou, což jsou vlnové délky v rozmezí od 390 do 700 nm. Jiné druhy zvířat, včetně ptáků, mají čtyři čípky tří mutací, které umožňují tzv. *tetrachromacii*. Vidí světlo i neobvykle krátkých vlnových délek, které už spadají do ultrafialového oboru. Tyto fotoreceptory jsou aktivovány elektromagnetickým zářením a při změně jejich tvaru vzniká elektrický signál. Elektrické signály jsou poté přenášeny do mozku optickým nervem. Signály z obou očí jsou mozkem spojeny v místě zvaném *optické chiasma*, kde mozek porovnává dva obrazy. To je to, co umožňuje zvířatům vnímat hloubku obrazu, tedy jak daleko jsou předměty sledované v jejich zorném poli. Tuto neobvyklou vlastnost by mohly zvládat i bionické oči.

Jedná se o obrovské zlepšení oproti stávajícím návrhům bionických očí, nicméně umělé oko EC-Eye stále nedosahuje vlastností přirozeného lidského oka. Tým však tvrdí, že tomu tak nemusí být navždy. Tato technologie má schopnost překonat lidské oko, pokud se využije hustší řada senzorů a každý z nich bude připojen k samostatnému nanovodiči. Tým z HKUST říká, že použití různých materiálů v různých částech EC-Eye by mohlo uživatelům poskytnout vyšší citlivost na infračervené záření – v podstatě noční vidění. Samozřejmě je před vědci ještě mnoho práce, ale EC-Eye vypadá velmi slibně a právě citlivost na další části spektra učiní z vyvíjeného oka nástroj, který předčí svůj původní vzor.

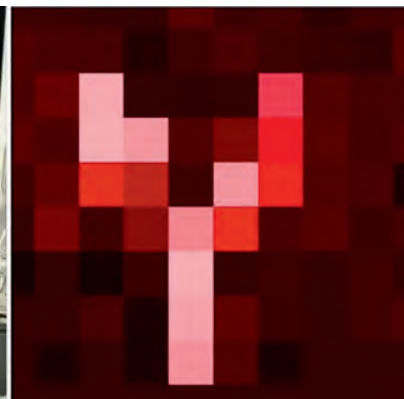


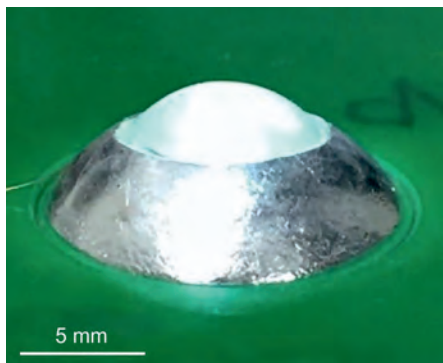
**Suprachoroidální prostor** – tenká zakřivená oblast na obvodu zadní části oka, možná dráha pro vedení signálu.

**Tetrachromacie** – využívání čtyř nezávislých kanálů pro přenos barevných informací nebo využívání čtyř typů kuželových buněk v oku. Organismy s tetrachromacií se nazývají tetrachromáty.

**Tetrachromát** – organizmus, jehož smyslový barevný prostor je čtyřrozměrný, což znamená, že k vytvoření smyslového účinku libovolně zvolené barvy z viditelného spektru je třeba použít směsí alespoň čtyř základních barev.

*Experiment s umělým okem prováděný na univerzitě HKUST. Na první fotografii je experimentální uspořádání, bionické oko snímá monitor, kde je zobrazeno písmeno ypsilon, na druhé je výsledek detekce. Zdroj: HKUST.*





Umělá oční bulva vytváří obrazy pomocí řady drobných senzorů, které simulují fotoreceptorové buňky detekující světlo v přirozeném oku. To vše je zabaleno do membrány z hliníku a wolframu, která je tvarována do polokoule napodobující sítnici. Zdroj: Nature, Daily Mail.



V blízké budoucnosti bude zařízení nejprve vyzkoušeno u humanoidních robotů, jejichž schopnosti by měly překonat schopnosti lidské. U robotů je totiž aplikovatelnost mnohem jednodušší. Může se stát, že zlepšování rychlosti a stability reakce biomimetického oka potrvá několik let. Teprve poté bude možné vytvářet humanoidní roboty. Výzkum umělé inteligence pokračuje velmi rychle. Spojení se sofistikovaným elektrickým a mechanickým designem může vést k vytvoření superrobota s mimořádnými schopnostmi. Na jednu stranu je myšlenka vytvoření nového a mocného „druhu“ lákavá. Na druhou stranu, pokud získají superroboti sebeuvědomění, mohla by se umělá inteligence spolu s roboty stát naší konkurencí. Nová technologie může pomoci robotům i lidem. Má potenciál pozvednout naši vizuální schopnost na mnohem vyšší úroveň.

*„Bát se superinteligentních robotů, kteří by si zotročili nebo by vyhubili lidstvo, je asi jako bát se přelidnění na Marsu. V zásadě je to možné, ale nyní irrelevantní.“ Andrew Ng.*

■ Petr Panchártek, 9. 10. 2020, AB 40/2020

# Pneumobot à la želva

Pneumaticky ovládaní měkkí roboti začali přizpůsobovat své schopnosti okolnímu prostředí. V minulosti byli tito roboti ovládáni elektromechanickými součástkami, jako jsou ventily a čerpadla, které jsou obvykle objemné a drahé. Nyní byl představen koncept, v němž nejsou roboti s měkkými nohama závislí na elektronických součástkách a jsou řízeni jen jednoduchými pneumatickými obvody. Tento koncept vytváří pohybové kroky pomocí kruhových oscilátorů složených z měkkých ventilů, které generují oscilující signály, na něž reagují pneumatické logické komponenty na základě odezvy na vstupní senzory. Takovému robotu k jeho činnosti postačí pouze zdroj stlačeného vzduchu k napájení řídicích a akčních systémů.

## Pneumatický čtyřnožec

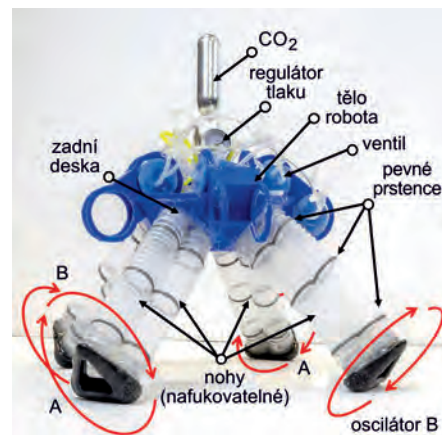
V poslední době měkkí roboti, kteří k dosažení složitých pohybů používají pružné materiály, zjednodušili interakci se složitým prostředím a umožnili bezpečnou interakci s lidmi. K ovládání měkkých robotů byly představeny různé zajímavé koncepty, včetně systémů poháněných pneumatickým nebo hydraulickým tlakem, šlachami nebo inteligentními materiály. Pneumatické ovládání je zvláště atraktivní v mnoha aplikacích, zejména pro jednoduchost výroby a komerční dostupnost požadovaných komponent. Obecně tento koncept zahrnuje nafouknutí uzavřené komory v měkkém těle řízené přívodním tlakem. Materiálová nebo geometrická asymetrie pak způsobí, že se měkké tělo bude pohybovat předepsaným směrem (například se může ohýbat, kroutit, otáčet, prodlužovat či smršťovat).

Schopnost měkkých robotů přizpůsobit se proměnlivému terénu zvyšuje jejich mobilitu. Pneumaticky ovládaný robot s měkkými nohama i se třemi stupni volnosti na jednu končetinu byl schopen pohybu v různých terénech (například v planinách nebo v údolích pokrytých volnými kameny a oblázky) pomocí velmi jednoduchých vzorů chůze. Robot může, díky pružnosti jeho měkkých končetin, vniknout do stísněných prostor. Robot je schopen reagovat na hydrodynamické síly, které „pocítuje“ při chůzi pod vodou, a zlepšit tak pohyb za různých podmínek okolního proudění.

Příroda poskytuje i inspiraci, jak generovat pohyb z oscilačních obvodů. Analogii řídicích obvodů známých jako *centrální generátory*

**CPG** – Central Pattern Generators, centrální generátory vzorů, biologické neurální obvody, které produkují rytmické výstupy při absenci rytmického vstupu. Jsou zdrojem úzce spjatých vzorů nervové aktivity, které řídí rytmické a stereotypní motorické chování, jako jsou chůze, plavání, létání, ejakulace, močení, vyprazdňování, dýchání nebo žvýkání. Schopnost fungovat bez vstupu z vyšších oblastí mozku stále vyžaduje modulační vstupy a jejich výstupy nejsou pevné. Flexibilita v reakci na smyslový vstup je základní kvalitou chování řízeného CPG.

„Nepřipoutaný“ čtyřnohý robot s palubními měkkými ventily poháněnými nádobou  $\text{CO}_2$ , která reguluje tlak. Na obrázku jsou označeny klíčové komponenty, stejně jako směry pohybů nohou pro chůzi vpřed. Pneumatické oscilátory se používají k ovládání pohybů každého páru diagonálních nohou pro rytmickou chůzi vpřed. Nohy robotů jsou v neutrálním stavu dlouhé 173 mm od základny k chodidlu. Zdroj: Science Robotics.







vzoru (CPG) používají přírodní organizmy k vytváření rytmických pohybů, jako jsou chůze, létání a plavání. Například CPG pozorované u pulců drápatky a mihule vytvářejí zjednodušené oscilační pohyby s minimální zpětnou vazbou. Zvířata používají senzory k regulaci svých oscilačních vzorů chůze na základě prostředí, ve kterém se pohybují. Jako příklady lze uvést strašilky, které zdolávají velké mezery díky změně rychlosti chůze na základě zpětné vazby od svých tykadel, a šváby, kteří používají tykadla k detekci stavu zeminy, na níž stojí a přizpůsobují tomu svou chůzi.

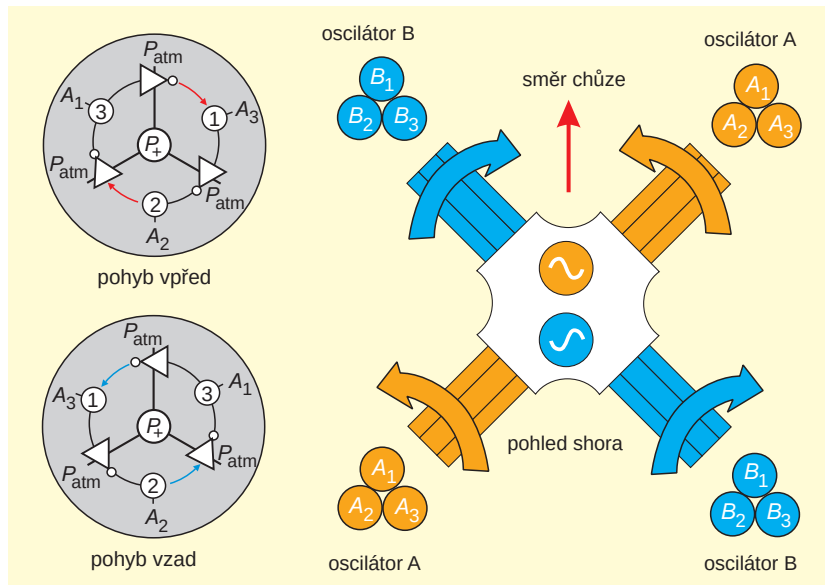
## Měkký čtyřnohý design

Návrh měkkého čtyřnožce obsahuje tři pneumatické komory na jednu nohu. Čtyři končetiny vycházejí z těla robota dvěma kolmými svislými rovinami symetrie. Každá končetina je skloněna směrem dolů pod úhlem  $45^\circ$  vzhledem k vodorovné rovině a skládá se ze tří spojených paralelních pneumatických válcových komor s měchy. Když je komora pod tlakem, končetina se ohne v opačném směru. Tři komory každé končetiny zajišťují víceosý ohyb potřebný pro chůzi.

Chůze je pro robotického čtyřnožce předurčena délkou nafouknutí či vyfouknutí tří komor každé nohy. Namísto individuálního adresování všech dvanácti komor se ovládání robota zjednodušuje pomocí spárování dvou podobných komor na nohách umístěných vzájemně na úhlopříčce. Tři spárované komory jednoho diagonálního páru jsou na obrázcích označeny  $A_1$ ,  $A_2$  a  $A_3$  a tři spárované komory druhého diagonálního páru  $B_1$ ,  $B_2$  a  $B_3$ . Vhodně načasovaná aktivace spárovaných komor  $A_1$ , pak  $A_2$  a poté  $A_3$  způsobuje, že se tento pár nohou otáčí stejným směrem, což umožní, aby robot udělal diagonální krok. Podobně sekvence  $B_1$ ,  $B_2$  a poté  $B_3$  způsobí, že robot kráčí napříč jako africká želva.

← Tento čtyřnohý měkký robot používá ke své chůzi jen pneumatické obvody bez jakékoliv řídicí elektroniky. Zdroj: IEEE Spectrum, foto UCSD.

Princip chůze robota. Konstantní přetlak  $P_+$  aplikovaný na tři komponenty střídače způsobí, že se vysokotlaký stav šíří po obvodu se zpožděním u každého měniče. Zatímco je vstup do jednoho měniče vysoký, připojený akční člen (tj.  $A_1$ ,  $A_2$  nebo  $A_3$ ) se nafoukne. Posloupnost stavů vysokého tlaku způsobí, že se každá dvojice nohou robota otáčí ve směru určeném pneumatickými spoji.



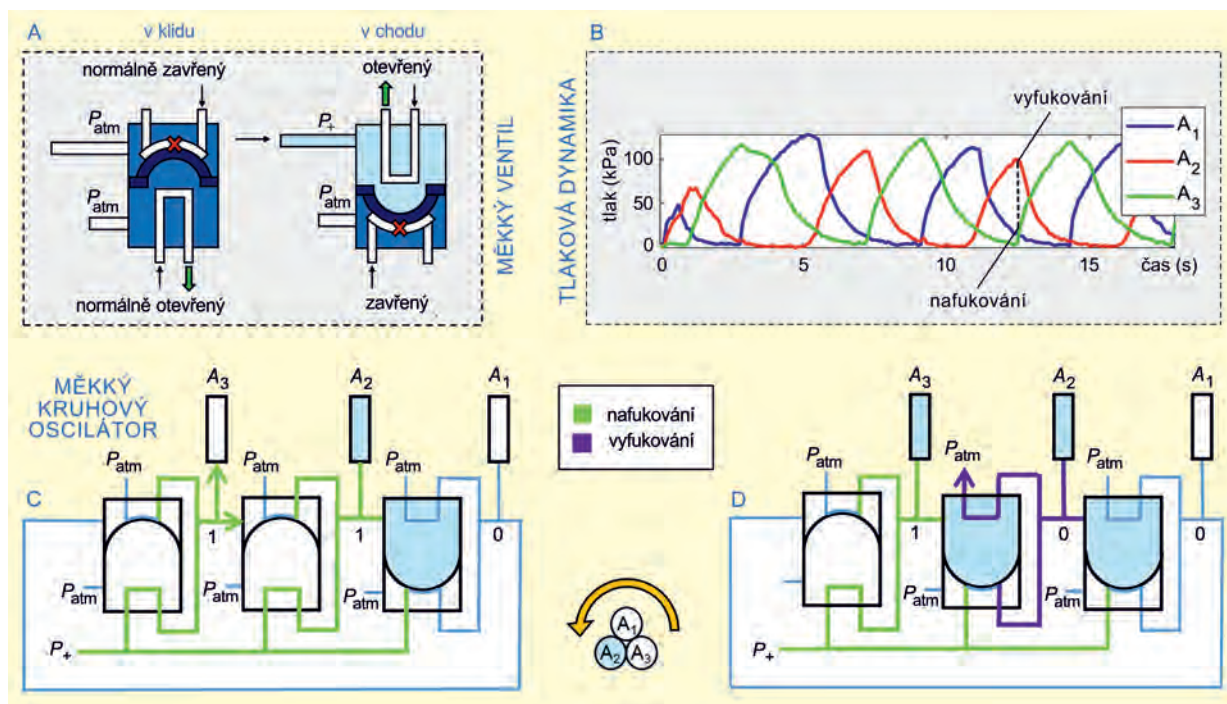
**Lokomoce člověka** – schopnost pohybu v prostoru pomocí svalové činnosti. Je zajištěna pomocí lokomočního systému, který je podsystémem pohybového systému, jenž zajišťuje a řídí aktivní přemístění živého organismu v daném prostoru a čase. U dospělého člověka a některých primátů dominují k zajištění lokomoce dolní končetiny (tzv. bipedální lokomoce).

Koncept měkkého kruhového oscilátoru. Každý z ventilů funguje jako měnič přepnutím normálně uzavřené poloviny (nahore) na otevřenou a normálně otevřenou polovinu (dole) na zavřenou. Měkký kruhový oscilátor je navržen tak, aby sledoval nafouknutí a vyfouknutí různých komor na robotovi. Aktivuje komory postupně, což vede k rotaci končetin v kruhu. Zdroj: Science Robotics.

Reverzní sekvence ovládání komor ve dvojici nohou způsobuje, že se robot pohybuje v opačném směru. Takže s lineární kombinací kroků vpřed nebo vzad s dvojicemi diagonálních nohou může robot kráčet jakýmkoli směrem. Otáčení je také možné obrácením směru otáčení jedné nohy ve dvojici vzhledem k druhé. Zjednodušený systém řízení chůze pro všesměrovou lokomoci tedy vyžaduje, aby se dvojice diagonálních nohou mohly otáčet po i proti směru hodinových ručiček.

## Rytmický pohyb s měkkým kruhovým oscilátorem

Pro ovládání výše popsaných sekvencí chůze bez elektroniky je použito měkkých pneumatických řídicích obvodů. Základní rytmičný pohyb dvojice nohou je generován měkkým kruhovým oscilátorem, který působí jako centrální pneumatický generátor vzorů (CPG). Měkký kruhový oscilátor reaguje na tlak, který působí jak jako signál (tj. indukuje, kdy má oscilovat), tak jako zdroj potřebné energie.





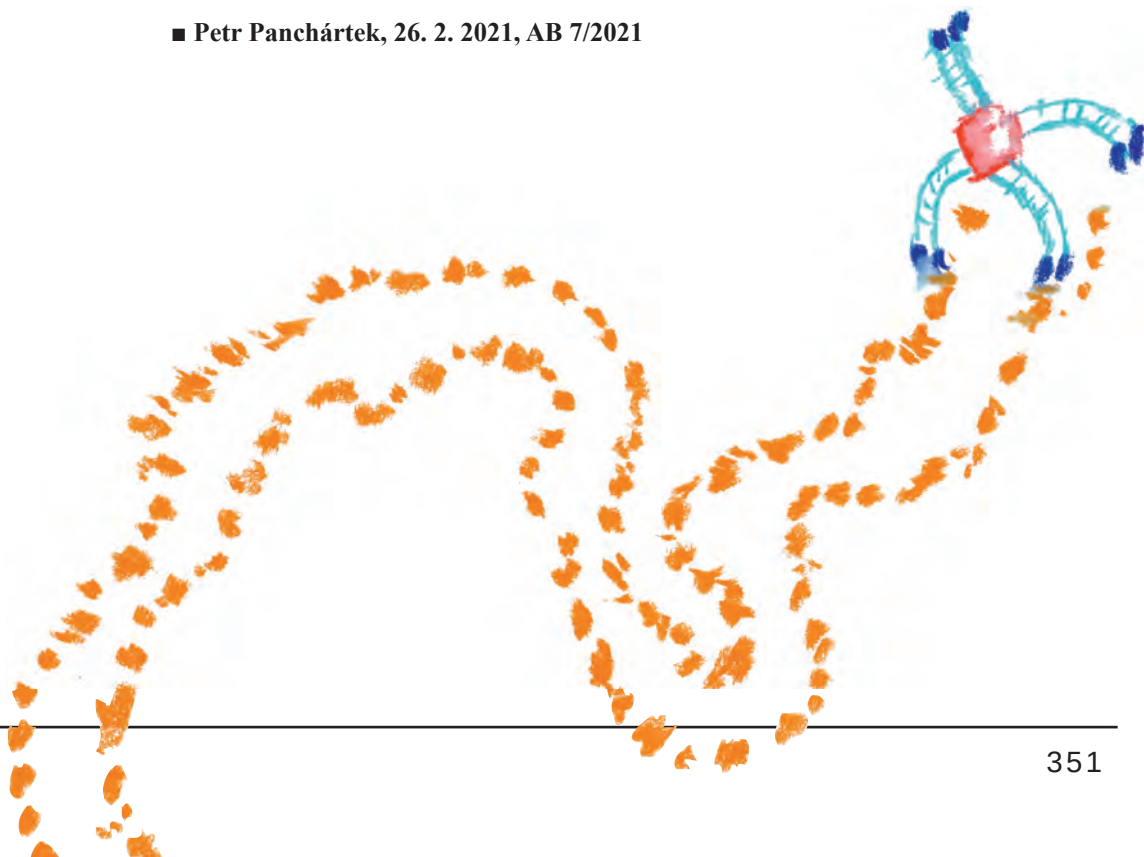
Pro generování rytmického pohybu dvojice nohou je jeden port každého ventilu s měkkým kruhovým oscilátorem připojen k pneumatickým komorám končetiny. Jedna sada spárovaných nohou je připojena k uzlům obvodu oscilátoru, které generují tlak v připojených komorách. Tlak generovaný v každé komoře během tohoto procesu má v průběhu cyklu průměrnou hodnotu 9,4 kPa.

Nový pneumatický robot má jistou podobnost s roverem, který Laboratoř tryskových pohonů JPL americké NASA vyvíjí k výzkumu Venuše. Rover samozřejmě není měkký robot, ale pracuje za podobných podmínek – nemůže se spoléhat na konvenční elektronické systémy pro autonomní navigaci nebo ovládání. Ukazuje se, že existuje spousta chytrých způsobů, jak využít mechanickou (nebo v tomto případě pneumatickou) inteligenci k výrobě robotů s relativně složitým autonomním chováním, což znamená, že v budoucnu by se mohli měkkí (nebo jemní) roboti skvěle uplatnit v situacích, kdy použití elektronického systému není dobrou volbou.

**Lokomoce živočichů** – přemísťování živočichů z místa na místo. Pohyb probíhá buď prouděním protoplazmy (například u měňavky), nebo stahy svalů u větších živočichů. Podle prostředí, v němž se pohyb provádí, se rozlišuje například chůze (běh), plavání nebo let.

**Měkká robotika** – specifická podoblast robotiky zabývající se konstrukcí robotů z vysoce pružných materiálů, podobných těm, které se nacházejí v živých organizmech.

■ Petr Panchártek, 26. 2. 2021, AB 7/2021



## Xenobot – první programovatelný organizmus

**Xenoboti** – mikroroboti schopní regenerace, kteří jsou pojmenováni po africké drápatce vodní (*Xenopus laevis*). Xenobot je biologický stroj s velikostí pod 1 milimetr, dostatečně malý, aby mohl cestovat uvnitř lidského těla. Jsou vytvořeni z kožních a srdečních buněk, které pocházejí z kmenových buněk žabích embryí.

Xenoboti vykazují kooperativní rojovou aktivitu, v tomto případě společně shromažďují hromady drobných částic.  
Zdroj: TechXplore.



Pod sledujícím okem mikroskopu poskakují v kapalině malé zaneprázdněné kuličky. Pohybují se vpřed, otočí se a někdy obíhají v kružích. Rozházejte kolem drobné částičky a tyto kuličky je shromáždí na hromádky. Jejich chování připomíná mikroskopického plochého červa snažícího se ulovit kořist nebo dokonce malé zvíře zvané želvuška, což je bytost dostatečně složitá, aby zvládla sofistikované chování. Podobnost je ale jen iluze. Tyto kuličky se skládají pouze ze dvou složek, z kožních a srdečních buněk žab.

Vědci popisují, jak pomocí evolučních algoritmů vytvořili takzvané xenoboty, jejichž buňky pocházejí z bezjazyčné africké žaby drápatky vodní (*Xenopus laevis*). Tento nový druh organismu je tvořený pouze ze smršťujících se buněk a na ně nalepených pasivních buněk. Vědci doufají, že jejich neuvěřitelně pokročilé chování může pomoci odhalit tajemství buněčné komunikace. Stále je velkou hádankou, jak buňky společně vytvářejí složité anatomie. Co vědce velmi zajímá, je otázka, jak buňky spolupracují, aby vytvořily konkrétní funkční struktury. Jakmile dostanou na tuto otázku odpověď, mohli by dokonce pokročit

k záhadnější otázce, a to, co vše by buňka mohla být ochotná udělat.

### Co je xenobot?

Vědci na Tuftsově univerzitě začali navrhopvat xenoboty z buněk na základě několika efektivních algoritmů. Sklízeli kmenové buňky ze žabích embryí a rozdělovali je na srdeční buňky, které se přirozeně stahují, a kožní buňky, které tuto vlastnost nemají. Pod mikroskopem sestavovali tyto aktivní a pasivní součásti dohromady a využívali přirozené vzájemné přilnavosti buněk. Některá uskupení skončila ve tvaru klínu, jiná jako oblouky.

Při pohybu xenobotů bylo možné pozorovat, jak jejich chování závisí na jejich struktuře (na uspořádání buněk a na tvaru). Napozorovaná data zpracovával tým počítačových expertů, kteří vytvořili simulované prostředí pro digitální verze xenobotů. Poté spustili evoluční algoritmy, které v jistém smyslu replikují procesy přirozeného výběru, aby zjistili, jak struktura xenobota

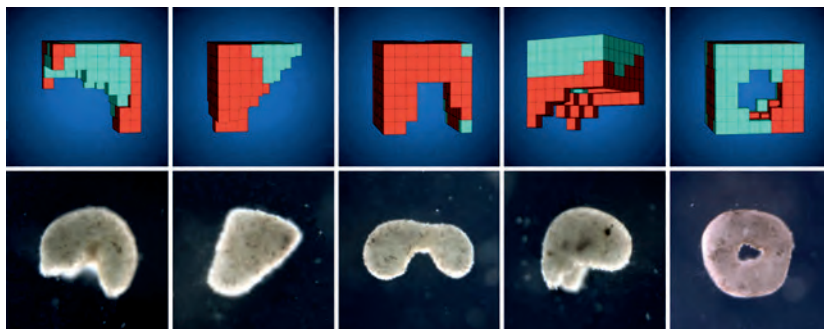
ovlivňuje jeho pohyb. Systém hledá možné změny v návrzích xenobotů a zkoumá, jak by nové designy mohly ovlivnit funkčnost. Xenoboti, kterým se v rámci simulace daří při plnění konkrétního úkolu, jsou považováni za „způsobilé“ a jsou „chováni“ spolu s dalšími vysoce výkonnými jedinci, aby vytvořili novou generaci „vyvinutých“ xenobotů.

Shluky bez mozku se nakonec chovají způsoby, které jsou až strážidelné. Čas od času změni směr pohybu, někdy se i otočí a vrátí zpět. Když narazí na uvolněné buňky, tak je nahromadí na malé hromádky. Rozkrojený xenobot se zase stáhne k sobě, à la T-1000 z Terminátora 2. Dva xenoboti se mohou spojit a skákat kolem sebe jako šťastný pár. Xenobot s otvorem uvnitř může věci sbírat a přenášet.

Xenobot je jedinečný organizmus, chová se současně jako živý tvor ze živých buněk, i jako stroj, který mohou vědci naprogramovat tak, aby se projevoval určitým způsobem. Žabí buňky nejsou specializované pro vykonávanou činnost, ale pozoruhodné je jejich mimořádné chování, které společně vykazují. Je na čase začít uvažovat o zcela novém přístupu k robotice. Typický humanoidní robot je vlastně jen sbírkou hloupých součástí, které tvoří (v ideálním případě) inteligentní celek, který může chodit a manipulovat s objekty. Lidské tělo je však inteligentní v každém detailu. Buňky komunikují a vytvářejí tkáň, které spolupracují na tvorbě orgánů, které jsou nakonec součástí inteligentní bytosti.

## Připravte se na xenoboty 2.0.

Stejný tým vědců nyní vytvořil formy života, které samy sestavují tělo z jednotlivých buněk. Nevyžadují pohyb svalových buněk a dokonce mají schopnost zapisovatelné paměti. Nová generace xenobotů se



Roboti, jak je navrhl počítač nahoře, s jejich reálnými analogiemi dole. Zdroj: Wired.

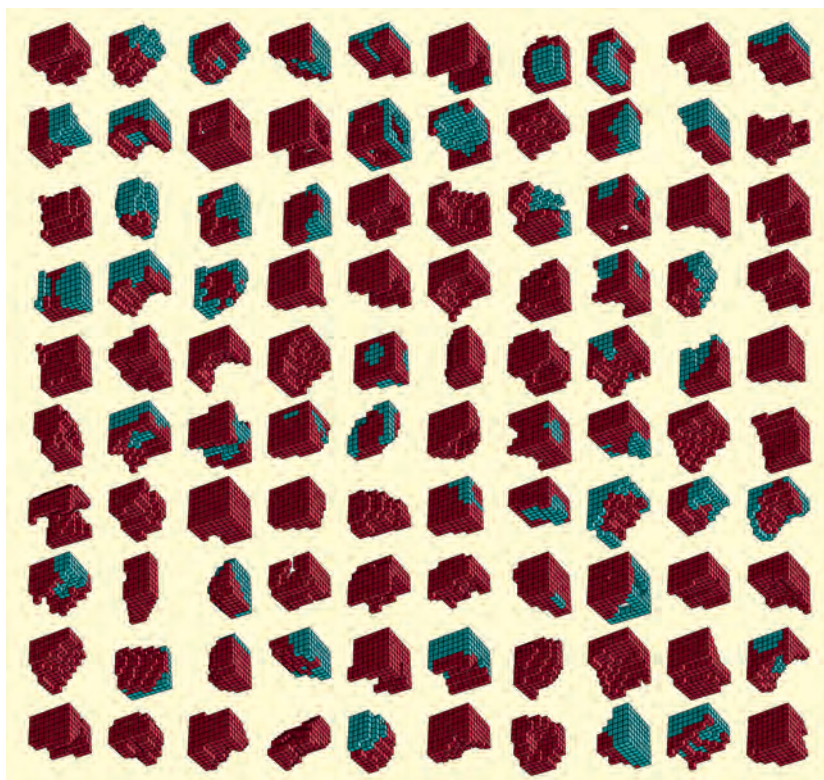
**Tuftsova univerzita** – soukromá vysoká škola ve Spojených státech, která byla založena v roce 1852 ve státě Massachusetts. Lukrativní pozemek na stavbu univerzity věnoval americký obchodník a filantrop Charles Tufts, proto nese univerzita jeho jméno. V sedmdesátých letech 20. století se univerzita v anglikánském stylu transformovala na velkou výzkumnou univerzitu. Je členem Asociace amerických univerzit, která sdružuje 64 nejvýkonnějších vědeckých univerzit v Severní Americe.



**Přístup shora dolů** – rozděluje složitý problém nebo algoritmus do několika menších částí (modulů). Tyto moduly jsou dále rozloženy, dokud není výsledný modul dále nerozložitelný.

**Přístup zdola nahoru** – funguje opačným způsobem než přístup shora dolů. Zpočátku zahrnuje návrh nejzákladnějších částí, které jsou pak kombinovány tak, aby vytvořily modul vyšší úrovně. Tato integrace submodulů a modulů do modulu vyšší úrovně je opakovaně prováděna, dokud není získán celý požadovaný algoritmus.

Evoluční algoritmy navrhly mnoho forem. Zdroj: Wired.



pohybuje rychleji, naviguje se v různých prostředích a má delší životnost než první verze. Stále zůstává schopnost spolupracovat ve skupinách a léčit se, pokud je xenobot poškozen.

U xenobotů 1.0 byly automaty o velikosti milimetru konstruovány přístupem „shora dolů“. Tkáň byla umísťována manuálně a žabí kůže a srdeční buňky byly chirurgicky tvarovány. Další verze xenobotů je naopak tvořena přístupem „zdola nahoru“. Biologové v Tuftsově univerzitě odebrali kmenové buňky z embryí drápatky vodní a umožnili jim, aby se samy shromáždily a vyrostly do sféroidů. Některé buňky se po několika dnech odlišily a vytvořily řasinky – drobné vlasové tvary, které se pohybují tam a zpět nebo se otáčejí určitým způsobem. Místo použití ručně tvarovaných srdečních buněk, jejichž přirozené rytmické kontrakce umožňovaly původním xenobotům potopit se, dávají

řasinky sféroidním robotům nové „nohy“, aby se rychle pohybovaly po povrchu. U žáby nebo u člověka by se řasinky normálně nacházely na sliznicích, například v plicích, aby pomohly vytlačit patogeny a další cizí materiál. Na xenobotech se vytvořily, aby umožnily rychlou lokomoci.

Za standardní situace buňky v embryu žáby spolupracují na vytvoření pulce. Buňky mohou použít řasinky pro nové funkce, jako je lokomoce. Buňky mohou spontánně převzít nové role a vytvářet nové způsoby chování těla bez dlouhých období evolučního vývoje těchto funkcí. Xenoboti jsou svým způsobem konstruováni podobně jako tradiční roboti. Jen se využívají buňky a tkáň místo umělých komponent, aby se vytvořil tvar a předvídatelné chování. Pokud jde o biologii, tento přístup nám pomáhá porozumět tomu, jak buňky

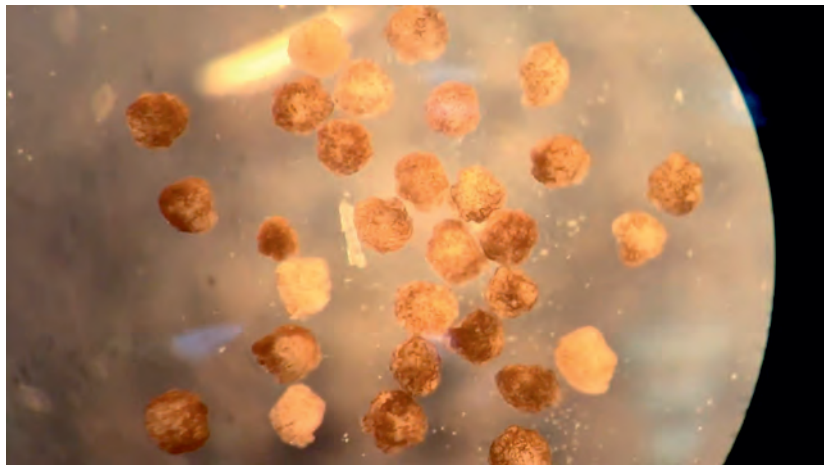
komunikují při vzájemné interakci během vývoje a jak se mohou tyto interakce lépe kontrolovat.

Zatímco vědci z Tuftsovy univerzity vytvořili fyzické organizmy, vědci z Vermontské univerzity (UVM) byli zaneprázdněni tvorbou počítačových simulací, které modelovaly různé tvary xenobotů. Cílem bylo zjistit, za jakých podmínek mohou vykazovat odlišné chování, a to jednotlivě i ve skupinách. Tým pomocí evolučního algoritmu vytvořil stovky tisíc náhodných podmínek prostředí. Tyto simulace byly použity k identifikaci xenobotů, kteří jsou nejvíce schopni spolupracovat ve skupinách a dokážou shromažďovat velké shluky částic.

Superpočítač prohledává prostor všech možných skupin xenobotů, aby našel skupinu, který dělá práci nejlépe. Dávají se jim zatím jednoduché úkoly, ale snad vznikne nový druh živého stroje, který by mohl například vyčistit mikroplasty v oceánu nebo kontaminanty v půdě. Ukázalo se, že noví xenoboti jsou mnohem rychlejší a lepší v úkolech, jako je sběr odpadků, než jejich první verze. Společně pracují ve skupině, aby projeli Petriho misku a shromáždili větší shluky z částic oxidu železa. Mohou také pokrýt široké povrchy nebo cestovat úzkými kapilárami. Tyto studie také naznačují, že simulace by v budoucnu mohly optimalizovat další vlastnosti biologických robotů, které povedou k složitějšímu chování xenobotů. Jednou z důležitých funkcí přidáných do upgradu xenobotů je schopnost zaznamenávat informace.

## Nyní s pamětí

Ústředním prvkem robotiky je schopnost zaznamenávat různé informace do paměti a používat je k úpravě akcí a chování příslušného robota. S ohledem na to vědci z Tuftsovy univerzity vytvořili xenoboty se schopností čtení a zápisu informace. Jeden informační bit zaznamenávají pomocí fluorescenčního proteinu zvaného EosFP, který normálně svítí zeleně. Při vystavení světlu o vlnové délce 390 nm však protein místo toho vydává červené světlo.



Při plavání xenobotů v tekutině je pozorováno výrazné skupinové chování. Zdroj: Syfy Wire.

**Sféroid** – rotační elipsoid, jehož dvě poloosy jsou stejně veliké. Sféroid se používá v teorii tíhového potenciálu Země jako nejjednodušší přiblížení tvaru gravitačních ekvipotenciál. Tvar sféroidu má také míč v americkém fotbale či ragby.

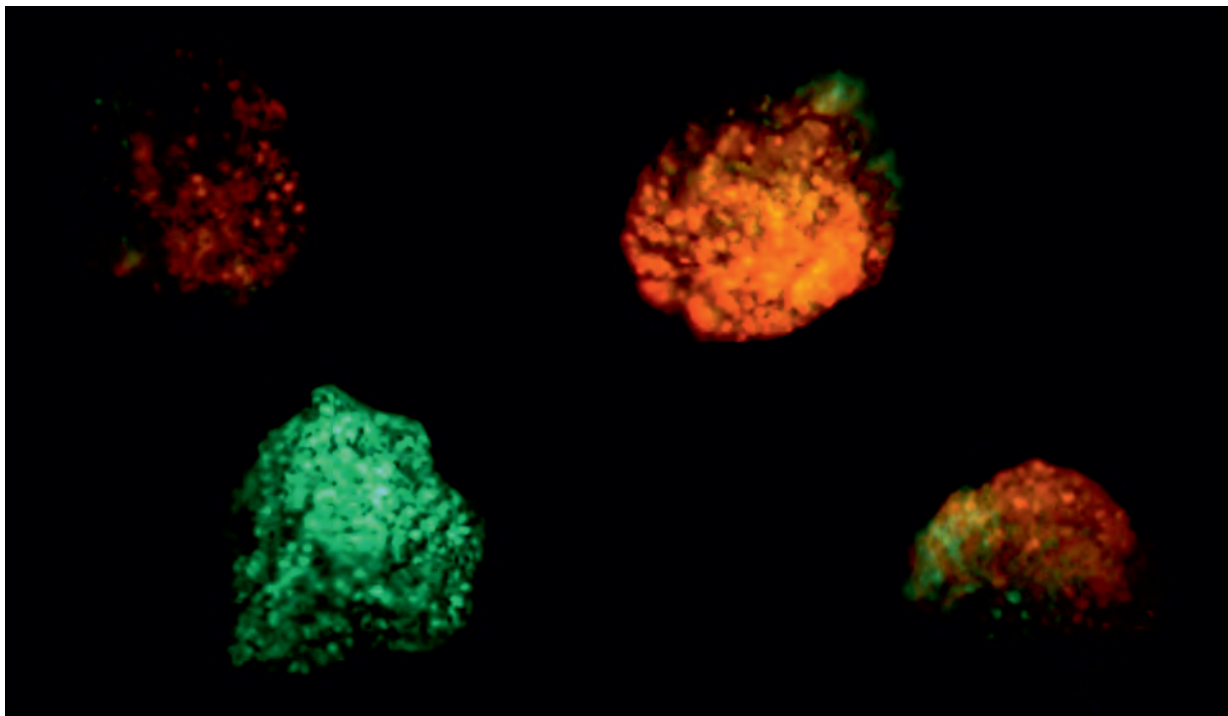
**EosFP** – Eos Fluorescent Protein, fotoaktivatelný fluorescenční protein v zelené a červené barvě. Jeho zelená fluorescence (516 nm) se změní na červenou (581 nm) aplikací ultrafialového záření (~390 nm, tj. na hranici mezi fialovým světlem a UV zářením). Změna je způsobena rozbitím peptidového řetězce poblíž chromoforu.

**mRNA** – jednovláknová nukleová kyselina (RNA), která vzniká během transkripce DNA a slouží jako předpis pro výrobu bílkoviny na základě genetické informace přepsané podle genetického kódu. Zkratka „mRNA“ pochází z angličtiny, ve které se tato molekula označuje jako „messenger RNA“, což znamená „poslíček“.

*Paměťová funkce xenobota. Tři roboti vydávali červené světlo poté, co byli osvětleni paprskem světla o vlnové délce 390 nm. Zdroj: Syfy Wire.*

Před vyříznutím kmenových buněk byla za účelem vytvoření xenobotů do buněk žabích embryí injektována mRNA kódující protein EosFP. Zralí xenoboti nyní mají vestavěný fluorescenční spínač, který dokáže zaznamenávat expozici modrého světla kolem vlnové délky 390 nm. Vědci testovali paměťovou funkci tím, že nechali deset xenobotů plavat kolem povrchu, na kterém bylo jedno místo osvětleno paprskem světla o vlnové délce 390 nm. Po dvou hodinách zjistili, že tři roboti vydávali červené světlo. Zbytek zůstal v jejich původní zelené barvě. Úspěšně tak byl zaznamenán „cestovní zážitek“ tří robotů.

Tento princip molekulární paměti lze v budoucnu rozšířit o detekci a záznam nejen světla, ale také přítomnosti radioaktivní kontaminace, chemických znečišťujících látek, drog nebo chorobného stavu. V budoucnu by mohly paměťové funkce umožnit záznam více podnětů (více bitů informací) nebo umožnit robotům uvolnit sloučeniny nebo změnit chování na základě podnětů z okolí.





## Xenobote, uzdrav se!

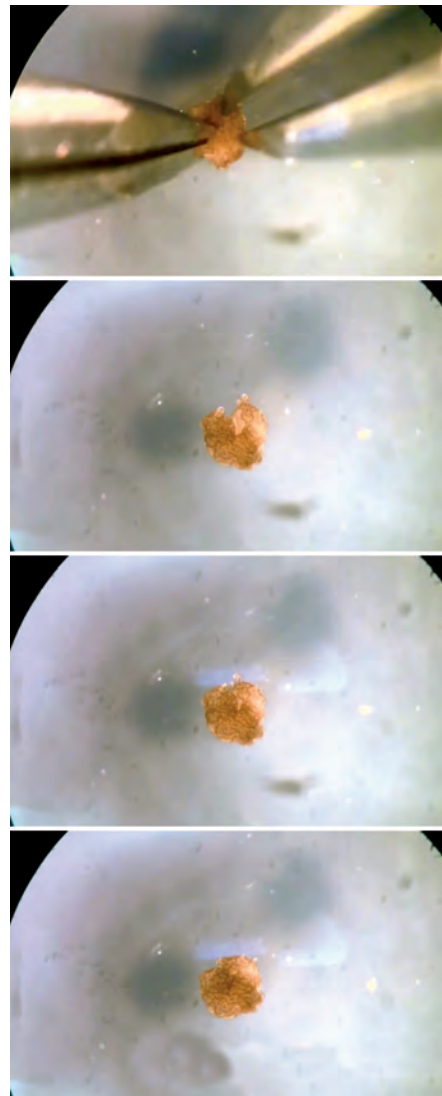
Na rozdíl od xenobotů, mají jejich kovové a plastové protějšky potíže s obnovováním vlastního těla. Xenoboti a budoucí verze biologických robotů tuto schopnost mají. Jejich buňky rostou a dozrávají a mohou se opravit a obnovit, pokud dojde k jejich poškození. Léčení je přirozený rys živých organismů a je v biologii xenobota zachován. Noví xenoboti byli pozoruhodně zdatní v hojení. Do pěti minut po poranění uzavírají většinu svých těžkých tržných ran skoro až o velikosti poloviny své tloušťky. Všichni zranění roboti dokázali ránu nakonec uzdravit, obnovit její tvar a pokračovat v předchozí práci.

Další výhodou biologického robota je metabolismus. Na rozdíl od kovových a plastových robotů mohou buňky biologického robota absorbovat a rozkládat chemikálie a fungovat jako malé továrny syntetizující a vylučující chemikálie a proteiny. U těchto mnohobuněčných organismů lze využít metody syntetické biologie, která se zaměřuje na přeprogramování jednobuněčných organismů tak, aby produkovaly užitečné molekuly. Upgradovaní roboti mohou, stejně jako původní xenoboti, přežít až deset dní ve svých embryonálních zásobách energie a plnit úkoly bez dalších zdrojů energie. Mohou ale také fungovat po mnoho měsíců, pokud jsou drženi v živné „polévce“.

## Význam xenobotů

Malí biologičtí roboti mají pozoruhodný potenciál. Provádějí užitečné úkoly v prostředí a v terapeutických aplikacích. Nejcenější výhodou tohoto výzkumu je však, že používání těchto robotů pomůže pochopit, jak se jednotlivé buňky spojují, komunikují a specializují při vytváření většího organismu, například žáby nebo dokonce člověka. Je to nový modelový systém, který může přinést zcela nové postupy v regenerativní medicíně. Xenoboti a jejich nástupci mohou dokonce umožnit pochopení toho, jak mnohobuněčné organismy vznikaly z původních jednobuněčných organismů, a jaký je původ zpracování informací, rozhodování a poznávání v biologických organizmech. Obrovská budoucnost této technologie umožnila založení *Institutu pro počítačově konstruované organismy* (ICDO) při Tuftsově univerzitě a Univerzitě ve Vermontu. Institut spojí zdroje obou univerzit k vytváření živých robotů se stále sofistikovanějšími schopnostmi.

*Automatická regenerace xenobota po záměrném poškození jednoduchým řezem. Zdroj: Wired.*

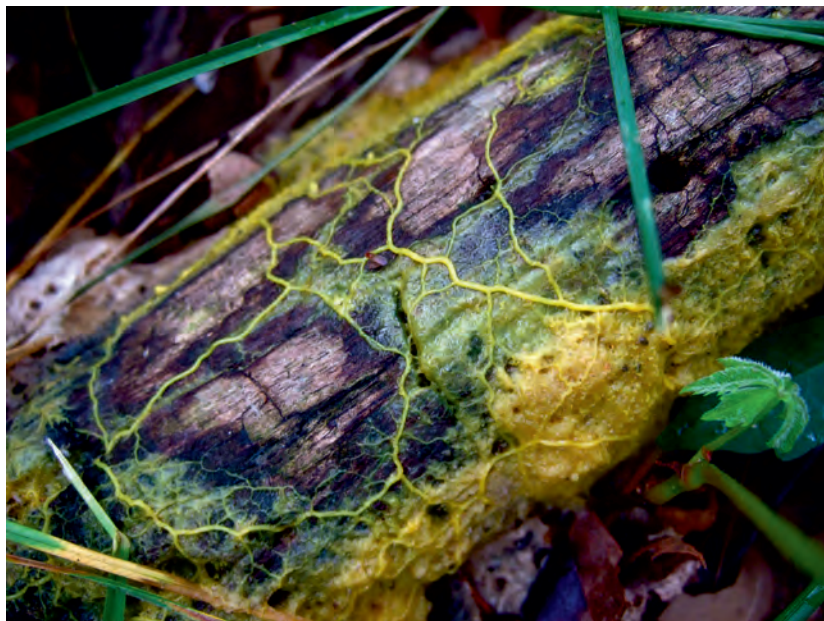


■ Petr Panchártek, 30. 4. 2021, AB 16/2021

## Intelligentní améby

**Měňavka** – jednobuněčný eukaryotní organizmus měnící téměř libovolně svůj tvar a pohybuji se pomocí panožek. Měňavky vysunují své panožky (vychlípeniny buňky) kupředu a pak za nimi přitahují celé tělo. Panožky slouží rovněž k přijímání potravy. Typicky může žít ve vodě nebo ve vlhké půdě, některé mohou žít neškodně, nebo patogenně v travici soustavě jiných živočichů. Některé druhy, například *Physarum polycephalum*, mohou vytvářet mnohojademá plazmódia o plochách až několik metrů čtverečních. Plazmódium vzniká mnohonásobným dělením buněčných jader, přičemž se poslední fáze rozdělení samotné buňky vynechá.

Vápenatka mnohohlavá (*Physarum polycephalum*) ve stadiu plazmódia v přirozeném prostředí na vlhkém pařezu. Zdroj: Wikimedia.



Měňavky jsou velmi zajímavé organizmy, které mohou žít na různých místech a v různých formách. Pokud jsou měňavky v obvyklé jednobuněčné formě, mohou některé dorůst do velikosti až 1,5 mm. Vybrané druhy ale mohou vytvořit tzv. *plazmódium*, což je buněčná látka obsahující mnoho buněčných jader, která vznikla dělením jader, ale bez dělení samotné buňky. Kromě řady jiných zajímavých vlastností byly popsány i takové, které připomínají inteligentní chování a které bychom u jednobuněčných organizmů vůbec neočekávali. Mezi hlavní znaky inteligentních bytostí patří učení, přizpůsobení se a řešení problémů. Oblíbě se již dlouhou dobu těší *vápenatka mnohohlavá* druhu *Physarum polycephalum*, u které byly všechny tyto znaky pozorovány.

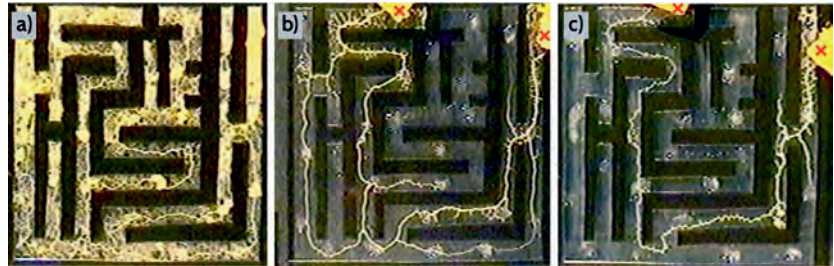
### Hledání v bludišti

Procházení prostoru a hledání nejkratší či nejrychlejší cesty patří k základním problémům umělé inteligence. Vápenatka si umí s tímto problémem také poradit. Skupina japonských vědců pod vedením profesora

Toshiukiho Nakagaki z Univerzity v Hokkaidó popsala případ, kdy byla vápenatka vpravena do bludiště, které v zápětí vyplnila. Potom byla na dvou místech do bludiště vložena potrava (velmi oblíbenou potravou jsou ovesné vločky), na což vápenatka reagovala a začala se stahovat ze slepých uliček bez potravy. Zájemem vápenatky bylo v tomto případě soustředit co nejvíce svého těla u potravy a zároveň zůstat jedním spojeným organizmem. Nejdříve se tedy stáhla ze slepých uliček, ale spoju mezi oběma místy s potravou zůstalo víc. Na to reagovala „logicky“ stažením se z delších cest a její výsledné tělo představovalo nejkratší cestu mezi dvěma body bludiště.

## Předvídání událostí

Vypozorovat periodicky se opakující situace v okolí a naučit se je předvídat je také jedním z projevů inteligence. Tatáž skupina z Univerzity v Hokkaidó popsala zajímavý experiment, v němž se vápenatka přesouvala po povrchu agarového gelu a při konstantních a vhodných podmínkách si v klidu hledala své ovesné vločky. Potom se ale snížením teploty podmínky na krátkou dobu zhoršily, na což vápenatka reagovala zpomalením pohybu. Toto zchlazení se opakovalo periodicky třikrát po sobě (po hodině) a vápenatka vždy dočasně zpomalila svůj růst. Vápenatka tento periodický děj „vyhodnotila“ a v době, kdy měla nastoupit čtvrtá perioda ochlazení, sama zpomalila, i když ochlazení nenastalo. Při dobré vůli lze vidět nepatrný pokles v rychlosti i při pátém marně očekávaném zchlazení. Skupina vápenatku ponechala a další ochlazení provedla až po šesti hodinách. O tom, že se vápenatka opravdu něco „naučila“, svědčí to, že hodinu po tomto ochlazení sama opět zpomalila, neboť očekávala periodické opakování jako v předchozím pokusu.

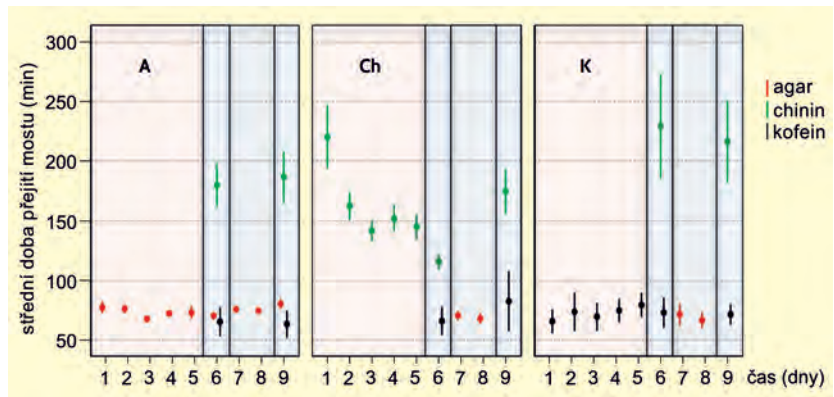


Vápenatka hledá cestu v bludišti. Na začátku zaplnila celé bludiště (a), po vložení potravy „x“ se stáhla ze slepých uliček (b) a následně svým tělem vytvořila nejkratší cestu v grafu (c). Zdroj: Nature.

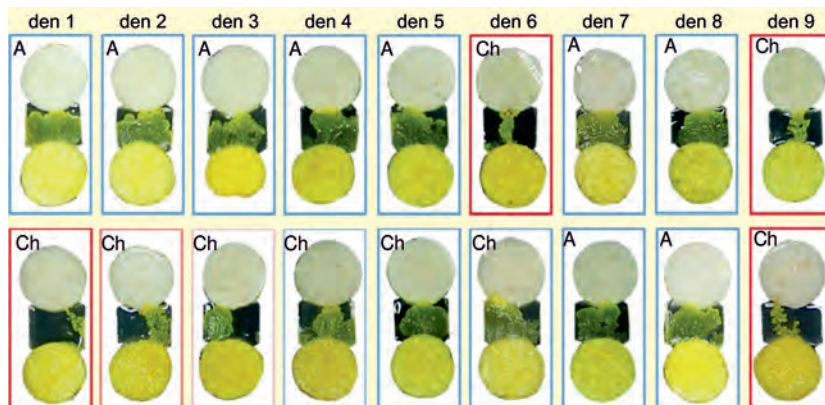
## Učení se (a zapomínání)

Dalším příkladem „inteligence“ je učení. Skupina vědců z francouzské Univerzity v Toulouse naučila vápenatku překonávat nepřátelské prostředí. Misky s vápenatkou byly spojeny agarovými mosty s jinými miskami s potravou (zase vločky). Mosty byly tvořeny čistým agarem a agarem s přísadkou kofeinu nebo chininu, které vápenatku odpuzují. V případě mostu z čistého agaru jej vápenatka bez problémů překročila a dorazila k potravě. K nepřátelskému agaru se nejprve stavěla odporově, během pěti dnů se ale postupně naučila hrozbu ignorovat a dostat se k potravě. Most

Znárodnění doby potřebné k překročení mostu v jednotlivých dnech, barevně je odlišen druh mostu (agar, kofein, chinin). Zdroj: Univerzita v Toulouse.







Fotografie vybraných vápenatek v jednotlivých dnech pro různé mosty (A – agar, Ch – chinin), červeným rámečkem jsou zvýrazněny přechody mostu tenkým kanálkem.  
Zdroj: Univerzita v Toulouse.

**Eukaryota** – jedna ze tří domén (nadřší) organizmů (archaea, bacteria, eukaryota), jednobuněčné i vícebuněčné organizmy, které obvykle mají obsah buňky rozdělený membránami na oddělené prostory a genetickou informaci umístěnou v podobě lineárních řetězců DNA v formovaném jádře. Rozmnožují se pohlavně i nepohlavně.

s čistým agarem vápenatka překročila nejrychleji a v celé šířce. Chininový most ze začátku překročila za mnohem delší dobu a pouze v tenkém pruhu, až se postupně se naučila hrozbu ignorovat. Překročení kofeinového mostu bylo sice rychlé, ale pouze tenkým kanálkem. Vybrali jsme jen několik zajímavých vlastností podivného organismu, které připomínají inteligentní chování. Rozhodnout, zda jde o inteligenci, nebo jen chová-

ní připomínající inteligenci, je obtížné, neboť neexistuje jedna a už vůbec ne jednoznačná definice inteligence. Pokud bychom zde přijali pracovní definici, že inteligencí je schopnost přizpůsobit se, můžeme konstatovat, že vápenatky inteligentní jsou. Schopnost přizpůsobit se mají všechny živé organizmy. Ty vyšší i díky nervové soustavě, ty nižší to zvládají díky velkému množství malých entit. Například přizpůsobování se bakterií okolí je založeno na jejich velkém množství a občasných mutacích. Ty jsou většinou škodlivé, někdy se však objeví mutace prospěšná a mutovaná bakterie lépe přežívá v kolonii a časem může převládnout – tím vzniká dojem, že kolonie našla lepší řešení a přizpůsobila se. Za inteligentní tedy můžeme označit kolonii bakterií, ne však jednu bakterii. Podobně můžeme chápat i celou biosféru a evoluci jako formu inteligence. Inteligentní chování vápenatek můžeme vidět v tom, že se s jistotou nadsázkou jedná o „mnobuněčný“ organizmus, kolonii buněk, které však zůstaly spojeny. Každá z nich se hypoteticky může chovat do jisté míry nezávisle a zvolit si nějakou možnost (ať už to znamená cokoliv). Při tak velkém množství už může některá z nich zvolit tu správnou možnost. Ty ostatní to potom nějakým způsobem rozpoznají a opět vyberou onu správnou možnost. V tomto případě by tedy inteligence spočívala v jednoduchém algoritmu prohledávání do šířky. Výzkumy tohoto druhu jsou velmi cenné, neboť umožňují lépe pochopit podstatu inteligentních forem života a navíc umožní použít jednoduché organizmy v nových průlomových technologiích.

## Slyší rostliny?

Živé organizmy se v zájmu přežití naučily vnímat okolní svět a účelně na něj reagovat. Obecně panuje shoda v tom, že člověk má pět základních smyslů: zrak, sluch, čich, chuť a hmat. Někteří jiní živočichové se naučili vnímat i další podněty, například elektrické nebo magnetické pole. Tyto schopnosti jsou u živočichů sice zajímavé, ale jejich samotná existence nás zase až tak moc nepřekvapuje. To už ale neplatí, pokud přijde řeč na rostliny. A přece se zdá, že i rostliny mají sluch.

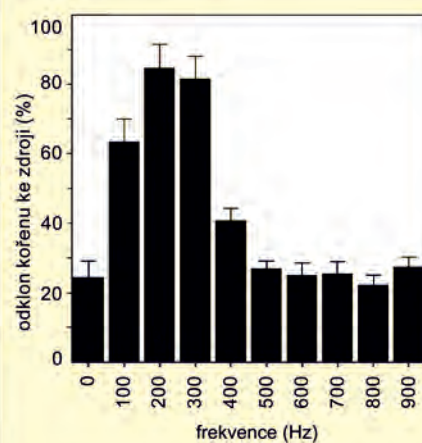
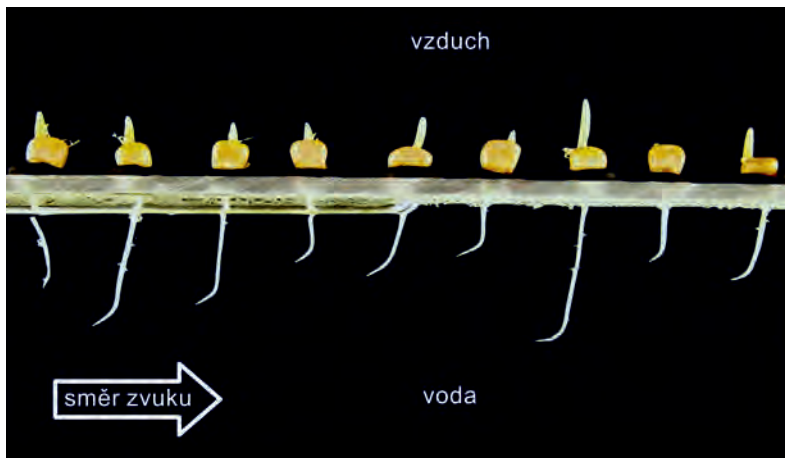
### Živočichové, rostliny a zvuk

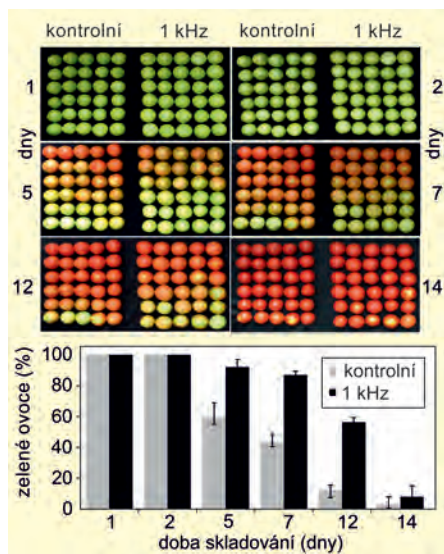
Živočichové vnímají zvuky obvykle prostřednictvím buněk citlivých na jemné periodické vibrace, které vytvářejí nervové vzruchy zpracovávané dále nervovou soustavou. Například obratlovci mají tyto buňky umístěny ve vnitřním uchu, octomilky vnímají zvuk štětinkami (*arista*) a podobně. Rostliny ale nemají žádnou nervovou soustavu a ani nemají pro vnímání zvuku speciální orgán. Ukazuje se však, že zvuk jsou schopny vnímat na úrovni buněk a že se nejedná o vnímání analogické s mechanickým drážděním. Vhodný zvukový podnět má za následek změnu exprese genů (přenos genetické informace z DNA do funkční podoby) a změnu buněčného metabolismu (způsobu zacházení s potravou). Ukažme si nyní několik zajímavých případů, jak příslušníci rostlinné říše reagují na zvukové podněty.

**Zvuk** – mechanické vlnění šířící se v hmotném prostředí. V tekutinách jde o podélné vlnění, v pevných látkách se šíří podélné i příčné módy. Interval frekvencí vlnění, které je schopen vnímat člověk, je přibližně od 16 Hz do 20 000 Hz. Tyto hranice jsou individuální a mění se s věkem. Zvuk s frekvencí nižší než 16 Hz se nazývá infrazvuk, zvuk s frekvencí vyšší než 20 kHz se nazývá ultrazvuk.

**Frekvence** – počet opakování sledovaného děje za časovou jednotku. V soustavě jednotek SI měříme frekvenci v hertzech (Hz, počet dějů za sekundu). Lze ji vypočítat jako převrácenou hodnotu periody děje. Často se používá také úhlová frekvence. Jde o časovou změnu fáze vlnění. Úhlová frekvence je  $2\pi$ -násobkem běžné frekvence.

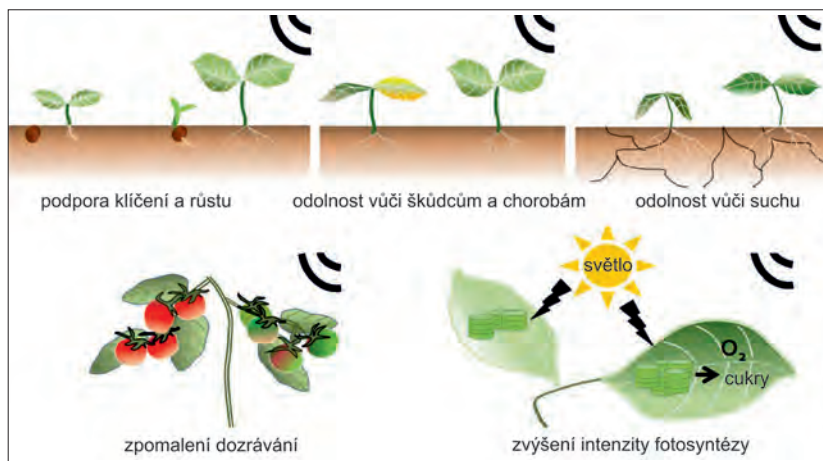
Reakce klíčků kukuřice seté na zvuk. Mladé kořeny kukuřice se viditelně zakřívují ve směru přichozího zvuku a velikost zakřivení je závislá na frekvenci zvuku, největší zakřivení nastává pro frekvence mezi 100 až 400 Hz. Zdroj: Západoaustřalská univerzita.





Zpomalené zrání rajčat vlivem zvuku o frekvenci 1 kHz v porovnání s kontrolním vzorkem. Zdroj: NAAS.

Shrnutí vlivu různých zvuků na rostliny: Zdroj: NAAS.



## Zvuk v rostlinné říši

Skupina odborníků z Austrálie, Itálie a Velké Británie ukázala, že rostliny prokazatelně vnímají zvuk a reagují na něj. Mladé klíčky kukuřice seté byly vystaveny směrovému působení zvuku s frekvencí do jednoho kilohertzu. Důsledkem byla změna směru růstu a zakřivení kořene ve směru přicházejícího zvuku. Zároveň se ukázalo, že vnímání zvuku kukuřicí silně závisí na frekvenci. Největší odklon kořenů byl pozorován pro frekvence mezi 100 až 400 Hz s maximem pro 220 Hz.

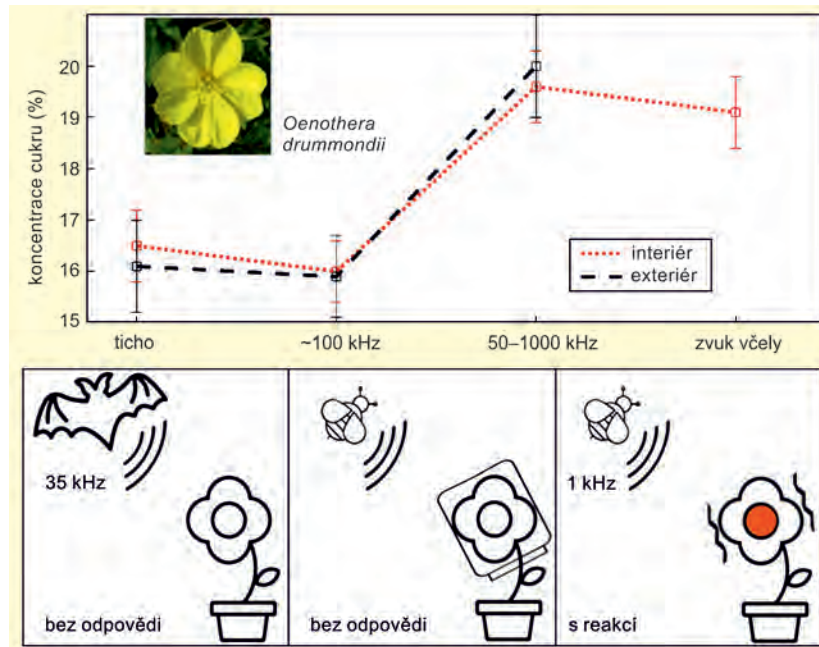
Další případ popsala skupina vědců z Telavivské univerzity v Izraeli. Při experimentech pozorovali selektivní reakci pupalky (*Oenothera drummondii*) na zvuk opylovačů. Květy pupalky byly vystaveny po dobu deseti sekund zvuku o různých frekvencích nebo zaznamenanému zvuku včely medonosné (*Apis mellifera*). Jak zvuk včely, tak zvuky s nízkou frekvencí 50 až 1000 Hz způsobily do tří minut zvýšenou tvorbu cukru v nektaru květu. Dále se zdá, že samotná květina funguje jako rezonátor a přijímač zvuku. Pokud se totiž z květu odstraní část okvětních lístků, celý efekt velmi rychle zaniká. Navíc tento případ na rozdíl od prvního uvedeného naznačuje i evoluční vysvětlení tohoto jevu. Rostlina je totiž schopna odlišit a reagovat pouze na příchod potenciálního opylovače a neplýtvat cukrem pro jiné hosty.

Působení zvuku na rostliny také pozorovali v Korejském výzkumném centru pro biologii a biotechnologie. V roce 2018 publikovali práci, v níž popisují několik různých pozorování působení zvuku na rostliny. Celá řada dalších vědeckých skupin následně zkoumala vliv zvuku na růst rostlin a jejich vývoj a kondici. Působení zvuku s frekvencemi od 250 Hz do 3000 Hz vede k celkovému zlepšení kondice rostlin a urychluje klíčení. Pravděpodobnou příčinou je aktivace vlastní imunity rostlin a produkce kyseliny salicylové a jasmínové a tok vápenatých iontů do rostlinných buněk z okolí. Pozorováno bylo zvýšení úrody a zlepšení odolnosti rostlin vůči chorobám. Působení zvuku s frekvencemi 100 Hz



až 1 000 Hz mělo za následek zvýšení produkce papriky, okurek, rajčat, hlávkového salátu, špenátu, bavlny, rýže a pšenice o více než 10 %. Zároveň se ukázal významný pokles roztočů, hmyzích škůdců, plísňových a virových onemocnění na rostlinách rajčete. Působení zvuků s frekvencí nad 800 Hz zvýšilo odolnost rostlin rýže vůči suchu. Zajímavé také je, že zvuky s frekvencí 1 kHz zpomalují v rostlinách rajčete produkci ethylenu. To má za následek zpomalení zrání jejich plodů. A konečně zvuky s frekvencemi 125 Hz až 250 Hz zvyšují expresi některých genů v rýži, čímž zvyšují intenzitu její fotosyntézy.

Z uvedených příkladů je vidět, že rostliny reagují na zvuky přicházející z okolí. Na příjem zvuku nemají specializovaný orgán a mechanismus tohoto vnímání není příliš prozkoumán. Pravděpodobně nepůjde o jediný mechanismus, ale podobně jako u živočichů jich bude několik. Otázkou zůstává také to, zda některé pozorované jevy jsou skutečně adaptací rostliny na prostředí, nebo zvuková vlna vyvolává pozorované děje pouze mimochodem. V každém případě by vegetariáni neměli květinám ubližovat a měli by raději jíst písek a kameny.



Květy pupalky reagují na zvuky opylovačů. Pro zvuk s frekvencí 50 až 1000 Hz a pro záznam zvuku včely koncentrace cukru v nektaru viditelně vzrostla z přibližně 16 % až nad 19 %. Rostlina nereaguje na zvuk netopýra, který nenabízí možnost opylení. Nereaguje ale ani na včelu, pokud je izolována a „neslyší“. Rostlina zvyšuje tvorbu cukru jen tehdy, pokud „slyší“ zvuk blízkého se opylovače. Zdroj: Telavivská univerzita.

■ Vladimír Scholtz, 10. 4. 2020, AB 15/2020

## Zelení mužíčci jsou žlutí

**Kutikula** – nebuněčný obal některých živých organismů, například hmyzu. Skládá se z povrchové jednovrstvé epikutikuly a vícevrstvé exokutikuly a endokutikuly.

**Xanthopterin** – žlutá krystalická látka vyskytující se v moči savců, na křídlech některých motýlů a v kutikule hmyzu. Ve žlutých skvmách na zadečku sršně východní tvoří náplň solárního panelu.

**Melanin** – viz str. 295.

**Enzymy** – jednoduché či složené bílkoviny, které katalyzují chemické přeměny v živých organizmech.

Sršň východní je charakteristická kávově hnědým zbarvením s výraznými žlutými skvmami na zadečku, na čele a čelním štítu. Zdroj: Wikipedie, KPFC.



Proč znázorňujeme mimozemšťany jako malé zelené mužíčky? Dnes těžko rozhodnout, zda myšlenka vznikla v myslích autorů sci-fi literatury nebo je to produkt seriózních úvah vědců zamýšlejících se nad existencí života mimo naši planetu. Důvod je však zřejmý. Na přelomu devatenáctého a dvacátého století jsme doufali v život na Marsu. Zdálo se, že je Mars pokrytý sítí kanálů. Civilizace schopná takových rozsáhlých projektů musí být nutně vyspělá. Tak vyspělá, že jistě dávno upustila od barbarského způsobu stravování. Nejen, že nevraždí jiná zvířata pro potravu, určitě již překonala i býložravý způsob výživy. Kde tedy bere energii? Kde jinde, než přímo ze světla. Martáňané musí být zelení, protože měnit světelnou energii v biologickou lze pouze fotosyntézou a světlo dokážou využívat pouze rostliny. Všechna tvrzení v předchozí větě jsou nepravdivá. Není pravda, že fotosyntéza je jediný způsob, kterým živý organizmus dokáže využívat světlo. Také není

pravda, že pouze rostliny využívají světlo jako zdroj energie. Dokáže to například sršň východní.

### Kdo je sršň východní

Sršň východní (nezaměňovat se sršní asijskou, která právě dobývá Evropu) je poměrně rozšířená, obývá například středomoří, jižní Asii, zavlečena byla i do Ameriky. Líbí se jí tam, kde je teplo a hlavně hodně světla. Se svými dvěma centimetry délky se řadí spíš k menším druhům, ale na agresivitu jí to neubírá. Charakteristická je kávově hnědým zbarvením se dvěma žlutými články na zadečku. Právě tyto výrazné články dělají sršň východní zajímavou i pro fyziky. Málokterý živý tvor se může pochlubit zabudovanou sluneční baterií, kterou dokáže využívat.

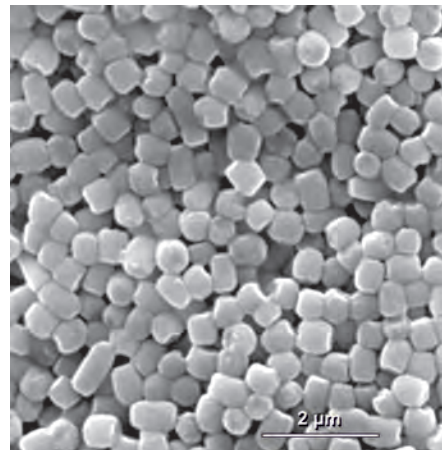
Sršeň východní byla vždy nápadná svým chováním. Zatímco jiné sršně vykazují největší aktivitu za soumraku nebo dokonce v noci, sršeň východní má největší elán v poledne za nejvyšších teplot, které ve středomoří dokážou být opravdu vysoké. Svá hnízda hloubí v zemi a materiál odnáší cca deset metrů od hnízda. Právě k této práci si vybírají část dne, kdy nejvíce praží slunce. Je zřejmé, že takový rozmar musí být přímo podporován hardwarově, protože přímé polední slunce může být pro hmyz smrtící.

Kávové zabarvení většiny povrchu těla má na svědomí melanin. Tentýž melanin, který chrání před ultrafialovým světlem i lidi. V tuto chvíli opouštíme biologii a přecházíme ke kvantové fyzice. Nejprve jen nenápadně, k záření absolutně černého tělesa, které již klasická fyzika vysvětlit nedokáže. Díky tmavé barvě melaninu se sršeň formou vyzařování snadněji zbavuje přebytečného tepla. Ovšem jen při práci ve stínu. Naopak, při výletech na přímé světlo je tmavá barva nevýhodná, a proto zde musí fungovat ještě jiný mechanismus. Ten se skrývá ve žlutých skvrnách.

## Živé sluneční baterie

Žluté skvrny na třetím článku zadečku obsahují látku xanthopterin, která je zodpovědná za přeměnu světelné energie v energii biochemickou. Při ozáření ultrafialovým světlem vzniká na kutikule elektrický potenciál. Vnější povrch se nabíjí kladně, vnitřní záporně. To má bezprostřední vliv na sršní metabolismus. Jednak se mění enzymatická aktivita, jednak se elektrická energie mění na chemickou. Jak sršeň získanou energii využívá, je předmětem dalšího výzkumu. Má se za prokázané, že část energie využívá pro mechanickou práci. Tím se vysvětluje zvýšená aktivita v poledních hodinách. Naopak za chladných rán je schopna nasbíranou energii využít k rychlejšímu prohřátí organismu.

Sršeň východní patří mezi rekordmany v přežití za vysokých teplot. Dokáže nejen přežít, ale dokonce být aktivní i při teplotě 60 °C. Sám proces přeměny světelné energie na elektrickou před žářem poněkud chrání (tato energie se nepřemění v teplo), nicméně nemůže tepelnou bilanci vysvětlit. Je tu odůvodněný předpoklad, že sršeň dokáže xanthopterin (nebo jinou složku kutikuly) přepnout do inverzního módu a využívat ho jako tepelné čerpadlo, které by ji dokázalo ochladit. Konkrétní práce na toto téma však zatím chybí a nezbývá, než v tomto ohledu zůstat u domněnek.



Granule xanthopterinu s typickou soudečkovitou strukturou zobrazené elektronovým mikroskopem. Zvětšení 30 000×. Zdroj: Naturwissenschaften.

**Elektroforetická depozice** – nanášení povrchů za pomoci elektrického pole. Koloidní částice rozpuštěné v kapalném médiu se pohybují vlivem elektrického pole a jsou nanášeny na elektrodu – buď katodu, nebo anodu. Běžně se touto metodou nanáší polymery, pigmenty, barvy, keramika a kovy. Jde o velmi rozšířenou metodu, která má mnoho nejrůznějších variant. Metodou elektroforetické depozice byla vyrobena funkční analogie solárního článku sršně východní.



**DSSC článek** – barvivem senzitivovaný článek (*Dye Sensitized Solar Cell*) neboli Grätzelův článek. Relativně levný článek, který zachytává světlo v barvivem senzitivované polovodivé anodě. Barvivo se regeneruje v elektrolytu. Článek může mít formu ohebných listů. Vynalezli ho v roce 1991 Michael Grätzel a Brian O'Regan ve Švýcarském federálním technologickém institutu v Lausanne.

Prototyp solárního článku fungujícího na bázi xanthopterinu. Zdroj: *Naturwissenschaften*.



## Postavme si model sršně

V případě samotné výroby elektrické energie však lze mít domněnky za prokázané. Solární článek sršně východní byl nejprve opatrně demontován a podle něj vyroben funkční vzorek. Nejprve bylo třeba prozkoumat kutikulu. Kutikula se skládá ze tří vrstev. Vnitřní dvě vykazují jemnou strukturu. Před mikroskopií byla kutikula zmrazena v kapalném dusíku, aby po rozlomení vynikla vnitřní struktura. Ukázalo se, že hnědá kutikula obsahující melanin je složena ze třiceti jemných vrstev a žlutá kutikula, obsahující soudečkovité granule xanthopterinu, z patnácti. Tloušťka vrstev kolísá mezi 30 až 50 nanometry u vnitřních vrstev a 1 až 2 mikrometry u vrstev vnějších.

Absorpční schopnosti hnědé i žluté kutikuly jsou srovnatelné, ale ukázalo se, že po odstranění granulí xanthopterinu je kutikula pro záření s vlnovou délkou větší než 300 nanometrů téměř průhledná. Světlo se tak ke xanthopterinu dostane prakticky bez útlumu.

Zvláštní úlohu hraje nesvrchnější vrstva kutikuly, tzv. *epikutikula*. Skládá se jen z jedné vrstvy, ale přesto vykazuje složitou strukturu, nejlépe snad popsateľnou jako mřížkování. Ve finále funguje jako antireflexní vrstva, která zaručí, aby se k fotocitlivému xanthopterinu dostalo co nejvíce záření. To může výrazně zvýšit účinnost solárního článku, protože na cylindrický povrch sršně dopadá světlo pod mnoha různými úhly. Nicméně studie se přesným měřením antireflexních schopností při ozáření pod různými úhly nezabývala.

Po fázi reverzního inženýrství již bylo jednoduché vyrobit tzv. DSSC článek (*Dye-Sensitized Solar Cell*). Metodou *elektroforetické depozice* byly nanášeny čtyři filmy  $\text{TiO}_2$  s tloušťkou 12 mikrometrů na skleněnou destičku pokrytou cínem dopovaným fluorem. Elektrody byly následně po dobu 24 hodin marinovány v lihovém roztoku xanthopterinu. Jako protelektroda byla použita skleněná deska potažená platinou. K osvětlení článku o ploše  $0,64 \text{ cm}^2$  byla použita xenonová lampa 250 W kalibrovaná na  $100 \text{ mW/cm}^2$ . Voltampérová charakteristika vykazuje pro proudové hustoty mezi  $0,8$  až  $0,9 \text{ mA/cm}^2$  plochou závislost až  $0,35 \text{ V}$ . Pak začne strmě klesat.

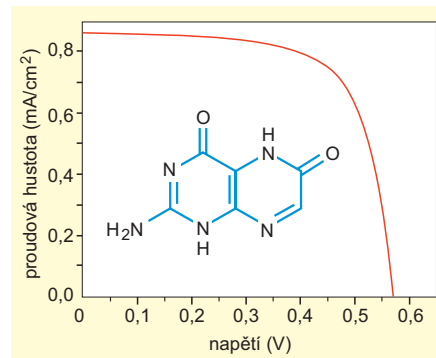
Studie skupiny vědců z Telavivské univerzity prokázala, že solární článek postavený na bázi xanthopterinu je funkční a sršeň zkoumaný efekt pravděpodobně opravdu využívá. Nicméně dosažená účinnost pouhých  $0,335 \%$  nastoluje mnoho palčivých otázek, které volají po dalších, ještě sofistikovanějších experimentech.

## High tech v hmyzí říši

Vzhledem k tomu, že xanthopterin není v živočišném světě látka nikterak vzácná (je například součástí barevných vzorů na křídlech některých motýlů), nabízí se otázka, nakolik je zkoumaný mechanismus běžný. Je možné, že je pro svou nenápadnost pouze přehlížený.

První řádky byly věnovány nezávazným úvahám o mimozemském životě. Sama sršeň východní se svým high-tech poněkud vypadá jako reprezentant mimozemského života. A je tu ještě další vlastnost sršně volající po bližším prozkoumání. Tento tvor vybavuje každou buňku plástve mikroskopickým (0,1 mm) zrnkem magnetického nerostu ilmenitu ( $\text{FeTiO}_3$ ). Soudí se, že se pak při stavbě hnízda řídí sítí magnetických siločar v hnízdě.

■ Rudolf Mentzl, 19. 6. 2020, AB 25/2020



Voltampérová charakteristika zkoumaného solárního článku. Zdroj: Naturwissenschaften.

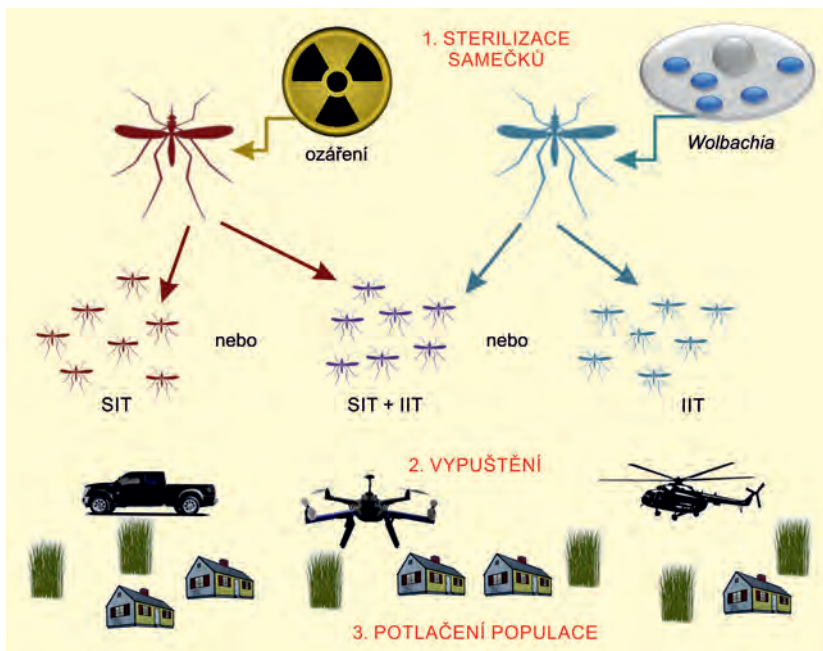


## Dron – účinná zbraň proti nemocem

**Vektor** – v medicíně označení pro přenašeče. Přenašeč je organismus, který je schopen přenést infekční onemocnění ze zdroje na cílového jedince. Sám vektor přitom obvykle infekci ohrožen nebývá. Typickými přenašeči jsou členovci (například klíště). Nezaměňujte vektor v medicíně s fyzikálním vektorem, jde o něco zcela jiného.

Základní principy potlačení populace pomocí sterilních komárů. Zdroj: Current Opinion in Insect Science.

Metoda genetické kontroly komářích vektorů malárie, horečky dengue, žluté zimnice a viru Zika je stále populárnější díky omezování jiných technik, jako je používání insekticidů. Technika sterilizace hmyzu je účinná metoda genetické kontroly řízení populace hmyzu a zajištění homogenního pokrytí, zejména na velkých plochách. Sterilní komáry je možné vypustit do cílové oblasti pomocí bezpilotního leteckého prostředku, jako je dron. Tato metoda byla testována v Brazílii a umožnila plošné rozšíření sterilních samečků komára tropického. Sterilní samečci byli poté schopni při páření s divokými samičkami konkurovat divokým samečkům. Sterilní samečci vyvolali sterilitu v nativní samičí populaci. Použití dronů k implementaci sterilní techniky povede ke zlepšení plošného pokrytí a ke snížení provozních nákladů na insekticidy a pracovníky v terénu.



### Hubení komárů

Podle Světové zdravotnické organizace (WHO) představují nemoci přenášené vektory až 17 % infekčních onemocnění, což každý rok vede k více než jednomu miliónu lidských obětí. To zahrnuje (uváděno v pořadí podle důležitosti) malárii, lymfatickou filariózu a nemoci způsobené arboviry, jako jsou horečka dengue, žlutá zimnice a horečka Zika. V mnoha zemích je velmi rozšířeno hubení přenašečů toxickými insekticidy, které negativně působí na živé organismy a ekosystém. Mnoho zemí chce tyto chemikálie zakázat. Navíc roste odpor vůči pyrethroidům, což je nejčastější používaná skupina insekticidů proti hmyzu. WHO



v reakci na rozšíření vektorů v letech 2017 až 2020 proto naléhavě požadovala alternativní metody kontroly komárů. Zejména se zaměřila na boj proti komárům tropickým, kteří jsou hlavním vektorem arbovirů.

K dispozici jsou inovativní metody kontroly komárů a některé metody genetické kontroly jsou velmi slibné. Technika sterilizace hmyzu je původní metodou genetické kontroly a byla s velkým úspěchem používána proti hmyzím škůdcům v zemědělství a škůdcům při chovu hospodářských zvířat, například jde o mušky z rodu bzučkovitých (*Cochliomyia*), octomilky, mýry a mouchy tse-tse. Nedávné metody genetické kontroly zahrnují:

- IIT (*Incompatible Insect Technique*) – vypouštění komárů či jiných vektorů infikovaných symbionty, například bakterií Wolbachia. Nakažená populace hyne už v embryonálním stádiu.
- SIT (*Sterile Insect Technique*) – vypouštění sterilních komárů či jiných vektorů (sterilizovaných například ozářením). Obě metody lze kombinovat, takto byl například huben komár tygrovaný.
- Vypouštění populace kmenů, které blokují virus.
- Úpravu genomu.
- Použití kmenů geneticky modifikovaného hmyzu.

Nejnovější vyvinutou technologií je genové řízení. Jedna z technik je založená na sterilních samečcích, v současnosti zejména u komárů rodů *Anopheles* a *Aedes*. Očekává se, že se tato metoda stane mocným nástrojem pro ovládání komárů, ale zatím není jednoduché komáry vypustit do terénu.

Pro vypuštění nákladu sterilních samečků komárů bude potřeba použít leteckou techniku, zejména pokud bude nutné pokrýt velké oblasti. Takové uvolňovací systémy byly vyvinuty pro programy SIT bojující proti ovocným muškám (octomilkám), mýrám a mouchám tse-tse. Existuje však jen málo systémů pro účinné vypouštění komárů a hmyzu obecně pomocí dronů. Proto byl vyvinut plně automatický uvolňovací systém pro vypouštění dospělých sterilních komárů samečků rodu *Aedes*, které lze vypustit pomocí malých bezpilotních letadel, obecně známých jako drony. Uvolnění sterilních komárů pomocí dronů by mohlo dvacetinásobně snížit náklady na kontrolu jimi přenášených nemocí. Drony by mohly usnadnit boj s těmito přenašeči nemocí zejména v tropických oblastech, kde je riziko přenosu nejvyšší.



Umělecké ztvárnění dronu vypouštějícího sterilní komáry jako bojovníky proti nákaze. Zdroj: ASME.

**Pyrethroid** – syntetická chemická sloučenina podobná přírodním látkám pyrethrinům produkovaným květinami (*Chrysanthemum cinerariaefolium* a *Chrysanthemum coccineum*).

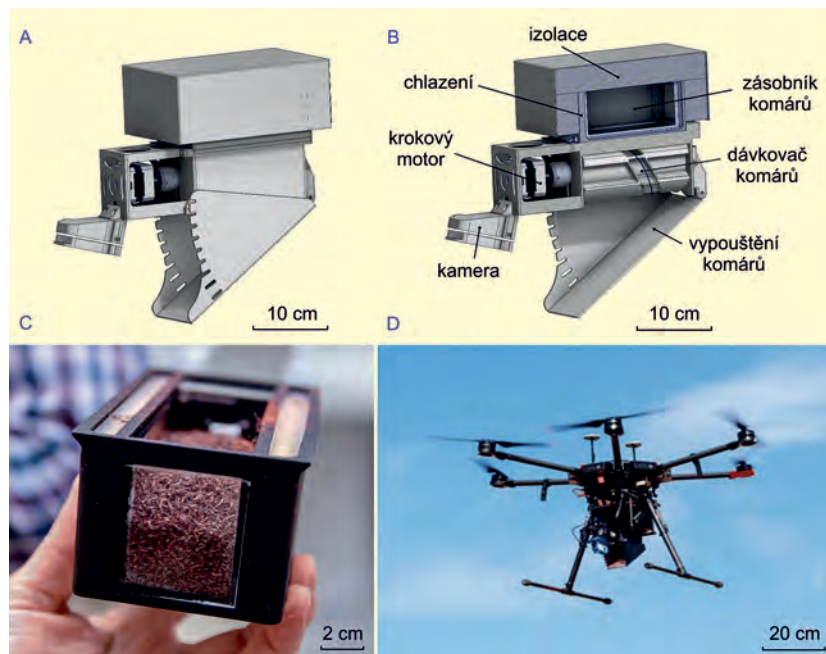
**Genom** – veškerá genetická informace uložená v DNA (u některých virů v RNA) daného organismu. Zahrnuje všechny geny a nekódující sekvence.

**Cochliomyia** – rod z čeledi bzučkovitých. Jde o mušky z řádu dvoukřídlých. Larva *Cochliomyia* je obecně nazývána jako „šroubovicový červ nového světa“. Liší se od larvy *Chrysomya*, obecně známé jako „šroubovicový červ starého světa“.

**Ovitrap** – past, která se skládá z tmavé nádoby obsahující vodu a substrát, kde komáři mohou snášet vejce. Vejce poté padají okénkem do vody, kde se líhnou larvy a vyvinou se z nich kukly. Když se objeví dospělí komáři, jsou uvězněni pod okénkem a nemohou z ovitrapu uniknout.

**Arboviry** – viry z různých skupin, které jsou na člověka přenášeny drobnými členovci. Nejvýznamnější skupinou virů, které patří mezi arboviry, jsou flaviviry. Arboviry vyvolávají u člověka infekční onemocnění řazené mezi antropozoonózy, nejtypičtějším příkladem je klišťová encefalitida.

Systém vypouštění dospělých komárů provozovaný na dronu (UAV). (A) Pohled na uvolňovací mechanismus zepředu. (B) Řez uvolňovacím mechanismem. (C) Zásobník naplněný 50 000 označenými komáři. (D) Plně sestavený systém pro vypouštění komárů připojený k dronu DJI M600 AUV. Zdroj: FAO, IAEA.



## Vypouštění sterilních komárů

Komáři mají dlouhé křehké nohy a jemná křídla, což činí značné požadavky na návrh systému pro jejich vypouštění. Takový systém se podařilo navrhnout skupině odborníků z Brazílie, Švýcarska, Rakouska, Španělska a dalších zemí v rámci programu na využívání jaderných technologií v potravinářství a zemědělství, který je společným programem organizace FAO (*Food and Agriculture Organization*) při OSN a Mezinárodní agentury pro atomovou energii IAEA. Systém nesmí způsobit komárům žádná zranění, a proto je návrh celkem komplikovaný. Z entomologického hlediska bylo hlavní výzvou řešit stěsnání komárů v malém prostoru, jejich chlazení a vývoj dopravníku, který umožní naskládat přiměřený počet komárů pro let. Bylo potřeba zajistit jejich úplnou imobilizaci a řídit rychlost uvolňování, aniž by došlo k jejich zranění. Ze strojírenského hlediska zahrnuje výsadebná plošina uvolňovací mechanismus, který se skládá z izolované úložné jednotky (mechanismus, který vypuzuje komáry na rampu vypouštěcí oblasti), palubní elektroniky (obsahuje senzory a kamery pro řízení

a sledování stavu mechanismu) a samotných komárů. Na zakázku byla vyvinuta softwarová aplikace pro autonomní provoz letů a dávkování komárů, která zefektivňuje plánování a vypouštění komárů. Zatím aplikace funguje jen na operačním systému Android.

## Simulace v laboratoři

Před terénní zkouškou byly rok prováděny laboratorní pokusy, jejichž cílem bylo vyvinout a vylepšit tento systém vypouštění komárů a posoudit jeho možný dopad na vypouštění sterilní samečky. Nejprve se zkoumal vliv různých úprav (stěsnání komárů, chlazení a uvolňování) na kvalitu vypuštěných komárů pomocí standardizovaného testu letové schopnosti,

který určuje podíl dospělých komárů unikajících z 25 cm vysoké svislé trubice. Ukázalo se, že samečci komára tropického jsou velmi citliví na stíněnost, a proto byla vyvinuta vypouštěcí kazeta s maximální hloubkou 5 cm, která neobsahovala více než 50 000 samečků komára tropického. Navíc se při teplotách 8 °C komáři chovali podobně jako inertní částice a jejich aktivita byla snížena, zatímco při 11 °C byla obnovena jejich pohyblivost. Proto byl vyvinut izolovaný kontejner, který mohl udržet teplotu nákladu mezi 8 °C až 10 °C během letu. Komáři vystavení těmto teplotám se znovu aktivovali po 40 až 60 s – poté, co se zahráli na okolní teplotu.

Vzhledem k tomu, že samečci komára tropického mají odhadovanou průměrnou rychlost volného pádu 2,5 m/s, byla vybrána výška pro vypouštění 50 a 100 m. Nakonec byly porovnány dva dopravníkové systémy – systém běžně používaný k vypouštění ovocných mušek (ocetomilek) a válečkový systém původně vyvinutý pro mouchy tse-tse. Systém válečků pro mouchy tse-tse, který byl menší a lehčí než systém pro dopravu ovocných mušek, vypouštěl komáry lepší kvality (s vyšší rychlostí letu). Simulace síly větru, která působí na komáry při vypouštění z dronu, se prováděla v aerodynamickém tunelu a potvrdila, že rychlost větru 7 až 9 m/s (25 až 68 km/h) nesníží kvalitu samečků vypuštěných tímto systémem. Nakonec byla provedena laboratorní studie k posouzení dopadu procesu simulovaného vypouštění na konkurenceschopnost sterilních komářích samečků. Konkurenceschopnost ozářených sterilních samečků, kteří byli vystavení konečnému návrhu systému vypouštění, byla hodnocena v laboratorních klecích (60×60×60 cm) a ukázalo se, že je podobná jako u neošetřených komárů.

## Experiment Moscamed

Na základě pozitivních výsledků z laboratorních experimentů bylo vypouštění komárů z dronu otestováno v březnu 2018 v terénních podmínkách v místě Carnaíba do Sertão, Juazeiro, Brazílie. Program dostal název Moscamed. Současně byly provedeny dvě série pokusů s různě barevně označenými sterilními samečky:

- Stacionární vypouštění** – vypouštění sterilních komárů z dronu vznášejícím se v pevném bodě nad ošetřovanou oblastí.
- Liniové vypouštění** – vypouštění sterilních komárů z dronu létajícího nad celou ošetřovanou oblastí.

**Wolbachia** – gramnegativní bakterie, prototyp organismu žijícího v symbiotickém vztahu. Wolbachia je nitrobuněčný parazit bezobratlých živočichů. Může přenášet závažná onemocnění, jako jsou skvrnivka, Q horečka nebo horečka Skalístých hor.

**SIT** – Sterile Insect Technique, vypouštění sterilních komárů či jiných přenašečů (sterilizovaných například ozářením) do volné přírody. Jde o šetrnou alternativu k hubení hmyzu insekticidy.

Záběry z laboratoře na přípravu komárů v experimentu Moscamed. Zdroj: FAO, IAEA, Moscamed.

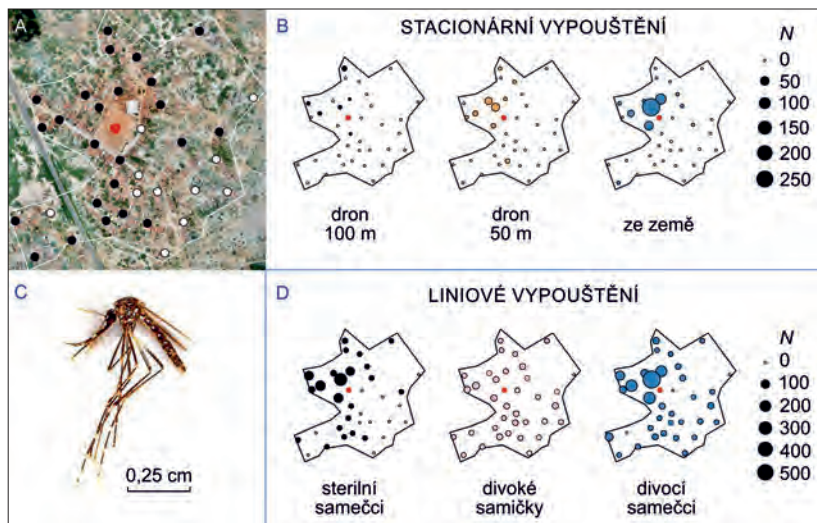






Vědec vysvětluje domorodým obyvatelům smysl vypouštění komárů a význam projektu. Zdroj: FAO.

(A) Mapa monitorovacího systému používající pasti BG. Černé body představují pasti s úlovky sterilního komára tropického během stacionárního uvolňování. Červený bod je místo vypouštění komárů. (B) Pasti chytající sterilní samečky. Číslo u bodů znamená celkový počet úlovků jedné pasti. (C) Fotografie sterilního samečka komára tropického. (D) Pasti chytající sterilní samečky během liniového uvolňování. Číslo u bodů znamená celkový počet úlovků jedné pasti. Zdroj: Science Robotics.



V první části se testoval dron vznášející se nad zemí na pevném místě, které bylo stejné jako u pozemních úniků. Celkem 50 400 sterilních ozařených samečků bylo vypuštěno z dronu při stacionárním letu ve výškách 50 a 100 m (dvě opakování). Komáři byli znovu chytáni pomocí 35 profesionálních nástrah na komáry značky Biogents (BG-Sentinel, Biogents, Německo) na zkušební ploše 20 ha (0,2 km<sup>2</sup>). Více komárů bylo pochyceno při vypuštění na zemi než při vypuštění pomocí dronu. Počet chycených komárů byl významně vyšší při experimentu ve výšce 50 m než ve výšce 100 m. Přezítí těchto tří skupin bylo podobné, ale jejich rozptýl se zvyšoval s výškou uvolnění.

## Experiment Moscamed II

Ve druhé části experimentu bylo vypuštěno celkem 165 400 sterilních samečků podél uvolňovacích linií od sebe vzdálených 80 metrů, na ploše 20 hektarů, monitorovaných 37 pastmi. Sledována byla plodnost vajíček, která byla porovnávána s neošetřenou kontrolní oblastí. Při tomto experimentu byla rychlost letu dronu 10 metrů za sekundu a rychlost válečků dvě otáčky za minutu, což umožnilo vypouštění přibližně 5 000 sterilních samečků na hektar. Na pokrytí dvaceti hektarů bylo potřeba asi 12 minut. Během letu teplota překročila 10 °C, ale zůstala pod 18 °C, což nezpůsobilo snížení kvality komárů, protože

doba letu byla kratší než 13 minut. Označení komáři byli zachyceni ve 24 z 35 monitorovacích pastí.

Data ukazují, že se sterilní samečci agregovali na stejných místech jako divocí komáři, což je předpoklad úspěchu v programu SIT. V uvolňovací oblasti byl získán maximální poměr 0,8 sterilního samečka ku 1 divokému samečkovi. Po uvolnění sterilních samečků se podíl vajíček shromážděných v oblasti zvýšil o více než 50 % ve srovnání se sousední kontrolní oblastí, kde žili divocí komáři. Vypuštění samečci byli tedy schopni konkurovat divokým samečkům, pářit

se s divokými samičkami a přenášet své sterilní spermie vyvolávající sterilitu v nativních samičkách. Experimenty s vypouštěním sterilních komárů z dronů už byly v této oblasti konány i dříve. Proto experiment Moscamed domorodé obyvatele nijak nepřekvapil a byl přijat kladně.

## Správná cesta...

Data z experimentu Moscamed ukázala, že vypuštění sterilních samečků komára tropického z plošiny dronu umožňuje rovnoměrné rozptýlení sterilních samečků v terénu a dosažení homogenního poměru sterilních a divokých samečků. Indukovaná sterilita pozorovaná v tomto experimentu byla neočekávaně vysoká s ohledem na počet vypuštěných samečků (přibližně 5 000 samečků na hektar za týden) a na celkový poměr sterilních samečků k divokým ( $<1$ ), což ukazuje na vysokou konkurenceschopnost sterilních samečků.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) a Mezinárodní zdravotnická organizace (WHO) nedávno zveřejnily pokyny pro metodu SIT jako nástroje pro genetickou kontrolu komárů spojenou se snížením výskytu nemocí přenášených komáry rodu *Aedes*. Aktuálně je realizováno 34 pilotních projektů SIT (vypouštění sterilních samečků komárů), které bojují proti komárům rodu *Aedes* na celém světě. Šance na úspěch je veliká.

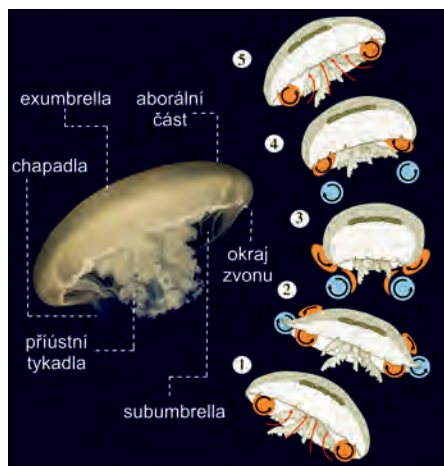
*„V přírodě je přežití a úspěch otázkou těch nejschopnějších a nejpřitažlivějších.“* Charles Darwin.

■ Petr Panchártek, 24. 7. 2020, AB 30/2020



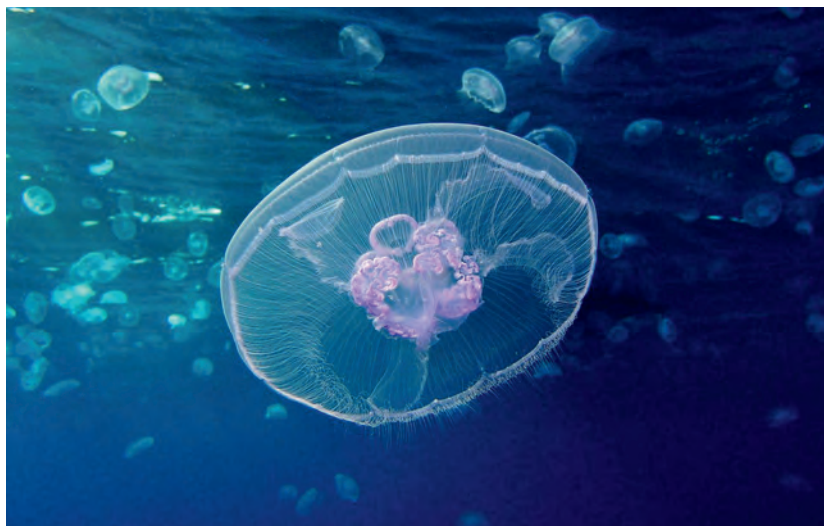
Vkládání kazety s komáry, let dronu a vypouštění komárů. Zdroj: FAO, IAEA, Moscamed.

## Elegantní pohyb medúz



Anatomie medúzy a vytvářené víry. Ve fázi 2 je na okraji zvonu vidět vír a zrcadlový antivír. Zdroj: USF, PNAS.

Medúza ušatá. Zdroj: A. Vasenin, Wikipedia.



Všimli jste si, že když při potápění plavete blízko u dna nebo u jiné pevné plochy, tak se pohybujete rychleji než na otevřené vodě? Příčinou je to, že proud vody, který svými pohyby vytváříte, se o tuto pevnou plochu odráží, nemůže odtékat, a tím odnášet hybnost a energii do prostoru. Tento jev je znám také při startu letadel, kdy se během startu mezi letadlem a zemí stlačuje vzduch. To zvyšuje vztlak, který pomáhá letadlu odlepit se od země. Pokud plovoucí těleso za sebou vytváří vír, který se odráží ode dna, lze toto dno nahradit i pomyslným virtuálním zrcadlovým vírem, který také brání odtoku hybnosti z původního víru a umožňuje mu se o tento virtuální vír „opřít“. Některá zvířata, která běžně neplavou u dna, se naučila vytvářet si skutečný zrcadlový vír, pomocí kterého se mohou efektivněji pohybovat. Profesor Brad Gemmell s dalšími kolegy z Jihofloridské univerzity podrobně tento mechanismus v roce 2021 zkoumal u medúzy ušaté (*Aurelia aurita*), která je považována za nejefektivnějšího živočišného plavce.

### Brzdný vír

Medúzy plavou ve světových oceánech již více než 500 milionů let a za tu dobu své ladné pohyby dovedly k dokonalosti. Jejich svalovou tkáň tvoří pouze jedna vrstva buněk, které jsou i při velmi nízkém příkonu schopny generovat dostatečně silný tah. Kinematika pohybu medúz je velmi zajímavá, pohybují se stlačováním svého těla do tvaru zvonu, čímž vypuzují tekutinu jedním směrem a svá těla posouvají opačným směrem. Obvyčejná ryba, která se přestane vlnit, se dále pohybuje alespoň setrvačností, zato medúzy se po každém stažení téměř zastaví. Při prvním přezkoumání vypadá pohyb medúz jako neefektivní, když pracně získanou hybnost periodicky ztrácejí. Opak je ale pravdou.

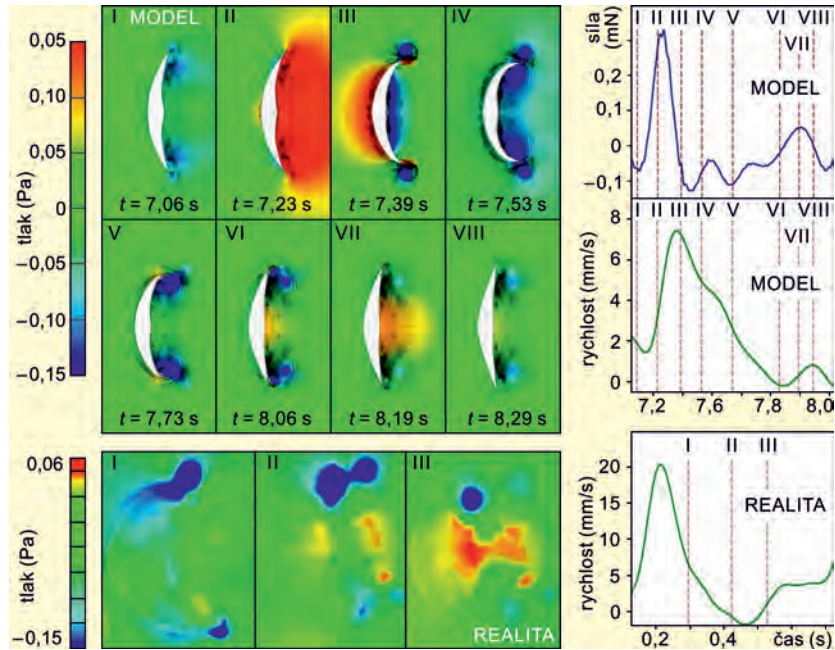


Už v minulosti se ale při práci s medúzami zjistilo, že i když je pohyb těla medúz stejný, je posun medúzy, která se již pohybovala dopředu rychlejší než té, která byla dosud pouze v klidu. Ukazuje se, že tvorba vodních vírů při stahování těla a vypuzování vody hraje důležitou roli při jejich pohonu. Medúzy mohou pasivně zachytávat energii z víru, který vznikl při zabrzdění těla medúzy v předchozím stahu (jde o tzv. *brzdný vír*), což jim na jedno stažení umožňuje ujet až o třetinu větší vzdálenost. Dosahují toho přemístěním zmíněného brzdného víru okrajem svého zvonu jakoby „pod sebe“. Jeho pohyb poté tlačí na vnitřní část medúzy.

## Pohyb medúzy

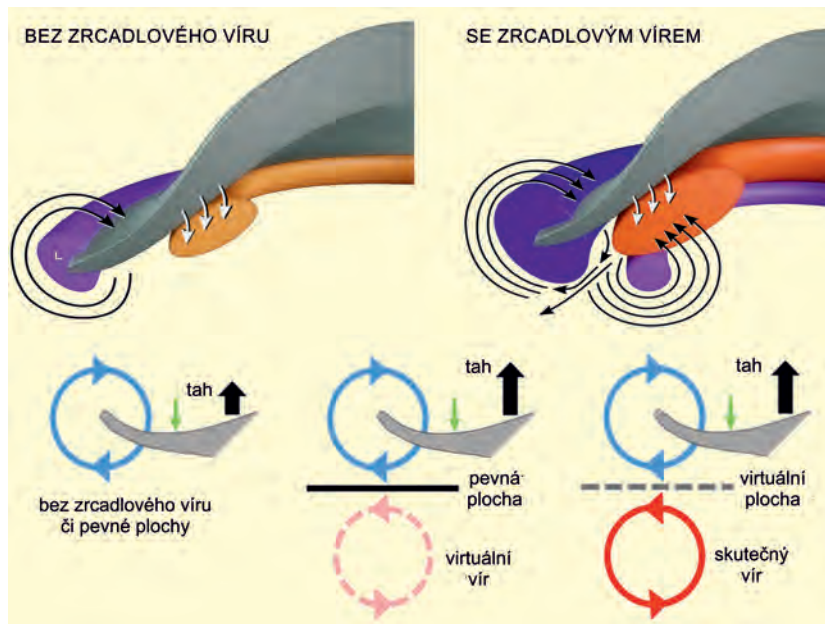
Nový výzkum ukázal ještě další výhody tohoto pohybu. Vědci z Jihofloridské univerzity sledovali pohyb medúz vysokorychlostní kamerou a laserovou částicovou anemometrií (laserové světlo se rozptyluje na drobných částicích v tekutině, z čehož lze zjistit její proudění), ze které numericky dopočítávali tlakové pole. Pomocí této techniky ukázali, že brzdý vír, který se vytvořil pod zvířetem během předchozího stahu, působí stejně jako virtuální zrcadlový vír nebo jako pevná plocha. Tento vír žene tekutinu na spodní stranu zvonu medúzy, čímž se při následné kontrakci výrazně zvýší tlaková síla ženoucí medúzu dopředu. Medúza se tedy své získané hybnosti nezbaví bezúčelně, ale dočasně si ji uloží do brzdého víru, od kterého se při dalším pohybu efektivně odráží.

Ukazuje se ale, že celková výhodnost z hlediska ujeté vzdálenosti závisí především na správném načasování dalšího stahu medúzy. Medúzy začínají další cyklus jen chvíli předtím, než se brzdý vír zastaví. Maximální potenciál tohoto víru tedy není zcela využit. Proč je tomu tak a proč medúzy nevyužijí celou energii vírů, zůstává zatím nejasné.



Hydrodynamický model plovoucí medúzy: v různých fázích pohybu (I až VIII) je zobrazen tlak v okolí medúzy – přetlak je červený, podtlak je modrý. Vlevo nahoře je hydrodynamický model, vlevo dole skutečnost. Na grafech napravo je síla působící na medúzu a její rychlost. Zdroj: Brad Gemmell, USF, PNAS.

**Medúza** – životní stádium žahavců následující po stádiu polypa. Typický je poloprůhledný vzhled připomínající rosol či želatinu. Medúzy mají nejružnější tvary, nejčastější je tvar zvonu. Horní část těla se nazývá exumbrella a spodní část subumbrella („umbrella“ znamená v angličtině deštník). Na okraji disku jsou smyslové orgány a chapadla. Ústa jsou ve spodní části. Medúzy žijí především v oceánech, ale existují i sladkovodní medúzy.



Situace na okraji zvonu bez vzniku zrcadlového víru a při jeho vzniku. Zdroj: USF, PNAS.

Během několika miliard let trvající evoluce už život objevil mnoho efektivních řešení a nám stačí pořádně přihlížet a inspirovat se. V tomto případě stojí za pozornost také skutečnost, že při pohybu medúz nevznikají, na rozdíl od lodních šroubů a jiných vrtulí, kavitační bubliny a jejich pohyb je velmi tichý. Možná by na podobném principu mohly v budoucnu fungovat tiché vysavače nebo klimatizace.

■ Vladimír Scholtz, 26. 3. 2021,  
AB 11/2021

# Je to pták? Letadlo? Ne, je to LEO!

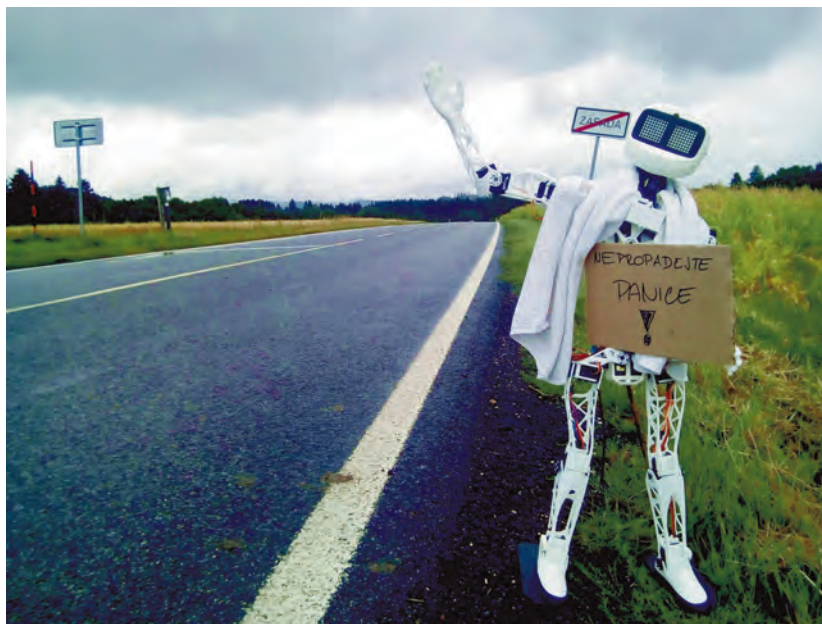
Myšlenka robota, který dokáže chodit po provaze, jezdit na skateboardu a létat, by mohla znít jako koncept sci-fi. Takový robot ale opravdu existuje, jmenuje se LEONARDO (*LEgs ONboARD drOne*). Jde o dvounohého robota, který je, podobně jako drony, vybaven stabilizačními vrtulemi. LEO byl postaven z částí robotů a dronů, které sestavili inženýři v laboratoři Kalifornského technologického institutu v Pasadeně. Kromě zlepšení stability při chůzi po laně umožňují vrtule asi 80 cm vysokému robotovi vznést se do vzduchu a létat. Tým říká, že LEO by jednoho dne mohl uplatnit své schopnosti země/vzduch u robotických misí, které jsou v současné době obtížné pro pozemní nebo vzdušné roboty či drony. Kromě balancování a skateboardingu by mohl být robot použit k provádění úkolů, které jsou v současné době pro drony, roboty nebo lidi velmi obtížné, včetně provozu v nebezpečných a těžko dostupných prostředích.

## Pozemní roboti

Během několika posledních desetiletí bylo studováno a vyvinuto mnoho pozemních robotů v různých podobách. Jejich hlavní pohyb je založen na chůzi, valení nebo plazení. Dvounoží roboti přitahují největší pozornost díky svému tvaru těla podobnému lidskému a všestrannému pohybu. Bezpečné mobilitě pozemních robotů brání nepříznivé pozemní podmínky a také existence různých velkých překážek. To omezuje jejich praktické aplikace na různě strukturovaná prostředí, jako tomu je u vnitřních servisních robotů nebo robotických vysavačů. Spadají sem i úzce specializovaní průmysloví roboti.

**Slackline** – chození a skákání na popruhu upevněném mezi dvěma body, například stromy. Název je z anglických slov „slack“ (balancování) a „line“ (linie). Na rozdíl od chození po provazu není popruh napravo, ale je více, nebo méně pružný. Počátky této nové zábavy/sportu lze vystopovat do Yosemitekého národního parku, kde si lezci krátili volnou chvíli chozením po řetězech u místních parkovišť.

Příkladem pozemního robota je humanoidní stopařka Matylda, která stopovala z Jablonce nad Nisou přes Pardubice a Plzeň až do Pelhřimova. Zdroj: Aktualne.cz





**Lokomoce** – přemísťování objektů, živočichů či člověka z místa na místo. Pohyb probíhá buď prouděním protoplazmy (například u měňavky), nebo stahy svalů u větších živočichů. Podle prostředí, v němž se pohyb provádí, se rozlišuje například chůze (běh), plavání nebo let. Lokomoce robotů vychází často ze vzorů z živočišné říše.

## Vzdušní roboti

Výše uvedené potíže u pozemních robotů lze překonat pomocí vzdušných robotů, kteří létají přes překážky jakékoli velikosti nebo v terénu za jakýchkoli podmínek. Takoví roboti byli další hlavní oblastí výzkumu v robotické komunitě. Letadla s pevným křídlem či vrtulemi a jejich hybridní typy byly rozsáhle studovány a jsou navrženy pro aplikace v reálném světě. Mezi ně patří dálkový průzkum Země, doručování zásilek, vyhledávání, záchrana, sledování a monitorování.

Tito roboti mají své nevýhody, včetně velké spotřeby energie, krátké doby letu a provozu. Mají omezené palubní zdroje a malou hmotnost užitečného zatížení. Kromě toho mají vzdušní roboti větší potíže než pozemní roboti při fyzické interakci se svým prostředím nebo s jinými roboty, protože ve vzduchu potřebují být stabilní. Vzdušní roboti byli navrženi především pro aplikace, které nezahrnují fyzické interakce nebo jen minimálně, jako jsou vizuální kontroly. V poslední době se ale stala oblíbeným tématem výzkumu i letecká manipulace. S pomocí hybridního pohybu, který je někde mezi chůzí a létáním, by se mohlo vytěžit to nejlepší z obou světů, pokud jde o lokomoci (přemísťování).

## LEO na scéně

LEONARDO je asi 80 cm vysoký robot s hmotností 2,5 kg. Je vybaven dvěma nohama, které mají tři ovládané klouby spolu se čtyřmi vrtulemi šikmo namontovanými na ramenou robota. Byl inspirován mnoha

druhy ptáků a hmyzu, kteří jsou schopni plynule měnit styl pohybu mezi chůzí, létáním nebo dokonce plazením se po zemi. Pohybuje se rychlostí asi 20 cm za sekundu, ale tu lze zvýšit přerušovaným létáním. Pomocí přerušovaného létání v blízkosti země může letět rychlostí 3 až 5 m/s. Inspirace byla čerpána z přírody. Přemýšlelo se o tom, jak jsou ptáci schopni mávat a skákat při chůzi po telefonním vedení. Když ptáci přecházejí mezi chůzí a létáním, dochází ke složitěmu, ale zajímavému chování. Exis-

Příkladem vzdušného robota je dron Mavic. Nabízí neuvěřitelné možnosti zoomování. Zdroj: FlyRobotics.



tuje podobnost mezi tím, jak člověk v nasazeném obleku s tryskami ovládá své nohy a chodidla při přistání nebo vzletu, a jak LEO synchronizovaně ovládá rozmístěné vrtule a klouby nohou.

Studovalo se rozhraní chůze a létání z hlediska dynamiky a řízení. Nejvhodnějšími aplikacemi pro LEA jsou ty, které zahrnují fyzické interakce se strukturami ve velké výšce. Činnosti, jako je inspekce vysokonapětového vedení nebo oprava částí vesmírné stanice, jsou obvykle pro lidské pracovníky nebezpečné a vyžadují několik typů pozemních a vzdušných robotů, ale LEO by mohl tento úkol provést sám.

### Chůze po provaze není problémem

Dvounozí roboti se vypořádávají s různými terény skutečného světa pomocí stejného pohybu jako lidé, včetně skákání, běhání a lezení. Často je však brzdí zvláště nerovný terén, pro který se lépe využívají vzdušní roboti, kteří se překážkám úplně vyhnou. Navzdory svým výhodám mají vzdušní roboti své vlastní problémy, včetně obzvláště vysoké spotřeby energie a omezení na hmotnost nákladu.

Roboti se schopností multimodální (hybridní) lokomoce se dokážou pohybovat náročnými prostředím efektivněji než tradiční roboti, a to vhodným přepínáním mezi dostupnými prostředky pohybu. Zejména LEO se snaží překlenout propast mezi dvěma nespojitými doménami vzdušné a dvounohé lokomoce, které nejsou typicky propojeny ve stávajících robotických systémech.

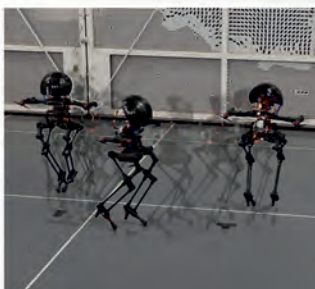
Protože jsou vrtule ovládány synchronně s klouby nohou, má LEO neskutečnou rovnováhu. Na základě typů překážek, které potřebuje překonat, si LEO může vybrat, zda použije chůzi, nebo létání, nebo je podle potřeby zkombinuje. Kromě toho je LEO schopen provádět neobvyklé lokomoční manévry, které i u lidí vyžadují zvládnutí rovnováhy, jako je balancování na laně a skateboarding. LEO je vybaven dvěma nohama, které mají tři ovládané klouby, spolu se čtyřmi vrtulmi namontovanými na ramenou robota.

Jak se člověk pohybuje, upravuje polohu a orientaci svých nohou tak, aby se jeho těžiště pohybovalo dopředu, zatímco je zachována rovnováha těla. LEO chodí tímto způsobem také, protože vrtule zajišťují, že robot je při chůzi vzprímený. Synchronizované ovládání vrtulí a nohou mění polohu tak, aby posunuly těžiště robota dopředu při chůzi a létání. Robot pro létání používá vrtule a zcela během letu ignoruje nohy a chová se jako dron.



LEO je profesionální slackliner, je to kříženec mezi dronem a robotem, který dokáže pomocí nohou překročit tenký drát, než ladně doletí zpět na zem. Zdroj: WWC.

**Caltech** – California Institute of Technology, Kalifornský technologický institut, prestižní americká univerzita, která vznikla v roce 1921. Založil ji chemik Arthur A. Noyes spolu s významným fyzikem Robertem A. Millikanem. Předchůdcem byla Throopova univerzita z roku 1891. Univerzita sídlí v kalifornské Pasadeně. Univerzita zajišťuje provoz Laboratoře tryskových motorů JPL (Jet Propulsion Laboratory) americké NASA, analyzuje data ze Spizerova vesmírného dalekohledu a spravuje hantfordskou část detektoru gravitačních vln LIGO.



LEO byl inspirován mnoha druhy ptáků a hmyzu, kteří jsou schopni plynule měnit styl pohybu mezi chůzí, létáním, nebo dokonce plazením se po zemi. Zdroj: WWC.

→ Roboti se schopností multimodální lokomoce se dokážou pohybovat náročnými prostředím efektivněji než tradiční roboti, protože vhodně přepínají mezi dostupnými prostředky pohybu. Zdroj: SciRobotics.

## Co dál?

Vědci, kteří vyvinuli LEA, plánují vyztřížit nohy a zvýšit sílu vrtulí. Tím se výkon LEA zlepší, bude schopen unést vlastní tělo i náklad. Důležité je, jak velkou část hmotnosti nesou nohy a jak měnit polohu vrtulí při chůzi po nerovném terénu. Dále se plánuje vybavit LEA algoritmem pro řízení přistávání dronů, který využívá neuronové sítě. S lepším pochopením prostředí by LEO mohl sám rozhodnout o nejlepší kombinaci chůze a letu nebo hybridního pohybu, které by měl používat k přesunu z jednoho místa na druhé dle toho, co je nejbezpečnější a co spotřebuje nejméně energie.

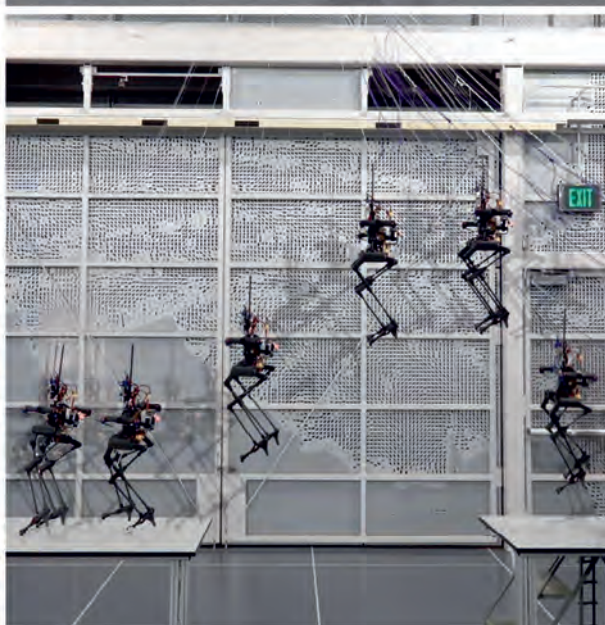
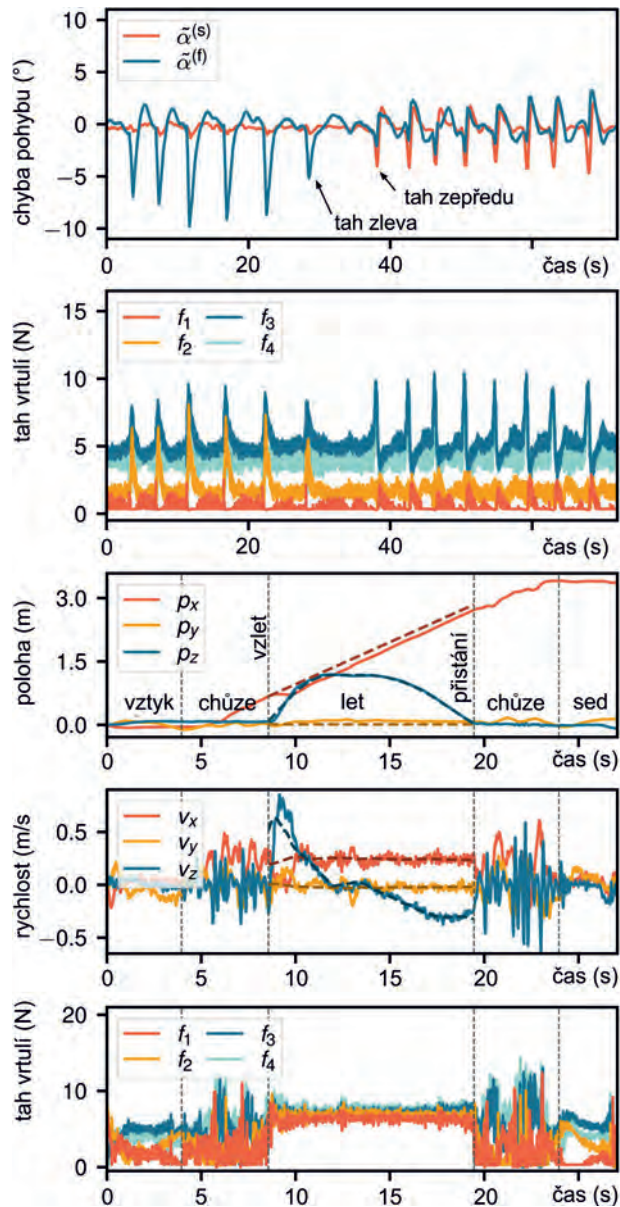
Tělo LEA obsahuje baterie, senzory a výpočetní výkon potřebný pro plně autonomní provoz, jen potřebuje větší schopnost samostatného rozhodování. LEO momentálně používá vrtule k udržení rovnováhy při chůzi, proto spotře-

bovává zbytečně moc energie, a to je poměrně neefektivní.

Skupina z Caltechu plánuje vylepšit konstrukci nohou, aby LEO při chůzi a balancování využíval vrtule minimálně. V reálném světě by technologie navržená pro LEA mohla podpořit vývoj adaptivních podvozkových systémů složených z nohou a řízených kloubů pro letecké roboty a další typy létajících vozidel. Budoucí letadla s překlopnými rotory by na Marsu mohla být vybavena podvozkem s nohama a klouby, aby bylo možné udržet rovnováhu těla těchto vzdušných robotů při přistávání na svažitém nebo nerovném terénu. To by snížilo riziko selhání za náročných podmínek přistání.

■ Petr Panchártek, 28. 1. 2022, AB 5/2022









# Astronomie a fyzika – hledání

Petr Kulháněk a kolektiv autorů

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2022, 1. vydání.

Žádná část této publikace nesmí být publikována a šířena žádným způsobem  
a v žádné podobě bez výslovného svolení sdružení AGA.

Odborná redakce: prof. RNDr. Petr Kulháněk, CSc.  
Doprovodná grafika a obálka: Ing. arch. Ivan Havlíček  
Sazba: Ing. Radek Beňo, Ph.D.  
Design: Mgr. Jakub Rozehnal, Ph.D.  
Formát: 20×21 cm, 384 stran  
Kontakt: [aldebaran@aldebaran.cz](mailto:aldebaran@aldebaran.cz), [www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)

Tisk: TISK CENTRUM s. r. o.

**ISBN 978-80-906638-7-9**



