ASTRONOMIE A FYZIKA

SOUVISLOSTI

Petr Kulhánek
a kolektiv autorů

ALDEB
ARAN

ASTRONOMIE A FYZIKA

SOUVISLOSTI

Astronomie a fyzika – souvislosti

Připravil kolektiv autorů pod vedením prof. RNDr. Petra Kulhánka, CSc.:
Ing. Radek Beňo, Ph.D. (4) – Mgr. Petr Brož, Ph.D. (1) – RNDr. David Břeň, Ph.D. (2) – Ing. arch. Ivan Havlíček (13) – Ing. Miroslav Havránek, MSc., Dr. rer. nat. (3) – Jiří Hofman, MSc. (2) – Ing. Miroslav Horký, Ph.D. (2) – Ing. Jan Jílek (1) – Ing. Jakub Jirsa (2) – prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (21) – Lucie Kulhánková, MSc. (1) – MUDr. Ing. Vítězslav Kříha, Ph.D. (1) – Ing. Rudolf Mentzl (2) – Ing. Petr Panchártek (2) – RNDr. Vladimír Přibyl, CSc. (1) – Mgr. Jakub Rozehnal (4) – doc. Ing. Vladimír Scholtz, Ph.D. (3) – Jaroslav Trnka (1).

Obálka: Mlhovina Bublina (NGC 7635). Hubblův dalekohled. © NASA/ESA/STScI/AURA.
Citát na úvodní straně kapitoly „Fyzika“: Goethův FAUST, přeložil Jaroslav Vrchlický, vydala v Praze Knihtiskárna F. Šimáček nakladatelé, 1890.

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2018, 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 Kulhánek, CSc.
Design: Mgr. Jakub Rozehnal
Doprovodná grafika a obálka: Ing. arch. Ivan Havlíček
Sazba: Ing. Martin Batelka
Formát: 20×21 cm, 352 stran
Kontakt: aldebaran@aldebaran.cz, www.aldebaran.cz
Tisk: EUROPRINT a.s.

ISBN 978-80-906638-0-0

Obsah

I. BLÍZKÝ VESMÍR 9

Budiž ti Merkur lehký! 10
Vulkány na Venuši 14
O původu vody na Zemi 18
Záhada Oceánu bouří 22
Magnetit a zemské pole 24
Sypané kužele na Marsu 27
Dvoudynamový Jupiter 32
Ohlédnutí za misí Cassini 36
Pluto – ledová krása 39
Devátá planeta opět na scéně 45
Bonus: Rande s kometou 49

II. VZDÁLENÝ VESMÍR 63

Zprávy ze středu Galaxie 64
Pulzary v jádru Galaxie 72
Jak rostou galaxie? 76
Nestydnoucí Panna 80
Parádní trefa 83
Je galaxie v Andromedě dvojčetem Mléčné dráhy? 86
Turbulence v galaktických kupách 90
Gioiello – klenot ve Velrybě 93
Laniakea 96
Kosmická rychlostní síť 100
Bonus: Na gravitačních vlnách 106

III. KOSMOLOGIE 123

Milníky kosmologie 124
Kde se vzaly černé veledíry v raném vesmíru? 131
Dark Energy Survey 134
Reliktní neutrina....138
Reliktní gravitační vlny, eLISA a LISA Pathfinder 144
Baryogeneze aneb vítězství hmoty nad antihmotou 152
Existoval velký třesk? 161
Fenomenální observatoř Planck....166
Bonus: Napříč Amerikou 172

IV. NOVÁ TECHNIKA 187

Oko nebes přebírá žezlo od Areciba 188
XFEL – první světlo 194
Jak pokračuje stavba gigantu E-ELT? 198
Kilometrové pole SKA – největší vědecký projekt 204
Observatoř CTA – nová éra pozemské gama astronomie.... 209
Juno poodhaluje pravou tvář Jupiteru 213
Stirling přece poletí....224
Stephen Hawking: Breakthrough Starshot 229
Bonus: Eurolabs....232

V. FYZIKA 243

Akustický výzkum blesků a hromů....244
Zvířata a fyzika....247
Je Faradayova klec vždy účinná?....252
Od Fresnela k metačočkám....255
Astrofyzikální plazma v laboratoři....258
Zakřivení časoprostoru a kvantové jevy....262
Molekuly v subatomárních částicích....266
Naučíme se využívat spin fotonů?....269
Unruhův jev – tepelné záření vakua....274
Bonus: Nobelovy ceny....278

VI. TECHNOLOGIE 291

Plastové úložiště dat....292
Jeden bit, jeden atom....294
Měření tvaru letící střely....298
Fraktální elektrodypro optoelektroniku....301
Vodivé inkousty a chytré textilie....305
Nanodiamanty....308
Jaderné raketové motory....314
Nám, nám narodil se ...Vendelín....318
Nanoelektromechanické systémy....321
Cestování s kvantovou technologií 2.0....330
Bonus: Kvantové počítače....338

Milí čtenáři,

od vydání publikace *Astronomie a fyzika – svítání* už uběhly dlouhé čtyři roky. Od té doby se v astronomii i ve fyzice odehrálo mnohé: kvantové technologie na nás útočí ze všech stran – společnost IBM dokonce prodala první dva kvantové počítače a další společnosti je usilovně vyvíjejí; dokázali jsme přistát na kometě, byly polapeny gravitační vlny, otevřel se nám zcela nový svět pohybů struktur na největších měřítcích ve vesmíru, fenomenální observatoř Planck zpřesnila naše představy o vesmíru jako celku a sen o obřím vesmírném interferometru se základnou milion kilometrů se stává skutečností.

Poslední roky byly také ve znamení obřích projektů. Zprovozněn byl pětisetmetrový radioteleskop FAST, začalo se stavět radioteleskopické pole SKA, které bude mít sběrnou plochu o velikosti kilometr čtvereční a nedaleko od našich hranic byl zprovozněn tříkilometrový rentgenový laser XFEL, který nám umožní sledovat reakce jednotlivých molekul a připravovat extrémní stavy látky nacházející se v nitru hvězd. Začala také stavba extrémně velikého evropského dalekohledu E-ELT, který bude mít průměr 39 metrů, staví se i nová gama observatoř CTA, která v budoucnu nahradí jihoamerický Auger pro sledování kosmického záření. Je až neuvěřitelné co vše se událo za pouhé čtyři roky.

Do knihy *Souvislosti* se samozřejmě nemohlo vejít vše, co bychom chtěli. Přesto doufám, že to hlavní, co se odehrálo, kniha obsahuje. Trocha statistiky: v knize naleznete šest kapitol pokrývajících astronomii od blízkého až po nejvzdálenější vesmír, fyziku i moderní technologie. V knize je celkem 55 článků a 6 bonusů, kterými kapitoly vždy končí. Jde o témata, která buď s kapitolami souvisí volně (zážitky z expedic, Nobelovy ceny), nebo jde o větší celky, které si zasluhovaly více prostoru (přistání na kometě, gravitační vlny, kvantové počítače). Na knize se podílelo 18 autorů, většinou zocelených dlouholetým pobytem ve vysokoškolském prostředí, což by mělo být zárukou serióznosti přinášených informací. Vše se nám podařilo vtěsnat do 352 stran, rozsah knihy je tedy stejný jako u předchozího *Svítání*.

Rád bych poděkoval všem, kteří se na vzniku knihy podíleli – Ivanovi Havlíčkovi za nakreslení všeho potřebného včetně úpravy obálky, Martinovi Batelkovi za sazbu, Rudovi Mentzlovi za podstatnou část jazykových korektur a samozřejmě autorům článků za jejich svěží rukopisy. Pevně věřím, že se vám, čtenářům, bude naše nová knížka líbit a stejně jako mě vás budou fascinovat neuvěřitelné poznatky a technologie, kterými disponujeme. Zbývá jen si přát, abychom naše znalosti využili k rozkvětu civilizace a nikoli k jejímu zničení.

V Praze 21. července 2018
Petr Kulhánek



I. BLÍZKÝ VESMÍR

Budiž ti Merkur lehký!

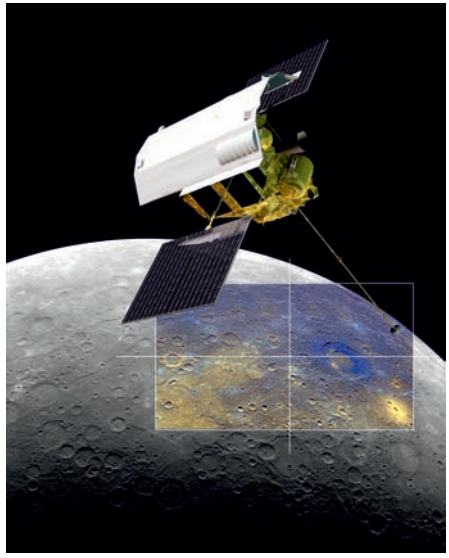
Merkur – *planeta nejbližší Slunci. Je to skalnatá planeta, posetá krátery podobně jako náš Měsíc. Jde o nejmenší planetu vůbec. Je téměř bez atmosféry. Teplota povrchu tohoto tělesa kolísá mezi −180 °C a 430 °C. Merkur se otočí kolem vlastní osy jednou za 59 našich dní. Jeho doba oběhu kolem Slunce trvá 88 dní. Jde o příklad vázané rotace (spinorbitální interakce) v poměru 2:3 způsobené slapovými silami. Dráha Merkuru kolem Slunce je protáhlá elipsa, která se stáčí vlivem přítomnosti ostatních planet. Malá část stáčení dráhy (43" za století) je způsobena efekty obecné relativity.*

Ve čtvrtek dne 30. dubna 2015 dopadlo večer před půl desátou našeho času na povrch Merkuru těleso o hmotnosti přes 500 kilogramů. Merkur není chráněn prakticky žádnou atmosférou, takže jeho povrch je na neustálé bombardování různými tělesy nepochybně zvyklý. Přesto zažil za bezmála 4,5 miliardy let své existence premiéru, neboť to bylo poprvé, co na Merkur dopadlo umělé těleso. Byla jím meziplanetární sonda Messenger. Marně čekaly antény Sítě dálkového spojení (DSN), zda nezachytí signál sondy, která by se vynořila z rádiového stínu. Byla by to bezesporu smutná událost, kdyby dopad sondy nebyl předem plánovaný. Využijme tuto událost k rekapitulaci její mise, během níž sonda vykonala celkem 4 104 oběhů nad povrchem první planety Sluneční soustavy.

Trocha historie

Sonda Messenger se na svou vesmírnou pouť vydala dne 3. srpna 2004, kdy byla z Mysu Canaveral vypuštěna na palubě nosiče Delta II. Přestože Zemi a Merkur dělí průměrná vzdálenost 150 milionů kilometrů, trvala cesta na oběžnou dráhu Merkuru více než 6,5 roku, což je o šest měsíců déle než doba, jakou cestovala slavná sonda Galileo k Jupiteru, který je průměrně pětkrát dále. Důvod této zjevné neúměry je zřejmý, pokud si porovnáme únikovou rychlost sondy ze Země (11,2 km/s), kterou musí sonda dosáhnout, aby se mohla vydat k Merkuru, a únikovou rychlost z Merkuru (4,3 km/s), pod kterou musí být sonda zbrzděna, aby tuto planetu obíhala. Pokud si navíc uvědomíme, že sonda se při nejjednodušší trajektorii nachází na vysoce excentrické dráze s přísluním poblíž dráhy Merkuru, je rychlost sondy v přísluní asi desetkrát vyšší, než je horní mez pro oběžnou dráhu Merkuru. Zbrzdění sondy na desetinu původní rychlosti by si vyžádalo obrovské množství paliva, což by náklady na celou misi neúměrně prodražilo. Z toho důvodu byla rychlost sondy před finálním brzděním pomocí motorů snížena gravitací planet při opakovaných průletech v jejich blízkosti (jedná se tedy o opak „gravitačního praku“). Úspora nákladů na palivo je však vykoupena delší dobou letu sondy. Messenger se tak rok po svém startu vrátil k Zemi (2. srpna 2005), následovaly dva průlety okolo planety Venuše (24. října 2006 a 5. června 2007). Ještě na heliocentrické dráze prolétl Messenger třikrát kolem Merkuru (14. ledna 2008, 6. října

Messenger pozoruje Rachmaninovu pánev na Merkuru. Umělecká vize NASA.



2008 a 29. září 2009) a teprve 18. března 2011 byl zahájen manévr, během něhož byla sonda čtvrthodinovým brzděním motorem navedena na oběžnou dráhu planety. Tato dráha byla vysoce excentrická – zatímco v apocentru se Messenger vzdaloval až na 15 000 km od Merkuru, v pericentru ji doslova pohlcovalo horko sálající z povrchu planety, vzdáleného pouhých 200 km.

Merkur před Messengerem…

Před příletem Messengeru byl Merkur z vesmíru zkoumán pouze při trojici průletů sondy Mariner 10 v letech 1974 až 1975. Mariner 10 poskytl snímky 45 % povrchu planety s rozlišením 1 km/pixel, objevil magnetické pole planety, zjistil přítomnost vodíku a helia v tenké atmosféře (složení atmosféry bylo posléze na základě pozemních pozorování zpřesněno, v exosféře planety byla potvrzena přítomnost iontů sodíku, draslíku a vápníku). Rozbor radarových signálů pozemských přístrojů naznačil možnost přítomnosti ledu v trvale zastíněných kráterech v polárních oblastech planety. Amplituda librací (periodických výkyvů) planety také naznačila, že Merkur má kapalné vnější jádro.

...a po něm

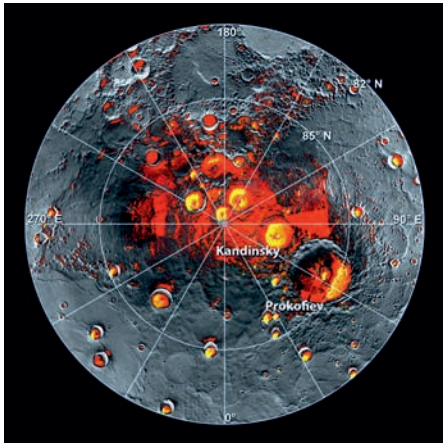
Z pohledu veřejnosti je jednoznačně největším objevem sondy Messenger faktické potvrzení přítomnosti vodního ledu na dně kráterů v polárních oblastech, kam nikdy nedopadá sluneční záření. Odhad objemu přítomné vody se pohybuje v rozmezí 100 až 1 000 km^3, což je asi jedna desetimilióntina až milióntina objemu vody na Zemi. Tato voda má zřejmě původ zejména v planetkách z vnějších oblastí hlavního pásu, destabilizovaných gravitačními poruchami způsobenými planetou Jupiter, které vyvolaly tzv. pozdní těžké bombardování vnitřních planet Sluneční soustavy.

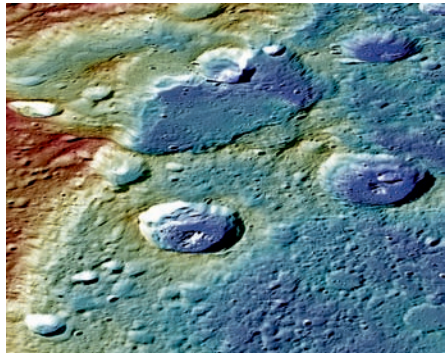
První spektroskopická analýza povrchu odhalila, že složení křemičitanové části planety se odlišuje od ostatních terestrických planet, zejména nízkým obsahem železa na povrchu. Svým složením se horniny na povrchu nejvíce podobají pozemskému komatiitu, vyvřelé hornině tvořené utuhnutým vysokoteplotním magmatem, pocházejícím z velkých hloubek. Povrch planety také obsahuje vyšší procento těkavých prvků, než kolik vyplývá z modelů vzniku a vývoje planet. Například obsah síry v povrchových horninách je přibližně o řád vyšší než na Zemi nebo na Marsu. Podrobné snímkování povrchu planety

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 „MErcury, Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging“. Sonda ukončila svou činnost 30. dubna 2015 řízeným pádem na povrch planety.*

DSN – *Deep Space Network, Síť dálkového spojení. Jde o mezinárodní komunikační síť antén sloužící podpoře meziplanetárních letů a radioastronomických pozorování. Síť začala budovat NASA a dnes ji tvoří tři sedmdesátimetrové antény umístěné na Zemi v přibližných rozestupech 120°: Goldstone v poušti Mojave (Kalifornie), v blízkosti Madridu (Španělsko) a v blízkosti Canberry (Austrálie).*

Obrázek severní polární oblasti Merkuru, vzniklý složením více snímků. Oblasti vysokého radarového odrazu z pozemských přístrojů jsou vyznačeny žlutě, oblasti, které se během všech průletů Messengeru nacházely ve stínu, jsou vyznačeny oranžově. Všechna místa vysoké radarové odezvy leží ve stínu a pravděpodobně jsou tvořena vodním ledem. Zdroj: NASA/Arecibo.





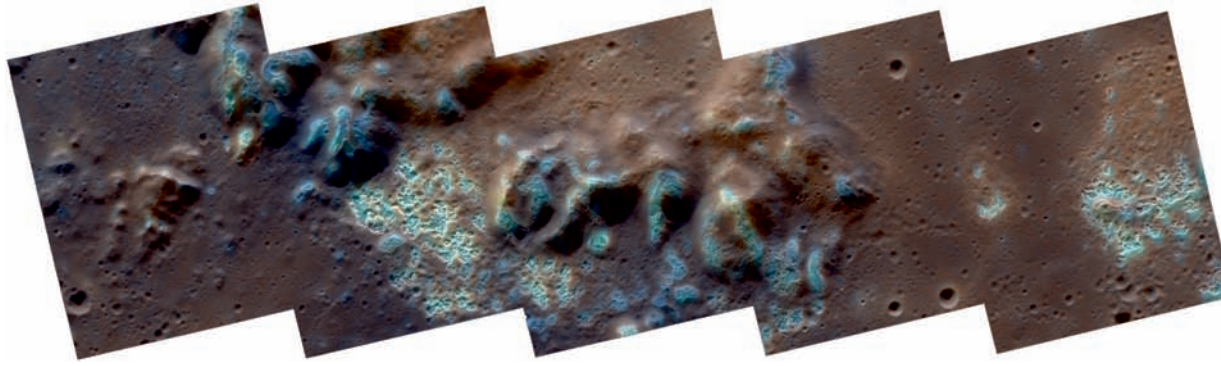
Chladnutí planety po její akreci způsobilo zmenšení objemu, na což kůra Merkuru reagovala vznikem četných zlomů, které vytvořily útesy, jako je tento, táhnoucí se z levého dolního rohu směrem vpravo nahoru. Barevné kódování odpovídá topografické výšce – červená nad ideálním povrchem planety, modrá pod ním. Zdroj: NASA/ Univerzita Johnse Hopkinse.

V oblasti impaktové pánve Raditaldi se nachází podivné útvary, připomínající „vyžrané díry". Vznikly patrně lokální erozí, způsobenou únikem těkavých složek. Zdroj: NASA/ Univerzita Johnse Hopkinse.

s rozlišením až 10 m/pixel odhalilo pozůstatky rozsáhlé vulkanické činnosti, jako jsou rozsáhlé planiny tvořené utuhlou lávou, nebo vulkanické nánosy, které vznikly výrony pyroklastických proudů, tvořených směsí plynů, magmatu a sopečného popela, vytvořených při sopečných explozích. V oblasti usazenin uvnitř kráterů jsou přítomny propadliny, jejichž okolí je na snímcích velmi světlé. Vznikly pravděpodobně únikem těkavých látek v geologicky nedávné době. Tektonická minulost Merkuru byla ovlivněna zejména deformacemi spojenými s kontrakcí planety při jejím chladnutí. Odhadovaný průměr před kontrakcí Merkuru je přibližně o 20 km větší než ten dnešní. Tektonika planety však také byla silně ovlivněna deformacemi při vzniku dopadových kráterů a impaktních pánví.

Magnetické pole

Magnetické pole Merkuru má v prvním přiblížení dipólovou strukturu, která je samozřejmě prostorově silně deformována interakcí se slunečním větrem, což ostatně není překvapivé. Zajímavé ale je rozložení magnetických siločar procházejících povrchem planety, tedy závislost intenzity magnetického pole na magnetické šířce. Na severu se magnetické siločáry dostávají blíže k magnetickému pólu planety než na jihu. Díky této asymetrii vzhledem ke geografickému rovníku planety je magnetické pole na severní polokouli planety přibližně třikrát silnější než na polokouli jižní. Magnetický rovník planety je vůči geografickému posunut o 500 km (0,2 poloměru planety) severním směrem a tuto asymetrii si pole zachovává i ve vzdáleném magnetickém ohonu planety. Takováto asymetrie nebyla zatím pozorována u žádné jiné planety



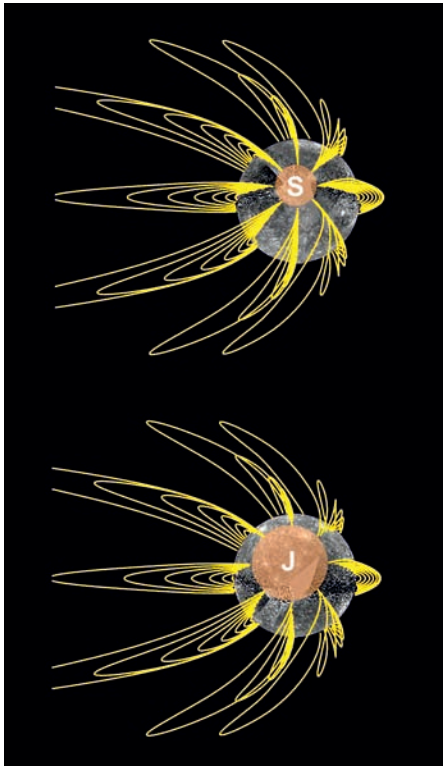
a nevyplývá ani z modelu planetárního dynama. Obrovské železné jádro planety zaujímá 85 % jejího poloměru a je zčásti kapalné, velikost tuhého vnitřního jádra však není známa. Na rozdíl od zemského jádra je však jádro Merkuru obklopeno ještě vrstvou pevného sulfidu železnatého, která teprve dosedá na křemičitanový plášť.

Merkur je nejbližší planetou, jejíž magnetický štít interaguje se slunečním větrem, navíc má natolik řídkou atmosféru, že ovlivňuje tuto interakci minimálně. Merkur je proto ideálním, i když dlouho opomíjeným, tělesem k výzkumu interakce planetárních magnetosfér se slunečním větrem.

Model planetárního dynama předpokládá, že magnetické pole je generováno díky konvektivnímu proudění ve vnějším jádru. Hnací silou konvekce je potom radiační ochlazování povrchu planety. Jenže z měření vyplývá, že plášť planety má všude zhruba stejnou tloušťku, takže asymetrií konvektivního proudění v severní a jižní polokouli planety nelze vysvětlit asymetrii magnetického pole. Numerické simulace tekutinového dynama ukázaly, že kvazi-stabilní asymetrie magnetického pole lze docílit za předpokladu, že jsou zdroje konvekce rozmístěny v celém objemu jádra (nejen na jeho hranici) a že tok tepla na rozhraní pláště a jádra je u rovníku vyšší než v ostatních částech planety. Na potvrzení této domněnky si budeme muset počkat nejméně do roku 2025, kdy by na oběžné dráze Merkuru měla zaparkovat evropsko-japonská sonda BepiColombo.

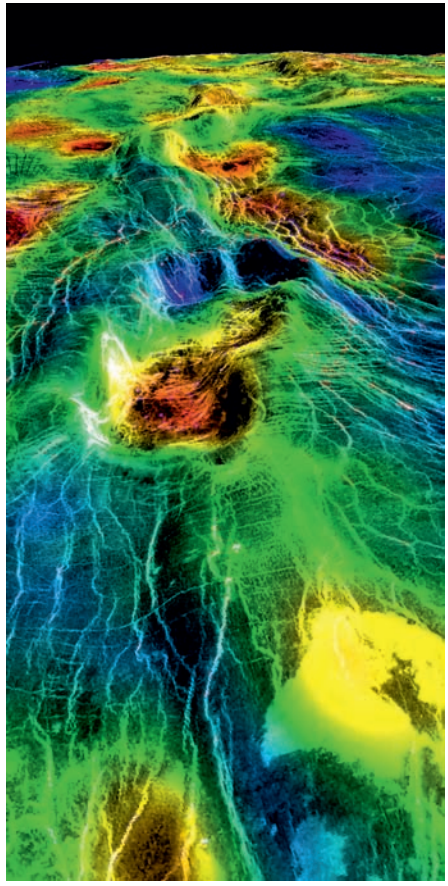
Pouť sondy Messenger, zakončená dopadem na povrch tohoto nehostinného tělesa, významně rozšířila obzory našeho poznání. Po třiceti letech od návštěvy Marineru 10 jsme se konečně dozvěděli, jak vypadá celý povrch planety. Na mnoho otázek nám sonda odpověděla, ale, jak už to u vesmírných misí (naštěstí) bývá, mnoho nových sama otevřela, a tak se můžeme těšit na další výzkum této unikátní planety.

■ **Jakub Rozehnal, 17. 5. 2015, AB 18/2015**



Magnetické pole v okolí severního magnetického pólu planety je třikrát silnější než magnetické pole v okolí jižního pólu. Jižní magnetická „polární čepička“, kde jsou siločáry pole otevřené a napojují se na meziplanetární magnetické pole, je mnohem větší, než ta severní. Jižní polární oblasti jsou proto více vystaveny vlivům kosmického počasí, způsobeného dopadáním nabitých částic na povrch planety. Zdroj: NASA/Univerzita Johnse Hopkinse.

Vulkány na Venuši



Perspektivní pohled na povrch Venuše v oblasti Sedna Planitia vytvořený podle stereoskopického měření sondy Magellan. Barevné kódování vyjadřuje vyzařování povrchu. Zdroj: NASA.

Povrch Venuše je poměrně mladý, podobně jako zemský povrch. Utvářel se v posledních několika stovkách milionů roků. Obě planety mají atmosféru a jsou téměř stejně velké a také jejich dráhy jsou, v celkovém měřítku Sluneční soustavy, zhruba stejně vzdáleny od Slunce. Venuše se ale v mnoha podrobnostech od Země výrazně odlišuje. Na povrchu Venuše je více než 150 velkých vulkanických štítů. Tyto mohutné sopečné hory mají průměr základny široký mezi 100 až 600 km a jejich vrcholy činí do výše 0,3 až 5 km. Většina z nich měří v průměru 100 až 200 km. Nejmohutnější štít *Theia Mons* se nachází v oblasti *Beta Regio*, úpatí dosahuje více než 700 km a jeho vrchol se vypíná nad okolní terén do výše 5,5 km. Vulkánů o velikosti 20 až 100 km je zde asi 270, z nichž ale jen 70 je skutečnými horami. Se zmenšujícími se rozměry počet vulkánů roste a sopek menších než 20 km je na Venuši odhadem nejméně 100 000.

Podmínky na Venuši

Atmosféru tvoří téměř výhradně oxid uhličitý, Venuše je tedy silně ovlivněna skleníkovým efektem. Teplota povrchu dosahuje až 470 °C (≈740 K) a atmosférický tlak při povrchu je zhruba stonásobný oproti tlaku vzduchu při povrchu moře na Zemi. Atmosféra zde má hustotu 65 kg/m^3. Hustota vzduchu na Zemi je jen 1,29 kg/m^3. Následkem toho se na povrchu voda prakticky nevyskytuje. Voda není ani v atmosféře, oblaka jsou zde tvořena převážně kyselinou sírovou a jsou mnohem výše než oblačná patra na Zemi. Díky tomu veškeré povrchové útvary vypadají po dlouhou dobu velmi čerstvě. Na Venuši nepozorujeme známky deskové tektoniky. Nejsou zde dlouhé linie vulkanických útvarů a ani subdukční zvrásnění, které by naznačovalo vzájemné pohyby větších povrchových oblastí. Veškeré projevy vulkanizmu jsou jen lokální, pravděpodobně mají příčinu v podpovrchových horkých skvrnách. Vulkanizmus na Venuši není tak eruptivní jako na Zemi. Při tlaku, jaký je na povrchu, by láva musela obsahovat mnohem vyšší podíl plynů, aby místní sopky byly podobné pozemským. Pozemské sopečné výbuchy, výrony popela a oblaka plynů prýštící ze sopečných jícnů jsou podmíněny přítomností vody, která ale na Venuši chybí.

Umělecké malůvky s kouřícími vulkány jsou zde jen výplodem nedomyšlené fantazie a skutečnosti se, dle našich současných znalostí,

nepodobají ani omylem. Vulkanické útvary na Venuši jsou zcela podřízeny místním podmínkám a typickým projevem vulkanizmu zde jsou lávová pole a řečiště husté lávy. Nepřítomnost subdukčních zón, a tedy nepřítomnost skokového uvolňování podpovrchového napětí, výbušnost místních sopek také snižuje. Aktuální pohled na vulkanickou činnost je ale, vzhledem k obtížnému zkoumání povrchu skrze téměř 70 km vysokou a pro viditelné záření neprůhlednou atmosféru, stále velmi náročným úkolem.

Průzkum sondami

Venuši do dnešní doby úspěšně zkoumalo celkem 25 kosmických sond, z nichž byly pravděpodobně, z hlediska dlouhodobého a soustavného sběru dat, nejvýznamnější tři mise. Od roku 1978 do srpna 1992 pracoval na oběžné dráze americký Pioneer Venus Orbiter. V první polovině devadesátých let pak americká sonda Magellan, která vydržela na oběžné dráze od 10. srpna 1990 až do 13. září 1994 a provedla téměř kompletní radarové mapování povrchu s rozlišením 100 metrů a méně. Třetí misí byla evropská sonda Venus Express, určená zejména pro výzkum atmosféry Venuše. Venus Express pracovala od 11. dubna 2006 do 16. prosince 2014 na protáhlé oběžné dráze s dobou oběhu 24 hodin, která byla v průběhu května a června 2014 brzděním o horní vrstvy atmosféry snížena a zkrácena na 22 hodiny a 20 minut. Výzkum prováděný sondou Venus Express se zabýval mj. otázkou, zda je povrch Venuše dnes ještě vulkanicky aktivní. Pokud ano, jak tedy probíhající vulkanizmus na Venuši vypadá?

Vulkanizmus na Venuši

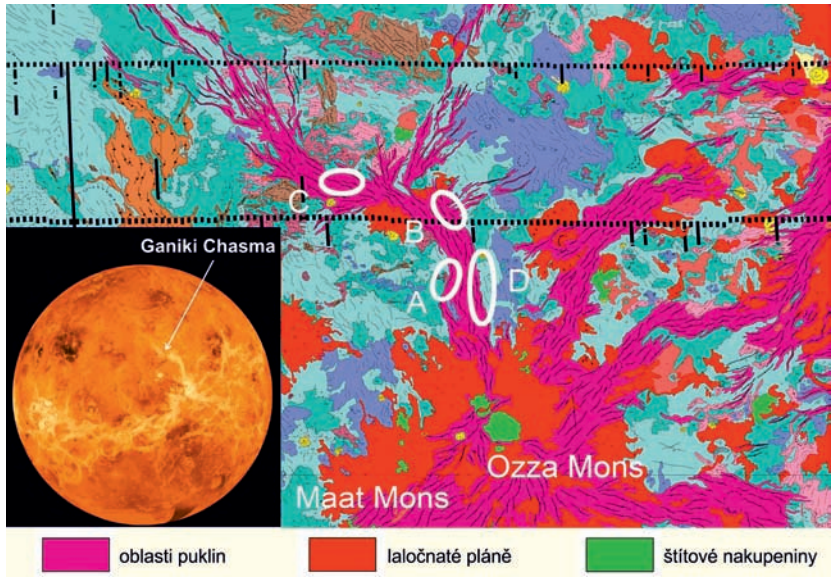
Kamerou VMC (*Venus Monitoring Camera*) na palubě sondy Venus Express byla po celou dobu mise prováděna příležitostná měření teplotní aktivity povrchu Venuše. Kamera VMC pracovala ve čtyřech spektrálních pásmech: 0,365 μm (UV); 0,513 μm (viditelná oblast); 0,965 μm (blízké IR1) a 1,010 μm (blízké IR2). V kanálu VMC IR2, pro který je Venušina atmosféra téměř průhledná, byly postupně zaznamenány lokální teplotní změny v oblasti *Ganiki Chasma*. Výrazné zvýšení teploty se podařilo zaznamenat několikrát ve stejných místech. Tyto teplejší skvrny byly ztotožněny s místy v dlouhém řečišti plném souběžných puklin poblíž útvarů *Ozza Mons* a *Maat Mons*. Oblasti puklin a laločnaté pláně jsou stratigraficky nejmladšími druhy terénu.

Venuše – *nejbližší planeta vzhledem k Zemi. Hustá atmosféra zabraňuje přímému pozorování povrchu. Díky skleníkovému efektu je na povrchu vysoká teplota, nejvyšší dosud naměřená hodnota činí 480 °C. Venuše obíhá kolem Slunce takřka po kruhové dráze ve vzdálenosti 108 milionů km s periodou 225 dní. Otočení kolem vlastní osy (proti oběhu, tzv. retrográdní rotace) trvá 243 pozemských dnů. To znamená, že na Venuši Slunce vychází a zapadá jen dvakrát za jeden oblet Slunce. Oblaka Venuše dobře odrážejí sluneční svit, a proto je tato planeta po Slunci a Měsíci nejjasnějším tělesem na obloze. Na večerní obloze ji můžeme spatřit jako Večernici a na ranní obloze jako Jitřenku.*

Subdukce – *postupné zasouvání jedné litosférické desky pod druhou. Jde o jeden z mnoha projevů tektonické aktivity.*

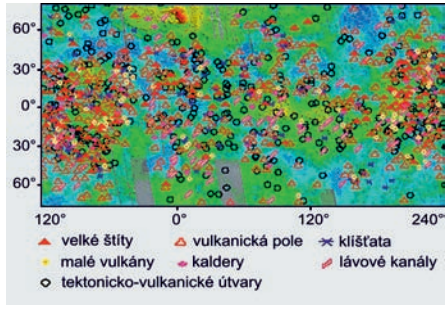
Magellan – *1) americká sonda, která vylétla 4. května 1989 vstříc planetě Venuši. Na oběžné dráze kol Venuše započala svůj výzkum 10. srpna 1990. Hlavním programem mise bylo poměrně detailní radarové mapování povrchu v rozlišení alespoň 100 m. Radarové mapování MGN (Magellan Venus Radar Mapping Mission) probíhalo ve třech cyklech s rozdílnými parametry oběžné dráhy, takže výsledkem je možnost stereoskopického zobrazení povrchu ve velmi vysokém rozlišení. Ode dne 14. září 1992 probíhalo ve dvou cyklech proměřování gravitačních povrchových nerovnoměrností planety. Každý cyklus trval 243 dnů vzhledem k rotaci planety a snaze zobrazit celý povrch. Mise byla ukončena 13. října 1994 po ztrátě signálu o den dříve. Výsledky mise Magellan umožnily dosud nejpodrobnější zobrazení povrchových charakteristik planety včetně výstupu ve formě stratigrafických geologických a gravitačních map.*

2) portugalský mořeplavec Fernão de Magalhães, který vedl první výpravu kolem světa 1519 až 1522. Zahynul bídnou či hrdinskou smrtí – podle toho, kdo o ní bude vypovídat – rukama Filipínců. Zprávu o jeho cestě zapsal Antonio Pigafetta, který jako jeden z mála námořníků obeplul tehdy poprvé celý svět. Po Magellanovi jsou pojmenovány satelitní galaxie Mléčné dráhy viditelné na jižní obloze a také sonda vyslaná agenturou NASA k Venuši.



Geologická mapa studované oblasti s vyznačením míst, v nichž byly sondou Venus Express pozorovány lokální teplotní změny. Zdroj: Planetary and Space Science.

Vulkanické útvary na Venuši. Na povrchu se nachází cca 1 600 velkých vulkanických útvarů a bezpočet menších. Zdroj: Magellan/Volcano World.

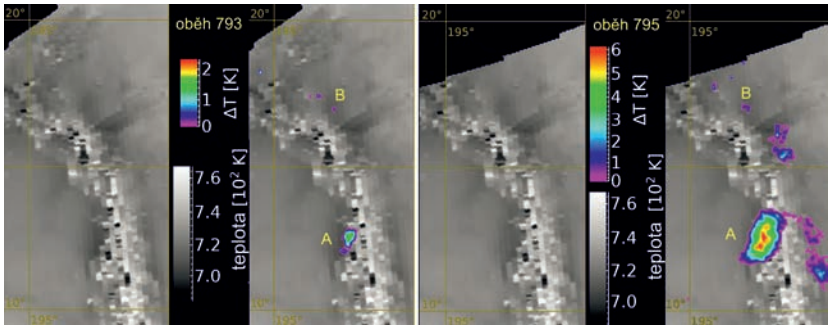


Je tedy možné, že jejich geologické utváření stále ještě probíhá.

Jelikož oběžná doba sondy Venus Express trvala 24 hodin a Venuše se otáčí mnohem pomaleji, bylo možné totéž místo sledovat v potřebném rozlišení a geometrii vždy jedenkrát denně. Měření jsou tedy datována číslem oběhu sondy okolo planety. Pozorovaná oblast *Atla Regio* o rozloze $1{,}4\times10^6$ km^2 se v době pozorování nacházela na noční straně a výraznější zvýšení lokální teploty bylo zaznamenáno jen při několika obletech. Kamerou VMC však bylo provedeno postupně 316 pozorovacích sérií, z nichž bylo 37 v poměrně dostačující kvalitě a souhrnně bylo pořízeno 2 463 snímků sledované oblasti. Místní teplotní anomálie byly dopočítány z intenzity naměřeného signálu odpovídající vyzařování povrchu. Do výpočtu bylo nutno zavést také opravy týkající se možného ovlivnění atmosférou. Postupně byla vyloučena možnost, že by zjasňování jednotlivých objektů mohlo být způsobeno proměnlivou propustností atmosféry pro příslušné spektrální pásmo. Četnost pozorovaných změn jasností jednotlivých objektů a také průběh jejich zjasňování a mizení neodpovídaly možným časovým změnám probíhajícím v atmosféře. Pro naměřený soubor dat je jediným představitelným vysvětlením zdroj související přímo s povrchem planety.

Okolní povrch mimo jasné skvrny se teplotně pohybuje kolem ≈740 K. Podrobnou analýzou naměřených dat bylo zjištěno, že některé jasné skvrny o ploše kolem 1 km^2 dosahují každá až 1 100 K, což je patrné na snímcích objektu označeného písmenem A získaných při obletech 793 a 795. Menší skvrny, dosahující teploty 950 K, jsou spolu s rozsáhlejšími oblastmi o rozloze až 200 km^2 o teplotě 800 K zachyceny na snímcích z obletů 1147 a 1148 (objekty B a D). Interpretace výsledků je ale stále velice opatrná. Jasné horké skvrny zaznamenané

s teplotou až o 360 stupňů vyšší, než jakou má okolní terén, by mohly být lávou vyvěrající na povrch, ale také jen podpovrchovým dějem či výronem žhavých plynů. Jisté je, že povrch Venuše se geologicky mění i v současnosti, což bylo potvrzeno přímým pozorováním těchto změn.



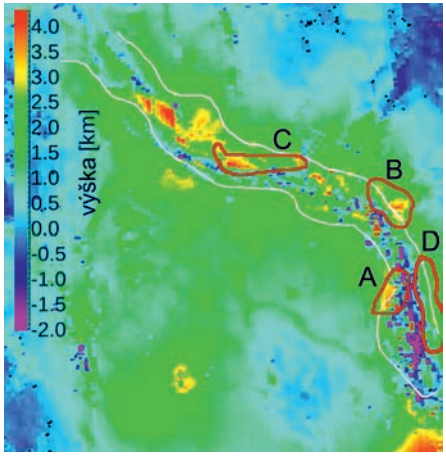
Teplotní anomálie v místě objektu A při obletech 793 a 795. Na obou snímcích je vždy vlevo radarová mapa pořízená sondou Magellan Venus a vpravo je do ní vkopírován záznam horkých skvrn ze sondy Venus Express. Zdroj: Geophysical Research Letters.

Ve prospěch vulkanizmu probíhajícího v současné době na povrchu Venuše hovoří také měření obsahu oxidu siřičitého v atmosféře. Řada měření je poměrně dlouhá a sahá do konce sedmdesátých let, kdy byl zahájen průzkum Venuše misemi Pioneer Venus Multiprobe a Pioneer Venus Orbiter. Proměnlivá koncentrace oxidu siřičitého by mohla znamenat nárazovité dotování atmosféry sírou právě z vulkanické činnosti. V obdobných hodnotách se podařilo naměřit kolísavou koncentraci tohoto plynu také sondě Venus Express.

V současnosti je poslední umělou oběžnicí zkoumající Venuši japonská sonda Akatsuki (Venus Climate Orbiter), která startovala dne 20. května 2010. V prosinci 2010 se ji bohužel nepodařilo navést na oběžnou dráhu Venuše. Poté pět let obíhala kolem Slunce a japonští odborníci hledali záložní řešení. Nakonec se jim ale 7. prosince 2015 podařilo sondu umístit na protáhlou eliptickou dráhu kolem Venuše. I když je hlavním cílem sondy výzkum Venušiny atmosféry, mohla by vnést jasno i do otázky Venušiny vulkanické činnosti.

■ Ivan Havlíček, 31. 7. 2015, AB 28/2015

Topografická mapa severní oblasti Atla Regio (fialová značí nejnižší úroveň, červená nejvyšší). Jednotlivá místa s lokálně proměnlivou teplotou byla označena velkými písmeny A až D. Zdroj: Planetary and Space Science.

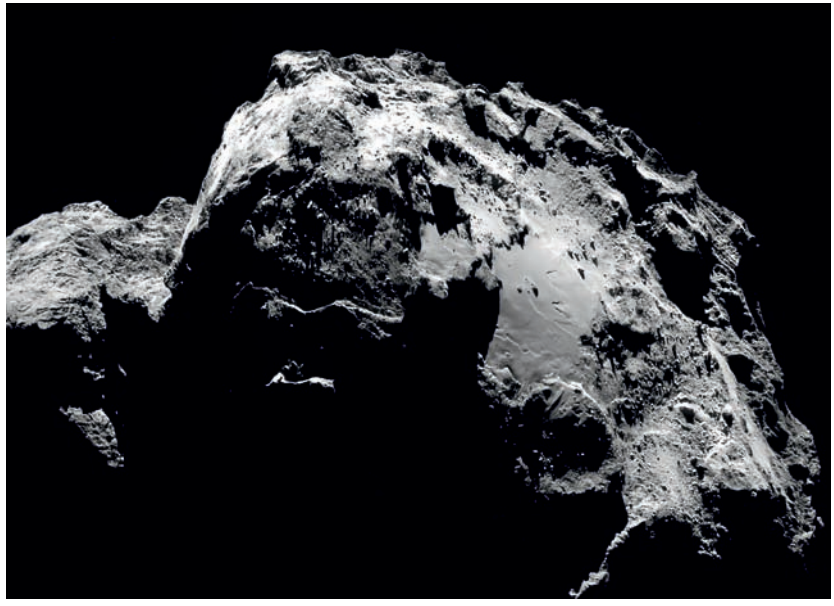


O původu vody na Zemi

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

Deuterium – *těžký vodík, v jádře má jeden proton a jeden neutron. V průměru na Zemi připadá na 7 000 atomů normálního vodíku jeden atom deuteria. Jde o stabilní izotop vodíku, který by měl být v budoucnosti hlavním zdrojem energie ve fúzních elektrárnách.*

Nedávná analýza složení vody na kometě 67P/Čurjumov–Gerasimenko rozvířila na populární úrovni debaty o původu vody na Zemi. Ukázalo se, že voda z komety má jiné izotopové složení (konkrétně jiný poměr zastoupení vodíku a deuteria, které se s časem prakticky neměnní) než standardní oceánská voda. Znamená to tedy, že „komety nepřinesly vodu na Zemi, jak se doposud soudilo?“, psalo se v mnoha populárních článcích. Planetární astronomy však tato nově otevřená debata zanechala poměrně chladnými. Že led v dnes pozorovaných kometách je patrně mezihvězdného původu, a obsahuje ledová zrna přítomná v původní mlhovině, ze které vznikalo naše Slunce a která byla bez rozmrznutí zabudována do komet, víme již od doby, kdy jsme začali komety po chemické stránce studovat. Z jedenácti doposud měřených komet má jen jediná, 103P/Hartley 2, podobný poměr zastoupení D/H jako oceánská voda na Zemi. U všech ostatních (slavnou Halleyovu kometu nevyjímaje), je tento poměr průměrně dvakrát vyšší. Komety tedy nemohou být hlavním zdrojem vody na Zemi.



Snímek komety 67P/Churyumov-Gerasimenko pořízený dne 3. ledna 2015 kamerou NavCam mise Rosetta ze vzdálenosti 28,4 km od středu komety. Rozlišení je 2,4 metru na pixel a rozměry oblasti jsou 4,4 km na 4,2 km. Zdroj: Evropská kosmická agentura.

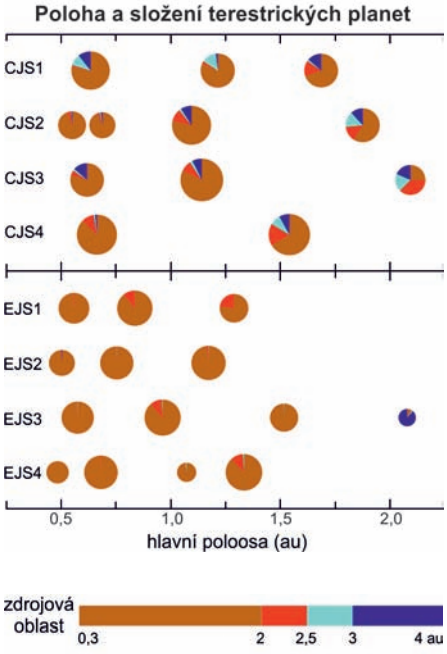
Vnitřní část naší Sluneční soustavy

O tom, jak je voda pro nás a obecně pro život na Zemi důležitá, se jistě není třeba rozepisovat. Kde se však voda na Zemi vzala? Voda je sloučeninou vodíku, který vytváří 75 % vesmíru, a kyslíku, který je třetím nejzastoupenějším prvkem. Není tedy příliš překvapivé, že se voda (nebo radikály pocházející z disociace její molekuly ultrafialovým zářením) ve vesmíru vyskytuje v hojném množství. To však neznamená, že bychom ji nutně museli nalézt všude. Z hlediska vzniku a velmi raného vývoje Sluneční soustavy může být překvapivé, že vodu nacházíme i na místech, která

vznikla zcela bez vody – například na Merkuru, Měsíci, Zemi i Marsu. Znamená to, že během svého vývoje musela naše planetární soustava projít obdobím, při kterém byla její vnitřní vyprahlá část bombardována ledovými tělesy, která terestrický region zavlažila.

Planety a další tělesa Sluneční soustavy vznikaly akrecí z prachoplynného disku, který se utvořil okolo mladičkého Slunce. Tento disk víceméně kopíroval složení zárodečného obřího molekulárního mračna, na rozdíl od centrální hvězdy však nebyl chemicky homogenní. Různé chemické sloučeniny, které byly v disku obsaženy, se při různých teplotách nacházejí v různých skupenstvích. Zatímco těkavé látky zůstávají i při relativně nízkých teplotách plynné, stabilní prvky a sloučeniny, jako jsou například kovy a jejich oxidy, jsou i za vysokých teplot pevné. Díky této skutečnosti a existenci teplotního gradientu (teplota v disku klesala nejméně s odmocninou ze vzdálenosti) se ve vnitřní terestrické zóně nacházely v pevné formě jen ty nejméně těkavé látky, zatímco ostatní – a mezi nimi i voda – byly ve skupenství plynném. Sluneční vítr, který z mladého Slunce vanul mnohem intenzivněji než dnes, „odvanul“ tyto sloučeniny do větších heliocentrických vzdáleností. Teprve ve vzdálenostech mezi třemi až čtyřmi astronomickými jednotkami (au) od Slunce klesla teplota natolik, že voda zde mohla zkondenzovat do pevné fáze. Na této hranici se vytvořila jakási „sněžná čára“, tvořená ledovou námrazou na drobných zrnkách prachu. Uvědomme si, že planeta Mars obíhá ve střední vzdálenosti 1,7 au od Slunce, a většina těles v tzv. Hlavním pásu planetek obíhá ve vzdálenostech mezi 2,1 a 3,3 au. Vnitřní část Sluneční soustavy, její terestrická zóna, tedy záhy „vyschla“, a další vývoj probíhal bez přítomnosti vody.

Následně docházelo k akreci prachových částic na zrna, která velmi rychle narostla na planetesimály rozměrů v řádech sto až tisíc metrů. Tato tělesa, která obíhala na téměř kruhových a koplanárních drahách, již byla schopna působit gravitačními poruchami na své sousedy, čímž docházelo ke zvyšování jejich excentricit a k vzájemným srážkám. Tak vznikla planetární embrya, která byla svou velikostí srovnatelná s Měsícem. Další srážky a růst těles v terestrické zóně však utlumilo dynamické tření, při kterém velká tělesa na excentrických drahách rozptylovala ta malá – na úkor své vlastní hybnosti, čímž klesala i jejich excentricita. Dalším příspěvkem k utlumení excentricit bylo tření o plyn, který byl do větších vzdáleností a z disku vypuzen až během



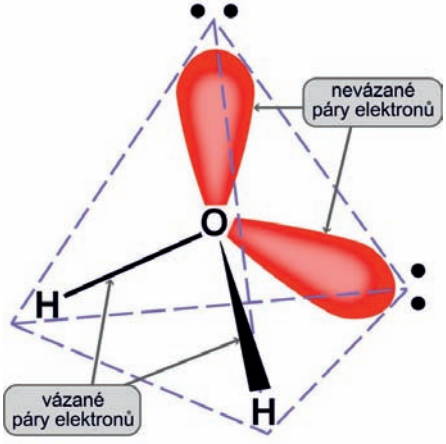
Výsledek dvou variant simulací vývoje vnitřních oblastí Sluneční soustavy. V každé variantě byly provedeny čtyři simulace s mírně odlišnými počátečními podmínkami. Horní obrázky, označené CJS1-4, ukazují výsledek simulace vývoje soustavy planetárních embryí a planetesimál, rušené Jupiterem a Saturnem na kruhových drahách. Naznačeno je i výsledné složení vzniklých terestrických planet – tj. kolik materiálu z původních oblastí s odlišnou vzdáleností od Slunce obsahují. U simulace CJS2 například vidíme, že v pořadí třetí planeta od Slunce obíhá ve vzdálenosti 1,1 au a obsahuje přibližně osmina materiálu, který se původně nacházel ve vzdálenosti mezi 3 až 4 au, a který tedy obsahoval i větší množství vody. (viz barevná škála na spodním okraji obrázku). Pro případ obřích planet na původně excentrických drahách nejsou výsledky zdaleka tak podobné dnes pozorovanému stavu. Svědčí to mj. o tom, že dráhy obřích planet získaly dnes pozorovanou excentricitu až v pozdějších fázích vývoje Sluneční soustavy. Zdroj: D. P. O'Brien, A. Morbidelli, H. F. Levison.

Terestrická zóna – *oblast planet podobných Zemi (latinsky terra), tedy vnitřní část Sluneční soustavy, kde obíhají relativně malé planety Merkur, Venuše, Země a Mars.*

Planetesimály – *tělesa z raných fází vývoje Sluneční soustavy. Jedná se o stavební kameny budoucích planetek, na kterých docházelo k procesům diferenciace hmoty a vzniku minerálních asociací typických pro jednotlivé druhy většiny známých meteoritů. V současné době se planetesimály mohou nacházet v oblastech Kuiperova pásu a Oortova oblaku, kam byly vypuzeny v pozdních fázích vývoje Sluneční soustavy planetami.*

Excentricita – *výstřednost, poměr vzdálenosti ohniska od středu elipsy k délce hlavní poloosy. U pohybu těles v gravitačním poli jde o jeden ze základních dráhových elementů.*

Rezonance – *vlastnost pohybu dvou těles ve Sluneční soustavě, při které jsou jejich doby oběhu v poměru malých celých čísel. V takovém případě nastává mezi tělesy gravitační vazba (rezonance), která ovlivňuje stabilitu tohoto uspořádání. Rezonance může také nastat v rámci dvou různých pohybů jediného tělesa, zpravidla při jeho oběhu kolem Slunce a rotaci kolem osy. Pak hovoříme o spinorbitální rezonanci.*



několika milionů let. Akrece dalších těles v terestrické zóně se tak zastavila, neboť planetární embrya na kruhových drahách se nemohla dále spojovat na větší.

Za sněžnou čarou

Jiná situace nastala ve větších heliocentrických vzdálenostech, za sněžnou čarou. Planetární embrya zde akreovala větší množství plynu, a vznikly tak postupně obří planety. Ty největší a Slunci nejbližší – Jupiter a Saturn – záhy změnily tvář celé vnitřní soustavy.

V oblastech blíže ke Slunci (tj. dále od Jupiteru) bylo gravitační rušení Jupiterem slabé. Jupiter zde způsobil jen mírný nárůst excentricit planetárních embryí, takže pokud docházelo k jejich vzájemným srážkám, dělo se tak zpravidla při malých rychlostech, což většinou vedlo k jejich syntéze. Naproti tomu v oblastech vzdálenějších od Slunce (ve vzdálenostech mezi 2 až 5 astronomických jednotek) docházelo k výrazným gravitačním poruchám způsobeným Jupiterem, zejména k rezonancím, při kterých jsou oběžné periody těles a Jupiteru v poměru malých přirozených čísel. Tyto rezonance mají za následek rychlý nárůst excentricity těles a jejich vzájemné kolize. Proto, na rozdíl od oblasti v blízkosti Slunce, dochází při vysokých rychlostech k fragmentaci – vzniku velkého množství menších těles, než jaká v této oblasti vznikla. Tímto způsobem vysvětlujeme vznik velkého množství těles, která dnes pozorujeme v oblasti tzv. Hlavního pásu planetek.

Výsledkem tohoto vývoje, trvajícího několik desítek milionů let (maximálně 200 milionů let), je vznik několika terestrických planet v oblasti 0,5 až 2 au od Slunce a Hlavního pásu planetek. Je důležité si uvědomit, že mnohá z planetárních embryí byla z oblasti mezi 2 až 5 au vypuzena ještě dříve, než došlo k jejich kolizi s jiným tělesem v dané oblasti. Pokud se těleso působením rezonance dostalo na výrazně excentrickou dráhu, leželo jeho přísluní hluboko v regionu budoucích terestrických planet a jeho odsluní blízko dráhy (nebo za drahou) Jupiteru. Taková tělesa se tedy mohla buď srazit s planetárními embryi obíhajícími v blízkosti Slunce, nebo mohla být při blízkém setkání s Jupiterem vymrštěna mimo oblast původního protoplanetárního disku. A protože, jak jsme se již zmínili, obsahovala tělesa akreovaná ve vzdálenosti větší než 3 až 4 au velké množství vody a dalších těkavých látek, tak ta tělesa, která se na svých excentrických drahách vybuzených Jupiterem srazila s planetárními embryi obíhajícími v blízkosti

Slunce, dopravila vodu zpět do terestrické oblasti.

Tato hypotéza se dobře shoduje s numerickými simulacemi raných fází vývoje naší Sluneční soustavy. P. O'Brien, A. Morbidelli a H. F. Levison provedli numerické simulace vývoje soustavy, která v regionu rozkládajícím se do vzdálenosti 4 au od Slunce obsahovala 25 planetárních embryí velikosti Marsu a stejné celkové množství hmoty v populaci 1 000 planetesimál. Následně byl simulován vývoj systému ve dvou variantách – s obřími planetami na kruhových drahách (tedy na těch, na kterých vznikly) a na mírně excentrických drahách, na jakých je pozorujeme dnes. Výsledek je velmi výmluvný. Zatímco v případě excentrických drah plynných obrů vzniklo ve vnitřní části Sluneční soustavy větší množství menších planet, které byly navíc co do složení podobné, v případě plynných obrů na počátečních kruhových drahách vzniklo menší množství větších planet, které byly navíc „poskládány“ z materiálu napříč celým regionem.



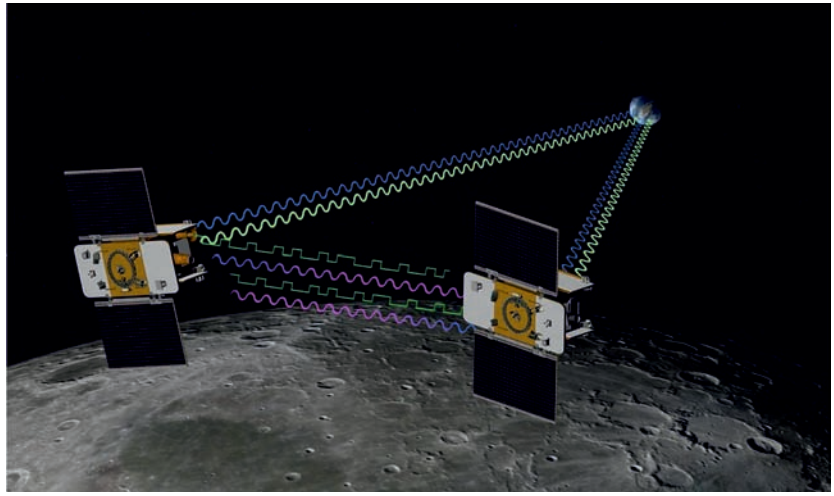
Zhruba 71 % povrchu Země tvoří oceány. Zdroj: DVID.

Vodu na Zemi tedy nejspíše dopravila zejména planetární embrya, která vznikla za sněžnou čarou ve vzdálenostech větších než 3 až 4 au od Slunce a byla destabilizována gravitačním rušením a rezonancemi velkých planet. Komety měly na zavlažení terestrického regionu zřejmě jen malý podíl, ale i tak mohly hrát pro rozvoj života zásadní roli – mohly totiž do vhodného prostředí přinést jeho základní stavební kameny, nebo dokonce život samotný.

■ Jakub Rozehnal, 18. 1. 2015, AB 3/2015

au – *astronomická jednotka (Astronomical Unit), původně střední vzdálenost Země od Slunce, v roce 2012 ji Mezinárodní astronomická unie definovala jako 149 597 870 700 m přesně a změnila zkratku z AU na au. Astronomická jednotka se používá především pro určování vzdáleností ve Sluneční soustavě, pro přibližné odhady postačí hodnota 150 milionů kilometrů.*

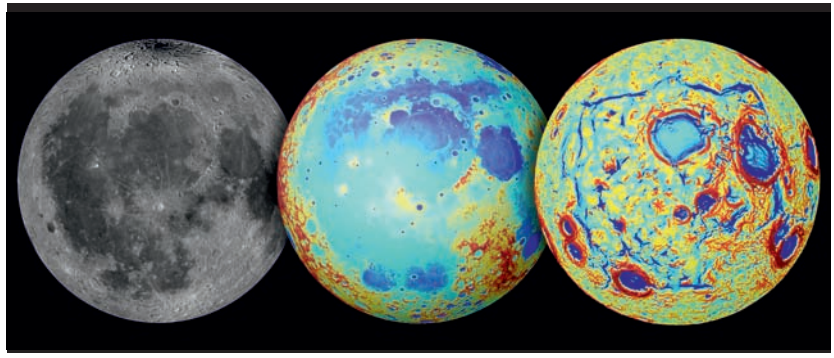
Záhada Oceánu bouří



Dvojice amerických song GRAIL sloužila k gravimetrickému mapování Měsíce. Zdroj: NASA.

Oceán bouří je dominantní útvar na přivrácené straně našeho Měsíce a jako jiná měsíční moře je vyplněn bazalty (čedičem). Dosud nebylo jasné, jak toto moře, které na délku měří až 2 500 km, vzniklo. Ostatní moře jsou vyplněnými impaktními krátery. Oceán bouří by ale musel být zdaleka největší a také nejstarší. Musel by vzniknout na konci období, kdy Měsíc byl pokryt ještě magmatickým oceánem, nebo velmi krátce po něm.

Tohoto tajemství byl Měsíc zbaven po prostudování dat z dvojice sond GRAIL, které v roce 2012 gravimetricky zmapovaly jeho povrch. Samotné měření nebylo vůbec snadné, dvojice sond musela kroužit okolo Měsíce po téměř polárních drahách ve velmi malé výšce, pouhých 55 km nad povrchem. Jednoduché však nebylo ani zpracování naměřených dat. Ta se musela očistit o příspěvky povrchové topografie. Výsledná, tzv. Bouguerova gravitační data tak nejsou ovlivněna horami a údolími, které můžeme pozorovat na povrchu. Tato data se pak používají pro další matematické zpracování, zejména k výpočtu gravitačních gradientů.

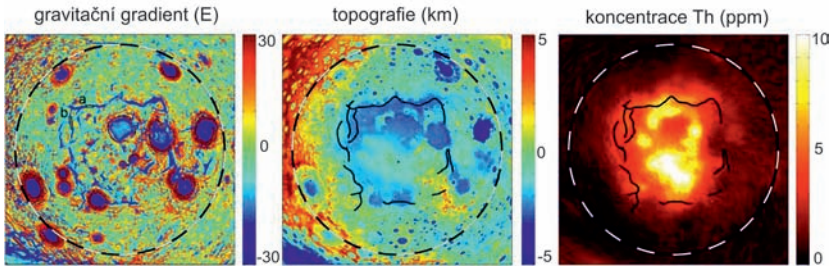


Měsíc ve viditelném spektru (vlevo), jeho topografie (uprostřed) a naměřené gravitační gradienty při misi GRAIL (napravo). Oceán bouří je oblast pokrývající většinu Měsíce z tohoto pohledu. Na topografické mapě má modrou barvu. Nově objevené rifty jsou zřetelné na obrázku vpravo, kde vytvářejí přibližně tvar kvaziobdélníku. Zdroj: NASA/GSFC/JPL/CSM/MIT.

Objev kvaziobdélníku

Při vizualizaci zpracovaných dat se na mapě objevily dosud neznámé deprese široké asi 150 km a hluboké 2 až 6 km. Autoři studie navrhli vysvětlení, že tyto deprese by mohly být analogiemi k pozemským riftům (příkopovým propadlinám), které jsou často doprovodným jevem ztenčování kůry a které často doprovází rozsáhlá vulkanická čin-

nost. V dnešní době jsou objevené deprese zcela překryty a zaplněny lávou, která se nejspíše vylévala na povrch Měsíce z přívodních žil prostupujících měsíční kůru. Soustava těchto objevených depresí je obdivuhodná zejména jako celek. Tvoří totiž přibližně kvaziobdélník na povrchu koule, jehož strany svírají úhel 120°. Tento tvar vyvrací domněnku, že by Oceán bouří mohl být pozůstatkem dopadu obřího tělesa. Krátery jsou totiž kruhové, nebo nanejvýš eliptické. Dalším důkazem proti obrovskému kráteru je gravitační pole v okolí těchto depresí. To neodpovídá gravitačním anomáliím z okrajů známých impaktních pánví. Naopak nalezené deprese (sníženiny) svými vlastnostmi odpovídají riftům pozorovaným i na jiných tělesech Sluneční soustavy.



Gravitační gradient, topografie a koncentrace thoria. Nalevo je Bouguerův gravitační gradient v polární projekci vystředěné na Oceán bouří. Písmeny a, b jsou označena místa, která byla dále analyzována. Černobílá kružnice rozděluje plný úhel po deseti stupních. Uprostřed je topografie Oceánu bouří v polární projekci. Černými čarami jsou naznačeny polohy nalezených riftů. Napravo je koncentrace thoria v Oceánu bouří zobrazená opět v polární projekci. Zdroj: Zdroj: 45th Lunar and Planetary Science Conference (2014).

Vulkanizmus na scéně

Zbývá tedy vysvětlit, kde se na Měsíci taková struktura vzala. K tomu velmi dobře posloužilo starší měření koncentrace thoria v kůře Měsíce sondou Lunar Prospector. Její gamaspektrometr totiž v oblasti Oceánu bouří našel rozsáhlé území, které obsahuje zvýšené množství horniny nazvané KREEP. Ta obsahuje hodně draslíku (K), vzácných zemin (REE – *Rare Earth Elements*) a fosforu (P). Kromě nich obsahuje také vysoké koncentrace uranu a thoria. Vznik KREEPu sahá až do období formování Měsíce, kdy vychládal prvotní magmatický oceán, kterým byl povrch mladého Měsíce pokrytý. Kvůli svému složení při tuhnutí prvotního magmatického oceánu nemohl KREEP krystalizovat a díky své nízké hustotě zůstal u povrchu.

Vysoký obsah radioaktivních prvků, které vyvíjely teplo, měl za následek částečné roztání pláště ležícího pod kůrou. To vedlo k tektonickým pohybům kůry a vulkanizmu. Ten pak byl zdrojem magmatu, které zaplnilo přilehlá moře. Při následném ochlazování litosféry došlo ke vzniku riftů na okraji území bohatého na KREEP. Jejich tvorbu doprovázel další vulkanizmus, který nová hluboká údolí vyplnil lávou, tak jak bylo zmíněno výše.

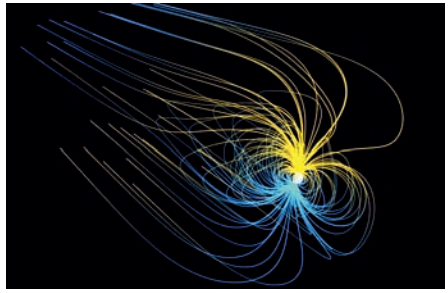
■ Jiří Hofman, 10. 10. 2014, AB 32/2014

Měsíc – *přirozený satelit Země, rotuje tzv. vázanou rotací (doba oběhu a rotace je shodná). Díky tomu stále vidíme přibližně jen přivrácenou polokouli Měsíce. Měsíc je prvním cizím tělesem, na kterém stanul člověk (Neil Armstrong, 1969, Apollo 11). Voda na Měsíci byla objevena v 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).*

Oceán bouří – *Oceanus Procellarum, největší z měsíčních moří, největší útvar na přivrácené straně Měsíce. Oceán bouří je patrný i pouhým okem.*

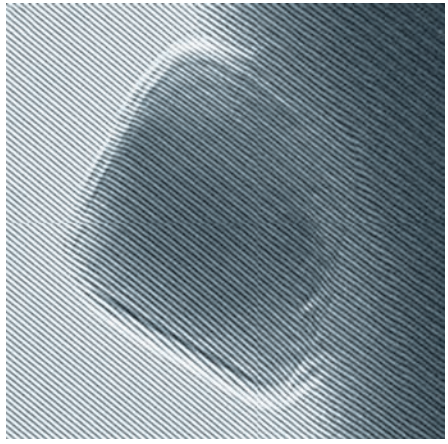
Bazalt – *čedič, zdaleka nejrozšířenější vyvřelá hornina. Skládá se především z bazického plagioklasu a pyroxenu, může obsahovat olivín a foidy nebo obyčejný křemen.*

Magnetit a zemské pole



Zemské magnetické pole má v těsném okolí Země přibližně tvar magnetického dipólu. Jeho střed ale není ve středu Země, je posunut přes 500 kilometrů a jeho osa je skloněná vzhledem k rotační ose Země o cca 10°. Ve větších vzdálenostech je pole deformováno naléhajícím slunečním větrem. Na denní straně se formuje typická rázová vlna a na noční straně ohon dlouhý přes sto zemských poloměrů. Zdroj: NASA, vizualizace Greg Shirah, Tom Bridgman.

Elektronový hologram magnetitového zrnka o velikosti 150 nm. V proužcích je uložena informace o fázi elektronových vln, z níž lze zrekonstruovat průběh magnetického pole v zrnku. Zdroj: Glasgowská univerzita.



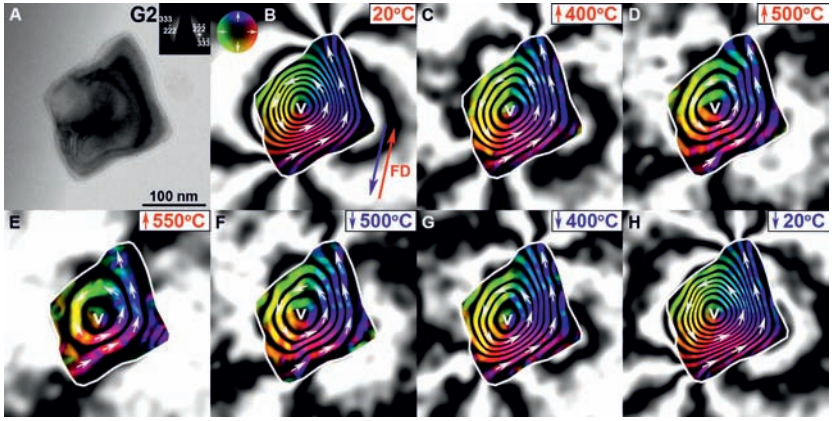
Magnetické pole Země je dynamickým systémem, který se mění v časových škálách od desítek sekund po miliony let. Nejkratší periodicitu mají projevy spojené s magnetickými bouřemi. Pokud k nám doletí oblak plazmatu se zamrzlým slunečním polem, rozvlní se zemské siločáry s periodou několika desítek sekund. Poprvé tento jev pozoroval Anders Celsius se svým asistentem Olofem Hiorterem v roce 1741, kdy zjistili, že v průběhu polární záře je střelka kompasu velmi neklidná a nepravidelně se komíhá. Jednodenní periodu mají změny magnetického pole způsobené rotací Země a její interakcí se slunečním větrem. Zemské magnetické póly nejsou na jednom místě, ale v průběhu dne opisují na zemském povrchu křivku podobnou nepravidelné elipse, jejíž delší rozměr je přibližně 80 kilometrů. Z ještě dlouhodobějšího hlediska dochází k postupné migraci severního magnetického pólu směrem k Sibiři. Tady jde dlouhodobě o přibližně 15 kilometrů za rok, v poslední době se tato rychlost zvyšuje. Možná se to zdá málo, ale za století jde o 1 500 kilometrů, a to je posun velmi podstatný. Nejdelší periodicitu má překlápění zemského dipólu. Z magnetického záznamu v sedimentech se ví, že k poslednímu překlopení došlo před 780 000 lety. Magnetický dipólový moment v současnosti klesá a další překlopení zemského dipólu se blíží. Dojde k němu v astronomicky krátké době, tedy řádově do 10 000 let. Může to být za tisíc roků, ale klidně může překlápění započít i v roce letošním. Modely zemského pole nejsou bohužel natolik dokonalé, aby bylo možné podobné jevy předpovídat. Skupina vědců z Glasgowské univerzity ukázala v roce 2016, že magnetické záznamy v sedimentech i ve vyvřelých horninách jsou mnohem trvanlivější, než jsme si dosud mysleli. Jejich výzkum by mohl otevřít cestu k podrobnějšímu zkoumání zemského magnetického pole a k pochopení procesů v zemském nitru.

Měření magnetického pole

Zemské magnetické pole lze měřit přímo, nejčastěji různými magnetometry, jejichž základem je malá cívka, v níž magnetické pole generuje elektrický proud. Magnetometry nejrůznějších typů jsou jak na sondách, tak na zemském povrchu. Například na rovníku je pole kolem 31 μT. Takový údaj ale nic nevypovídá o velikosti zemského magnetického dipólu. Magnetické pole směrem od povrchu ubývá se třetí moc-

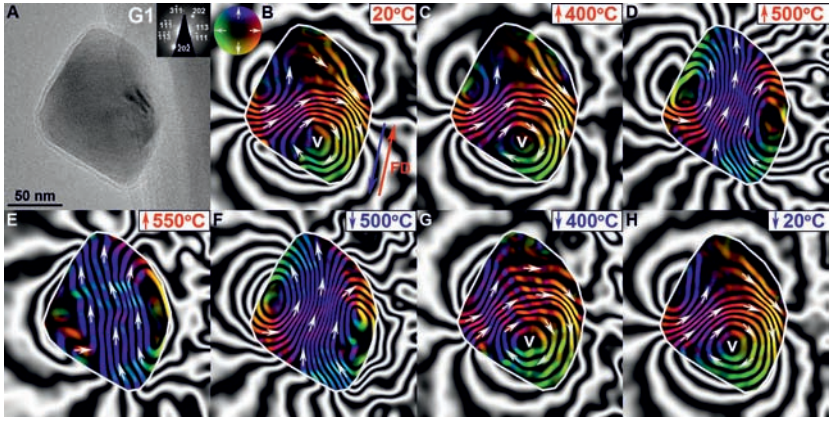
ninou vzdálenosti od středu Země. Pokud chceme porovnávat dipóly různých planet, musíme vynásobit pole na rovníku třetí mocninou poloměru planety. Tím dostaneme charakteristickou konstantu (tzv. dipólový moment) popisující velikost magnetického dipólu. Pro naši Zemi je jeho hodnota rovna $7{,}5\times10^{15}$ Tm^3. Největší dipólový moment, $1{,}6\times10^{20}$ Tm^3, má Jupiter.

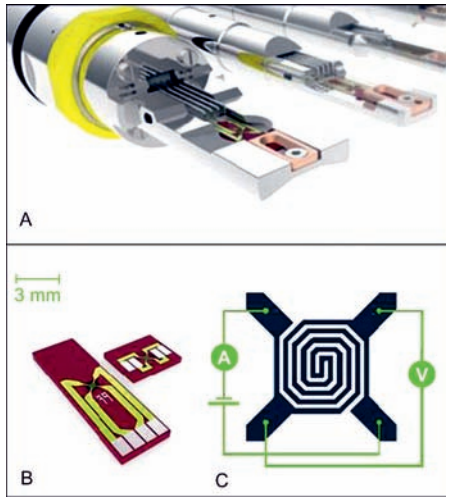
Chceme-li se dozvědět, jaké bylo magnetické pole Země v dávné minulosti, musíme využívat magnetický záznam uložený v horninách. Nejvhodnějšími jsou k tomuto účelu malá zrníčka magnetitu, chemicky Fe_3O_4. Magnetický záznam zde byl uložen zpravidla v době, kdy zrnko ochladlo pod tzv. Curieovu teplotu, například při chladnutí sopečného magmatu. Pro magnetit činí Curieova teplota 580 °C. Nad touto teplotou je magnetický záznam definitivně přemazán. Cenné jsou záznamy v podmořských sedimentech, kde jsou dlouhodobě netknuté vrstvy dostatečné tloušťky. Jak se ale dá magnetický záznam ze zrnka magnetitu přečíst? K nejúspěšnějším metodám patří elektronová holografie. Malé zrnko se umístí do elektronového mikroskopu a procházejí jím elektrony (metoda TEM). Obdobně jako u optické holografie se nezaznamenává jen počet prošlých elektronů, ale i fáze jejich hmotových vln. Vznikne tzv. elektronový hologram – soustava interferenčních proužků způsobených průchodem elektronů různými částmi struktury. Z nich se dá vyčíst fáze elektronových vln, a ta je mimořádně citlivá na magnetické pole. Analýzou elektronového hologramu se dá dopočíst magnetické pole v zrnku magnetitu (v rovině kolmé na směr pohybu elektronů).



Záznam rekonstrukce průběhu magnetických siločar z elektronového hologramu pro zrnko o průměru 250 nm při jeho ohřevu a následném ochlazení. Tvar magnetických siločar se nijak výrazně nezměnil. Zdroj: Sci Adv.

Záznam rekonstrukce průběhu magnetických siločar z elektronového hologramu pro zrnko o průměru 150 nm při jeho ohřevu a následném ochlazení. Tvar magnetických siločar se při ohřevu výrazně měnil. Po následném ochlazení se ale siločáry vrátily do původního obrazce a záznam je použitelný pro analýzu. Zdroj: Sci Adv.





Zařízení pro ohřev vzorku. (A) držák vzorku umístěný přímo v elektronovém mikroskopu. (B) detail čipu, jenž zajišťuje ohřev. (C) MEMS součástka ohřívající zrnko magnetitu. Zdroj: Sci Adv.

Magnetická doména – *oblast elementárních magnetických dipólových momentů, které jsou uspořádány jednotným způsobem. Magnetické domény v materiálu vznikají při teplotách nižších, než je Curieova teplota. Při vyšších teplotách je uspořádání elementárních magnetů chaotické.*

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.*

Glasgowské experimenty

Pro určování průběhu zemského magnetického pole v minulosti jsou ideální malá zrnka, v nichž je jediná magnetická doména. Taková zrnka mají rozměry do 80 nanometrů a bohužel jich je v horninách jen velmi málo. Pole v těchto zrnkách je homogenní v celém průřezu zrnka. Mnohem častěji mají zrnka magnetitu rozměry 0,1 až 10 μm. V nich ale magnetické pole vytváří různé zvlněné obrazce nebo víry. Dosud nebylo jasné, zda má smysl se pokoušet z těchto obrazců rekonstruovat zemské pole, tedy nakolik je záznam stabilní a neměnný. Tým vědců pod vedením Trevora Almeida zahříval zrnka magnetitu různých velikostí až na teplotu těsně pod Curieovou teplotou a sledoval, zda se magnetický záznam u středně velkých zrn mění. Výsledky jsou překvapivé. U zrna velkého 250 nm se záznam s teplotou neměnil, a to ani při ohřevu, ani při následném poklesu teploty. Jiná situace nastala u menšího zrna o velikosti 150 nm. Při ohřevu na teplotu 550 °C (hodnota Curieovy teploty je 580 °C) došlo ke změně směru i tvaru magnetických siločar. Ale při následném ochlazení se magnetické siločáry vrátily do původního tvaru! Experiment prokázal, že magnetický záznam je stabilní i při ohřevu až těsně pod Curioeovu teplotu a po zpětném ochlazení je použitelný k rekonstrukci magnetického pole Země. Pokud jsou experimenty správné, bude možné využívat i hojněji se vyskytující zrna střední velikosti.

Závěr

Samozřejmě, že laboratorní podmínky nejsou stejné jako podmínky v exteriéru. Tým zahříval zrna na speciálním držáku s elektronickým čipem, na kterém docházelo k ohřevu. V přírodě mohou ohřev a chladnutí trvat velmi dlouhou dobu, na rozdíl od minut v laboratorním experimentu, a je otázkou, zda i za takových podmínek zůstane magnetický záznam v zrnku nezměněný. K destrukci záznamu mohou přispět také chemické procesy. Pokud se ale prokáže, že je záznam v zrnkách střední velikosti stabilní, bude možné rekonstruovat mnohem přesněji historii překlápění zemského dipólu, tektoniku zemských desek i polohu zemských magnetických pólů v dávné minulosti.

■ Petr Kulhánek, 20. 5. 2016, AB 19/2016

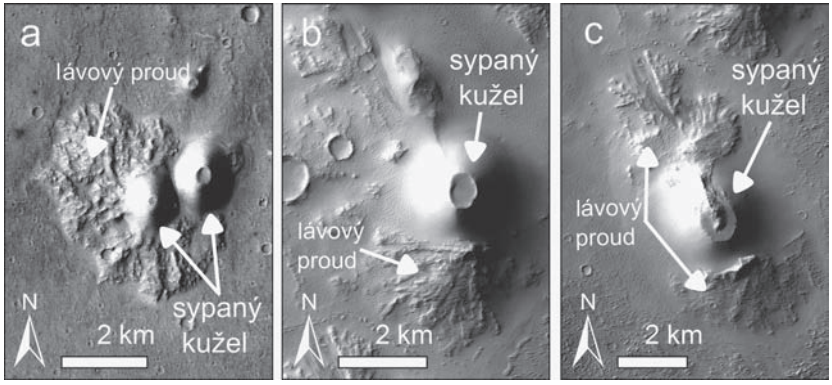
Sypané kužele na Marsu

Mars, podobně jako Země, je těleso, které významně utvářela sopečná činnost. Ta byla na počátku historie planety rozprostřena globálně, nicméně s postupem času se lokalizovala do dvou hlavních sopečných provincií *Tharsis* a *Elysium*. V těchto oblastech je možné spatřit jak desítky kilometrů vysoké štítové sopky (např. *Olympus* či *Elysium Mons*), tak i stovky kilometrů dlouhé lávové proudy či rozsáhlé sopečné pláně. Vyjma velkých sopečných těles se za posledních několik desetiletí podařilo v těchto místech objevit i řadu menších sopečných útvarů dokládajících bohatou historii sopečné činnosti. Jedním z objevů jsou i sopky vznikající postupným ukládáním vyvržených úlomků magmatu do okolí kráteru – tzv. sypaných kuželů – nejhojnějšího druhu sopek na Zemi. Při detailnějším pohledu na marsovské sypané kužele se zjistilo, že jejich tvary jsou nápadně odlišné od pozemských kuželů. Je vůbec možné porovnávat útvary na různých planetách?

Mars – *rudá planeta se dvěma malými měsíci, Phobosem a Deimosem, je v pořadí čtvrtým tělesem Sluneční soustavy. Povrch planety je pokryt načervenalým pískem a prachem. Barva je způsobena vysokým obsahem železa. Načervenalá barva celé planety jí dala jméno (Mars je bůh válek). Na povrchu se nacházejí obrovské sopky, z nichž ta největší, Olympus Mons, je 24 km vysoká a její základna je 550 km široká. Na vrcholu je kráter o průměru 72 km. Pro Mars jsou charakteristické systémy kaňonů, které mohly vzniknout pohyby kůry. Na jejich původ ale existují i jiné teorie. Snímky ze sond ukazují místa, kudy dříve tekla voda. Zdá se, že Mars byl dříve vlhčí a teplejší, než je dnes.*

Sypané kužele na Zemi

Existence sypaných kuželů na povrchu Marsu byla naznačena již v 70. letech 20. století, a to na základě snímků ze sond Viking I a II. Nicméně tehdejší rozlišení fotografií neumožňovalo spatřit takové detaily povrchu, které by tato pozorování jasně potvrdila a která by umožnila detailnější výzkum jejich tvarů. Až s nástupem nové generace planetárních sond (například Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Express) snímající povrch Marsu s rozlišením od několika desítek centimetrů až metrů na pixel se povedlo objevit oblasti, kde bylo možné sypané kužele prokazatelně identifikovat a detailně prozkoumat jejich tvary. Jednou z těchto objevených oblastí je i sopečné pole *Ulysses Colles* ležící v severozápadní části *Tharsis*. Pole *Ulysses Colles* se skládá z 29 sypaných kuželů v různém stupni degradace. Některé sypané kužele jsou téměř zcela zničené erozí, jiné vypadají velmi dobře zachovalé. Ke všemu jsou pro tuto oblast

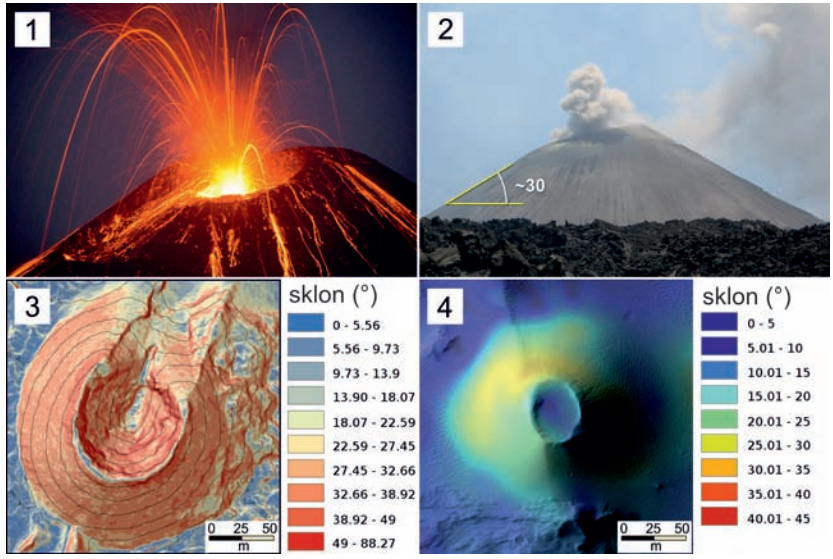


Fotografie ukazují pravděpodobné marsovské sypané kužele s doprovodnými lávovými proudy a) Dvojice sypaných kuželů v oblasti Hydraotes Colles ležících na starším lávovém proudu. b) Sypaný kužel s dobře rozpoznatelným centrálním kráterem a lávovým proudem v oblasti Ulysses Colles. c) Další sypaný kužel v oblasti Ulysses Colles s dobře rozpoznatelným lávovým proudem začínající v centrálním kráteru. Všechny snímky byly pořízeny za pomoci kamery CTX (Context Camera). Zdroj: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

Sypaný kužel – *zvláštní druh malé sopky, která vzniká na povrchu tělesa jako výsledek odplyňování magmatu a jeho následné fragmentace. Na povrchu Země jde o nejrozšířenější druh sopečných těles. Sypané kužele jsou většinou méně než 2 km široké kužele, které se tyčí do výšky prvních stovek metrů. Tvoří je nahromaděná struska, jejíž množství na Zemi často postačuje k dosažení hodnoty sypného úhlu, což má za následek, že jejich svahy bývají obvykle okolo 30° strmé.*

dostupná topografická data ve vysokém rozlišení, na jejichž základě bylo možné určit jak velikost kuželů, tak i výšku a sklony jejich svahů. Zjistilo se, že marsovské sypané kužele jsou přibližně 2,6krát širší, až šestkrát vyšší a o jeden až dva řády objemnější než pozemské sypané kužele. A i přes to, že marsovské sypané kužele jsou větší, vyšší a objemnější, jejich svahy jsou méně strmé, než je obvyklé v případě Země.

Na první pohled by se dalo totiž předpokládat, že sypané kužele na Zemi i na Marsu budou shodné, jelikož na obou planetách vznikají stejným procesem – trháním magmatu (tzv. fragmentací), vyvrhováním těchto úlomků do okolního prostředí a jejich postupným ukládáním v okolí místa erupce. I když o magmatu většinou smýšlíme jako o kapalině, magma je ve skutečnosti směsí různých fází. Vyjma roztavených hornin se v magmatu nachází pevné částice v podobě krystalů různých minerálů i bublinky tzv. sopečných plynů. Většinou se jedná o vodní páru, oxid uhličitý, různé oxidy síry, fluorovodík, chlorovodík, oxid uhelnatý, metan a další plyny. A právě sopečné plyny jsou zodpovědné za to, že je magma tráno. Jak totiž magma stoupá k povrchu, snižuje se tlak nadložních hornin (tzv. litostatický tlak) působící na taveninu. Pokles tlaku časem umožní v magmatu vznik nepatrných bublinek plynů. Ty se společně mohou slučovat do větších bublin, nicméně významným důvodem růstu jejich objemu je další pokles tlaku s pokračujícím výstupem magmatu. Pro lepší názornost si to můžeme představit jako bublinky v otevřené minerálce. Ve spodní části lahve jsou bublinky menší než blíže u jejího hrdla. Blízko pod povrchem pak začnou bublinky plynu v magmatu převažovat, a tím dochází k dalšímu poklesu hustoty vystupující směsi, což urychluje její výstup směrem k povrchu. Při dosažení povrchu plyny expandují velkou rychlostí do okolní atmosféry. Pokud množství plynu v magmatu přesáhne asi 75 objemových procent, začne ce-



1: Noční snímek s dlouhou expozicí zachycuje nízkoenergetickou sopečnou erupci strombolského typu na Anak Krakatoa. Balistické dráhy vyvržených úlomků magmatu jsou dobře patrné, stejně jako následné svahové pohyby po dopadu. 2: Příklad sypaného kužele na ostrově Barren poblíž Indie, jehož svahy dosahují sypného úhlu pro strusku. 3: Mapa sklonu svahů sypaného kužele Puu Kapanaha na Havaji. Jak je patrné, úhel 30° je dosažen ve většině části kužele. 4: Sypaný kužel na Marsu v oblasti Ulysses Colles takto příkrého sklonu svahů nedosahuje. Zdroj: Brož a kolektiv.

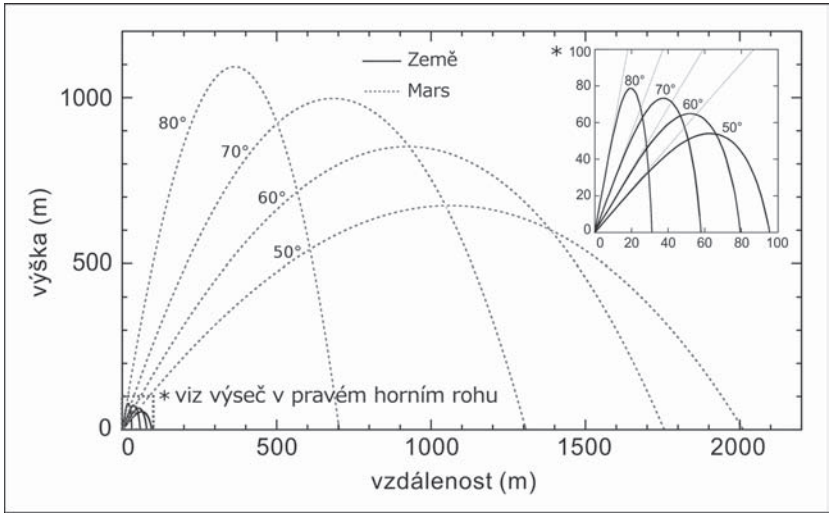
listové magma trhat a unikající plyn pak s sebou do okolní atmosféry nese milimetrové až deseticentimetrové úlomky magmatu. Ty během letu chladnou, čímž vzniká tzv. struska. Tento proces magmatického odplyňování způsobuje slabé až středně silné sopečné exploze, během kterých je struska na Zemi většinou vyvržena do vzdálenosti desítek až stovek metrů. Let strusky se dá popsat balistickou křivkou, kdy vyvržený úlomek má na počátku rychlost (na Zemi většinou rychlost desítek m/s), o kterou postupně přichází interakcí s atmosférou.

Pokud je magma dostatečně bohaté na plyny, takže k trhání a následnému vyvrhování úlomků do okolí dochází po delší čas (hodiny, dny, měsíce), na povrchu vznikne sypaný kužel. Sypané kužele jsou sopky o průměrné šířce 800 metrů a výšce 150 metrů (nicméně v některých případech mohou dosáhnout šířky až 2 kilometrů a výšky až 450 metrů). Jejich přesná velikost je závislá na množství vyvrženého materiálu, a proto se může značně lišit mezi jednotlivými kužely. Množství strusky bývá v případě nově vzniklých kuželů zpravidla dostatečné k tomu, aby svahy kužele dosáhly kritické hodnoty sypného úhlu, jenž je okolo 30°. Dosažení sypného úhlu zapříčiní, že další vyvrhovaná struska dopadá na příkrý svah, na kterém se neudrží. Po dopadu tak dochází k drobným sesuvům a růstu kužele do šířky vlivem svahových pochodů, nikoliv tedy vlivem balistické distribuce, která je zodpovědná za vyvrhování částic do okolí kráteru. Na Zemi tak s pokračujícím časem není podstatné, kam částice přesně dopadne, protože dopadne na příkrý svah, kde její dopad způsobí drobný sesuv.

Struska – *sopečná hornina tmavé barvy s výraznou pórovitou strukturou vzniklou vlivem úniku a expanze sopečných plynů z magmatu během jeho odplynění.*

Litostatický tlak – *tlak, kterým působí nadložní horniny na vrstvu hornin ležících pod nimi.*

Magma – *přírodní tavenina vznikající v hlubokých částech kůry nebo pláště planet. Jedná se o směs roztavených minerálů, pevných krystalů a rozpuštěných sopečných plynů. Může mít různé chemické složení a teplotu v závislosti na zdroji, ze kterého vzniklo. Označení magma se používá tehdy, pokud je tavenina pod povrchem, jakmile dosáhne povrchu, využívá se termín láva.*



Výpočet rozdílu v doletu vrženého úlomku na Zemi a na Marsu pro stejné počáteční parametry (rychlost vrhu 100 m/s, hustota úlomku 850 kg/m^3, velikost částice 4 cm), ale rozdílný atmosférický tlak a gravitační zrychlení. Částice na Marsu jsou schopny doletět do mnohem větších vzdáleností než na Zemi. Zdroj: Brož a kolektiv.

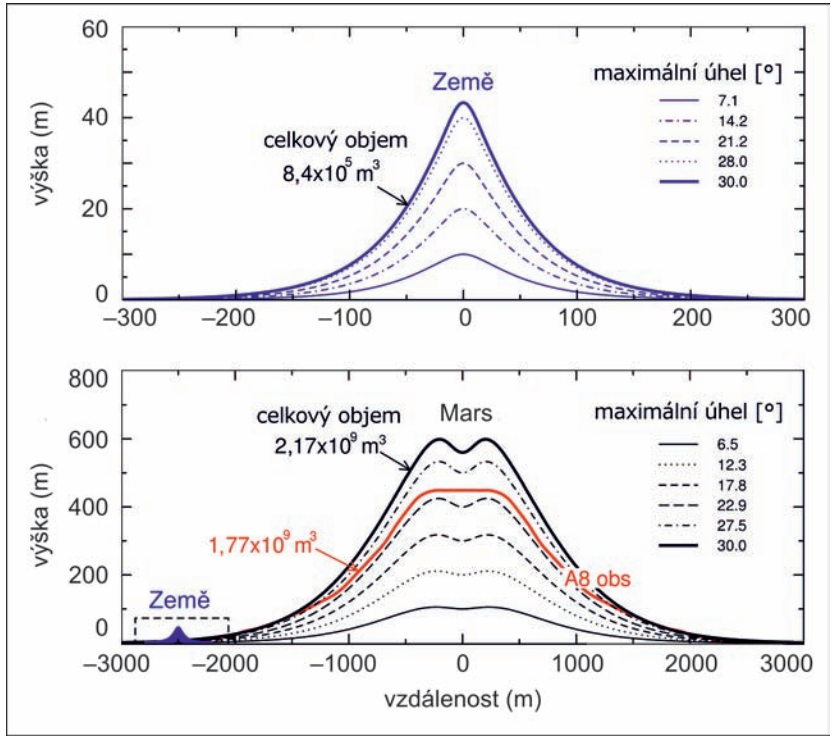
Sypané kužele na Marsu

Jak je tomu v případě Marsu? Je proces formování sypaných kuželů na této planetě stejný? Výzkum sopek odhalil, že marsovské kužele jsou větší a vyšší než pozemské, ale s méně strmými sklony svahů, a to i přes to, že je tvoří mnohem větší objem vyvrženého materiálu než kužele na Zemi. Sklony mají

Balistická dráha – *dráha předmětu šikmo vrženého v přítomnosti tíže a atmosféry. Při nulové interakci s atmosférou je balistická křivka totožná s parabolou. V přítomnosti atmosféry je balistická křivka složitější a počítá se většinou za pomoci numerických simulací na počítači.*

dokonce tak nízké hodnoty, že i přes neznalost, jestli je sypný úhel závislý či nezávislý na gravitaci, je možné říci, že leží hluboko pod jeho hodnotou. Jak je to možné?

K nalezení odpovědi je potřeba se podívat na podmínky panující na povrchu Marsu. Tato planeta má ve srovnání se Zemí na povrchu přibližně třetinové gravitační zrychlení a její atmosférický tlak je přibližně 160krát nižší. Tyto rozdíly způsobují, že vržené částice jsou schopny doletět dále od zdroje a rozprostřít se na větší ploše, než na Zemi. Rozdíl je značný. Představme si pro ilustraci 4 cm velkou částici o hustotě 850 kg/m^3, kterou exploze vyvrhne pod úhlem 50° od vertikály rychlostí 100 m/s. Na Zemi doletí v ideálním případě těsně pod 100 metrů, na Marsu až do vzdálenosti dvou kilometrů! Je patrné, že na Zemi se budou vyvržené úlomky hromadit v blízkosti místa erupce. To znamená, že relativně malý objem (řádově 10^5 m^3) vyvrženého materiálu je schopen dosáhnout sypného úhlu, který je zodpovědný za svahové sesuvy na svazích kužele. Oproti tomu k dosažení sypného úhlu na Marsu je potřeba množství vyvrženého materiálu dramaticky zvýšit. Oblast, na kterou se materiál ukládá, odpovídá ploše kruhu, tedy druhé mocnině poloměru (πr^2). Dvacetinásobný nárůst vzdálenosti představuje čtyřsetnásobný nárůst plochy. Proto je v případě Marsu k dosažení sypného úhlu potřeba mnohem více vyvrženého materiálu (řádově 10^9 m^3). A takové množství materiálu nebylo k dispozici. Vulkanizmus tvořící sypané kužele je zpravidla způsoben jen malým množstvím magmatu, které nebylo schopno poskytnout potřebný objem strusky.



Model růstu sypaného kužele na Zemi (horní panel) a na Marsu (dolní panel) do doby dosažení sypného úhlu (30°). Čárkovaná čára ukazuje jednotlivé stupně růstu pro různé úhly. K dosažení sypného úhlu je na Marsu potřeba až o čtyři řády více materiálu než v případě Země. Zdroj: Brož a kolektiv (2014).

Zatímco jsou tvary sypaných kuželů na povrchu Země řízeny převážně svahovými pohyby, v pří-

padě Marsu to tak není. Jejich tvar odpovídá balistické distribuci. Dá se tedy vytvořit numerický model, který za pomoci sledování balistických drah zrekonstruuje vznik a vývoj kužele. To, jak sypaný kužel na povrchu Marsu vypadá, záleží na několika parametrech: na tlaku okolního vzduchu a jeho odporu, na velikosti a hustotě vyvržených částic, na rychlosti a úhlu vyvržení a na gravitaci. Z těchto parametrů jsou jen dva neznámé: velikost částic a rychlost jejich vyvržení. Kombinací různých řešení se dá vyvodit, které dvě hodnoty nejlépe vyhovují pozorovaným tvarům, a tak zjistit, jaká musela být rychlost vyvržení částic a jejich velikost. Aplikací na marsovské kužele lze určit, že částice musely být vyvrženy rychlostí přibližně dvakrát větší, než je tomu na Zemi (tedy rychlostí ~92 m/s) a že musely být přibližně desetkrát menší (tedy o velikosti ~4 mm). Tento rozdíl v rychlostech a velikosti částic je pravděpodobně způsoben výraznější fragmentací magmatu na Marsu následkem nižšího atmosférického tlaku a tedy rychlejšího rozpínání unikajících bublin sopečných plynů.

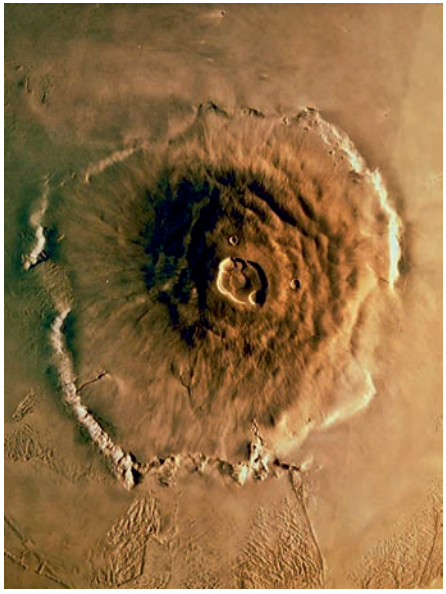
Strombolský typ erupce – *klidná sopečná erupce s pravidelným vyvrhováním sopečných úlomků menší velikosti, které zpravidla vychladnou ještě před dopadem na zem. Tento typ vulkanické aktivity získal název podle sopky na ostrově Stromboli v Tyrhénském moři. Ostrov patří Itálii. Poslední velké sopečné erupce proběhly v letech 1919 a 1930. K menším erupcím došlo v letech 2002 a 2003. Zvýšená aktivita byla zaznamenána také v roce 2007. Sopka je tedy stále aktivní.*

Závěr

Abychom se ale vrátili zpět k původní otázce. Můžeme tedy mezi sebou porovnávat podobné útvary z rozdílných světů? Odpovědí je opatrné ano. Vždy bychom ale měli zvažovat, zda rozdílné podmínky neovlivní výsledný tvar tělesa. V lepším případě jen nepatrně (jako například, když řidší atmosféra neodvádí teplo tak dobře, což umožňuje lávovým proudům na Marsu dotéci dále než na Zemi), v tom horším zcela zásadně. Kdybychom totiž chtěli hledat sypané kužele na povrchu Venuše, nejspíše bychom neuspěli. Tlak atmosféry je tam natolik vysoký, že většinou neumožňuje odplyňování magmatu a vznik nízkoenergetických sopečných erupcí potřebných ke vzniku sypaných kuželů. Na druhou stranu, při snaze objevit sypané kužele na Merkuru či Měsíci, bychom se také dočkali zklamání. Absence atmosféry způsobuje extrémní expanzi plynů vedoucí k rozprostření vyvrženého materiálu na tak velkou plochu, že nevznikne strmý centrální kužel, ale do široka rozprostřený lem strusky kolem centrálního kráteru. Je tedy pravděpodobné, že sypané kužele jsou a budou v naší Sluneční soustavě pouze doménou Země a Marsu. A jak vidno, na každém z těchto světů si pod názvem sypaný kužel musíme představit něco trochu jiného.

■ **Petr Brož, 6. 3. 2015, AB 10/2015**

Olympus Mons, sopka třikrát vyšší než Mont Everest s rozměry Francie. Zdroj: NASA.



Dvoudynamový Jupiter

Jupiter – *největší a nejhmotnější ($1{,}9\times10^{27}$ kg) planeta Sluneční soustavy má plynokapalný charakter a chemické složení podobné Slunci. Se svými mnoha měsíci se Jupiter podobá jakési „sluneční soustavě" v malém. Jupiter má, stejně jako všechny obří planety, soustavu prstenců. Rychlá rotace Jupiteru (s periodou 10 hodin) způsobuje vydouvání rovníkových vrstev a vznik pestře zbarvených pásů. Charakteristickým útvarem Jupiterovy atmosféry je Velká červená skvrna, která je pozorována po několik století. Atmosféra obsahuje kromě vodíku*

Konec sedmdesátých let byl počátkem novodobého průzkumu největší planety Sluneční soustavy. Při průletu sondy Voyager 1 kolem planety byly poprvé v roce 1979 pořízeny detailní snímky rozsáhlých turbulencí v atmosféře. Takové děje nikdo nečekal a kolotající atmosféra se stala jedním z nejpůsobivějších procesů, které byly na Jupiteru pozorovány. Na mnohé otázky, které se díky podrobným záznamům z kosmických lodí tehdy vyrojily, hledáme odpovědi dodnes.

Magnetosféra Jupiteru

Magnetosféra největší planety Sluneční soustavy dosahuje až k dráze Saturnově. V heliosféře jde po Slunci o nejrozlehlejší oblast ovlivňovanou magnetickým polem jediného tělesa. Existence Jupiterovy magnetosféry byla odvozena z rádiových pozorování již na konci padesátých let minulého století a v roce 1973 byla magnetosféra poprvé přímo pozorována kosmickou sondou Pioneer 10. Později, na počátku devadesátých let, vlétla sonda Ulysses, určená především k průzkumu heliosféry, do Jupiterovy magnetosféry v dosud největší vzdálenosti od Jupiteru, než v jaké se to podařilo předchozím kosmickým lodím. Čelo rázové vlny bylo zaznamenáno již ve vzdálenosti 113 Jupiterových poloměrů. Kolísání rozsahu magnetosféry bylo tehdy přičítáno měnícímu se vlivu Slunce, přesněji rozdílné intenzitě slunečního větru oproti obdobím, v nichž prolétaly kolem Jupiteru sondy Pioneer a Voyager. Pomocí sondy Ulysses byl objeven plazmový torus, jehož původcem jsou vulkány na měsíci Io. Plazmoidy putující v ochranném prostoru Jupiterovy magnetosféry jsou zřetel-



Rozevláté krajkoví Jupiterovy oblačnosti poblíž rovníku zachytila ze vzdálenosti 5 milionů kilometrů už sonda Voyager 1, a to dne 1. března 1979. Zdroj: NASA.

né a nepříliš pozměněné ještě ve vzdálenosti 2 500 Jupiterových poloměrů. To je dokonce dále, než činí vzdálenost Země od Slunce.

Vnitřní část magnetosféry, v níž se pohybují galileovské měsíce, je s pohybem měsíců provázána. Ionizovaná látka, která se z nich uvolňuje do kosmického prostoru, putuje podél magnetických siločar a může se dostávat až k magnetickým pólům Jupiteru. Současně toto plazma bombarduje povrchy měsíců a mění je podobně, jako počasí na Zemi postupně přetváří povrch naší planety. Na Jupiteru byly pozorovány polární záře, v nichž bylo zřetelné ukotvení magnetických trubic spojujících aurorální ovál s jednotlivými blízkými měsíci. Rozměry Jupiterovy magnetosféry jsou ve srovnání se Zemí řádově mnohem větší. Magnetický dipólový moment Jupiteru je 18 000krát větší než zemský, dosahuje $1{,}56\times10^{20}$ T m^3 a pole na rovníku je 430 μT. Magnetická osa je skloněná vůči rotační ose o 10°. Povrchové vrstvy planety rotují z planet Sluneční soustavy nejrychleji. Den na Jupiteru trvá jen 9 hodin a 55 pozemských minut. Rovníkový průměr Jupiteru činí 143 000 kilometrů.

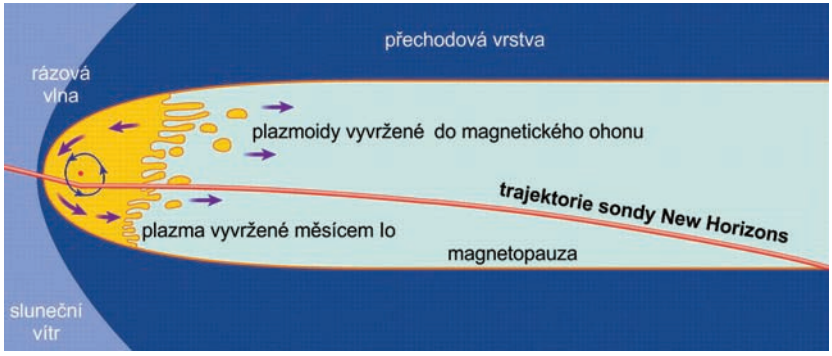
I když je Jupiter téměř ze tří čtvrtin složen jen z vodíku, tlak uvnitř takového tělesa je natolik veliký, že v hloubi kolem 10 000 kilometrů by se vodík měl chovat jako kov. V takovém stavu se na Zemi vodík vůbec nevyskytuje. Pokud má Jupiter uprostřed kamenné jádro, nemělo by být v průměru větší než jen 25 000 kilometrů. Původcem rozsáhlé magnetosféry by tedy měla být poměrně rychle rotující koule kovového vodíku o průměru zhruba 100 000 kilometrů s drobným kamenným jádrem, pokrytá směsí vodíku a helia.

a helia také metan, čpavek a vodní páry. Teplota pod oblaky směrem ke středu roste. Na vrcholcích mraků je −160 °C, o 60 km hlouběji je přibližně stejná teplota jako na Zemi. Proudy tekoucí v nitru (v kovovém vodíku) vytvářejí kolem Jupiteru silné dipólové magnetické pole. Elektrony kroužící kolem siločar tohoto pole vysílají charakteristické záření (tzv. cyklotronní emisi), které je natolik silné, že Jupiter slouží jako standard rádiového signálu pro testování přístrojů na různých sondách. Na Jupiteru také byly, obdobně jako na Zemi a Saturnu, pozorovány rozsáhlé polární záře.

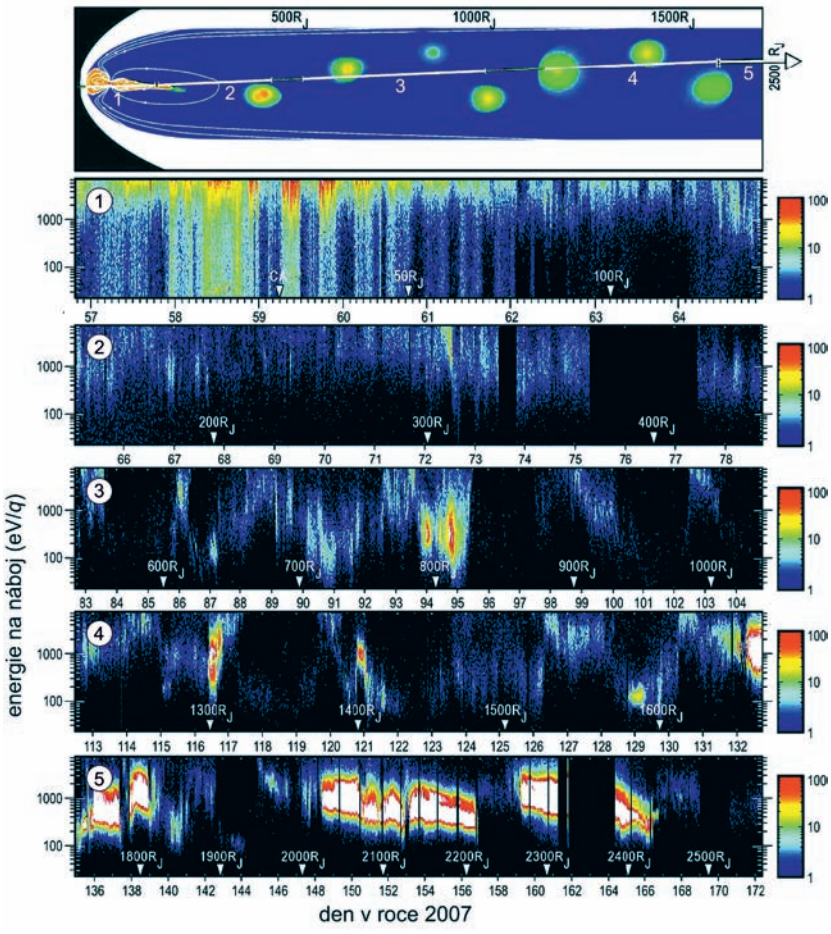
Voyager – *dvojice amerických sond, která startovala v roce 1977 pomocí nosných raket Titan/Centaur. V roce 1979 proletěly obě sondy kolem Jupiteru, v roce 1980 (Voyager 1) a 1981 (Voyager 2) kolem Saturnu. Voyager 2 pokračoval dále k Uranu (1986) a Neptunu (1989). Obě sondy se zásadním způsobem zasloužily o poznání Sluneční soustavy a dnes jsou nejvzdálenějšími objekty, které lidstvo vyslalo do vesmíru.*

Numerické simulace

Dřívější numerické simulace nedokázaly dospět k výsledkům, které by odpovídaly charakteristikám zjištěným pomocí kosmických sond. Modely se lišily zejména v intenzitě pole a také ve výsledném tvaru Jupiterovy magnetosféry. Nejpravděpodobnější příčina byla v přílišném zjednodušení modelů. Například vnitřní struktura Jupiteru byla modelována jako slupková. Každá



Plazma pocházející převážně z měsíce Io vyplňuje bezprostřední okolí Jupiteru a oblast, kterou zaujímá, je tvarována magnetosférou. Na Jupiterově noční straně je plazma strháváno do magnetického ohonu a ve formě obřích plazmoidů se magnetickým ohonem od Jupiteru vzdaluje. V diagramu je zakreslena dráha sondy New Horizons. Zdroj: Science.



Rozlehlost Jupiterova magnetického ohonu, a tím i intenzitu magnetosféry, dokládá měření aparaturou SWAP (Solar Wind Analyzer Around Pluto) na sondě New Horizons z roku 2007. Čelo magnetosféry bylo zachyceno ve vzdálenosti 75 Jupiterových poloměrů. Patrné jsou plazmoidy putující v Jupiterově magnetosféře. V horním pruhu diagramu je znázorněna dráha sondy New Horizons s vyznačenými úseky měření. Záznam s číslem 1 byl pořízen při největším přiblížení sondy k Jupiteru. Barva označuje intenzitu signálu. Zdroj: Science.

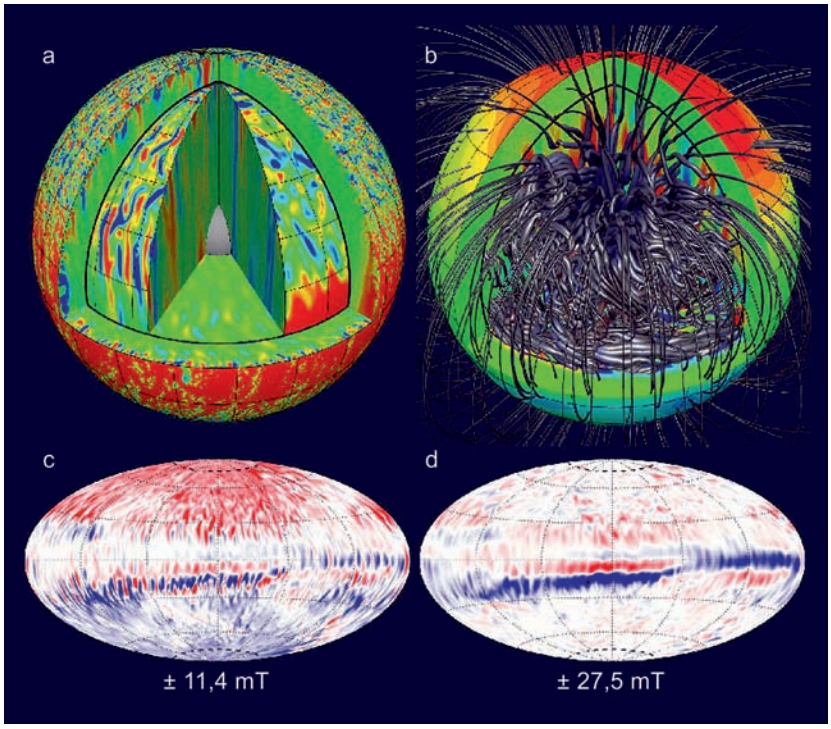
slupka byla počítána zvlášť a následně byly výsledky vzájemně kombinovány a skládány. Slupková struktura ovšem předpokládá, že na rozhraní koncentrických slupek se skokově mění vlastnosti látky, z níž je slupka složena. Vnitřní kovová vodíková koule byla obklopena plynnokapalným nekovovým pláštěm.

Skupina fyziků z Institutu Maxe Plancka v Göttingenu, vedená Johannesem Wichtem, vytvořila nový model vnitřní struktury Jupiteru, který vychází z předpokladu velmi pozvolna se měnících vlastností prostředí od povrchu planety až do hlubin, v nichž začíná být z vodíku vodivý kov. Model byl následně zpracováván superpočítačem Hydra v Garchingu, který je v provozu od roku 2012. Výpočty nové vnitřní struktury Jupiteru, a z ní vyplývající struktury magnetosféry, zabraly Hydře šest měsíců. Výsledek publikovaný v červenci 2014 je ale nad očekávání překvapivě velmi podobný tomu, co bylo postupně od sedmdesátých let naměřeno pomocí kosmických sond. Velmi silné pole, které tvarem odpovídá dipólovému poli známému například ze Země, je skryto hluboko pod povrchem Jupiteru, ve vrstvách, které jsou poměrně ustálené a jejichž vlastnosti se v čase nejspíše příliš nemění. Simulace nadto ale nabídla ještě druhé slabší dynamo, které je ukotveno v přechodové vrstvě mezi kovem a nekovem v oblasti rovníku.

Tento druhý dosud neočekávaný generátor magnetického pole je unášen silným východním prouděním podpovrchových vrstev, jejichž

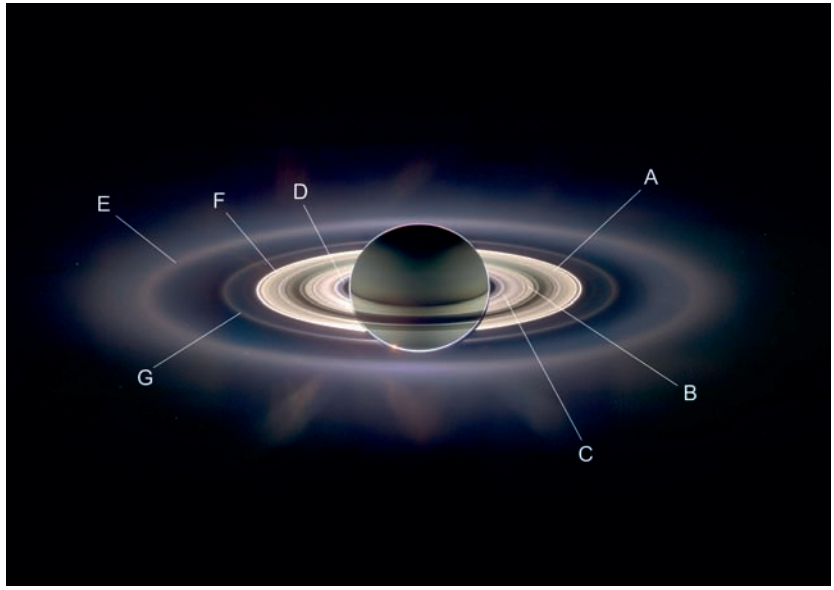
pohyb je patrný v oblačných pásech rovníkové zóny. Chladná povrchová oblačnost je příliš řídká a tedy současně i málo vodivá na to, aby dokázala generovat pozorované magnetické pole. V hloubce přibližně 8 000 kilometrů jsou již ale vlastnosti plazmatu schopné tekutinové dynamo nastartovat. Klíčové jsou dostatečná velikost fluktuací rychlostního pole a hodnota elektrické vodivosti. V současné době jde o první model vnitřní struktury obří planety, jehož výsledky se s dostatečnou přesností shodují s dosavadními pozorováními. Podobné numerické modelování by mohlo v budoucnu pomoci vysvětlit děje, které byly pozorovány také u Saturnu, Uranu a Neptunu.

■ Ivan Havlíček, 3. 10. 2014, AB 31/2014



Zobrazení proudění a magnetického pole Jupiteru podle numerické simulace na superpočítači Hydra. Na obrázku a) je znázorněna azimutální složka toku na vnějším povrchu a v pravé části řezu. Radiální složka toku je vykreslena na rovníkové a na levé části řezu. Na povrchu vnitřní vložené slupky je zviditelněno slabší proudění ve větší hloubce. Pravá část sférického řezu zobrazuje azimutální složku toku zvětšenou 10krát, levá část zobrazuje radiální složku toku a je tentokrát navýšena jen 2,5krát. Obrázek b) zobrazuje radiální magnetické pole na vnějším povrchu a v levém řezu. Povrchové pole je navýšeno desetinásobně. Pravý a horizontální řez (úroveň −10°) ukazují azimutální pole. Vzájemná tloušťka magnetických siločar měřítkově odpovídá třetí odmocnině intenzity magnetického pole. Obrázky c) a d) zobrazují radiální a azimutální magnetické pole v úrovni přechodové vrstvy na poloměru 0,87 R0, která je také vyznačena na obrázcích a) a b) sítí tmavě šedých linií. Červená (modrá) barva zde značí vzestupnou (sestupnou) nebo východní (západní) orientaci pole. Zdroj: Thomas Gastine.

Ohlédnutí za misí Cassini



Značení Saturnových prstenců. Zdroj: NASA/Cassini.

Americká sonda Cassini startovala z mysu Canaveral ve špici nosné rakety Titan v roce 1997. Po dlouhé pouti čítající dvě gravitační asistence Venuše, opětovný průlet okolo Země, a pak ještě kolem Jupiteru, konečně 1. července 2004 zaparkovala na oběžné dráze okolo Saturnu. Takový manévr nutně vyžadoval velké zpomalení sondy, a toho bylo možno dosáhnout jen při těsném průletu nad povrchem planety. Tehdy zvolená trajektorie byla ale v největším přiblížení nastavena tak, že před těsným průletem sonda „nadlétla“ rovinu prstenců v mezeře mezi F a G, tedy ještě než se mohla nebezpečně přiblížit k hustým vnitřním částem začínajícím okrajem prstence A, prosvištěla nad Saturnem ve výšce necelé čtvrtiny jeho průměru a opět se mezi prstenci G a F zanořila pod jejich rovinu. Všechny pozdější dráhy v aktivní fázi života sondy byly nastaveny tak, aby se sonda Cassini už do tak těsné blízkosti k prstencům nedostávala a udržovala si od nich bezpečný odstup.

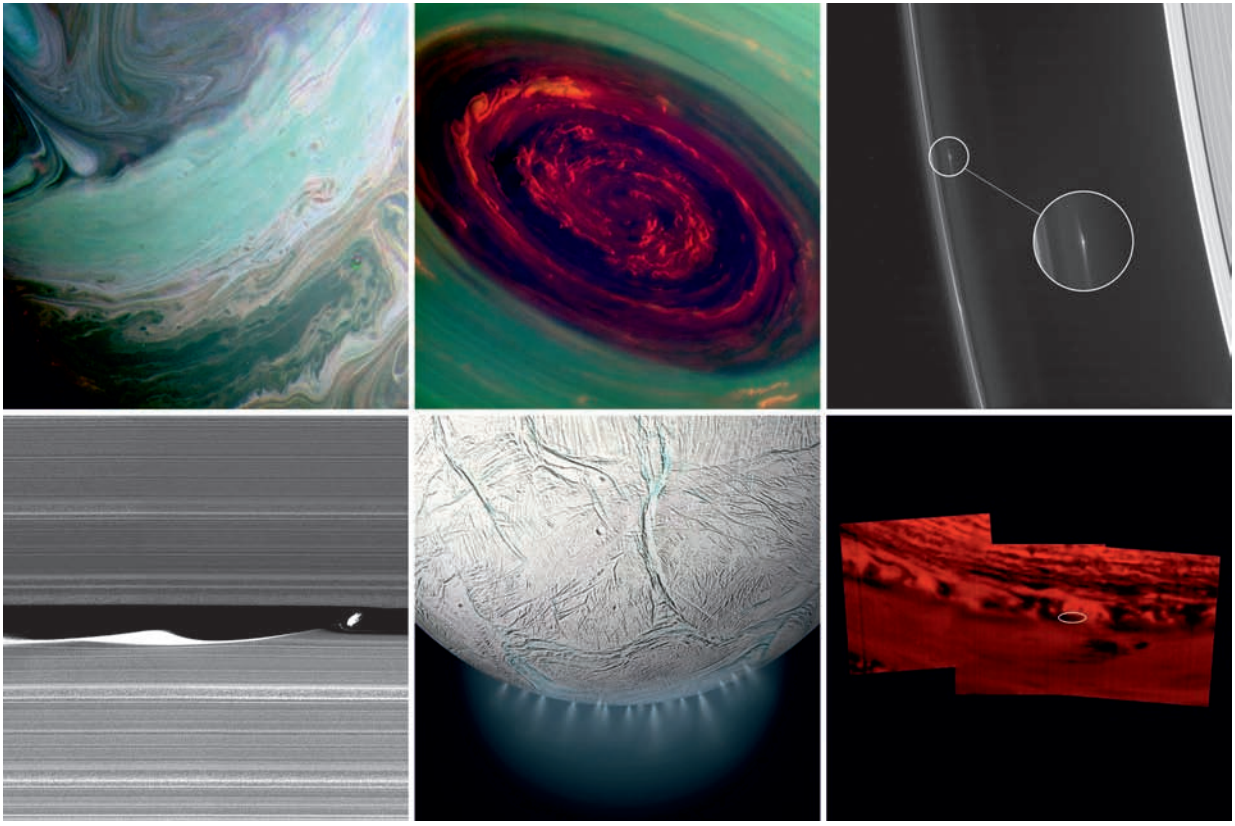
Označování prstenců vzniklo historicky podle jejich postupného objevování. Vnější jasný prstenec nápadně se projevující již v malých dalekohledech je tedy označen A, dále prstence B, C a D jdou sestupně k povrchu Saturnovu. Písmeny E, F a G jsou pak označeny vnější slabé prstence z jemných až mikroskopických částic, které byly rozpoznány až v době kosmických sond. Prstenec F objevil Pioneer 11 v roce 1979.

Saturn – *druhá největší planeta Sluneční soustavy. Je charakteristická dobře viditelným prstencem. Saturn je od Slunce desetkrát dále než Země, a proto je jeho teplota velmi nízká (−150 °C). Průměrná hustota planety 0,7 g·cm^{-3} je nejnižší ze všech planet, dokonce nižší než hustota vody. Saturn patří k obřím planetám. Oběhne Slunce za 30 let, kolem vlastní osy se otočí za pouhých 10 hodin. Rychlá rotace způsobuje vznik pásů. V atmosféře jsou pozorovány velké žluté či bílé skvrny. Atmosféra je tvořena oblaky čpavku, vodíkem a heliem. V nitru je snad malé jádro z křemičitanů obklopené kovovým vodíkem. Vítr v atmosféře dosahuje rychlosti až 1 800 km/h. Magnetické pole má dipólový charakter s osou téměř rovnoběžnou s rotační osou.*

Mise Cassini

Sonda Cassini je bezesporu nejúspěšnější lidskou misí k Saturnu. Sonda u Saturnu pracovala 13 let a 76 dní, i s příletem mise trvala bez jednoho měsíce 20 roků. Evropské pouzdro Huygens, které bylo součástí mise, přistálo na největším Saturnově měsíci Titanu 14. ledna 2005.

Modul sestupoval 2 hodiny a 28 minut na padácích do Titanovy atmosféry a vysílal dalších 70 minut, dokud neztratil spojení s mateřskou sondou Cassini. Přenos dat na Zemi byl zprostředkován sondou Cassini, která byla sledována radioteleskopy. Z naměřených dat bylo zjištěno, že ve výšce mezi 20 a 30 km probíhá silné turbulentní proudění, které je obdobné tomu, co naměřily terestrické balóny na Zemi. Předpokládá se tedy, že toto turbulentní proudění by mohlo být způsobeno oblaky. Atmosféra je mnohem méně průhledná, než se předpokládalo. Ve výšce cca 40 km nad povrchem měsíce atmosféra zprůhledněla a modul získal první detailní snímky Titanova povrchu. Na snímcích najdeme mnoho znaků eroze způsobené kapalinou (nejspíše metanem).



To nejlepší z Cassini: Zleva doprava a shora dolů: 1. Turbulentní struktury v Saturnových oblacích v infračerveném oboru (2016). 2. Detailní pohled na hurikán v severní polární oblasti (2013). 3. Uzlíky prachu v prstenci F nazývané „vrtule“. Tyto útvary vznikají rozvlněním látky prstence vlivem přítomnosti větších objektů (2017). 4. Měsíc Daphnis v Keelerově dělení. Měsíce, které výrazně ovlivňují tvar prstenců, nazýváme pastýřské měsíce (2017). 5. Měsíc Enceladus s gejzíry. Podmínky v podpovrchových oceánech jsou slučitelné s primitivními formami života. To ale neznamená, že zde život musí být (2015). 6. Předpokládané místo dopadu sondy Cassini v infračerveném oboru (2017). Zdroj: NASA/Cassini.



Umělecká vize poslední fáze letu úspěšné sondy Cassini. Zdroj: NASA.

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.*

Sonda Cassini detailně zkoumala soustavu prstenců, Saturnovy měsíce, turbulence v Saturnově atmosféře, zajímavý šestiúhelníkový útvar v severní polární oblasti, magnetosféru Saturnu i jeho polární záře, které si svou krásou nezadají s těmi pozemskými. Sonda o hmotnosti 2,5 tuny měla příkon 885 wattů, na konci mise potom už „jen“ 660 wattů.

Velké finále

Od listopadu 2016 byla dráha sondy upravována tak, aby o necelý rok později, 15. září 2017 ukončila svou pouť řízeným pádem do Saturnovy atmosféry. Sonda od počátku prosince 2016 prolétala v perikronu (nejbližší bod dráhy vzhledem k Saturnu) těsně nad okrajem nejvzdálenějšího Saturnova prstence F. K prvnímu takovému průletu prstenci došlo 4. prosince 2016. V dubnu 2017 byla dráha upravena při těsném průletu kolem Titanu (ve vzdálenosti 979 km) tak, aby sonda prolétala těsně mezi povrchem Saturnu a vnitřní hranou prstenců. Při těchto pro sondu riskantních průletech už nebylo co ztratit. Tato poslední fáze života sondy získala označení Velké finále. Dne 15. září 2017 sonda dopadla do svrchních vrstev Saturnovy atmosféry, kde vzhledem k její vysoké rychlosti došlo k jejímu roztavení. „Horký“ zánik sondy Cassini by měl ochránit případný život, který by se mohl vyskytovat v prostředí kolem Saturnu nebo na jeho měsících, před kontaminací samotnou sondou. Při Velkém finále byla nastavena geometrie všech drah tak, aby k největšímu přiblížení docházelo vždy na polední straně Saturnu, která je současně přivrácena k Zemi. To umožnilo zaznamenat data a vůbec poprvé získat pohledy z vnitřku prstenců mezi prstencem D a planetou a také zobrazit některé měsíčky, které se v prstencích pohybují. Nostalgie z ukončení této fascinující mise byla zastíněna detailními záběry prstenců, Saturnovy atmosféry a některých vnitřních měsíců.

■ Ivan Havlíček, 6. 3. 2015, AB 9/2017, aktualizováno

Pluto – ledová krása

Rok 2015 byl pro planetární astronomy i ostatní příznivce astronomie a kosmonautiky velkým svátkem. Po cestě trvající 9,5 roku dorazila ke svému primárnímu cíli americká sonda New Horizons. Při průletu kolem trpasličí planety Pluto sonda pořídila přes stovku snímků s úžasným rozlišením až 250 m na pixel. Pluto byl v době startu sondy ještě „oficiálně" považován za planetu, poslední, kterou člověk zblízka nezkoumal. Vášně, které planuly a tu a tam stále doutnají kolem nově zavedeného pojmu trpasličí planety, a tím pádem i „vyškrtnutí" Pluta ze seznamu planet, udělaly z předmětu výzkumu sondy atraktivní cíl i pro nejširší veřejnost. Přeměření velikosti pravděpodobně vrátilo Pluto s průměrem 2 370 km na první místo mezi trpaslíky, ze kterého jej pomyslně sesadila planetka Eris (její průměr je ovšem dosud změřen nepřímo, pomocí pozorování zákrytu hvězdy).

Pluto – *spolu s Charonem tvoří trpasličí dvojplanetu v Kuiperově pásu, která patří do rodiny plutin. Do roku 2006 byl Pluto řazen konvenčně mezi planety. V blízkosti jsou čtyři menší měsíce Nix, Hydra, Kerberos a Styx. Pluto má průměr 2 370 km, hmotnost 1,305×10^{22} kg a střední hustotou 1,86 g·cm^{-3}. Pluto oběhne Slunce jednou za 248 pozemských let po protáhlé, eliptické dráze. Kolem vlastní osy se otáčí v opačném smyslu, než obíhá. Jeho povrch, kde je nejvíce zastoupen dusíkový a metanový led, dobře odráží světlo. Dráha Pluta je mimořádně excentrická, v některých obdobích je blíže ke Slunci než Neptun (například 1979–1999). Sklon dráhy k rovině ekliptiky je 17,1°. Sklon rotační osy od kolmice na rovinu dráhy je 122,5°. Pluto se, podobně jako Uran, odvaluje v rovině dráhy.*

Na periferii

Maximální přenosová rychlost dat je zhruba čtyři kilobity za sekundu, takže obrovské nekomprimované snímky povrchu se na Zemi přenášely následujících šestnáct měsíců. První podrobné snímky Pluta byly nejen úžasné, ale odhalily fakta, se kterými se příliš nepočítalo. Vezměme to popořádku.

Pluto podle současných teorií vznikl v době před 4,2 až 4,4 miliardami let v transneptunickém disku, který se tehdy rozprostíral ve vzdálenostech od 20 do 40 au, tedy výrazně blíže (zhruba dvakrát), než je jeho současná poloha. Tento disk byl relativně hmotný, jeho hmotnost odhadujeme na třiceti až padesátinásobek hmotnosti Země, což by stačilo ještě na jednu planetu velikosti Uranu nebo Neptunu! Plošná hustota protoplanetárního disku, která přirozeně klesala se vzdáleností od Slunce, však již byla příliš nízká na to, aby zde došlo k akreci větších planetárních embryí, jež by na sebe mohla nabalit okolní plyn, a stát se tak plnohodnotnou planetou.

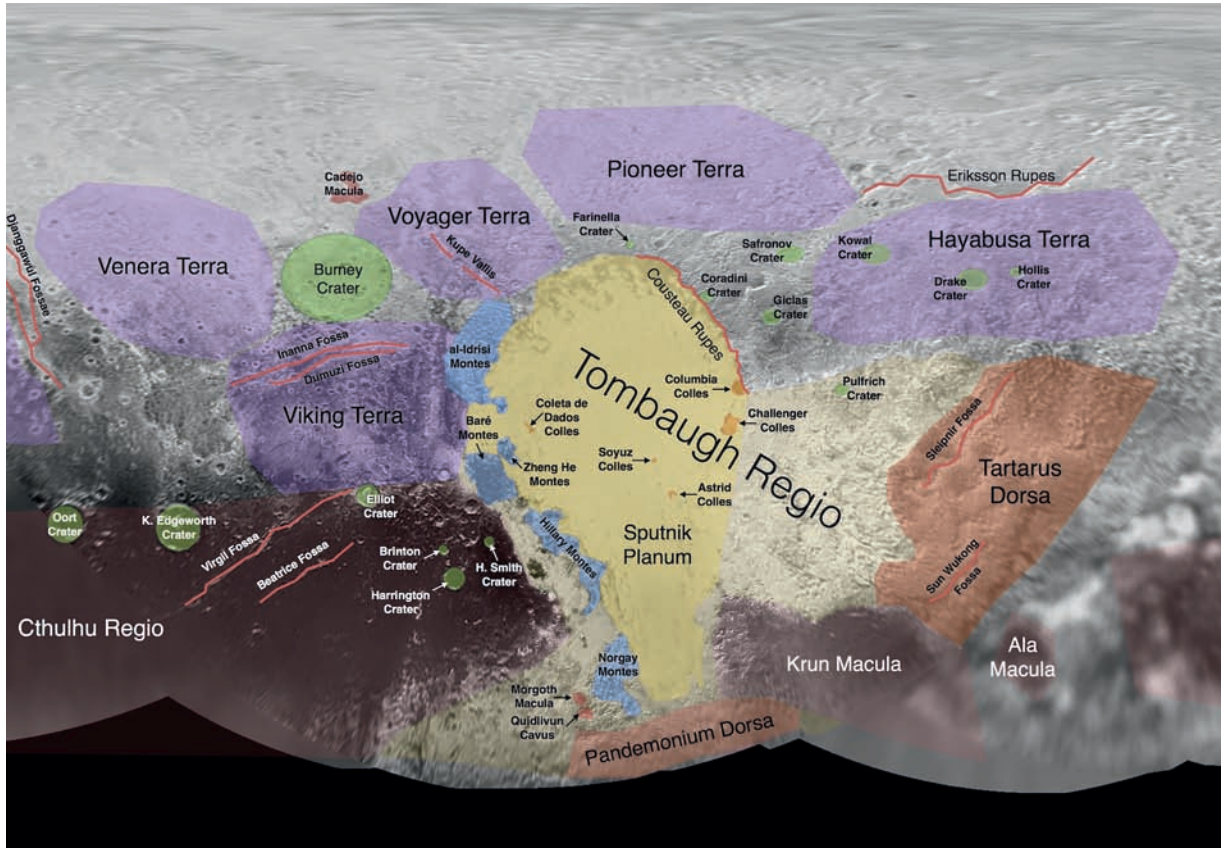
Pluto se tedy podle našich představ stal v raných fázích vzniku Sluneční soustavy jedním z největších představitelů transneptunických těles, která se do dnešního dne zachovala. Čekal ho však velmi zajímavý osud. V období nestability Sluneční soustavy, následované prudkou migrací ledových obrů směrem do transneptunického disku, byl zachycen v rezonanci středních pohybů 2:3 s Neptunem. Tato planeta,

Pluto uvítal sondu New Horizons výraznou ledovou plání připomínající tvarem symbol srdce. Zdroj: NASA/JHU.



Mapa předběžných názvů jednotlivých povrchových útvarů na Plutu. Prvé mapy s navrhovaným názvoslovím byly zveřejněny těsně po průletu. Rozlehlá severní území jsou pojmenována podle slavných sond. Sonda prolétala kolem Pluta poměrně vysokou rychlostí a jejich vzájemná vzdálenost se velmi rychle měnila řádově v hodinách. Jelikož se Pluto otočí kolem své osy jedenkráte za 6,4 dne, tak se rychle měnily podmínky pro podrobné zobrazení některých částí povrchu. Názvy byly nutné, aby vědci věděli, o kterém útvaru diskutují. Definitivní podobu názvů schvaluje Mezinárodní astronomická unie, což je proces, který mnohdy trvá dlouhé roky. Zdroj: NASA/JHU.

tlačící se do planetesimálního disku, před sebou vytvořila na hranici rezonance jakousi past, podobnou lžíci bagru, do které při své migraci „chytala“ malá tělesa z původního disku planetesimál. Vznikla tak skupina plutin, početné populace těles zachycených v rezonanci, jež časem z rezonance „čerpaly energii“ v podobě zvyšující se excentricity. Tak si vysvětlujeme velkou excentricitu Pluta a těles jemu podobných. Jejich dráha je natolik excentrická, že se v přísluní přibližují ke Slunci více než Neptun, ale nikdy se s touto planetou díky rezonanci nesrazí. Populace plutin tak vytváří jakousi přirozenou vnitřní hranici dnešního Kuiperova pásu.



Atmosféra a povrch Pluta

Co nám přinesla data zaslaná sondou New Horizons? Atmosféra Pluta byla v období průletu sondy tvořena prakticky výhradně dusíkem, metan z ní již při vzdalování od Slunce vymrzl (v bližší vzdálenosti ke Slunci tvoří metan až čtvrtinu atmosféry Pluta). Dusík z atmosféry sněží, takže zde zřejmě existuje atmosférický cyklus – tedy projevy počasí. Atmosférický tlak při povrchu dosahuje jen ~10 μbar. Hranice neprostupné mlhy byla detekována ve výšce 150 km nad povrchem.

Povrch Pluta je barevný – od vysoce odrazivé bílé, přes modravou, různé valéry žlutí, okru a odstínů hnědé až po tmavě červenou. Původ tak rozmanité barevnosti nalezneme nejspíše v tholinech, jimiž jsou hojně pokryty povrchové útvary. Tholiny jsou organické sloučeniny vznikající za přispění ultrafialového záření ze směsi dusíku a jednoduchých uhlovodíků. Tholiny byly v hojné míře pozorovány na Titanu (největší měsíc Saturnu), kde byl detekován například polypropylén. Při nedostatku kyslíku zde nedochází k jejich rozkladu. Směs často polymerních molekul vznikajících vysoko v řídké atmosféře pak klesá ve formě aerosolu a ukládá se na povrchu tělesa. Na Plutu byly zaznamenány oblasti s rozdílnou absorpcí metanu a oxidu uhelnatého. Tento jev nejspíše také přispívá k odlišné barevnosti jednotlivých oblastí.

Ve snaze hovořit o Plutu a podrobněji jej popisovat byly některé zobrazené oblasti pojmenovány (u některých názvů se čeká na schválení Mezinárodní astronomickou unií). Největší a nejzářivější světlá oblast ve tvaru srdce byla nazvána *Tombaugh Regio* po Clydu Tombaughovi, který Pluto v roce 1930 objevil. Její součástí je rovina *Sputnik Planum* – rozsáhlá ledová pláň pojmenovaná po první umělé družici Země. Následují oblasti se jmény významných objevitelských sond (*Venera Terra*, *Pioneer Terra*, *Voyager Terra*, *Hyabusa Terra*). Dostalo se také na některé zasloužilé astronomy, namátkou – jeden velký kráter je pojmenován po Janu Hendrickovi Oortovi.

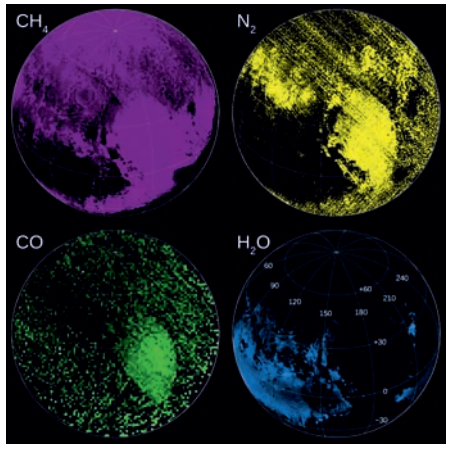
Na povrchu byly pozorovány kopce vysoké 2 až 3 km oproti okolnímu terénu, jsou zde dopadové krátery až do velikosti 260 km v průměru. Současně se zde ale nacházejí také rozsáhlé rovinaté ledové pláně bez výraznějších terénních nerovností, *Tombaugh Regio* měří ve směru od východu k západu 1 800 km a 1 500 km od severu k jihu. Povrchová teplota byla naměřena v rozmezí 35 až 55 K. V takových podmínkách jsou povrchové útvary, ať už jsou tvořeny čímkoli, pokryty ledem vymrzlým z atmosféry. Povrch je na mnoha místech pokryt dusíkovým

New Horizons – *americká sonda, která se vydala na cestu k Plutu v lednu 2006. Sonda byla vynesena raketou Atlas V551. Opuštění Zeměkoule bylo propočteno tak, aby sonda letěla nejprve k Jupiteru, který ji urychlil na cestu k Plutu. Po průletu kolem Pluta a Charonu v červenci 2015 mise pokračuje do oblasti dalších transneptunických těles v Kuiperově pásu.*

Kuiperův pás – *oblast malých těles za drahou Neptunu. Vnitřní okraj pásu se nachází ve vzdálenosti asi 30 au a vnější asi ve vzdálenosti 50 au od Slunce. Je „položen"; do roviny ekliptiky. Odhaduje se, že obsahuje až 6×10^8 těles o průměru větším než 1 km a 40 000 těles větších než 100 km. V dnešní době jich známe přes 2 000. Průměry těles nepřesahují (až na ojedinělé výjimky) 100 až 300 km. Celková hmotnost všech těles se odhaduje na desetinu hmotnosti Země. Nejznámějším tělesem Kuiperova pásu je Pluto.*

Měsíc Charon se po průletu sondy New Horizons stal tělesem, na němž existují povrchové útvary jako na jiných měsících. Zdroj: NASA/JHU.





Na mapách jsou znázorněny oblasti se zvýšenou koncentrací metanu, dusíkových molekul, oxidu uhelnatého a vodního ledu. Jde o výsledek práce pole spektrometrů LEISA, které bylo instalováno na palubě sondy New Horizons. Zdroj: NASA/JHU.

Hadí kůže – modrošedý zvrásněný terén Tartarus Dorsa (Hřbet Tartaru) s hlubokými rýhami vyplněnými červenavým materiálem, který se nachází poblíž terminátoru (rozhraní světla a stínu) Pluta. Nejmenší podrobnosti jsou veliké 1,3 km. Zdroj: NASA/JHU.



ledem a zmrzlou tholinovou směsí a také ledovým oxidem uhelnatým. Rozmanitost povrchových útvarů přirozeně vyvolává otázky po jejich původu. Nelze vyloučit, že oproti dřívějším odhadům může mít Pluto železné jádro a kamenný plášť skrytý pod silnou ledovou slupkou. Povrchová skaliska a ledové pláně jsou pak různými druhy barevného ledu jen „zaprášena“. Pokud by byl plášť pokryt dostatečně silnou ledovou kůrou o mocnosti alespoň 320 km, bylo by možné uvnitř Pluta očekávat železné jádro o poloměru až 370 km. Za určitých podmínek by tlak uvnitř tělesa dokázal udržet takové jádro poměrně dlouho plastické. Nerovnoměrné chladnutí a postupné tuhnutí složek rozdílné hustoty tvořících Pluto by mohly být, při smršťování vychládajícího tělesa, příčinou poklesu tak rozsáhlé oblasti jako je *Sputnik Planum* (s plochou okolo 540 000 km^2) až o 7 km, a tedy jejího pozdějšího vyhlazení oproti okolním pahorkatinám.

Charon

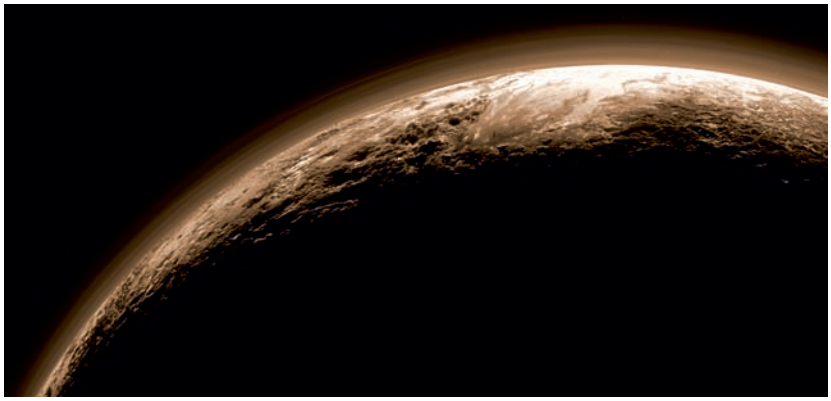
Charon je největší z pěti měsíců Pluta, průměr má 1 212 km. Po průletu sondy New Horizons byly, obdobně jako na Plutu, pojmenovány některé povrchové útvary. K nejvýraznějším patří rozlehlá tmavá pláň v severní polární oblasti, která získala název *Mordor Macula* (Temnota Mordoru). Nalezneme zde ale také například hory pojmenované po Arthuru C. Clarkovi a Stanleym Kubrickovi a krátery nesoucí jména kapitána Nema a Carrollovy Alenky. Není vyloučeno (ale ani potvrzeno), že i Charon má železné jádro. V jeho prospěch hovoří přítomnost rozsáhlého systému hlubokých rýh a kaňonů, které by mohly být pozůstatkem po smršťování chladnoucího tělesa.

Kryovulkanizmus

O malých tělesech obíhajících za drahou Neptunu jsme očekávali, že nebudou příliš geologicky aktivní – tedy že jejich povrch bude velmi starý. To by pro nás bylo přínosné v tom, že v četnosti a stáří kráterů by byla zaznamenána celá 4 miliardy let stará historie nejzazších končin Sluneční soustavy. A právě v tomto ohledu nás snímky ze sondy New Horizons, velmi překvapily. Místo nudného zaprášeného povrchu posetého krátery jsme objevili aktivní svět s horami vysokými přes 3 kilometry, rozsáhlými ledovými pláněmi poprášenými dusíkovým a metanovým sněhem, v případě měsíce Charonu i obrovský kaňon s hloubkou kolem 9 km. Stáří povrchu geologové předběžně odhadli

na pouhých 100 milionů let, což je z astronomického i geologického hlediska pouhý okamžik. Geologická aktivita má zřejmě podobu kryovulkanizmu, štíty hor jsou tvořeny ledem, který je při teplotě −230 °C pevný jako skála.

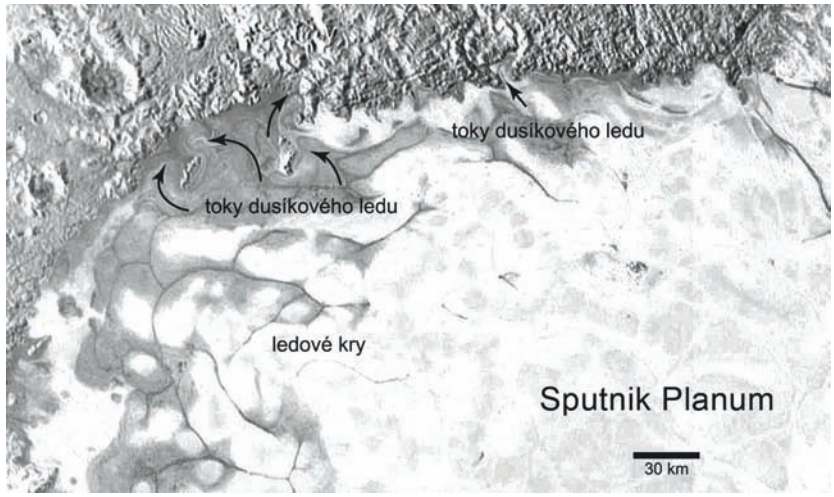
K tomu, aby byl kryovulkanický mechanizmus aktivní, potřebuje těleso vnitřní zdroj tepla, které je s to roztavit led na tekutou fázi, která vyvěrá v aktivních místech na povrch. Kryovulkanickou aktivitu pozorujeme na větších i menších tělesech, než je Pluto. Kryovulkány najdeme jak na Jupiterově měsíci Ganymedu, který je dvakrát větší, tak na Saturnově měsíci Enceladu, který je bezmála pětkrát menší. Kryovulkanickou aktivitu možná vykazuje i Uranův měsíček Mab, přestože jeho velikost odhadujeme na pouhých 24 km! Z hlediska velikosti tedy není kryovulkanizmus nijak omezen. Ve všech uvedených případech se však jedná o měsíce velkých planet, které jsou zahřívány slapovým „hnětením“. V případě Jupiterova měsíce Ganymedes nám to může připadat podivné, když Ganymedes obíhá s vázanou rotací. Pokud si však uvědomíme, že dráha tohoto satelitu je díky rezonancím s ostatními velkými měsíci Jupiteru mírně excentrická, měsíc libruje (jako by se „kýval“), takže gravitace Jupiteru na něj působí střídavě v odlišných směrech. Podobné slapové zahřívání se projevuje i u měsíce Enceladu. V případě Pluta však máme problém. Je zde sice velký satelit, Charon, ovšem systém je ve vzájemně vázaném stavu – obě tělesa obíhají s vázanou rotací kolem společného těžiště po prakticky kruhových drahách (excentricita dráhy Charonu je 0,00). Kde se tedy bere teplo nutné k vybuzení kryovulkanické aktivity? Zatím nevíme. Jednou z možností je teplo uvolňované rozpadem radionuklidů, ale kde se jich dostatečné množství vzalo v tak vzdálených končinách? Protoplanetární disk byl díky působení slunečního větru v raných fázích chemicky diferencován, takže těžké netěkavé prvky, mezi které radionuklidy patří, zůstaly ve vnitřních částech disku, zatímco lehké a těkavé látky se dostaly do vnějších částí. A právě zde podle našich představ vznikl Pluto. Záhada kryovulkanizmu je tedy prozatím nevyřešena.



Pouhých 15 minut po těsném průletu zachytily kamery na New Horizons tento ledový a hornatý terén na okraji Sputnik Planum (nahoře) v protisvětle. Některé hory dosahují až do výše 3 500 metrů nad okolní terén. Snímek byl pořízen ze vzdálenosti 18 000 km. Zřetelné je také rozvrstvení atmosféry Pluta. Zdroj: NASA/JHU.

Ledové pláně na Plutu s „pobřežními“ liniemi a sněžnými děrami. Tmavší vyvýšenina na snímku získala název Krun Macula. Zdroj: NASA/JHU.





Severní část oblasti Sputnik. Rovina je rozdělena do ledových ker obtékaných úzkými proudy připomínajícími ledovcové toky či zlomy v čerstvém tenkém ještě nesouvislém ledovém pokryvu při střídavém zamrzání a rozmrzání. Zlomy a i některé jimi vydělené připojené kry jsou výrazně tmavší než okolní bílé pláně. Povrch pláně je tvořen dusíkovým ledem. Zdroj: NASA/JHU.

Šťastnou cestu!

Sonda New Horizons tráví většinu života v hibernovaném stavu. Probouzí se jen jednou ročně při kontrole palubních systémů a při vědeckých pozorováních v okolí zajímavých těles. V současné době sonda letí k dalšímu tělesu Kuiperova pásu, k objektu (486958) 2014 MU69, jehož rozměry se odhadují na 30 až 40 kilometrů.

Průlet kolem tohoto tělesa by měl podle propočtů nastat 1. ledna 2019. Sonda je již nyní na dráze, která jí zajistí opuštění Sluneční soustavy. Při startu měla rychlost 16,26 km/s, což je nejvyšší rychlost ze všech sond, ale při opuštění Sluneční soustavy ve vzdálenosti 100 astronomických jednotek bude mít rychlost kolem 13 km/s, což je méně, než ve stejné vzdálenosti měla sonda Voyager 1. Doufejme, že sonda New Horizons vydrží v dobré kondici ještě mnoho desítek let a pošle nám zajímavá data z vnějších oblastí naší Sluneční soustavy.

■ **Jakub Rozehnal, AB 26/2015; Ivan Havlíček, AB 39/2015, aktualizováno.**

Devátá planeta opět na scéně

Čas od času proběhnou médii zprávy o existenci velké planety na periferii Sluneční soustavy, kdesi daleko za drahou Pluta. Většinou jde o zprávy na úrovni pavlačových drbů, ale na počátku roku 2016 se taková zpráva objevila v renomovaném časopise *The Astronomical Journal*. Článek Konstantina Batygina a Michaela E. Browna měl název „*Evidence for a Distant Giant Planet in the Solar System*“, tedy volně přeloženo „Důkaz o přítomnosti vzdálené obří planety ve Sluneční soustavě“. Jak už to bývá, následovala mediální smršť ujišťující nebohé obyvatelstvo, že existence další planety je „hotová věc“. Většina médií bohužel čerpala především z názvu článku a nikoli z jeho obsahu, což vyvolalo řadu nedorozumění a chybných interpretací obsažených informací. Jistou roli zde sehrála skutečnost, že systém hodnocení vědecké práce je z velké části založen na počtu citací, které publikace získá. Vzhledem k obrovskému množství publikovaných prací je doslova nutností zvolit název článku tak, aby zaujal co největší počet potenciálních čtenářů, a proto bývají často voleny „bombastické“ názvy, které jsou do jisté míry expresivní formou vyjádření obsahu práce. Jak je to tedy s „objevem“ deváté planety Sluneční soustavy doopravdy?

Kuiperův pás

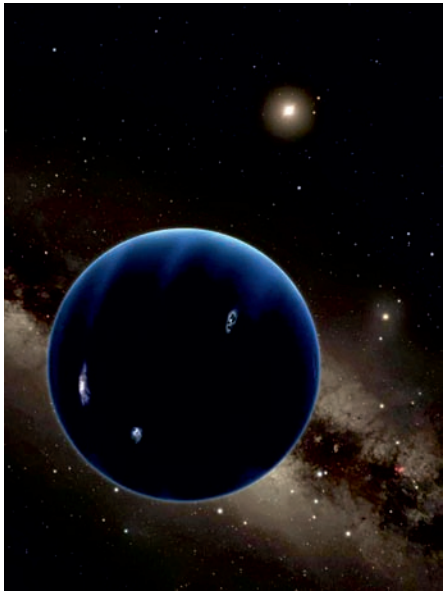
Celý případ potenciální oběžnice vychází z analýzy dynamiky malých těles Sluneční soustavy, obíhajících Slunce za drahou Neptunu. V této oblasti, označované obecně jako Kuiperův pás, dnes známe přibližně 2 000 těles. Odhaduje se však, že zde může obíhat asi 40 000 těles o průměru větším než 100 km. Tato tělesa pocházejí ještě z doby, kdy se utvářely planety Sluneční soustavy, a celá oblast jejich výskytu je dramaticky poznamenaná bouřlivými událostmi, které doprovázely závěrečné fáze vzniku našeho planetárního systému.

V Kuiperově pásu se nachází několik dynamických populací – „klasický“ Kuiperův pás, který představuje zbytek původní populace planetesimál obíhajících ve vzdálenostech mezi 42 až 48 au od Slunce na málo excentrických drahách s nízkými sklony (tzv. dynamicky chladná populace), a dále rozptýlený disk, který se rozprostírá do větších vzdáleností (nad 100 au). Tělesa rozptýleného disku mají

Ekliptika – *zdánlivá dráha Slunce na obloze. Průsečnice, v níž rovina dráhy Země kolem Slunce protíná světovou sféru. Rovina ekliptiky je rovinou oběžné dráhy Země.*

Počítačová simulace – *napodobení skutečnosti pomocí numerického výpočtu, nezbytná součást modelování fyzikálních procesů. Dokáže předpovědět jak kvantitativní, tak kvalitativní výsledky pokusů při různých počátečních podmínkách. Umožňuje omezit výběr jevů, které celý pokus ovlivňují nejvíce, a tím vysvětlit příčiny a podstatu sledovaných procesů.*

Umělecká představa deváté planety sluneční soustavy, která by mohla obíhat po excentrické dráze dvacetkrát dále od Slunce, než se nachází poslední planeta Neptun. Zdroj: Caltech/R. Hurt.



Keck – *Dvojice obřích, pohyblivých segmentovaných dalekohledů. Jsou umístěny na hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech v nadmořské výšce 4 123 metrů. Každé zrcadlo je tvořeno 36 šestiúhelníkovými segmenty a má průměr 10 metrů. Keckovy dalekohledy byly uvedeny do provozu v letech 1993 a 1996.*

Subaru – *japonský dalekohled, který má průměr 8,2 metru a je umístěný na hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech. Zprovozněn byl v roce 2005.*

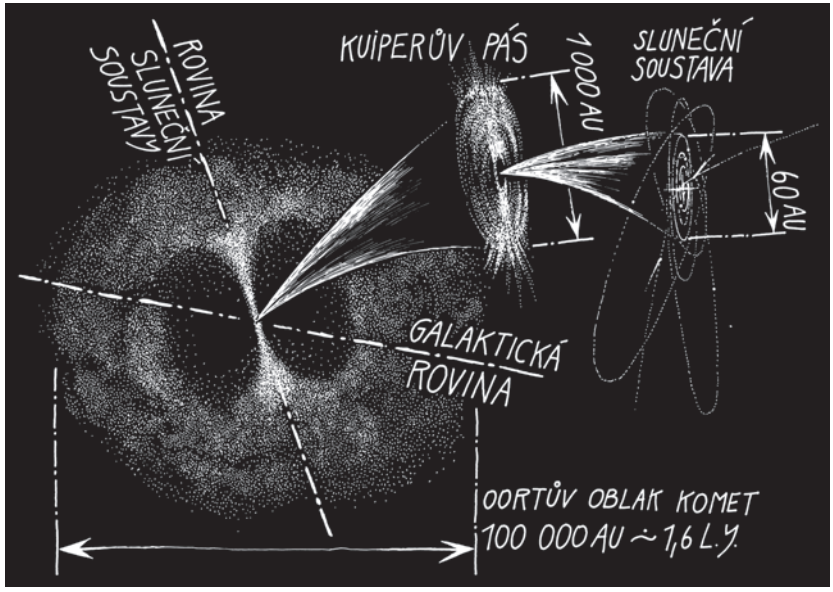
LSST – *Large Synoptic Survey Telescope, nový přehlídkový dalekohled o průměru 8,4 metru stavěný v Chile v oblasti Cerro Pachón. Jeho kamera bude mít 3 200 megapixlů a bude snímat miliardy objektů v šesti pásmech. Uvedení do provozu se očekává v roce 2019.*

vysoké sklony drah (i 40°) a velké excentricity (větší než 0,4). Jejich perihelia však leží u dráhy Neptunu, což svědčí o tom, že se jedná o tělesa původního disku, jež byla na své dráhy vypuzena právě gravitační poruchou způsobenou Neptunem. Trpasličí planeta Sedna patřila mezi první objevená tělesa tzv. odděleného disku. Dráha Sedny je oddělená od Neptunu, nikde se k ní nepřimyká, tudíž se na ni nemohla dostat poruchami způsobenými Neptunem. Pro existenci těles odděleného disku nemáme dosud žádné uspokojivé vysvětlení. Jednou z možností je gravitační rušení dosud neznámým velkým tělesem, mezi další možnosti patří třeba gravitační poruchy drah blízkou hvězdou, ke které došlo v období, kdy bylo Slunce součástí mladé otevřené hvězdokupy.

Analýza drah těles

Analýza parametrů drah těles odděleného disku odhalila, že řada těles vytváří nápadné shluky v hodnotách některých parametrů. Konkrétně se jedná o velikosti sklonů a hodnotu tzv. argumentu perihelia, což je úhel mezi periheliem a vzestupným uzlem dráhy (tj. bodem, ve kterém dráha tělesa kříží ekliptiku a těleso se zde dostává „z pod ekliptiky nad ekliptiku“). Pokud jsou argumenty perihelia několika těles podobné, znamená to, že jejich eliptické dráhy jsou v prostoru podobně orientované.

Kuiperův pás a Oortův oblak. Zdroj: AGA.



Poloha perihelia (a tedy i hodnota argumentu perihelia) se u všech oběžnic Slunce s časem mění díky gravitačnímu působení mezi obíhajícími tělesy. Roztočíme-li na stole klasickou „káču“, můžeme pozorovat, jak se její osa „kýve“ – opisuje plášť kužele. Tento pohyb nazýváme precesí a je způsoben tím, že na setrvačník alias káču působí moment sil, reprezentovaných zemskou gravitací a reakcí káči opírající se o podložku. Těleso obíhající kolem Slunce je vlastně také setrvačníkem – pokud nás nezajímá aktuální poloha

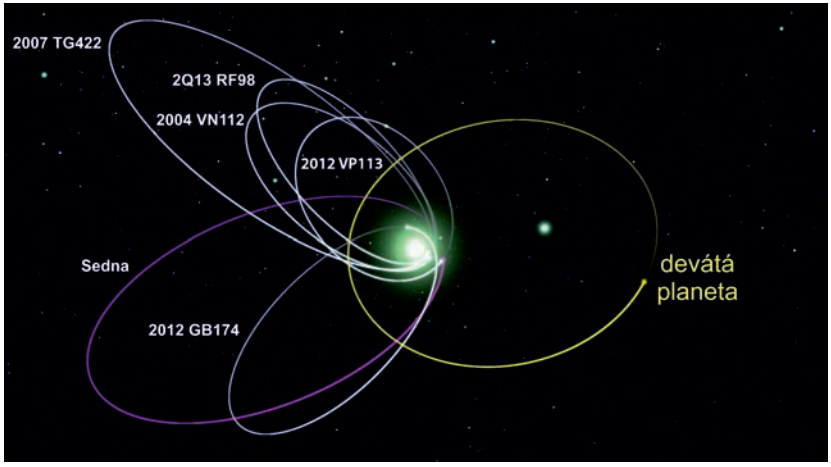
oběžnice, můžeme si ji představit jako „obruč“ o hmotnosti daného tělesa, jehož hmota je rovnoměrně rozprostřena podél jeho dráhy. Na obíhající těleso pak působí gravitace ostatních těles, zejména planet, což vyvolává moment sil, působících na setrvačník. Osa dráhy všech obíhajících těles proto vykonává pomalý precesní pohyb, což má za následek i stáčení polohy perihelia.

Podobná orientace drah některých těles transneptunického disku je překvapivá proto, že gravitační rušení obřími planetami by mělo v časové škále miliard let způsobit náhodné rozmístění poloh perihelií. U těles, která se nepřibližují ke Slunci na vzdálenost menší než 30 au a zároveň obíhají v průměrné vzdálenosti nad 150 au od Slunce potvrdila analýza jejich drah skutečnost, že poloha jejich perihelií je orientovaná nenáhodně. Perihelia všech šesti známých těles na dynamicky stabilních drahách jsou orientována do úhlu menšího než 90º, pět z těchto těles má dokonce perihelia shodná v rozmezí do 45º. Všechny dráhy navíc mají podobné sklony v rozmezí 5º až 25º.

Hypotézu, že jsou tělesa na podobné dráhy „tlačena“ přítomností hmotné oběžnice, otestovali autoři článku tím, že provedli sérii numerických simulací. V nich testovali dynamický vývoj drah 40 testovacích částic, obíhajících kolem Slunce na drahách s počáteční excentricitou 0,05 až 0,95, jejichž perihelia byla rovnoměrně orientována do všech směrů. Parametry dráhy rušící planety byly v jednotlivých simulacích nastaveny tak, že oběžnice s hmotností desetinásobku hmotnosti Země obíhala ve střední vzdálenosti v rozmezí 200 až 2000 au s excentricitou 0,1 až 0,9. Tyto simulace prokázaly, že pozorované rozmístění perihelií malých těles může způsobit gravitační rušení, za něž je zodpovědná planeta obíhající po excentrické dráze (excentricita 0,6) ve střední vzdálenosti 700 au od Slunce a s přísluním orientovaným opačně, než je poloha perihelií malých těles. Obíhající planeta navíc dokáže vysvětlit přítomnost těles v odděleném disku, jak jsme již poznamenali výše.

Planeta – *nebeské těleso, které: 1) obíhá okolo Slunce. 2) má dostatečnou hmotnost, aby jeho gravitace překonala vnitřní síly pevného tělesa (dosáhne kulového tvaru odpovídajícího hydrostatické rovnováze). 3) vyčistí okolí své dráhy od drobnějších těles. Planetami jsou Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. V poslední době se název planeta vžil i pro exoplanety obíhající kolem jiných hvězd, než je naše Slunce.*

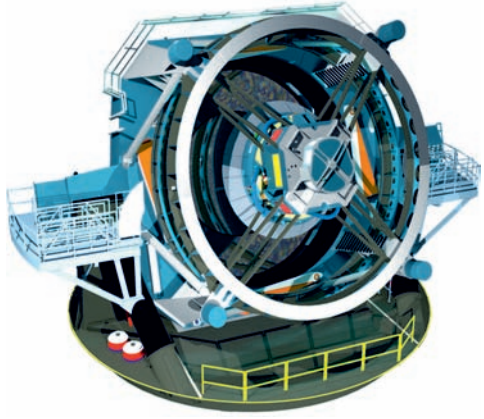
Trpasličí planeta – *nebeské těleso, které: 1) obíhá okolo Slunce. 2) má dostatečnou hmotnost, aby jeho gravitace překonala vnitřní síly pevného tělesa (dosáhne přibližně kulatého tvaru odpovídajícího hydrostatické rovnováze). 3) není satelitem jiného tělesa. 4) nevyčistí okolí své dráhy od drobných těles (na rozdíl od planety). K typickým trpasličím planetám patří velká tělesa Kuiperova pásu, z nichž nejznámější je Pluto.*



Dráhy těles Kuiperova pásu s velkou poloosou větší než 150 astronomických jednotek. Pohled „shora“ ukazuje, že pericentra jsou orientována do podobných směrů. Vyznačena je rovněž předpokládaná dráha deváté planety, jejíž perihelium je orientováno „naproti“ periheliu malých těles. Zdroj: Caltech/R. Hurt.

Planetka – *nesprávně asteroid, malé těleso o rozměrech maximálně stovek kilometrů na samostatné dráze kolem Slunce. Nejvíce planetek se nachází v tzv. Hlavním pásu mezi drahami Marsu a Jupiteru. Obdobná tělesa jsou i v Kuiperově pásu za drahou Neptunu.*

LSST (Large Synoptic Survey Telescope) je dalekohled budovaný v Chile, který má šanci devátou planetu nalézt – pokud samozřejmě existuje. Zdroj: ESO/LSST.



Existuje devátá planeta?

Numerické simulace nejsou samozřejmě důkazem existence 9. planety, shlukování parametrů malých těles může mít i jinou příčinu. Pokud by ale taková planeta existovala, jak je to s možností jejího nalezení? Planeta by se měla v přísluní přibližovat na vzdálenost 360 au. To znamená, že její jasnost v periheliu by mohla dosahovat přibližně 20 mag, což je například v dosahu celooblohové přehlídky Pan-STARRS. Naopak v afeliu se planeta vzdálí až na 1 100 au od Slunce, takže její jasnost by mohla poklesnout až k 26 mag. To je však stále v dosahu velkých dalekohledů jako je Keck či Subaru. Pátrání po planetě by mohlo být také výzvou pro velký přehlídkový dalekohled LSST, jehož stavba by měla být ukončena v roce 2019. Případné potvrzení hypotézy o deváté planetě Sluneční soustavy by bylo jistě obrovským úspěchem a také příležitostí, jak ověřit naše představy o vývoji rané Sluneční soustavy. V případě úspěchu budou následovat pokusy o vysvětlení, jak se vlastně planeta do vzdálených končin Sluneční soustavy vůbec dostala. Mohla být na svou excentrickou dráhu „vykopnuta“ při blízkém setkání s některou z vnějších planet a následně zadržena na současné dráze tzv. dynamickým třením v transneptunickém disku? Mohlo by se jednat o „pátou obří planetu“, jejíž setkání s Jupiterem a následnou exkomunikaci ze Sluneční soustavy předpověděl astronom David Nesvorný v roce 2011? Doufejme, že se tuto planetu podaří najít a vyřčené otázky získají skutečný smysl.

■ Jakub Rozehnal, 26. 1. 2016, AB 4/2016

Rande s kometou

Od dob Julese Verna lidstvo snilo o přistání na kometě. Po desetileté cestě se sondě Rosetta Evropské kosmické agentury podařilo tuto touhu vyplnit. V srpnu 2014 se sonda Rosetta úspěšně přivinula k oběžné dráze komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko (67P/C-G), kterou v roce 1969 objevili Světlana Gerasimenková a Klim Čurjumov. Přes potíže na startu, které nakonec vyvolaly i změnu cílového objektu, i přes četné odvážné manévry při korekcích dráhy letu se nakonec odvěký sen splnil. Přistávací modul Philae mise Rosetta dokázal dne 12. listopadu 2014 přistát na povrchu komety. Přistání to sice nebylo nijak elegantní, ale nakonec se podařilo. Hezčí dárek si Evropská kosmická agentura ke svým „padesátinám" ani dát nemohla.

Rosetta k této vlasatici vážila dlouhou cestu – za více než deset let uletěla cca 6,4 miliardy kilometrů a provedla velké množství korekcí dráhy včetně několika průletů kolem Země, Marsu a dvou planetek. Po navedení na oběžnou dráhu dne 6. srpna 2014 následovala čtyřměsíční série přibližovacích manévrů. Sonda se nakonec dostala na vzdálenost 10 kilometrů od komety, aby k jejímu povrchu vyslala robotické pouzdro Philae, které bylo schopné podrobně prozkoumat povrch komety.

Velmi ambiciózní plán mise byl umocněn mnoha prvenstvími – po prvním navedení lidského posla na oběžnou dráhu kolem komety a prvním přistání na kometě se jedná především o první přímou detailní analýzu jejího povrchu. Rosetta na cestě za kometou proletěla Hlavním pásem planetek, což byl první „evropský" průlet tohoto druhu. V neposlední řadě byla Rosetta první sondou, která proletěla okolím Jupiteru se solárními panely coby hlavním zdrojem energie.

Drama před startem

Plán navést sondu na oběžnou dráhu kolem jádra komety a uskutečnit přistání na kometě se zrodil koncem sedmdesátých let minulého století. V listopadu 1993 byl tento záměr schválen Výborem pro vědecký program Evropské kosmické agentury (ESA). Mise Rosetta si původně kladla za cíl přistání na kometě 46P/Wirtanen. Během cesty měly být při průletu Hlavním pásem planetek mapovány povrchy planetek Siwa a Otawara. Navedení sondy na oběžnou dráhu kolem komety bylo plánováno na květen 2012 a přistání na jádře komety se mělo uskutečnit v červenci 2012.

Rosetta – *sonda ESA vypuštěná 2. března 2004, která byla jako první navedena na oběžnou dráhu kolem jádra komety (67P/Čurjumov–Gerasimenko dne 6. srpna 2014). Dále uskutečnila průlet kolem planetek 2867 Steins (5. září 2008) a 21 Lutetia (10. července 2010); řízené přistání na jádru komety (modul Philae, 12. listopadu 2014). Během cesty ke kometě se podílela na projektu Deep Impact při pozorování komety 9P/Tempel 1 a projektu New Horizons při pozorování Jupiteru a plazmového toru měsíce Io. Sonda spolu s kometou prošla perihelem 13. srpna 2015. Mise byla několikrát prodloužena a definitivně byla ukončena dne 30. září 2016 řízeným pádem sondy na povrch komety.*

Start nosné rakety Ariane se sondou Rosetta na palubě z evropského kosmického střediska v Kourou ve Francouzské Guyaně dne 2. března 2004. Zdroj ESA.



Philae – *robotický přistávací modul ESA, který dne 12. listopadu 2014 jako první provedl řízené přistání na povrch komety. Ke kometě 67P/Čurjumov-Gerasimenko byl dopraven na sondě Rosetta. Přistávací manévr se nerealizoval podle plánu a výsledná poloha po dvou odpoutáních od povrchu komety byla zhruba kilometr od vybrané lokality, v poloze na boku a ve stínu terénní nerovnosti. Po vyčerpání energie primárních baterií byl modul v listopadu 2014 hibernován. Po přiblížení ke Slunci se baterie dobily a modul se ze spánku probudil v červnu 2015.*

Sonda Rosetta s přistávacím modulem Philae (fialovo-modrý váleček v přední části. Zdroj ESA.



V prosinci 2002, těsně před startem Rosetty, však došlo k selhání nosné rakety ESA Ariane 5, která vynášela komunikační družici Hot Bird 7. Jelikož se jednalo o podobný typ nosné rakety, která měla vynést Rosettu, byla tato nehoda pochopitelně vyhodnocena jako riziko a před vypuštěním Rosetty bylo nutné zjistit příčiny předchozí havárie. Start plánovaný na 12. ledna 2003 byl zrušen a ani další pokusy o start mise nebyly úspěšné. Nově naplánovaný start na 26. února 2004 byl dvakrát odložen (nejprve o den kvůli počasí a podruhé startu zabránil kousek uvolněné pěny). Nakonec byla Rosetta z kosmodromu ESA v Kourou ve Francouzské Guyaně vypuštěna dne 2. března 2004. Na heliocentrickou dráhu byla navedena zhruba dvě a půl hodiny po startu. Kvůli problémům se startem musel být i kompletně změněn letový plán. Namísto původní komety 46P/Wirtanen, jejíž letové okno již nebylo možné dosáhnout, byla vybrána za cíl kometa 67P/Čurjumov-Gerasimenko. K dosažení její orbity však bylo potřeba využít gravitačních manévrů po téměř celé vnitřní části Sluneční soustavy. Rámcový plán mise zůstal zachovaný, včetně těsného průletu kolem dvou planetek.

Gravitační manévry

Rosettu bylo potřeba navést na excentrickou eliptickou dráhu, která se tečně dotýká dráhy komety 67P. Výsledná rychlost sondy musela být blízká rychlosti komety. Navedení na tuto dráhu se podařilo při postupných obletech kolem Slunce doplněných čtveřicí gravitačních manévrů. Pro představu o spotřebě paliva bez gravitačních asistencí: při dvou korekcích rychlosti při přibližování se ke kometě, každé přibližně o čtvrt kilometru za sekundu, by v obou případech musely trysky hořet zhruba sedm hodin a spotřebovat přitom kolem dvou set kilogramů paliva. Po úspěšných manévrech se obě tělesa pohybovala vůči Slunci rychlostí zhruba čtrnáct kilometrů za sekundu.

Prvního z celkem tří průletů kolem Země bylo dosaženo 4. března 2005. Měsíc byl při tomto průletu využit pro testování systémů pro průlet kolem planetek.

Na 25. února 2007 byl kvůli další nutné korekci dráhy letu pomocí gravitačního praku naplánován velmi blízký průlet kolem Marsu, který se měl uskutečnit pouhých 250 kilometrů nad jeho odvráceným povrchem. Takovou událost si pochopitelně nenechala ujít média. Titulky si neodpustily přirovnání typu „Evropa hraje s lovcem komet hazard o miliardu euro“, případně „Blízké setkání k okousání nehtů“. Sku-

tečností, která by snad mohla vést v řídícím středisku k neplánované manikúře, byl průlet nad noční stranou Marsu, kdy navíc planeta stála v cestě komunikaci se Zemí. Solární panely, schopné dodávat potřebnou energii i na úrovni dráhy Jupiteru, připravil stín Marsu o osvětlení. Loď musela převést většinu systémů do klidového režimu a spolehnout se po dobu 15 minut na záložní baterie, které však nebyly k tomuto účelu navrženy. Manévr byl, k velké radosti řídícího střediska, úspěšný a nasměroval Rosettu zpět k Zemi.

O další úsměvný kousek se při druhém průletu Rosetty kolem Země postaral nepříliš dokonalý systém hlášení umělých těles. Dne 13. listopadu 2007 byla mylně označena za planetku, jejíž nízký průlet by mohl ohrozit Zemi. Naposledy navštívila Rosetta okolí Země dne 12. listopadu 2009 při svém třetím průletu. Dne 8. června 2011 byla sonda kompletně uvedena na dlouho dobu do stádia hibernace, během kterého navštívila i okolí planety Jupiter.

ESA – *European Space Agency, Evropská kosmická agentura. ESA spojuje úsilí 18 evropských zemí na poli kosmického výzkumu. Centrální sídlo je v Paříži, pobočky jsou v mnoha členských zemích. ESA byla založena v roce 1964 jako přímý následovník organizací ESRO a ELDO. Nejznámější nosnou raketou využívanou ESA je Ariane. Česká republika vstoupila do ESA v listopadu 2008.*

Na cestě

Těsně po startu byly v průběhu března 2004 zkontrolovány a postupně aktivovány jednotlivé systémy na Rosettě. První závažnější problém se objevil při neúspěšném pyrotechnickém uvolnění krytu spektrálního analyzátoru ALICE. Naštěstí se tuto situaci podařilo vyřešit pomocí

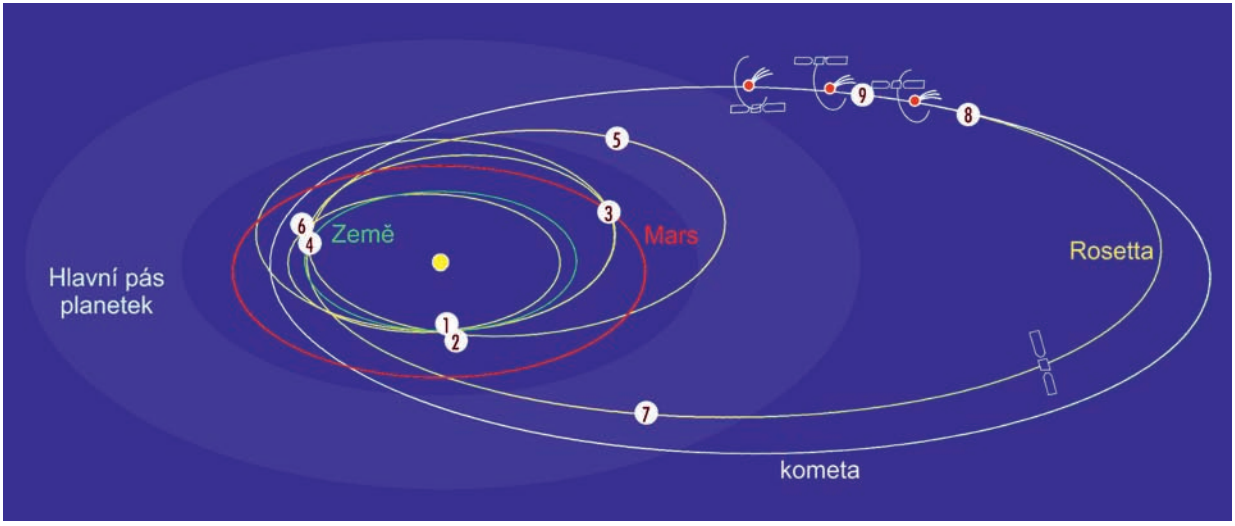
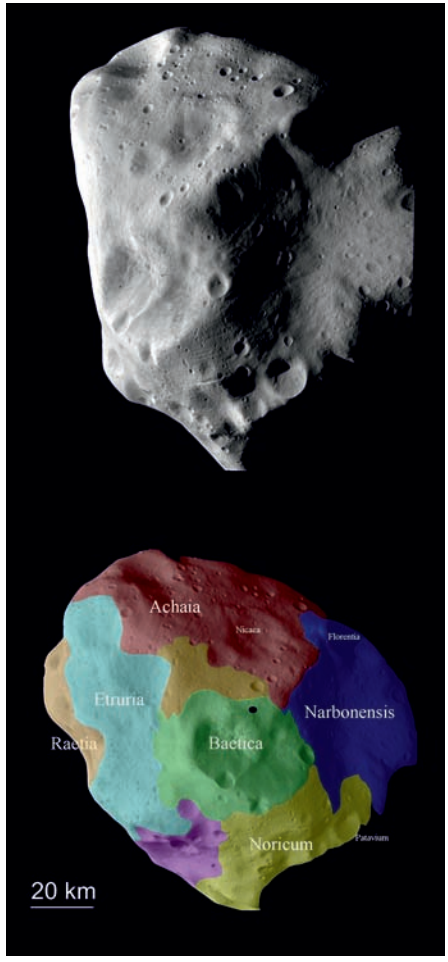


Schéma dráhy Rosetty s vyznačením klíčových okamžiků: (1) start ze Země dne 2. března 2004, (2) první gravitační manévr se Zemí dne 4. března 2004, (3) gravitační manévr s Marsem dne 12. března 2007, (4) druhý gravitační manévr se Zemí dne 14. listopadu 2007, (5) průlet kolem planetky 2876 Šteins dne 5. září 2008, (6) poslední gravitační manévr se Zemí, (7) těsný průlet kolem planetky 21 Lutetia, (8) přílet ke kometě, (9) přistání Philae na kometě. Zdroj: ESA.

Planetka Lutetia, vyfotografovaná při průletu Rosetty ze vzdálenosti 3 162 kilometrů. Oblasti s odlišnými geologickými vlastnosti na planetce Lutetia nesou názvy podle míst v Římské říši. V oblasti Narbonensis je zřetelný obrovský kráter o průměru 57 kilometrů pojmenovaný Massilia. Lutetia patří k planetkám Hlavního pásu, má průměru 100 km. V roce 1852 ji v Paříži objevil Hermann Goldschmidt z balkónu svého bytu. Zdroj: ESA/Planetary and Space Science.



záložní pyrotechniky. Další drobný odklon od plánu byl způsobený přehřátím motorků určených k orientačním manévrům, v důsledku čehož se upustilo od plánovaných manévrů, při kterých měly být na soustavě Země-Měsíc testovány kamerové systémy. Posledního dubnového dne roku 2004 uskutečnila Rosetta první vědecké měření. Jako správný „lovec komet“ zaměřila svou pozornost na kometu s názvem C/2002 T7 (LINEAR).

V následujícím období byly testovány přechody do úsporných režimů s opětovným probuzením systémů. Stavy s nízkou spotřebou energie byly uskutečněny jak při průletech blízkých ke Slunci, tak při putování ve vzdálených oblastech, ve kterých nebylo nutné provádět měření. Při své dlouhé cestě nebyla Rosetta ušetřena ani zátěžové zkoušky dané aktivitou Slunce. V období od 8. do 9. září 2005 zasáhl sondu vzdálenou 244 miliónů kilometrů výtrysk koronární hmoty ze sluneční erupce. Navigační systém sledování hvězd se dostal do anomálního stavu, jeho činnost byla posléze obnovena ze Země. Všechny vědecké měřicí systémy na palubě byly v té době vypnuty.

Dne 5. září 2008 proletěla Rosetta Hlavním pásem planetek mezi Marsem a Jupiterem. Zde přibližně měsíc důkladně pozorovala planetku 2867 Šteins, největší přiblížení bylo na 800 kilometrů. Pojmenování objektů na povrchu po drahých kamenech inspiroval tvar připomínající briliant. Kráter Diamant je rébusem pro hloubavé astrofyziky. Jak mohla planetka vydržet náraz, který kráter vytvořil?

Posledním objektem pozorování před samotnou kometou byla dne 10. července 2010 planetka 21 Lutetia, kterou Rosetta sledovala ze vzdálenosti 3 162 km. Zkoumaná planetka 21 Lutetia vykazuje změny ve světelné křivce, které jsou pravděpodobně způsobeny nekonvexním (prolákým) nepravidelným povrchem, pravděpodobně krátery pokrývajícími výraznou část planetky. Na povrchu planetky bylo popsáno 350 kráterů s poloměrem od 0,6 do 57 kilometrů. Velké krátery ukazují na značné stáří těchto útvarů. Podle simulací musel největší kráter Massilia vzniknout srážkou s objektem o průměru kolem 7,5 km. Pravděpodobnost srážky s takovým tělesem je však velice nízká a zasazuje tvorbu Massilie do doby těsně po pozdním těžkém bombardování. Tato hypotéza je podpořena skutečností, že srážka nevedla k roztříštění tělesa, takže vnitřek planetky je poměrně pevný, a rozhodně se nejedná o slepenec menších těles, jak je to obvyklé u jiných malých planetek. Dalším překvapením byla poměrně vysoká hustota, jedna z nejvyšších

pozorovaných u planetek. Zdá se, že Lutetia je velice starý objekt, pravděpodobně původní planetesimála, která – podobně jako Rosetta – byla ze své původní dráhy ve vnitřní části Sluneční soustavy vymrštěna těsným průletem kolem některé planety. Dalším oříškem, na který se Rosetta zaměřila, je složení planetky. Lutetia je spektrálním typem zařazena do planetek typu M tvořených kovy, avšak tomu nenasvědčuje ani nízkofrekvenční část spektra, které odpovídá spíše typu C, ani nízké albedo pro radiové vlny.

Představujeme Rosettu

Jméno Rosetta dostala sonda po Rosettské desce, která byla objevena v roce 1799 při Napoleonově tažení do Egypta, a díky níž v roce 1822 rozluštil francouzský archeolog Jean-François Champollion (1790–1832) egyptské hieroglyfy. Tento název měl pravděpodobně označit sondu Rosetta za zprostředkovatele nových vědomostí, které její mise přinesla. Na palubě sondy se také nacházel disk z niklové slitiny, na kterém bylo leptaným mikropísmem zaznamenáno přibližně 13 tisíc stran nejrůznějších textů v 1 200 různých jazycích.

Řídicí centrum pro přistání na kometě se nacházelo v Kolíně nad Rýnem. Rosetta s ním komunikovala ze vzdálenosti více než půl miliardy kilometrů od Země, takže cesta signálům z Rosetty na Zemi trvala celých 28 minut a 20 sekund. Elektromagnetický signál byl zachytáván přijímači ESA New Norcia (Austrálie) a Malargüe (Argentina). Jako záložní pak byly zvoleny přijímače a vysílače NASA Canberra (Španělsko) a Goldstone (USA).

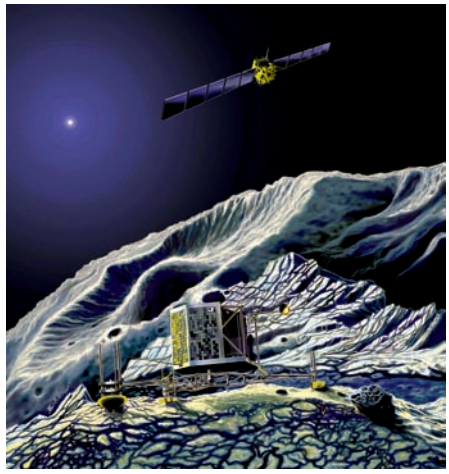
Co se týká technického vybavení, byla sonda Rosetta vybavena komplexním „špionážním“ zařízením, jehož podrobnější popis by vystačil na celou knihu. Pojďme se proto ve stručnosti podívat jen na to nejdůležitější, co se vědcům z ESA podařilo vtěsnat do této „hliníkové krabice“ o rozměrech 2,8×2,1×2 metry.

- ALICE (UV spektrograf) – ultrafialový spektrograf, který měl za úkol především hledat a analyzovat vzácné plyny v jádře komety. Detekce se prováděla pomocí bromidu draselného a jodidu cesia, spektrograf pracoval v extrémním a dalekém ultrafialovém oboru (70 až 205 nm).
- OSIRIS (*Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System*) – kamerový systém s úzkým (700 mm) a širokoúhlým (140 mm) objektivem. CCD čip měl rozlišení 2048×2048 pixelů.

Kometa – *těleso malých rozměrů obíhající kolem Slunce, většinou po protažené eliptické dráze 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. Dnes se nacházejí v Oortově oblaku za hranicemi sluneční soustavy, ve vzdálenosti 20 000 až 100 000 au. Některé komety pocházejí i z bližšího Kuiperova pásu.*
67P/Čurjumov-Gerasimenko – *kometa z Jupiterovy rodiny, která byla původně součástí Kuiperova pásu. V současné době oběhne Slunce jednou za 6,45 roku, rotační perioda je 12,4 hodiny. Jádro komety je nepravidelné s rozměry 4×3×2 km. Kometa byla objevena v roce 1969 ukrajinským astronomem Klimem Ivanovičem Čurjumovem a kazašskou astronomkou Světlanou Ivanovnou Gerasimenkovou.*

Jádro komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko fotografované 3. srpna 2014. Zdroj: ESA.





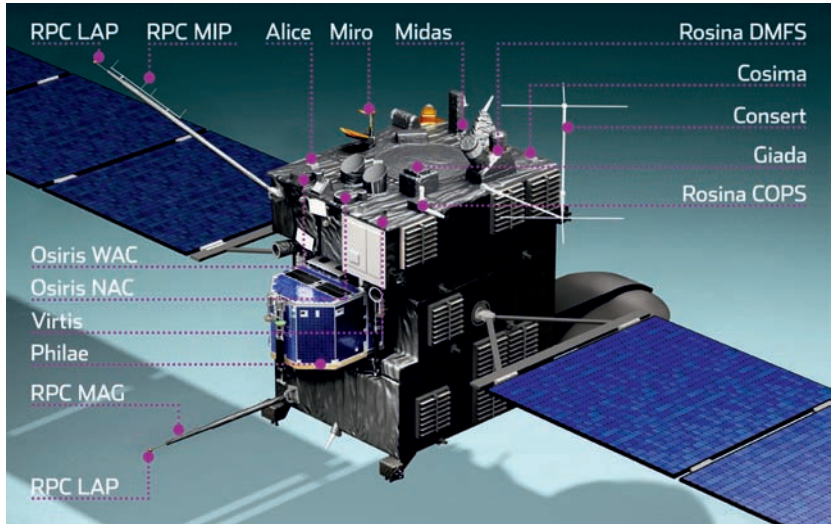
Umělecká představa ideálního přistání na kometě. Nahoře je Rosetta, dole modul Philae. Zdroj: ESA.

- VIRTIS (*Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer*) – spektrometr pracující ve viditelném a infračerveném oboru, který byl schopen pořizovat infračervené fotografie jádra komety včetně pořizování spekter molekul. Detekce se prováděla pomocí sloučeniny rtuti a kadmia (infračervený obor), ve viditelném spektru pak pomocí CCD čipu.
- MIRO (*Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter*) – mikrovlnný analyzátor koncentrace a teploty těkavých látek (vody, čpavku, oxidu uhličitého apod.).
- Consert (*Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission*) – experiment zjišťující informace o jádru komety tomografickou metodou za pomoci elektromagnetických vln vysílaných z Rosetty skrze jádro komety k modulu Philae na jejím povrchu.

Mezi další přístroje, kterých bylo celkem 21 (11 Rosetta a 10 Philae) patřily především systémy analyzující prach, další spektrometry v různých vlnových oborech a systémy pro analýzu plynů.

Představujeme Philae

Jelikož se v případě 67P jednalo o hmotnější kometu, než bylo v původním plánu, vyžádala si, s ohledem na vyšší očekávanou rychlost při přistání, změna cíle konstrukční úpravu nohou přistávací sondy, tehdy ještě označované RoLand (zkratka ze slov Rosetta Lander). RoLand byl na základě modelových zkoušek vybaven podpěrou označovanou jako omezovač náklonu (dlužno podotknout, že s tak dramatickým průběhem přistání, které přinesla realita, tyto zkoušky nepočítaly) a na základě mezinárodní soutěže byl přistávací modul dne 5. února 2014 přejmenován na Philae, které doplněním paralely s Rosettskou deskou lépe vystihovalo symboliku celé mise. Název byl zvolen podle nilského ostrova



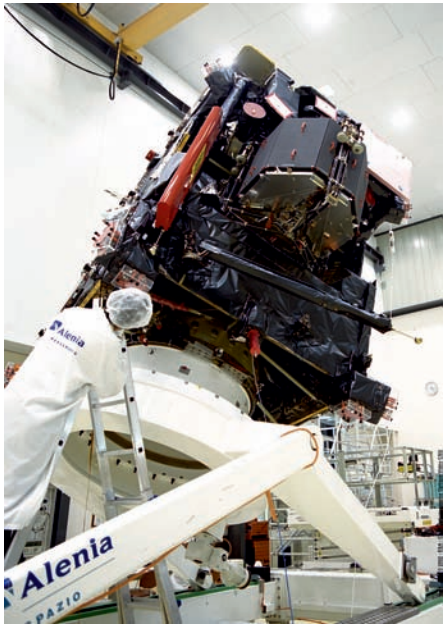
Poloha jednotlivých přístrojů na sondě Rosetta. Vpředu je přistávací modul Philae. Zdroj: ESA.

Philae, na němž byl postaven chrám bohyně Esety, který díky dvojjazyčným nápisům (démotické písmo a hieroglyfy) přispěl k rozluštění egyptských hieroglyfů. Symbolika zaměřená na Egypt provází celou misi Rosetta: místo původně plánovaného přistání bylo pojmenováno po ostrovu Agilkia, novým bezpečným místem chrámu Philae po zatopení původní lokality Asuánskou přehradou.

Stokilogramová sonda byla vybavena deseti měřicími systémy, které celkem vážily 26 kilogramů. Seznamme se s některými z nich:

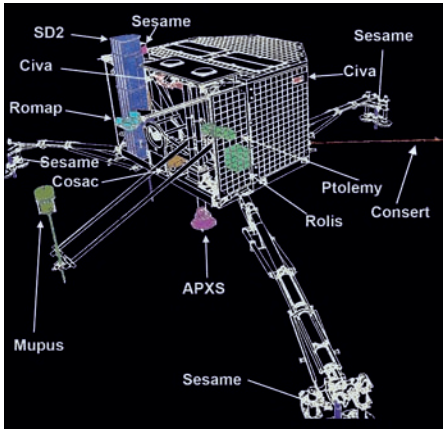
- Vrtná sada SD2 (*Sample Drill & Distribution*) byla schopna odebírat vzorky o hmotnosti maximálně 3 mg, případně objemu nejvýše 20 ml. Vrtná hlavice o průměru 12 milimetrů mohla proniknout do různé hloubky podloží až do 230 milimetrů a poradila si s tvrdostí podloží od poprašku nadýchaného sněhu až po čedič. Karuselový systém umožňoval zpracovávat vzorky v 26 pícách a předávat ke zpracování dalším systémům Phliae. Vrtná souprava potřebovala při plném výkonu 12 W.
- Spektrometr APXS (*Alpha-Protone X-ray Spectrometer*) měl být při řádném dosednutí Philae umístěný 4 cm nad povrchem. Tento systém, umožňující pomocí energetických částic určit složení prachu, byl umístěný jak na Philae, tak na mateřské sondě Rosetta.
- Obrazový systém CIVA (*Comet Infrared and Visible Analyser)* zahrnoval dva experimenty: CIVA-P byl tvořen sedmi identickými fotoaparáty, které umožňovaly vytváření panoramatických snímků. CIVA-M byly dva miniaturní mikroskopy, jeden ve viditelné části spektra, druhý v infračervené oblasti.
- Plynový chromatograf COSAC (*COmetary SAmpling and Composition*), které prováděl měření odebraných vzorků do vyčerpání energie z primárních baterií. Chromatograf COSAC potvrdil přítomnost organických látek na kometě 67P.
- Hmotnostní spektrometr Ptolemy cílený na lehké molekuly, zejména uhlík, dusík a kyslík a těkavé látky jako je voda, oxid uhličitý a vzácné plyny a rovněž lehké organické molekuly.

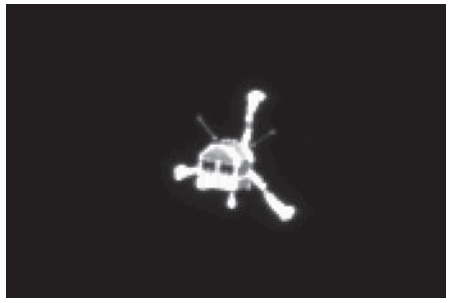
Z dalších přístrojů jmenujme alespoň teplotní senzory MUPUS umístěné na kladivu sbíječky, které se ale bohužel podařilo proniknout jen do hloubky několika milimetrů, magnetometr ROMAP a akustický snímač prachu DIM. S výjimkou základny a čelní stěny byl povrch Philae pokryt fotovoltaickými články s plochou 2,2 m^2, které byly při osvitu Sluncem schopny dodávat ve vzdálenosti 3 au od Slunce výkon 32 W.



Kompletace sondy Rosetta s přistávacím modulem Philae před startem. Zdroj: CNES.

Schéma umístění klíčových experimentů na přistávacím modulu Philae. Zdroj: ESA.





Modul Philae opouští sondu Rosetta. Záběr byl pořízen kamerou na Rosettě. Zdroj: ESA.

Poloha modulu Philae zakreslená podle nekvalitního smíku z obíhající Rosetty. Philae skončil na boku v rokli-ně mezi skalami. Zdroj: ESA.



Komplikované přistání

Už po navedení sondy na oběžnou dráhu komety bylo pro úspěšné naplánování přistání nezbytně nutné jádro komety důkladně zmapovat. Již 20. srpna 2014 roku vybrala ESA z fotografií pořízených ze vzdálenosti 30 až 100 kilometrů od povrchu komety 10 míst na povrchu vhodných pro přistání modulu, které následně zúžila na 5 nejvhodnějších kandidátů. Ty se staly na delší dobu terčem dlouhých sporů a diskuzí především mezi vědci z různých experimentů, které měly být po přistání modulu prováděny. Vědci a inženýři z ESA se nakonec shodli na místu označovaném „J“ v oblasti dvojitě laločnatého objektu jedné strany komety, které bylo později přejmenováno na „Agilkia“. Toto místo pak bylo detailně studováno především při nízkých průletech sondy Rosetta – přibližně 10 km nad povrchem.

Pak nastala noc z 11. na 12. listopadu a vědce a inženýry z ESA čekalo těžké rozhodnutí. „Go or No-Go?“ Tedy vyslat modul nebo nevyslat? Proti tomuto rozhodnutí byly i testy systému aktivního sestupu, které nepotvrdily chod motoru umístěného ve vrchní části modulu Philae. Tento motor měl přidržovat modul při povrchu komety, než dojde k jeho pevnému ukotvení pomocí harpun. Vše bylo důležité především z důvodu malé únikové rychlosti z jádra komety, která je přibližně 0,5 m/s. Jakýkoliv prudší pohyb modulu tak mohl znamenat jeho „odraz“ zpět do vesmíru, a tím i konec mise. Gravitace na kometě je přibližně stotisíckrát menší než u nás na Zemi. ESA se nakonec rozhodla riskovat a k přistání použít pouze kotvící harpuny, což mohlo znamenat selhání mise především v případě, že by Philae přistál na prudším svahu nebo na kamenu. Převrácení modulu by totiž také znamenalo ukončení mise.

Přistání Philae doprovázela řada nehod. Prvním z nich bylo selhání výpočetního systému, což bylo v předvečer přistání vyřešeno – jak jinak – restartem systému. Dalším problémem byl hrozící výpadek přistávacích dusíkových trysek, které měly po dosednutí přitlačit sondu ke kometě, zatímco ji vrtáky v nohách podstavce upevní k povrchu. Jelikož fixace ke kometě byla zároveň zabezpečena pomocí harpuny, bylo rozhodnuto, že se přistání uskuteční.

Dne 12. listopadu 2014, kolem třetí hodiny ranní, byl započat komplexní oddělovací manévr a v 9:35 SEČ došlo k oddělení modulu Philae od těla sondy Rosetta ve vzdálenosti 22,5 km od středu komety. Modul Philae tak započal svou sedmihodinovou sestupovou cestu

k jádru komety. Po oddělení bylo nejdříve nutné vytvořit komunikační spojení mezi modulem a sondou. Philae totiž dokázal odesílat data na Zemi pouze prostřednictvím Rosetty. Modul se komunikačnímu centru odmlčel na celé dvě hodiny, po kterých odeslal na Zem první fotografie sondy Rosetty těsně po oddělení. ESA již v tuto dobu zpřístupnila veškeré dostupné informace na svém televizním kanálu, kde mimo jiné promluvil i sám Klim Čurjumov, spoluobjevitel navštívené komety.

Při samotném přistání trysky selhaly, jak někteří vědci očekávali. Aby toho nebylo málo, ani harpuna nevystřelila. Po přistání se Philae od komety odrazil a v jejím slabém gravitačním poli vyskočil zhruba kilometr vysoko. Zlí jazykové si pak neodpustili přirovnání pohybu Philae k trajektorii špuntu z lahve šampaňského otevřeného při oslavě přistání na kometě. Po dalším kontaktu s povrchem následoval další, již nižší skok. Naštěstí poté už Philae kometu neopustil. Skončil však v nedůstojné poloze na boku a navíc ve stínu skalnatého útesu, kam dopadá světlo jen půldruhé hodiny za dvanáct hodin. Rovněž komunikace s mateřskou lodí byla možná jen ve tří až čtyřhodinových časových oknech. Přesto systémy začaly pracovat a po deseti letech létání vesmírem a s „najetými“ více než 6,4 miliardami kilometrů začalo pro vědce zpracovávající data naměřená misí Rosetta vzrušující období.

Hmotnostní spektrometrie – *diagnostická metoda zaměřená na stanovení složení plynné směsi. Hmotnostní spektrometrie určuje zastoupení molekul nebo jejich fragmentů ve směsi iontů podle parametru daného podílem molekulové hmotnosti a náboje iontu. Využívá skutečnosti, že zrychlení nabité částice v elektrickém poli je přímo úměrné náboji nabité částice a nepřímo úměrné hmotnosti.*



Nelíčená radost v řídícím středisku v okamžiku potvrzení, že modul Philae na povrchu komety 67P /Čurjumov-Gerasimenko skutečně přistál. Zdroj: ESA.

Philae využil svých zhruba šedesát hodin, které systémy sondy měly zajištěné z primárních baterií. Mezitím se z oběžné dráhy pátralo po přesném místě, kam Philae dopadl. Poté se modul nadlouho odmlčel, neboť byl v listopadu 2014 hibernován a čekalo se, zda se při následném přiblížení komety ke Slunci jeho baterie alespoň částečně v nevýhodné poloze na boku nabijí. K tomu skutečně došlo a modul se ze svého spánku probudil v červnu 2015.

Život na kometě?

Přístrojové vybavení sondy Rosetta by si jistě zasloužilo zvláštní

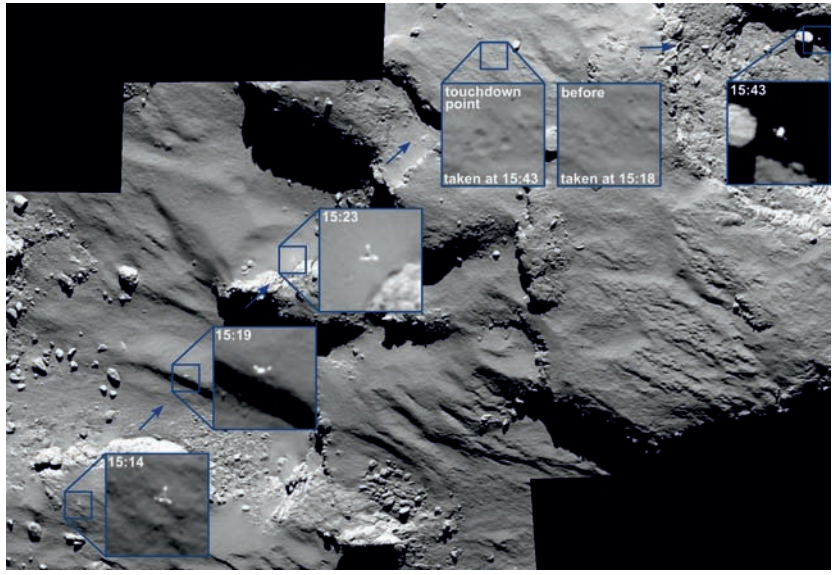
Aminokyseliny – *organické sloučeniny charakterizované přítomností karboxylové skupiny –COOH a aminoskupiny –NH_2. V biochemii jsou významné α-aminokyseliny, u kterých jsou obě funkční skupiny, karboxylová i aminoskupina, vázány ke stejnému uhlíku. V živých organizmech se až na výjimky vyskytují převážně levotočivé aminokyseliny. Reakcí mezi karboxylovou skupinou a aminoskupinou dvou aminokyselin vzniká peptidová vazba. Aminokyseliny se pomocí peptidové vazby mohou řetězit do složitějších molekul, peptidů. Peptidy dělíme podle počtu aminokyselin na oligopeptidy, vzniklé zřetězením nejvýše deseti aminokyselin a polypeptidy tvořené větším počtem aminokyselin. Bílkoviny (proteiny), které jsou strukturním a funkčním základem živé hmoty, jsou polypeptidy s velkou molekulární hmotností.*

pozornost, nicméně podrobněji se budeme věnovat jedinému přístroji, který je součástí systému ROSINA, hmotnostnímu spektrometru s dvojitým zaostřováním – ROSINA DFMS. V hmotnostním spektrometru s dvojitým zaostřováním jsou ionty vychylovány ve dvou sektorech, elektrostatickém a magnetickém. ROSINA DFMS vychází z geometrie spektrometru označované jako Nier-Johnsnova, při níž se v elektrostatickém sektoru svazek iontů ohýbá o 90° a v magnetickém o 60°. Podle výsledné polohy dopadlých iontů je dopočtena jejich hmotnost.

Vstup spektrometru je při měření orientován směrem k povrchu komety, takže neutrální částice putující do volného prostoru od jádra komety mohou volně vstupovat do ionizační komory. Elektrostatické pole na vstupu spektrometru zabraňuje iontům vletět do spektrometru. Důvod k pomyslné ceduli „Iontům vstup zakázán!“ je jednak ryze vědecký – ionizovanou a neutrální složku je třeba posuzovat zvlášť, jednak technický – nabité částice v ionizační komoře by díky lokálním elektrickým polím nedefinovaným způsobem ovlivňovaly tvorbu iontů z neutrálních molekul.

Ionizační komora byla chráněna víčkem, které se mohlo otevírat a uzavírat, případně být umístěno do střední polohy mezi těmito stavy. To jednak umožnilo chránit spektrometr před kontaminací v oblastech s vysokým tlakem v blízkosti komety, jednat víčko plnilo funkci závěrky, která omezovala přítok kometárních částic.

Záběry z kamery OSIRIS zaznamenávající přistání Philae na povrchu komety 67P. Zdroj: ESA.



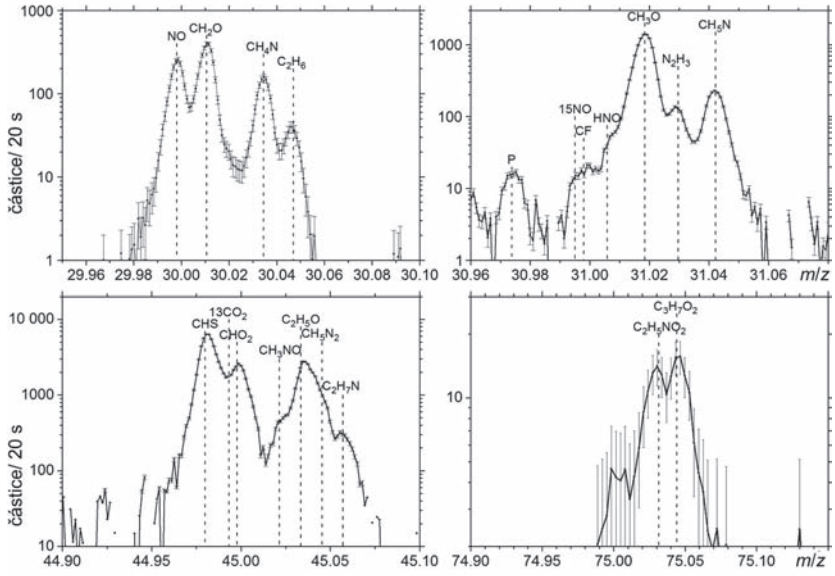
Na přítomnost nejjednodušší aminokyseliny, glycinu, v materiálu vyvrhovaném z komet ukazovaly již výsledky mise Stardust, která proletěla kolem komety Wild 2. Bohužel, vzhledem ke kontaminaci vzorků pozemským materiálem, byl kometární původ usuzován jen nepřímo ze zastoupení izotopu ^{13}C. Pochybnosti o výskytu aminokyseliny, která jako jediná může vznikat v bezvodém prostředí v zárodečném materiálu naší Sluneční

soustavy, tak přetrvávaly. Zároveň se zpočátku optimistická tvrzení, že se glycin vyskytuje v molekulárních oblacích, ukázala jako nepodložená. Ve vesmíru se aminokyseliny vyskytují v meteoritech, a má se za to, že zde klíčovou roli hrají procesy probíhající ve vodním prostředí.

Při stanovování přítomnosti organických molekul narážíme na zásadní problém hmotnostní spektroskopie. Z podstaty metody je vlastně stanoven pouze sumární vzorec. Například pro glycin zjistíme přítomnost molekuly $C_2H_5NO_2$. Pod tímto vzorcem se však může skrývat několik sloučenin, izomerů. Naštěstí se při ionizaci na vstupu spektroskopu rozrušují chemické vazby a vznikají tak lehčí ionty, fragmenty původní molekuly, s charakteristickou hmotností. Díky absenci signálů odpovídajících molekulovým hmotnostem typických fragmentů bylo možné postupně vyloučit řadu izomerů $C_2H_5NO_2$. Zcela vyloučit se nepodařilo přítomnost methylkarbamové kyseliny, nicméně nebude tvořit více než 10 % ze signálu odpovídajícímu glycinu. Společně s glycinem byl v materiálu z komety stanoven methylamin, který nemá izomery a ethylamin, jehož izomer dimethylamin byl vyloučen. Z těchto molekul může být syntetizován glycin. Zajímavostí je signál, který nemůže být vysvětlen fragmentací detekovaných molekul, ale příčinou může být fragment methylhydrazinu z pohonu sondy.

Glycin byl poprvé detekován při navedení na dráhu ve výšce 10 km nad kometou, před vypuštěním přistávacího modulu Philae v říjnu 2014. Kometa byla v té době ve vzdálenosti 3 au od Slunce. Další zaznamenání glycinu proběhlo 28. března 2015, 2 au od Slunce při průletu 15 km nad kometou. Měření probíhala od místního rána do místního odpoledne, přičemž se vzdálenost od jádra měnila mezi třiceti a patnácti kilometry při sestupu i vzestupu. Pokud považujeme kometu za přibližně bodový zdroj, měla by hustota vynásobená čtvercem vzdálenosti od

Glycin – *nejjednodušší aminokyselina. Jako jediná z dvaceti tří aminokyselin tvořících bílkoviny může vznikat v bezvodém prostředí, a proto je po ní intenzivně pátráno jak v mezihvězdném prostoru, tak ve Sluneční soustavě. Do detekce hmotnostním spektrometrem systému ROSINA na sondě ESA Rosetta, který přímo změřil výskyt glycinu při těsném průletu kolem komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko a přitom důsledně prováděl kontrolní měření látek uvolňovaných ze samotné sondy, byla všechna oznámení výskytu glycinu mimo Zemi zatížena buď kontaminací ze Země, nebo metodickou chybou a posléze zpochybněna.*



Spektra ze spektrografu ROSINA DSMS snímaná dne 9. července 2015. Vzorek pro stanovení spektra byl nabírán po dobu 20 s. Chybové úsečky odpovídají směrodatné odchylce. Zdroj: Science Advances.



Záběry výtrysků z komety. Zdroj: ESA/Rosetta.

komety zůstat konstantní. Tento předpoklad se potvrdil pro celkovou hustotu, ve které hlavní roli hraje voda. Nicméně pro glycin byly detekovány vyšší hodnoty. To ukazuje na pravděpodobné uvolňování glycinu z prachových částic. Pro tento předpoklad hovoří i zjištění glycinu během výtrysku hmoty unikající ve vzdálenosti 200 kilometrů od komety. Glycin byl detekován pouze v oblastech s vysokou hustotou při těsných průletech, případně za situací, kdy se Rosetta ve větší vzdálenosti dostala do výtrysku hmoty unikající z komety.

Nelze však vyloučit, že se glycin nachází i v kometárním ledu a je uvolňován společně s dalšími látkami. Sublimační teplota glycinu je poměrně vysoká, takže tato molekula není příliš těkavá s ohledem na nízkou teplotu komety. Tmavá prachová zrnka se však mohou zahřát na vyšší teploty.

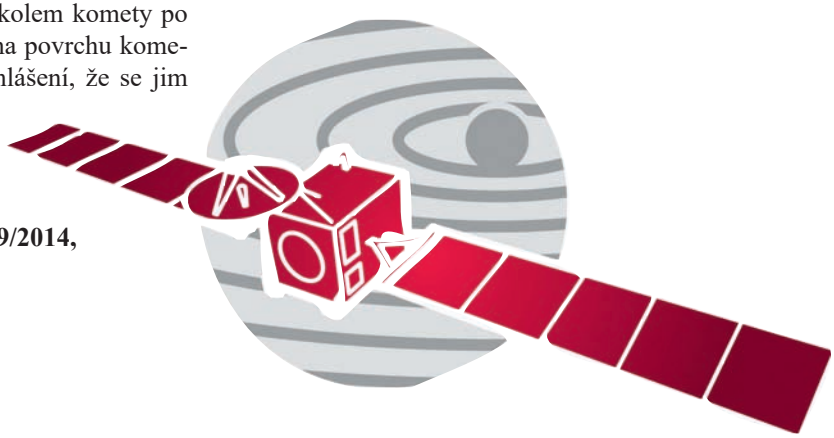
Fosfor je nezbytnou složkou nukleových kyselin, které zajišťují v organizmech ukládání a přenos informace. Nukleotidy jsou významnými molekulami z hlediska přenosu energie a buněčné signalizace. V hmotnostních spektrech byl nalezen fragment odpovídající atomárnímu fosforu, nicméně se nepodařilo najít rodičovskou molekulu. A jak je to s dalšími aminokyselinami? Zatím nevíme. Pátrání po další aminokyselině, alaninu, v hmotnostních spektrech neukázalo měřitelné stopy této aminokyseliny.

Závěr

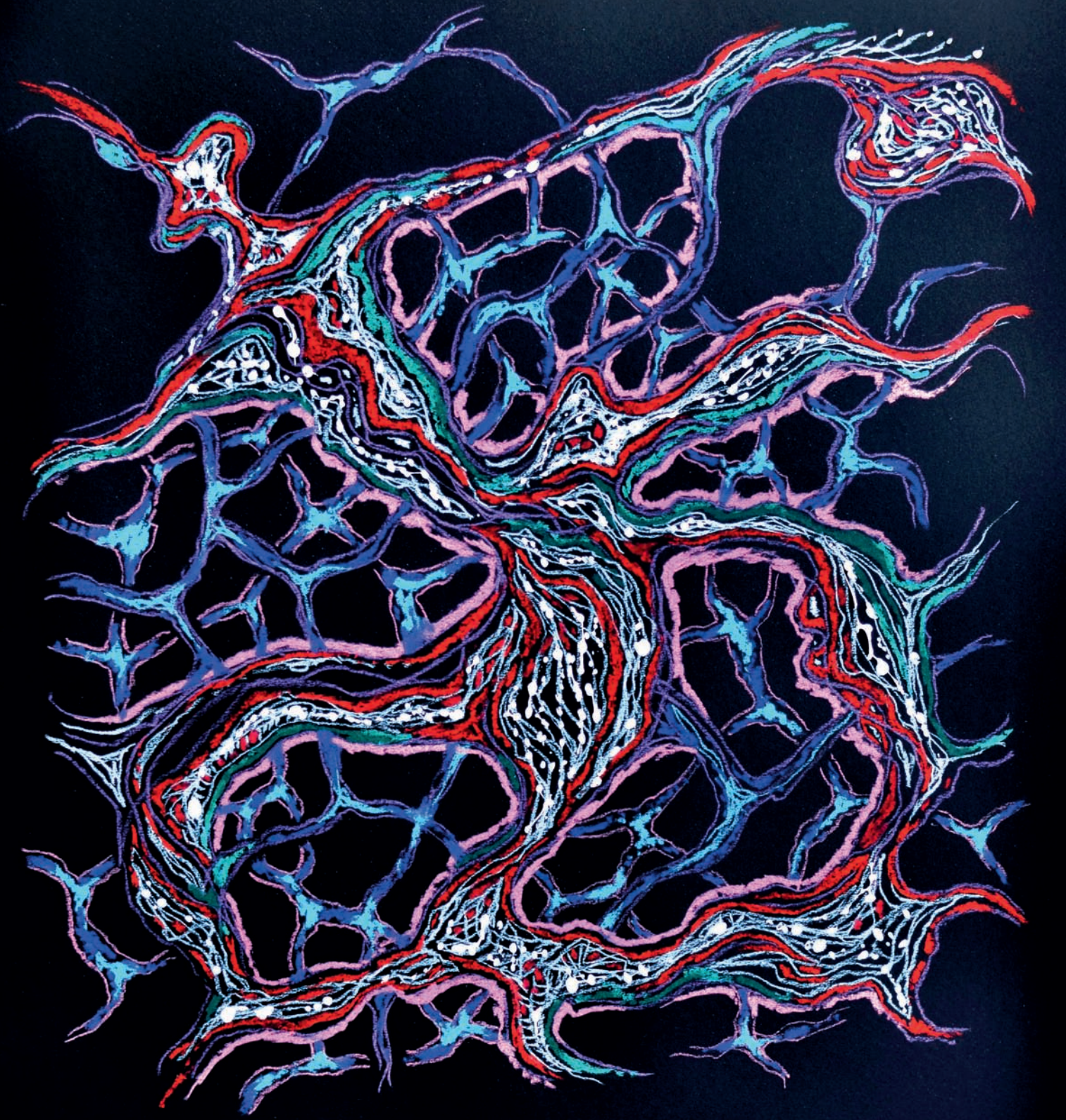
Mise si jako jeden z cílů kladla zásadní otázku týkající se původu života na Zemi: Kde se na naší planetě v životodárné polévce, ve které se posléze utvářely první životní formy, vzaly základní stavební kameny života, aminokyseliny a nukleové kyseliny? Přestože různý poměr deuteria a lehkého vodíku na kometě a v zemských oceánech svědčí pro to, že vodu na Zemi nepřinesly komety podobné 67P, je zjištění, že nejjednodušší aminokyselina – glycin – se vyskytuje v dobře vychlazené vzpomínce na vznik naší Sluneční soustavy, jasnou stopou, že v pátrání po přípravě na explozi života na třetí planetě musíme jít i k samým počátkům formování našeho místa ve vesmíru.

K vrcholům mise samozřejmě patří samotné přistání modulu Philae na povrchu komety. Zajímavostí může být, že samotná ESA již na začátku mise dávala šanci na přistání přibližně 70 až 75 %. Přistání na kometě okomentoval generální ředitel ESA, Jean-Jacques Dordain, slovy: „Naše ambiciózní mise Rosetta má zajištěno své místo v učeb-

nicích dějepisu – Rosetta jako první nejen obíhala kolem komety po její orbitě, ale nyní také její modul úspěšně přistál na povrchu komety.“ ESA pak lehce zavtipkovala při tiskovém prohlášení, že se jim podařilo na povrchu komety přistát hned dvakrát. Evropskou kosmickou agenturu vyšla mise Rosetta na 1,4 miliardy euro.



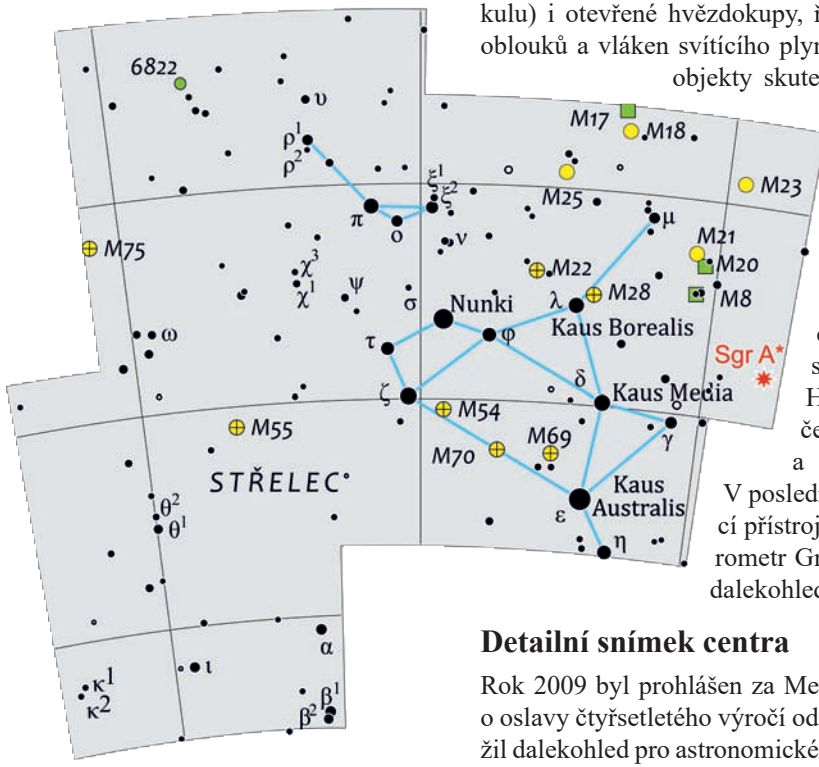
■ **Radek Beňo, Vítězslav Kříha, 2014–2016, AB 29/2014, 37/2014, 6/2015, 24/2015, 29/2015, 20/2016**



II. VZDÁLENÝ VESMÍR

Zprávy ze středu Galaxie

Střed naší Galaxie se nachází na západním okraji souhvězdí Střelce, v těsném sousedství s hranicí souhvězdí Hadonoše. Astronom se sotva na obloze setká s krásnějším místem. Okolí středu Galaxie je bohaté na mlhoviny (Trifid, Laguna a desítky dalších), kulové hvězdokupy (například M 22, která je dokonce jasnější než kulová hvězdokupa v Herkulu) i otevřené hvězdokupy, řadu pozůstatků supernov, rozsáhlých oblouků a vláken svítícího plynu a dalších zajímavých cílů. Některé objekty skutečně souvisí se středem naší Galaxie, jiné se do této oblasti náhodně promítají. V souhvězdí Střelce se nachází patnáct objektů slavného Messierova katalogu a mnoho desítek objektů z dalších katalogů. Oblast je častým cílem velkých dalekohledů, které pořizují nádherné snímky zdobící čelní strany astronomických časopisů. Za vizuální obor jmenujme alespoň Hubblův vesmírný dalekohled, za infračervený Spitzerův vesmírný dalekohled a za rentgenový observatoř Chandra. V posledních letech jsme získali další vynikající přístroje: síť radioteleskopů ALMA a interferometr Gravity využívající signál ze všech čtyř dalekohledů Velmi velkého dalekohledu VLT.



Mapa souhvězdí Střelce s vyznačeným rádiovým zdrojem Sgr A, který se nachází přesně ve středu naší Galaxie, v místě, kde sídlí centrální černá veledíra o hmotnosti 4 miliony Sluncí. Zdroj: Sky & Telescope.*

Detailní snímek centra

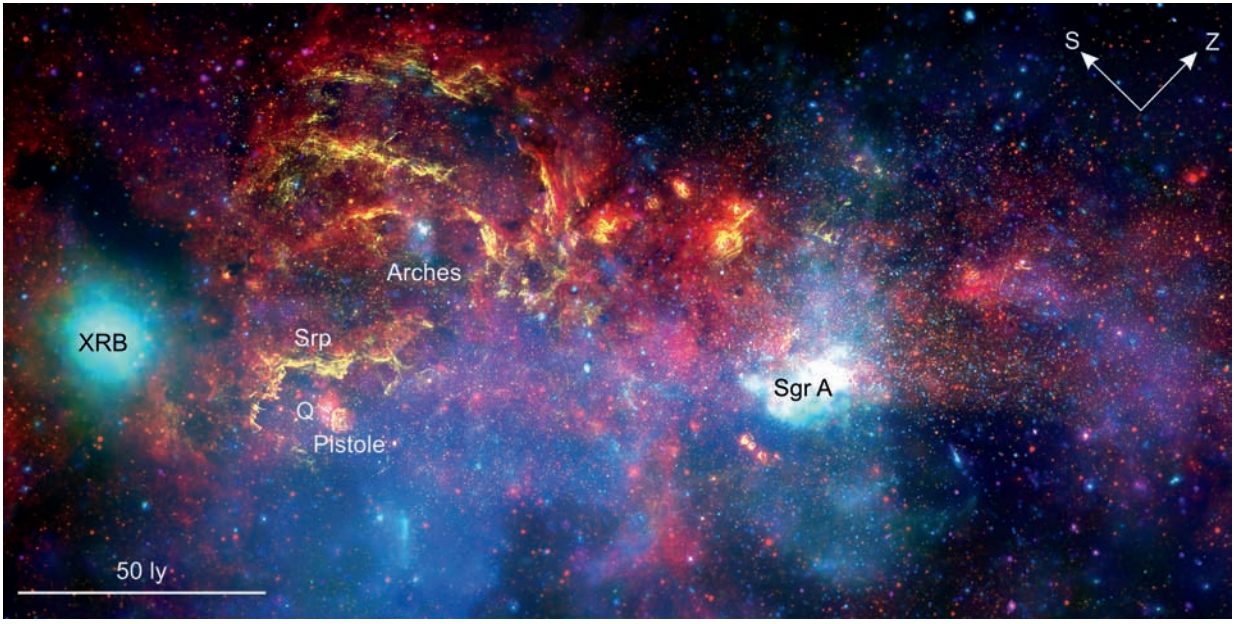
Rok 2009 byl prohlášen za Mezinárodní rok astronomie. Šlo vlastně o oslavy čtyřsetletého výročí od doby, kdy Galileo Galilei poprvé použil dalekohled pro astronomické účely. A astronomové přemýšleli, jaký velký čin, který by oslnil veřejnost, by k tomuto výročí mohli učinit. Bylo jasné, že musí jít o nějakou fotografii, která by dokumentovala pokrok astronomické techniky za oněch uplynulých 400 let. Nakonec padlo rozhodnutí spojit síly nejlepších družicových dalekohledů světa a vyfotografovat co možná nejdokonaleji střed naší Galaxie. Takové mediální kousky mívají většinou katastrofální průběh, ale tentokrát se věc skutečně podařila. Hubblův dalekohled fotografoval v blízkém in-

fračerveném oboru, Spitzerův dalekohled v infračerveném oboru a observatoř Chandra v rentgenovém oboru. Šlo o precizní práci observatoří umístěných za hranicemi atmosféry, která znemožňuje snímkování ve většině oblastí spektra. Vzniklý kompozitní snímek má 9 725 na 4 862 pixelů, což je v astronomii nebývalé. Pokud bychom ze snímku vytiskli plakát s rozlišením 100 pixelů na palec, měl by šířku 2,5 metru. Snímek je v nepravých barvách, rentgenový signál je zobrazen modře, infračervený červeně a blízký infračervený ve stupních žluté a hnědé. Prestižní snímek zabírá na šířku oblast o velikosti přibližně 250 světelných roků (30 obloukových minut). Pojďme se podrobněji podívat na některé objekty zobrazené na snímku.

Sagittarius A je rádiový zdroj objevený zaměstnancem Bellových telefonních laboratoří s českými kořeny, Karlem Janskym, už v roce 1933. Právě tímto objevem zahájil éru radioastronomie, byť se jí dál sám nezabýval. Zdroj je ve vizuálním oboru skryt okolním plynem a prachem. Na snímku jde o jasnou nepravidelnou oblast v jeho pravé třetině. Zdroj má složitou strukturu a skládá se ze tří částí. Nejrozsáhlejší je Sgr A East – východní část, která je pozůstatkem po explozi

Černá díra – *objekt, který kolem sebe zakřiví čas a prostor natolik, že z něho nemůže uniknout ani světlo. Část z nich vzniká kolapsem hvězdy v závěrečných fázích vývoje. Druhou skupinu tvoří obří černé díry sídlící v centrech galaxií. Rotující černé díry kolem sebe vytvářejí akreční disky látky a v ose rotace výtrysky vysoce urychlených částic. Paradoxně akreční disky i výtrysky, vznikající v bezprostředním okolí černé díry, velmi intenzivně vyzařují. Existují také černé díry středních hmotností (desítky Slunců), které vznikají postupným slučováním černých děr a které byly objeveny při detekci gravitačních vln. Černé díry komunikují s okolím gravitačně a nezřídka je obíhají i další objekty.*

Detailní snímek středu Galaxie pořízený dalekohledy Spitzer (IR, červená), Chandra (RTG, modrá) a HST (blízké IR, žlutá a hnědá). Zdroj: NASA/ESA.

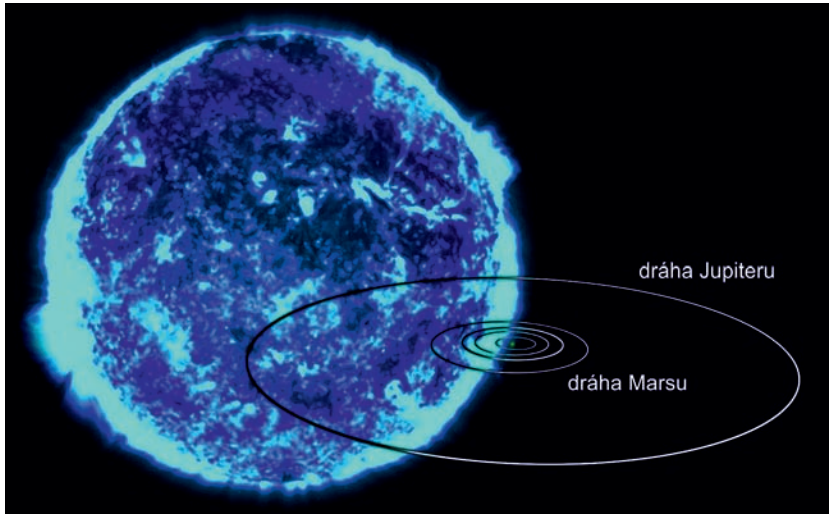


VLT – *Very Large Telescope, čtveřice dalekohledů ESO postavená v Chile na Cerro Paranal (2635 m). Dalekohledy VLT mají celistvá zrcadla o průměru 8,2 metru (Antú – 1998; Kueyen – 1999; Melipal – 2000; Yepun – 2001). Názvy zrcadel znamenají v Mapušštině Slunce, Měsíc, Jižní kříž a Venuši. Sběrná plocha každého z velkých přístrojů je 53 metrů čtverečních. Dalekohledy jsou vybaveny systémem adaptivní a aktivní optiky. Další menší pomocné dalekohledy tvoří s hlavní čtveřicí výkonný interferometr o základně 200 m, jehož srdcem je od roku 2015 přístroj Gravity – interferometr druhé generace, který nemá na světě obdoby.*

supernovy o rozměru zhruba 25 světelných roků. Stáří supernovy se odhaduje na 30 000 až 100 000 roků. Rozsah exploze musel být nebývale veliký, podle odhadů se uvolnila energie minimálně padesátkrát větší než u běžných supernov. Na snímku jde o červené rozplizlé kolečko vlevo dole od bílé spirály na západě. Západní část rádiového zdroje Sgr A West je výraznější a má bohatší strukturu. Je tvořena spirálami, které jsou ve skutečnosti oddělenými chuchvalci plynu padajícími do centrální černé díry. Uprostřed spirály je malý kompaktní zdroj označovaný Sgr A* – skutečný střed naší Galaxie. Polohou je totožný s obří černou dírou o hmotnosti 4 miliony Sluncí. Velikost zdroje Sgr A* se z měření radioteleskopické sítě VLBA odhaduje na 44 milionů kilometrů, což je zhruba poloměr dráhy Merkuru. Zdroj začal být chápán jako černá díra v roce 1974. Samotná černá díra má Schwarzschildův poloměr 12 milionů kilometrů (0,08 au).

Rentgenová dvojhvězda 1E 1743.1−2843. Druhou nejvýraznější dominantou snímku je jasná modrá skvrna v levé části (XRB) – světlo rentgenové dvojhvězdy 1E 1743.1−2843 složené nejspíše z neutronových hvězd. Zdroj není vidět v měkkém rentgenovém záření (například na záznamech bývalé observatoře ROSAT), ale je výraznou dominantou na všech přístrojích měřících záření s energií nad 2 keV (Integral, Beppo-Sax, ASCA). Jde o trvalý zdroj bez výrazné proměnnosti. S největší pravděpodobností vzniká rentgenové záření akrecí látky na kompaktní objekt, pravděpodobně neutronovou hvězdu. Není ale vyloučeno, že jde o černou díru hvězdné hmotnosti. Na snímku je tento objekt označen písmeny XRB (*X-Ray Binary*).

Porovnání Pistolové hvězdy s velikostí Sluneční soustavy (umělecká vize). Zdroj: SciTech Daily.



Hvězdokupa Arches (Oblouk). V horní části snímku jsou tři rozsáhlé oblouky svítícího plazmatu. Pod nimi je malá jasná skvrna – otevřená hvězdokupa Arches (Oblouk). Hvězdokupa obsahuje přes 130 mladých hvězd. Její svit je stíněn okolním plynem a prachem, proto je pozorovatelná jen

v rádiovém, infračerveném a rentgenovém oboru spektra. Je to nejhustší známá otevřená hvězdokupa v Galaxii. Byla objevena v roce 1995, její stáří se odhaduje na 2 až 4 miliony roků. Hvězdokupa je vzdálena přibližně 100 světelných roků od galaktického centra. Hmotnost hvězdokupy je podle odhadů nižší než 150 Sluncí. Nejhmotnější hvězdy už opouštějí Hlavní posloupnost.

Hvězdokupa Quintuplet (Pětinásobná kupa). Otevřená hvězdokupa Quintuplet je o něco menší a řidší než hvězdokupa Arches. Nachází se uvnitř mlhoviny Srp (výrazného oblouku plazmatu ve tvaru srpu) v úhlové blízkosti Pistolové hvězdy. V hvězdokupě jsou červení veleobři a tři modří proměnní obři typu S Doradus. Přítomnost těchto hvězd ukazuje, že jde o starší hvězdokupu, než je Arches. V hvězdokupě je pět výrazných infračervených zdrojů, které jí daly jméno. Hvězdokupa byla objevena v celooblohové přehlídce na 2,5 mikronu v roce 1983. Na fotografii (strana 65) je hvězdokupa označena písmenem Q.

Pistolová hvězda. Pistolová hvězda se nachází v těsné blízkosti hvězdokupy Quintuplet (směrem na jih). Pistolová hvězda je zářivý modrý proměnný hyperobr o hmotnosti přes 100 Sluncí, který má zářivý výkon asi 1,7 milionu Slunce. Jde o jednu z nezářivějších hvězd v Galaxii. Průměr hvězdy se odhaduje na 1,4 miliardy kilometrů – to je srovnatelné s průměrem dráhy Jupiteru. Symetricky ji obklopuje Pistolová mlhovina o průměru čtyři světelné roky, která vznikla asi před 5 000 lety poté, co hvězda odvrhla zhruba desetinásobek hmoty Slunce. Pistolová hvězda je od nás viditelná jen v infračerveném oboru, protože ji zastiňují mezihvězdná oblaka prachu.

Černá díra

Ve středu Galaxie, ve vzdálenosti 26 000 ly, sídlí obří černá díra s hmotností 4 miliony Sluncí, a tak není v této oblasti o zajímavé jevy

Gravity – *nový interferometr druhé generace, který byl zprovozněn u čtveřice dalekohledů VLT na Mt. Paranal v Chile. Přístroj pracuje v pásmu K (2,2 μm), kde proměřuje polohy objektů s přesností 10 obloukových mikrosekund. Signál z dalekohledů přichází do interferometru Gravity optickými vlákny. Pokud přístroj využívá signál ze čtyř hlavních osmimetrových dalekohledů, je zorné pole 2", pokud pracuje v režimu, při němž využívá pomocné dalekohledy, je zorné pole 4".*



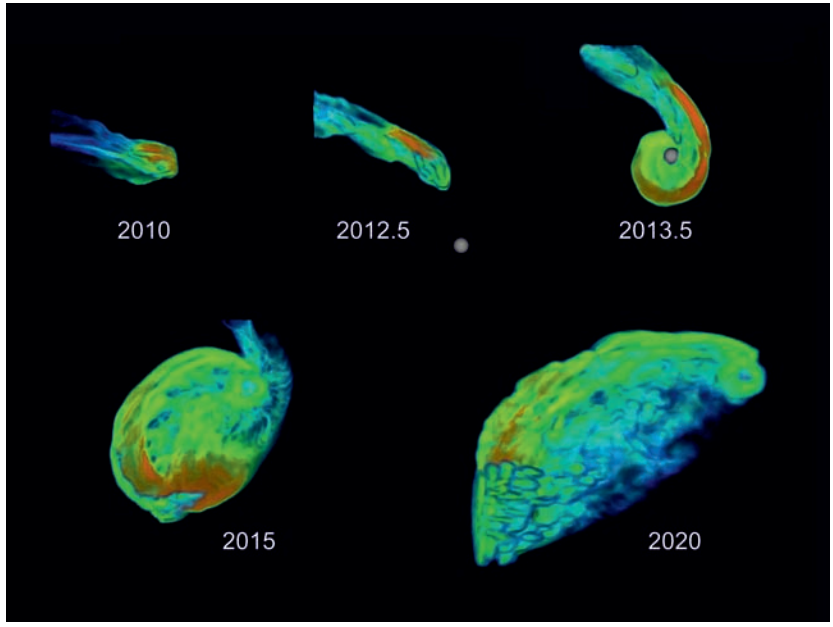
Interferometr Gravity, v němž se v infračerveném oboru kombinuje signál zachycený čtveřicí dalekohledů VLT. Největší podíl na jeho stavbě mají odborníci z německého Institutu Maxe Plancka. Zdroj: ESO.

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 působící na Zemi jsou příčinou přílivu a odlivu a také příčinou výměny momentu hybnosti mezi Měsícem a Zemí, která vede k postupnému vzdalování Měsíce o 4 centimetry za rok. Obdobná slapová vazba existuje mezi Zemí a Sluncem a je pravděpodobně hlavní příčinou současného vzdalování Země od Slunce. Ve větších měřítkách působí slapové síly například při prolínání dvou galaxií.*

nouze. Její Schwarzschildův poloměr je roven 12×10^6 km, tj. 0,08 vzdálenosti Země od Slunce. V okolí černé díry je plazmatický akreční disk se silným magnetickým polem, v němž dochází k přepojování (rekonekci) magnetických siločar. Přepojování je pravděpodobně zdrojem občasných zjasnění v okolí této obří černé díry pozorovaných v rentgenovém a infračerveném oboru (vizuální obor je pohlcen mezilehlým plynem a prachem). Periodicita těchto záblesků má dvě složky: 20 minut (nejspíše oběžná doba vnitřní části akrečního disku) a cca 1 hodinu (snad kvaziperiodicita rekonekcí magnetického pole). Černá díra je zdrojem intenzivního radiového signálu, který objevil Karl Jansky už v roce 1933 a který je dnes označován jako Sgr A*. Rentgenový signál z centra naší Galaxie (z bezprostředního okolí černé díry) je pozorován z družic (například Chandra), neboť atmosférou neprochází.

Kolem černé díry obíhá značné množství hvězd, a centrální černá díra je tak vlastně středem hvězdokupy. Měření parametrů dráhy těchto hvězd umožňuje relativně přesné určení hmotnosti centrální černé díry. Pohyb hvězd je možné pozorovat v blízkém infračerveném oboru (VLT, Keck) a z něho přesně hmotnost centrální černé díry dopočíst. Podle odhadů by se do vzdálenosti zhruba 3 světelných roků od centrální černé díry mělo nacházet přibližně 20 000 neutronových hvězd a zhruba stejný počet hvězdných černých děr, tj. černých děr vzniklých na konci hvězdného vývoje, jejichž hmotnost je několikanásobkem hmotnosti sluneční.

Numerická 3D simulace průletu oblaku G2 kolem centrální černé díry provedená v Lawrencově národní laboratoři v Livermoru. Zdroj: University of Arizona.



Zklamání z oblaku G2

Když byl v roce 2011 objeven oblak plynu G2 mířící k obří černé díře v centru naší Galaxie, byli astronomové a fyzikové nadšeni. Očekávali jeho blízká setkání s kompaktními objekty v okolí centra a postupné rozcupování černou veledírou doprovázené bouřlivými projevy.

Oblak G2 objevila skupina z německého Institutu Maxe Plancka (MPI) vedená Stefanem Gillesenem na snímcích z VLT. Objev byl publikován v časopise Nature v roce 2012. Oblak byl později dohledán i na snímcích z roku 2002. Záhy po objevu se ukázalo, že se oblak pohybuje od nás (má červený posuv spektrálních čar) směrem k centrální černé díře, kterou měl podle prvních propočtů minout ve vzdálenosti pouhých 20 světelných hodin od centra (tj. přibližně 2 000 Schwarzschildových poloměrů neboli 150 au). Hmotnost oblaku je trojnásobkem hmotnosti Země. Oblak byl v době objevu složen z prachu o teplotě 550 K a plynné (převážně vodíkové) složky o teplotě 10 000 K. Při této teplotě je oblak částečně ionizován a je tedy v plazmatickém skupenství. Jeho původ je dodnes nejasný. Jde o druhý podobný pozorovaný oblak v této oblasti. Oblak G1 se pohyboval na obdobné dráze jako G2, ale předcházel ho o 13 roků.

Podle původních představ se měl oblak plynu G2 setkávat s kompaktními objekty v okolí centrální černé díry. Při těchto setkáních mělo docházet k ionizaci oblaku a pádu jeho části na kompaktní objekt doprovázenému zábleskem krátkovlnného záření. Oblak letící centrální oblastí Mléčné dráhy tak měl umožnit detekci minimálně několika černých děr a neutronových hvězd a předvést našim přístrojům velkolepý plazmatický ohňostroj.

Podrobné třírozměrné simulace průletu oblaku kolem centrální černé díry, které slibovaly zajímavou podívanou na několik nejbližších desetiletí, provedli vědci v superpočítačovém centru Lawrencovy národní laboratoře v Livermoru. K simulaci bylo třeba 50 000 hodin strojového času rozloženého mezi 3 000 procesorů superpočítače Palmetto. Průlet oblaku měl být podobný chování kapky mléka v ranní kávě, včetně jejího roztahování a turbulencí vznikajících na okrajích.

Očekávaný průlet pericentrem veledíry se opozdil z podzimu 2013 až na jaro 2014, kdy oblak v naprosté tichosti proklouzl ve vzdálenosti 150 astronomických jednotek od centrálního monstra. Bohužel se

ALMA – *Atacama Large Millimeter Array. Síť 66 radioteleskopů o průměru 12,5 metru, kterou vybudovala Evropská jižní observatoř (ESO) v chilských Andách ve výšce 5100 m nad mořem na planině Lano Chajnantor v blízkosti městečka San Pedro de Atacama. Smlouva o stavbě byla podepsána v roce 2002, se stavbou se započalo na podzim 2003, stavba byla dokončena na konci roku 2012.*

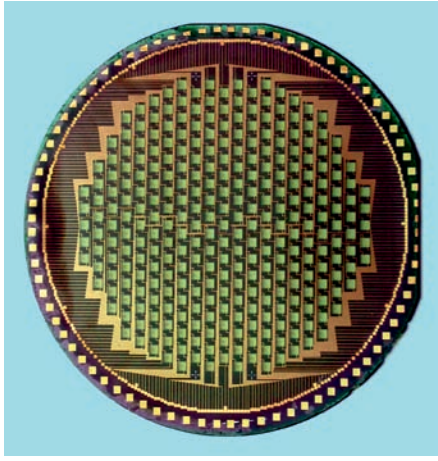


ALMA, radioteleskopické pole složené z 66 antén, které se nachází v Atacamské poušti. Cílem pozorování jsou nejchladnější zákoutí vesmíru. Síť radioteleskopů ALMA je ale také vhodná k pozorování naší centrální černé díry, neboť mikrovlnný signál hustým prostředím středu Galaxie alespoň trochu prochází. Zdroj: ESO/C. Malin.

APEX (radioteleskop) – *Atacama Pathfinder EXperiment, dvanáctimetrový radioteleskop ESO umístěný v Chile v Atacamské poušti ve výšce 5 100 metrů nad mořem. Do provozu byl uveden v roce 2007, stal se prvním radioteleskopem ze zamýšlené sítě 66 teleskopů ALMA.*

LABOCA – *Large APEX BOlometer CAmera, maticový detektor elektromagnetického záření v submilimetrové oblasti na pomezí radiových vln a infračerveného světla, s excelentní citlivostí. Umístěn je na radioteleskopu APEX v Atacamské poušti v Chile v nadmořské výšce 5 100 m.*

Pole 295 bolometrických snímačů použité v kameře LABOCA na prvním z radioteleskopů sítě ALMA. Průměr křemíkové destičky je 102 mm. Zdroj: MPI.



žádný divoký ohňostroj nekonal, žádné rentgenové ani jiné záblesky nebyly pozorovány. Proč byl průlet oblaku tak poklidný? A šlo tedy o zklamání? Není právě neočekávaný průběh důvodem k zamyšlení nad podstatou oblaku a motivací k pochopení procesů při jeho průletu kolem naší centrální černé díry?

Oblak se podle výpočtů při průletu pericentrem (150 au od černé díry) roztáhl na délku 1 000 au. Jeho čelo získalo rychlost 10×10^6 km/h (2 500 km/s, přibližně 1 % rychlosti světla), zadní část se pohybovala zhruba čtvrtinovou rychlostí. Průměrná hustota oblaku je relativně vysoká, proto se spekuluje o tom, že by v jeho nitru mohla být skryta hvězda. Hvězda by samozřejmě ovlivnila dynamiku průletu a přispěla by k udržení oblaku pohromadě, a tím ke klidnému průletu bez výrazného roztrhání oblaku černou dírou.

Pokud je uvnitř oblaku G2 skutečně hvězda, je možné existenci oblaku vysvětlit několika způsoby. Mohlo by například jít o protoplanetární disk kolem velmi mladé hvězdy, nebo o hvězdný vítr z hvězdy typu T Tauri, případně o odhozenou obálku novy. Exotičtější, ale nikoli nereálné teorie předpokládají, že uvnitř oblaku je hvězda hlavní posloupnosti a oblak je výsledkem jejího přiblížení k některé z mnoha hvězdných černých děr přítomných ve středu naší Galaxie. Taková těsná setkání jsou asi častá a měla by vést ke vzniku gravitačních vln.

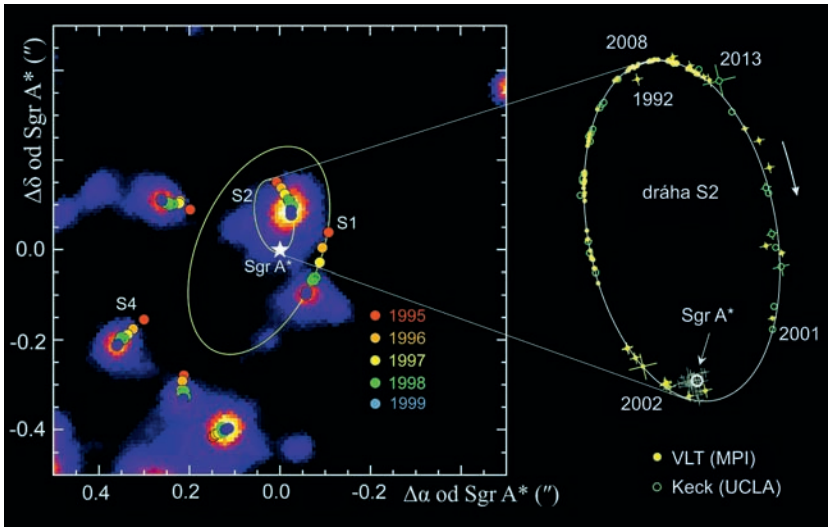
Skupina astronomů soustředěná kolem objevitele oblaku G2 Stefana Gillesena předložila další možný scénář. Podle provedených měření jsou charakteristiky oblaků G1 a G2 zcela kompatibilní. Mohlo by tak jít o pozůstatky bývalé hvězdy roztrhané slapovými silami. To by znamenalo, že na bývalé dráze hvězdy je souvislý pás plynu a prachu, který je jen v některých částech ionizovaný. Dvě z těchto částí odpovídají oblakům G1 a G2. Souvislý pás plynu a prachu prolétající kolem centrální černé díry by mohl vysvětlit klidný průběh průletu. Nová teorie vrátila do hry scénář čistě plynného oblaku bez hvězdy v jeho středu, což znamená, že v současnosti jsou možné oba scénáře: relativně malý oblak s hvězdou, nebo souvislý proud plynu a prachu bez přítomnosti hvězdy.

Proklatě rychlá hvězda

V červenci 2015 byl zprovozněn na čtveřici dalekohledů VLT interferometr Gravity druhé generace, který umožňuje měřit polohy hvězd pohybujících se kolem naší černé veledíry s bezprecedentní přesností.

Citlivost přístroje Gravity je patnáctinásobná v porovnání s libovolnou ze čtyř samostatných jednotek VLT. Přístroj Gravity bude samozřejmě pozorovat i jiné černé díry, jak obří v jádrech aktivních galaxií, tak se pokusí vyhledávat černé díry středních hmotností, o jejichž existenci jsme se dozvěděli při prvním zachycení gravitačních vln. Název interferometru připomíná jeho schopnost detailně studovat gravitační pole v okolí černých děr i jiných objektů.

Hvězda s označením S2 je sledována od roku 1992 a je prvním objektem, u něhož byl pozorován celý oběh kolem centrální veledíry. Perioda oběhu je 15,6 roku a hvězda se vrátila do stejné pozice v roce 2008. V polovině roku 2018 prošla pericentrem, v němž měla nejvyšší rychlost, která činila 2,5 % rychlosti světla, což je přibližně 30 milionů kilometrů za hodinu nebo zhruba 8 000 kilometrů za každou sekundu. Zprovoznění interferometru Gravity pro infračervenou oblast spektra nemohlo být načasováno lépe. K dalšímu přiblížení do pericentra dojde až v roce 2034. Při nejtěsnějším přiblížení byla hvězda S2 vzdálena od černé díry pouhých sedmnáct světelných hodin, takže jsme v reálném čase sledovali průlet objektu v její těsné blízkosti.



Hvězdokupa v okolí centrální černé díry. U hvězdy S2 byl jako u první hvězdy už pozorován celý oběh. Hvězda S2 je monitorována od roku 1995, a to hned dvěma institucemi – Institutem Maxe Plancka a Kalifornskou univerzitou v Los Angeles. Excentricita dráhy je 0,88, hvězda se nejblíže k centrální černé díře přiblíží na 120 astronomických jednotek (čtyřnásobek vzdálenosti Neptunu od Slunce). Oběžná doba je 15,6 roku. Jde o hvězdu spektrální třídy B1 s hmotností rovnou patnáctinásobku sluneční hmotnosti. Z dlouhodobého hlediska bude nesmírně zajímavé pozorovat poruchy dráhy této hvězdy způsobené dalšími blízkými objekty. Kolem centrální černé veledíry je totiž řada neutronových hvězd a černých děr. Zdroj: Leicester University, VLT (MPI), Keck (UCLA).

■ **Petr Kulhánek, 18. 11. 2016, AB 40/2016, AB 30/2014**

Pulzary v jádru Galaxie

Fermi – *americká gama observatoř, která se v roce 2008 stala následovníkem slavné gama observatoře Compton. Rozsah detekovaného záření: 10 až 300 GeV. Původně se tato observatoř jmenovala GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope), v srpnu 2008 byla přejmenována na Fermi Gamma-ray Space Telescope (FGST) podle významného italského kvantového fyzika. Observatoř je na nízké oběžné dráze s perigeem 536 km a apogeem 553 km. Na stavbě observatoře se kromě NASA také podílely CEA, DLR, ASI, JAXA a SNSB. Mise byla v roce 2013 prodloužena do roku 2018.*

Gama observatoř Fermi je na nízké oběžné dráze v provozu již od roku 2008. Data nashromážděná za téměř sedm roků její činnosti od 4. srpna 2008 do 3. června 2015 se stala základem pro analýzu původu gama signálu z centrální oblasti Galaxie.

Neutronové hvězdy a pulzary

Neutronová hvězda může vzniknout za určitých podmínek například kolapsem červeného veleobra v závěrečné fázi hvězdného vývoje. Jde o objekt hmotností srovnatelný s původní hvězdou, ale o průměru v řádu desítek kilometrů. Jelikož se při proměně hvězdy ve hvězdu neutronovou zachovává původní rotační moment, změna rozměrů z milionů kilometrů na pouhé desítky kilometrů nutně vyústí v odpovídající zrychlení rotace. Pulzar by mohl vzniknout ale také v soustavě těsné rentgenové dvojhvězdy. Jednu složku tvoří bílý trpaslík s počáteční hmotnosti 1,2 hmotnosti Slunce, který nasává látku z druhé složky o hmotnosti kolem dvou Sluncí. Přestože bílý trpaslík přesáhne akrecí kritickou hmotnost danou Chandrasekharovou mezí, nezhroutí se po ukončení přetoku látky do neutronové hvězdy, jelikož rotuje tak rychle, že kontrakci brání odstředivá síla. S postupujícím časem ale hmotný bílý trpaslík rotaci zpomaluje a nakonec se zhroutí do milisekundového pulzaru na velmi výstředné dráze. Jeho průvodcem zůstává málo hmotný heliový bílý trpaslík, pozůstatek dřívější dárcovské hvězdy.

Gama observatoř Fermi. Zdroj: NASA.



Neutronové hvězdy rotují velmi rychle. Typická doba rotace se pohybuje řádově v sekundách. Někdy může jít ale až o stovky otáček za sekundu. Dosud nejvyšší rychlost otáčení byla zjištěna u hvězdy, která se otočí 716krát za sekundu.

Rychle rotující hvězda vyzařuje do okolního prostoru energii v celém spektrálním rozsahu od rádiové oblasti, přes viditelné světlo až po záření gama. Jelikož jde ale o objekty velmi malých rozměrů, je jejich okolí utvářeno strukturou magnetického pole a odcházející elektromagnetické záření je směřováno podél magnetických siločar rychle rotujícího objektu. Pro pozorovatele ve vzdáleném vnějším vesmíru tak zůstává jediná možnost, jak by takovou rychle rotující hvězdu mohl pomocí elektromagnetických vln zaznamenat. Pozorovatel se musí nacházet ve směru velmi úzkého kužele v okolí magnetické osy hvězdy, jímž záření od hvězdy do prostoru odchází. Protože osa rotační a osa magnetická obvykle nebývají totožné, můžeme pozorovat záblesky záření, jejichž frekvence odpovídá rotaci neutronové hvězdy. Takovéto objekty byly nazvány pulzary. Pulzary objevila v rádiovém oboru v roce 1967 studentka Jocelyn Bellová a její školitel Antony Hewish byl za tento objev v roce 1974 odměněn Nobelovou cenou.

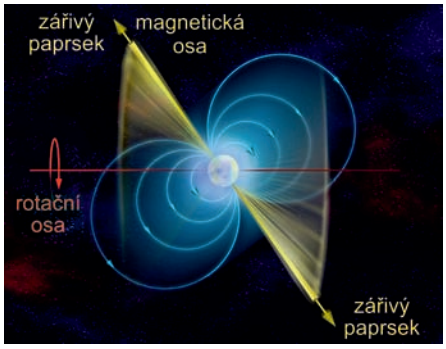


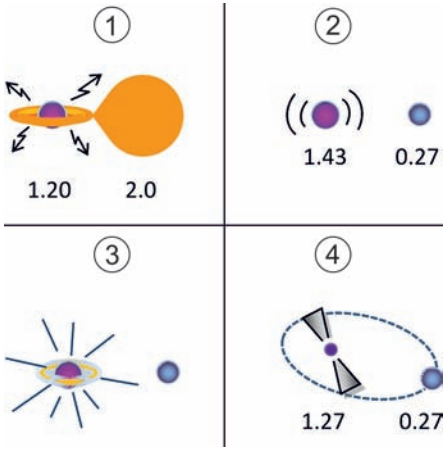
Schéma pulzaru. Magnetické pole směruje tok záření podél magnetické osy. Při otáčení objektu kolem rotační osy, která není totožná s magnetickou, dojde k majákovému efektu – pozorovatel uvidí pravidelné záblesky. Zdroj: National Radio Astronomy Observatory.

Není pulzar jako pulzar

Většina dnes známých pulzarů se nachází v disku naší Galaxie. Pulzary byly ale nalezeny také v centrálních oblastech kulových hvězdokup. Nejvíce pulzarů vysílá v rádiovém oboru, známe však i pulzary svítící ve viditelném světle, rentgenové pulzary a také gama pulzary. Rádiové pulzary lze rozdělit do dvou hlavních skupin: pulzary milisekundové a tzv. „normální“ pulzary. Perioda milisekundových pulzarů se pohybuje nejčastěji v intervalu 1 až 30 ms, a to bylo také příčinou jejich názvu. Důležitější charakteristikou je však jen nepatrné zbrzďování rotace, které prozrazuje poměrně slabé vnější magnetické pole (silné pole je schopné rotaci zpomalovat). Většina známých pulzarů jsou ale „normální“ objekty s periodou od 30 ms až do 8 s, což by mělo odpovídat hvězdám starým jen několik milionů roků s extrémně silným magnetickým polem typicky kolem 10^8 T.

Neutronové hvězdy mohou vysílat záblesky i v rentgenovém oboru. První skupinou jsou anomální rentgenové pulzary AXP (*Anomalous X-ray Pulsars*), u nichž je mechanizmus vzniku záblesků analogický jako u rádiových pulzarů. Druhou skupinou jsou opakující se zdroje měkkého gama záření SGR (*Soft Gamma-ray Repeaters*), které vysílají nepravidelné záblesky v rentgenovém oboru nebo na nízkých energiích oboru gama. Tyto objekty mají s pulzary společné jen to, že jde o neutronové hvězdy. Mechanizmus vzniku záblesků je odliš-

Alternativní vznik pulzaru v soustavě těsné dvojhvězdy. Zdroj: Max Planck Institute.



Neutronová hvězda – *těleso tvořené degenerovaným neutronovým plynem o hmotnosti menší než přibližně 2,5 Slunce. Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu desítek kilometrů. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných hvězd nebo při explozích supernov.*

Pulzar – *neutronová hvězda, jejíž magnetická a rotační osa nemají shodný směr. Zářící oblasti v magnetických pólech hvězdy vytvářejí pro pozorovatele majákovým efektem pravidelné pulzy. První objevené pulzary byly rádiové, dnes známe i pulzary rentgenové nebo gama pulzary.*

ný a souvisí s náhodným přepojováním magnetických siločar. Perioda rotace těchto objektů bývá v intervalu 5 až 12 sekund a velmi rychle narůstá, což souvisí se zpomalováním rotace vlivem extrémně silného magnetického pole až 10^{11} T (SGR patří do skupiny tzv. magnetarů).

Dnes už jsou známy ale i pulzary, které prvotním představám o pravidelně blikajících majácích v dalekém vesmíru, dle nichž je možno si seřizovat hodinky, tak úplně neodpovídají. Objev prvních jedenácti takových nepravidelných zdrojů byl publikován v roce 2006 a dostaly prvotní označení RRT (*Repeating Radio Transients*), tedy něco jako pomíjivé rádiové majáky. Tyto pulzary vydávají nepravidelné signály v intervalech několika minut až hodin. Když bylo ale zjištěno, že podkladem je vždy slabší signál s periodou řádově v jednotkách sekund, byly rychle přejmenovány na RRAT (*Rotating Radio Transients*). Rotační periody objektů RRAT se pohybují v intervalu 0,4 až 6,9 s.

Jednotlivých pulzarů je už známo několik tisícovek a nejde vůbec o jednotvárnou skupinu astrofyzikálních objektů. Jejich rozmístění v Galaxii dnes však stále ještě odpovídá spíše našim pozorovacím schopnostem než skutečnému zastoupení pulzarů ve struktuře Galaxie. Jako jednotlivé zdroje jsme schopni je rozlišit jen v poměrně blízkém okolí Sluneční soustavy, v blízkosti galaktického jádra je to již téměř nemožné.

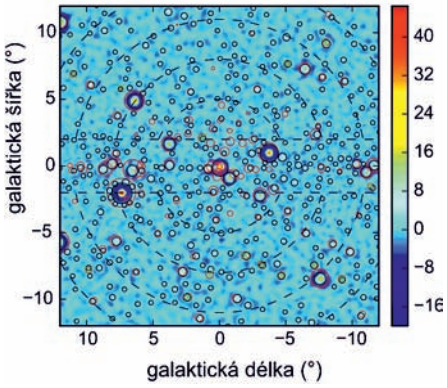


Překrásná kulová hvězdokupa 47 Tucanae na jižní obloze je domovem 22 milisekundových pulzarů s periodou od 2 do 8 ms. Mnoho z nich je součástí binárního systému. Předpokládá se, že hvězdokupa hostí podobných objektů o několik stovek více, jsou ale příliš slabé, než abychom je dokázali zachytit. Zdroj: APOD/NASA.

Gama signál z centra

Mnoho dřívějších autorů předpokládalo, že pozorované gama záření vycházející z nejhustších oblastí v jádru Galaxie by mohlo mít původ ve srážkách dosud nezachycených částic temné hmoty označovaných jako *wimpy*. V únoru 2016 ale rovnou dvě na sobě nezávislé studie ukázaly, že by tomu tak být nemuselo. Oba týmy použily nové statistické analytické metody a prokázaly, že charakteristiky naměřeného gama záření neodpovídají tomu, co by mělo vzniknout

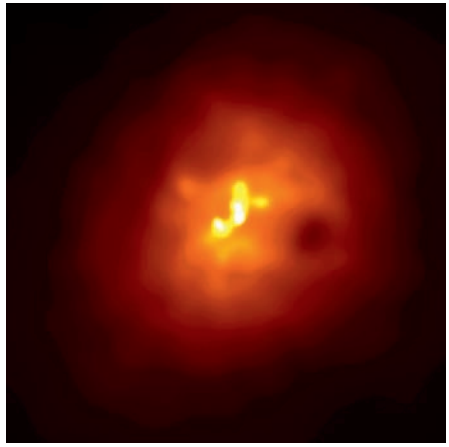
při kolizích částic temné hmoty. Analýzy ukazují, že pozorované záření pochází z nových astrofyzikálních bodových zdrojů v jádru Galaxie. Zde je velmi komplikované prostředí, z něhož přichází mnoho různorodých signálů, a je obtížné je navzájem od sebe rozlišit. Stejně tak je obtížné zde rozlišit objekty velikosti jednotlivých hvězd. Jádro Galaxie dozajista obsahuje velké množství temné hmoty, ale současně je zde mnoho hustých hvězdokup a také řada černých děr včetně galaktické černé veledíry. Základem pro analýzu byla měření kosmické observatoře Fermi pracující v gama oboru. Podle modelu by měly být fotony pocházející z kolizí temné hmoty na gama mapě centrální oblasti Galaxie rozloženy poměrně hladce, naproti tomu bodové zdroje, jako jsou milisekundové pulzary, by měly být oproti pozadí zobrazeny velmi zřetelně a ostře, tedy jen na jednotlivých pixelech. Podle analýzy naměřených dat jsou ale zdroje vysoce energetických fotonů rozloženy nepravidelně a odpovídají spíše bodovým zdrojům. Nejpravděpodobněji se toto rozložení hodí právě na velmi staré milisekundové pulzary, které vznikaly při kolapsech velkých hvězd. K úplnému pochopení původu gama záření vysílaného z centra Galaxie povede ale ještě dlouhá cesta. Pozorování observatoře Fermi bude třeba doplnit o měření jiných kosmických dalekohledů, aby bylo možné novou teorii o spojitosti gama signálu s milisekundovými pulzary hlouběji analyzovat a posléze potvrdit, nebo vyvrátit.



Centrální část Galaxie zachycená observatoří Fermi. Zobrazeno je převedení poměru signálu vůči šumu podle energie v rozsahu 1 až 4 GeV. Černé kroužky označují pozice výrazných píků, červené kroužky jsou bodové zdroje v katalogu 3FGL (Third Fermi-LAT catalog). Velikost kroužků je úměrná intenzitě signálu. Čárkované čáry značí oblasti galaktické šířky $|b| < 2°$, tedy v blízkosti roviny galaktického disku, které byly v pravděpodobnostní analýze vyloučeny kvůli silné emisi galaktického disku. Podmnožina zdrojů uvedených v katalogu 3FGL, která byla odhalena touto analýzou, je označena zelenými křížky. Zdroj: Physical Review Letters.

■ Ivan Havlíček, 21. 2. 2016, AB 7/2016

Jak rostou galaxie?



Kupa Abell 2597 v rentgenovém oboru na snímku observatoře Chandra z roku 2002. Zdroj: NASA/Chandra.

Galaxie – *kompaktní seskupení hvězd, hvězdných asociací, otevřených a kulových hvězdokup, mezihvězdné látky a temné hmoty. Galaxie se liší svou strukturou (spirální, eliptické, nepravidelné…), vyzařovaným 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.*
Galaktické jádro – *nejvnitřnější část galaxie, zpravidla má podobu centrální výdutě a obsahuje podstatnou část atomární látky galaxie. V mnoha galaxiích je v jádře obří galaktická černá veledíra.*
Galaktické haló – *oblast obklopující galaxii. U spirálních galaxií jde o prostor kulového tvaru opsaný galaktickému disku. Haló je tvořeno řídkou mezihvězdnou látkou a nacházejí se v něm kulové hvězdokupy vázané gravitačně na mateřskou galaxii. Koncentrace látky v haló se snižuje s rostoucí vzdáleností od roviny galaxie a od jádra. Všeobecně uznávaným předpokladem je, že temná látka obklopující galaxie je rozložena také do tvaru haló.*

Galaxie se vyvíjejí postupným proměňováním látky, z níž jsou složeny. Současně mohou také narůstat slučováním nebo připojováním svých menších galaktických souputníků nebo splynutím s jinými velkými galaxiemi. Tyto děje jsou pozorovatelné v různých měřítkách, podle vzdálenosti, v jaké se galaxie nebo skupiny galaxií od nás nalézají. Nejznatelněji se galaktický vývoj projevuje tvorbou nových a zánikem starých hvězd. Nejstarší hvězdy vznikaly z látky, která zde vyvstala po Velkém třesku, tedy téměř výhradně z vodíku a menšího množství helia. Tyto primordiální hvězdy bývají označovány jako populace III, nevyskytují se v nich prakticky žádné jiné příměsi jiných prvků, protože taková stavební látka v době jejich zrodu nebyla k dispozici. Z hvězd populace III vznikaly po jejich zániku hvězdy populace II, jejichž metalicita (obsah kovů, v astronomii se tak označují všechny prvky těžší než helium) dosahuje zlomků procent. Znamená to, že veškeré další prvky, vyjma vodíku a helia, vznikly při zániku hvězd populace III. Trpasličí dlouhověké hvězdy populace II je dnes ještě možné nalézat poblíž galaktických jader nebo při okraji galaktického haló v kulových hvězdokupách. Z hvězd populace II pak vznikaly při dalším přerodu hvězdy populace I, které dnes tvoří většinu hvězdných struktur blízkých velkých galaxií. Jejich metalicita dosahuje hodnot zhruba v intervalu 1 až 3 %. Do populace I náleží i naše Slunce.

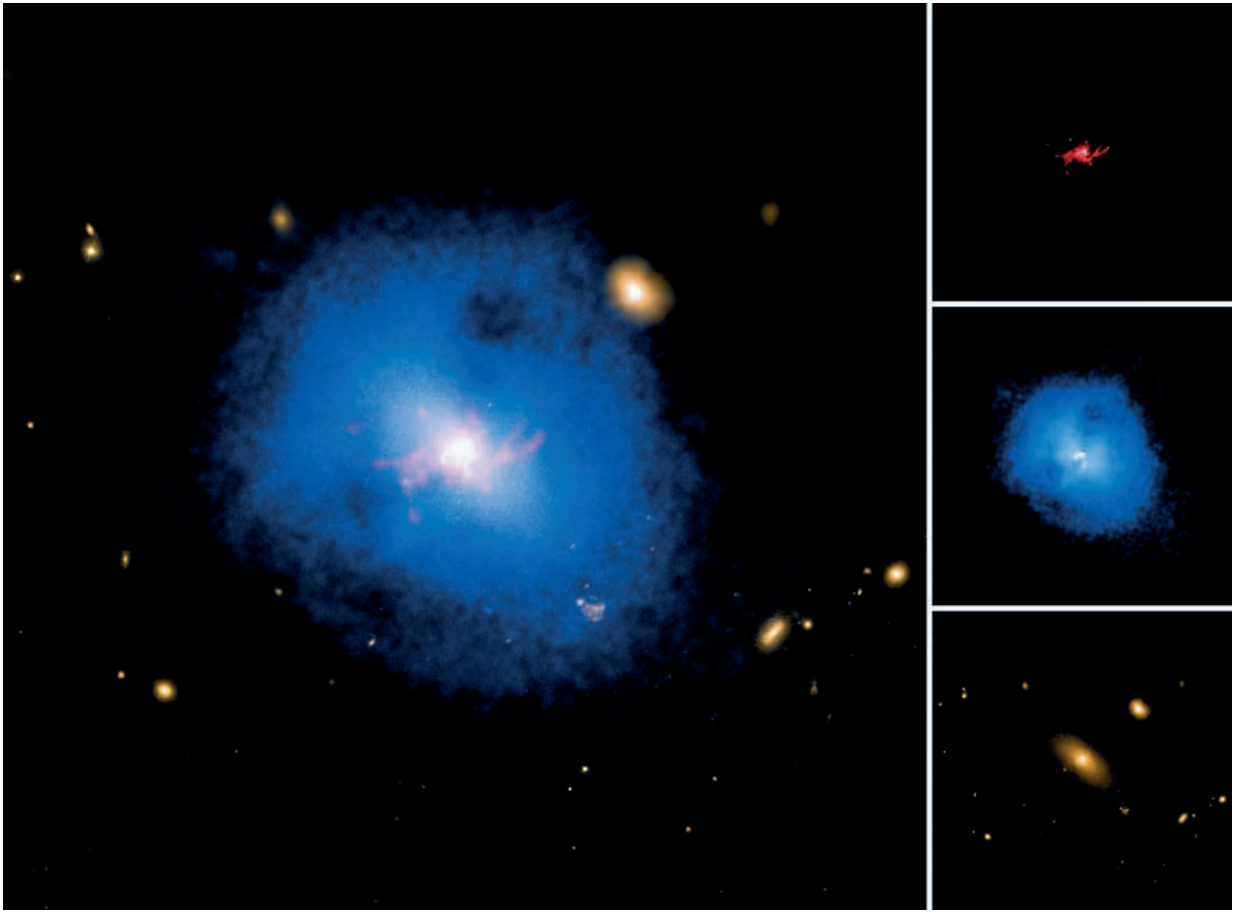
Vznik hvězd

Oblasti, v nichž nové hvězdy vznikají, lze v galaxiích, u nichž ještě rozlišíme strukturu, přímo uvidět. Je tedy také možné je detailněji zkoumat a posoudit například polohu, míru či rozlehlost takovýchto hvězdných líhní oproti celkové struktuře. U vzdálenějších objektů je pak nutné se spokojit jen s rozborem a interpretací jejich spektra. O vzniku nových hvězd víme mnohé ze studia hvězdných porodnic v naší Galaxii, popřípadě v sousedních Magellanových oblacích. Astronomové se obvykle pokoušejí srovnávat a přenášet tyto poznatky do vzdálenějších hvězdných ostrovů, které v takových podrobnostech studovat nelze. Hvězdy nevznikají osamoceně, ale v mnohačetných skupinách, které později můžeme pozorovat jako otevřené hvězdokupy.

Díky mikrovlnné astronomii, a zde zejména díky výjimečné soustavě rádiových teleskopů ALMA, se už podařilo rozeznat i předhvězdné

zárodky nových hvězd v chladných prachových mlhovinách. Jelikož galaxie se vyskytují ve vesmíru obvykle ve velkých skupinách, tzv. kupách galaxií, je možné ve větším měřítku hovořit též o vývoji galaktických kup. Zde je možné sledovat závislost množství mezigalaktického plynu na stáří kupy. Velmi zjednodušeně platí: čím starší kupa, tím více plynu je vytaženo z galaxií na periferii do mezigalaktického prostoru, a tím menší množství ho v nich setrvává. Centrální obří galaxie pak oplývají velmi hustými atmosférami a mezigalaktické prostředí v jádru kupy se s časem postupně ohřívá. Vzdálené kupy lze proto

Snímky kupy Abell 2597 ve viditelném světle, v RTG oboru a v čáře H_α. Vlevo je složenina všech tří spektrálních oken. Kupa Abell 2597 pluje ve vzdálenosti miliardy světelných roků v souhvězdí Vodnáře. V jádru kupy je usazena obří eliptická galaxie typu cD, jejíž galaktická černá veledíra je pravděpodobně určujícím prvkem dějů kolem jádra celé kupy. Řada menších snímků vpravo shora dolů: infračervený signál vodíkových atomů zachytil teleskop Waltera Baadeho v Chile, rentgenový záznam uprostřed je z observatoře Chandra a spodní snímek ve viditelném světle pochází z HST.

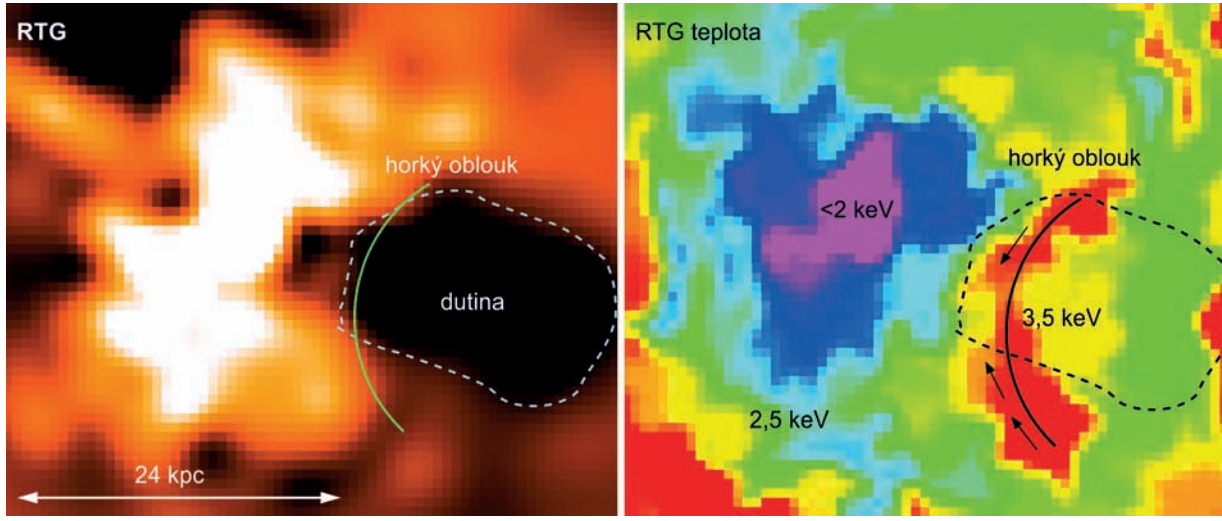


Galaktická kupa – *jedna z největších gravitačně vázaných struktur ve vesmíru. Některé galaktické kupy až desetitisícinásobku hmotnosti naší Galaxie. Jsou tvořené třemi hlavními složkami: 1) stovkami až tisícovkami galaxií obsahujícími hvězdy, plyn a prach; 2) obrovskými oblaky horkých plynů; 3) temnou hmotou zatím neznámé povahy.*

odhalit jako oblaka žhavého mezigalaktického plynu zářícího v rentgenovém oboru, i když jednotlivé galaxie jsou na hranici viditelnosti nebo nejsou pozorovatelné vůbec. Otázkou k řešení zůstává, nakolik jsou propojeny děje provázející tvorbu hvězd v jednotlivých galaxiích s událostmi probíhajícími v neporovnatelně větším měřítku v mezigalaktickém plynu.

Galaktické „počasí“

Na základě mnohaletých pozorování zhruba dvou stovek galaktických kup včetně Abell 2597 v rentgenovém oboru byl popsán děj označovaný jako vesmírné spršky (*cosmic precipitation*). Vesmírné spršky jsou pojmenovány po vzoru atmosférických dějů, podobně jako déšť, kroupy či sněžení. V případě měřítka galaktické kupy jde ale o mechanizmus, který umožní v prostředí horkého mezigalaktického plynu vzniknout sprškám chladnějších oblaků, které pak pronikají zpět do galaxií. Ukazuje se, že jde o klíčový děj vysvětlující, jak mohou galaktické veledíry přímo ovlivňovat růst galaxií. Ve velkých kupách jsou uprostřed obří galaxie, v jejichž středu sídlí obří veledíry požírající své bezprostřední okolí, které je současně největším zdrojem energie v oblasti. Centrální galaxie jsou obklopeny hustým a žhavým mezigalaktickým plynem. Díky tomuto prostředí by proto měly být v jejich nejbližším

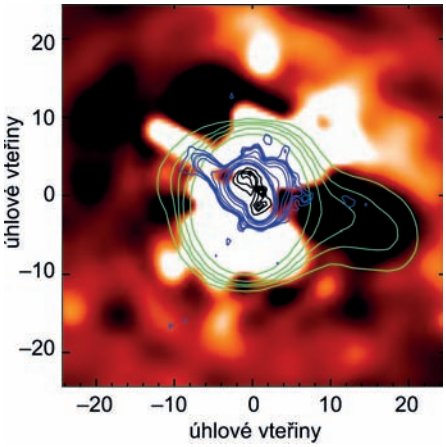


Detailní RTG pohled na centrální část kupy Abell 2597 s vyznačenou dutinou, která je od zdroje rádiových laloků oddělena vrstvou horké látky jevící se zde jako oblouk. Nejpravděpodobněji tento útvar vznikl při rozpínání dutiny a jeho vyšší teplota oproti okolí je důsledkem přeskupení energie v mezigalaktickém plynu. Vlevo je RTG záznam klíčovaný dle intenzity signálu: bílá značí nejvyšší intenzitu signálu, přes oranžovou a červenou až k černé pak intenzita signálu klesá. Vpravo je teplotní mapa téže oblasti. Červená značí nejteplejší místa. Zdroj: ArXiv Cornellovy univerzity.

okolí ideální podmínky pro vznik nových hvězd ve skutečně galaktickém měřítku. Chladnutím mezigalaktického plynu pronikajícího do hustších oblastí galaxie by měly nové hvězdy v tomto prostředí kondenzovat jako slivovice v destilační koloně. Podle pozorování ale takto snadno a rychle nové hvězdy nevznikají.

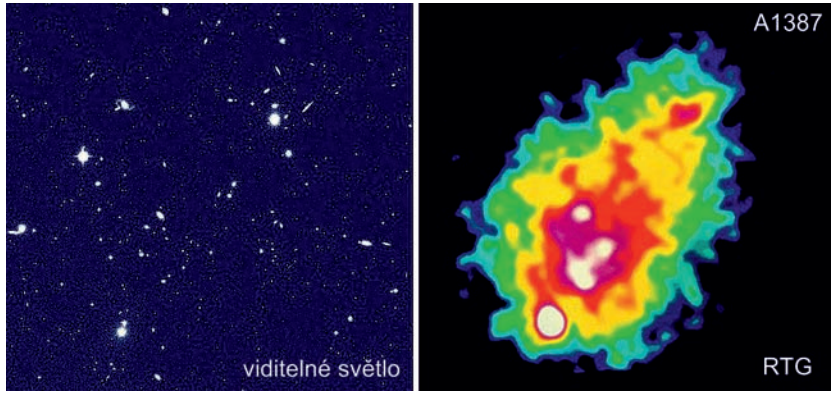
Za dnes již poměrně dobře známých podmínek vznikající chuchvalce plynu vyzařují svou energii a chladnou, přičemž se promíchávají s okolním horkým plynem, který tím ochlazují. Vznik hvězd z takových chuchvalců je relativně složitou záležitostí. Není například zcela prozkoumaná role magnetických polí a nestabilit s nimi spojených. Právě v okolí centrální černé díry jsou tato pole velmi silná. Hvězdy se vytvářejí jen někde a jen z některých plynných shluků. Jiná chladnoucí oblaka jsou, ještě než stihnou zkondenzovat do hvězd, vtažena přímo do jícnu černé veledíry. Pád do díry je provázen výronem vysoce energetických částic, které opět ohřívají nově přilétávající chladnější plyn. Tento proces opětovného chladnutí a ohřívání plynu je při neustálé výměně energie udržován ve zpětnovazebném cyklu, a tedy přímo zabraňuje vytváření hvězd. Galaktická černá veledíra tak, čím je větší, tím více zpomaluje galaktický vývoj ve svém bezprostředním okolí. Typické vesmírné počasí poblíž galaktické veledíry by se dalo popsat jako „oblačno s nadějí na oteplení, když se černé díře zadaří“.

■ Ivan Havlíček, 20. 3. 2015, AB 12/2015



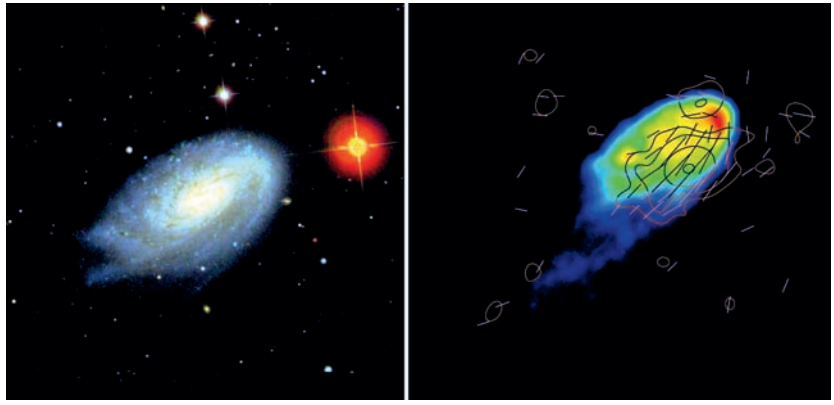
Centrální oblast galaktické kupy Abell 2597 na záznamu z rentgenové observatoře Chandra v rozsahu signálu 0,5 až 7 keV. Rentgenový záznam je klíčovaný dle intenzity signálu stejně jako na levém obrázku na protější straně. Zelené kontury značí signál na frekvenci 330 MHz zaznamenaný sítí VLA, modré pak frekvenci 1,3 GHz a černé rádiový signál frekvence 8,4 GHz. Orientace rádiových laloků koresponduje s dutinami v horkém plynu (černé oblasti) zaznamenanými v rentgenové oblasti. Zdroj: ArXiv Cornellovy univerzity.

Nestydnoucí Panna



Galaktická kupa Abell 1387. Porovnání obrazu ve viditelném světle, v němž jsou zřetelné jen jednotlivé galaxie, s rentgenovým obrazem stejné oblasti, na němž je zřetelný mezigalaktický plyn. Zdroj: Princeton.

Galaxie NGC 4654 v optickém (vlevo) a rádiovém oboru (vpravo). Levý obraz pochází z přehlídky SDSS. Rádiový obraz se zakreslením intenzity rádiového signálu a jeho polarizace je vytvořen podle pozorování radioteleskopu Effelsberg na vlně 3,6 centimetru. Vodíkový chvost zobrazený tmavomodře, který galaxie zanechává při svém pohybu kupou za sebou, nevykazuje známky polarizace. Zdroj: Yale/UJ.



Magnetická pole jsou ve vesmíru všudypřítomná. Své magnetosféry mají planety, hvězdy ba i celé galaxie. V galaktických kupách je mezi galaxiemi různě velké množství mezigalaktické látky, která je nejčastěji v plazmatickém skupenství. Mezigalaktickou látku ale v optickém oboru obvykle nevidíme. V kupách jsou ve viditelném světle pozorovatelné jen galaxie plné hvězd. Děje, které se mezi galaxiemi odehrávají a zejména odpovědi na otázky související s tím, jak to všechno drží pohromadě, zůstávaly dlouho bez uspokojivých odpovědí.

Uvnitř kup, poblíž jádra, je prostředí hustší než v okrajových oblastech. Jedná se o látku ovlivnitelnou magnetickým polem, a pokud se podaří takové mezigalaktické prostředí správným způsobem zobrazit, mělo by být v principu možné otisk magnetického pole přečíst. Jako použitelný způsob zobrazení se nabízí měření polarizace ze záznamů v rádiovém nebo rentgenovém oboru. Jde o spektrální obory, v nichž září zejména mezigalaktický plyn. Přenos tepelné energie v takovém prostředí obvykle probíhá ve směru magnetických siločar (nabité částice snadno kloužou podél siločar, napříč je pohyb omezený). Struktura magnetického pole galaktické kupy tedy určuje, jak si galaxie vyměňují energii mezi sebou a s mezigalaktickým prostředím. Pozorným čtením zde můžeme nalézt zprávu o energetické historii celé soustavy. Takto lze například určit, zda jádro kupy postupně chladne, nebo zda se udržuje v energeticky rovnovážném stavu po dobu srovnatelnou s existenci celé soustavy.

Kupa v Panně

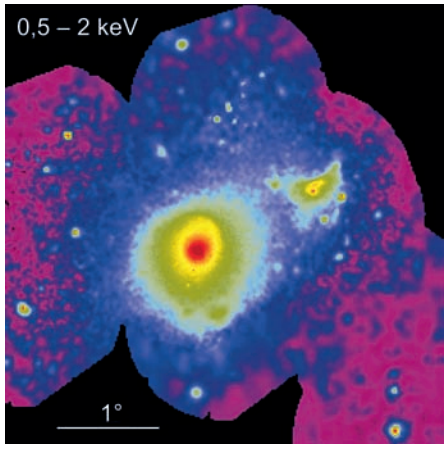
Kupa galaxií v souhvězdí Panny je jednou z obřích galaktických kup ve vesmíru a současně jde o nejbližší velkou galaktickou kupu. Kupa čítá kolem 2 000 galaxií, její jádro se nachází ve vzdálenosti 54 milionů světelných roků a je soustředěno okolo obří eliptické galaxie M 87. Hmotnost kupy se odhaduje na $1{,}2\times10^{15}$ hmotností Slunce a kupa zaujímá oblast s poloměrem cca 2,2 Mpc (7,2 Mly). Jelikož jde o nejbližší takto rozsáhlou velkorozměrovou strukturu, je kupa v Panně ideální laboratoří pro studium dějů, které v kupách galaxií probíhají.

Zametání stop

Kupa v Panně je zdrojem rentgenového záření, jehož původcem je především horký mezigalaktický plyn. Orientace magnetického pole kupy se určuje ze směru polarizace synchrotronní emise jednotlivých velkých spirálních galaxií. Magnetosféry jednotlivých galaxií pozorovaných v kupě jsou doslova prozářeny svitem hvězd. Světlo hvězd je ale magnetickou obálkou galaxie polarizováno, a pokud změříme jeho polarizaci, získáme tak informace o struktuře pole. Magnetická pole galaxií kolotajících na orbitách kolem jádra kupy a proplouvajících mezigalaktickým prostředím se zákonitě propojí s celkovým polem kupy a budou se vzájemně ovlivňovat. Při pohybu galaxie mezigalaktickým plazmatem se na náletové straně magnetické siločáry zhušťují a na závětrné straně vznikají turbulence. Galaxií jsou v kupách stovky a v některých i tisíce. Veškeré jejich vzájemné pohyby „promíchávají“ strukturu plazmatu v jejich okolí, a tím i mezigalaktickou magnetosféru, v níž vznikají magnetotepelné nestability. Každá galaxie takto při svém pohybu za sebou „zametá“ magnetickou stopu. V prostředí dostatečně bohatém na pohybující se galaxie pak magnetotepelné nestability brání úniku energie do periferních oblastí. Kupa se proto bude dlouhodobě udržovat ve stavu, kdy z jádra do periferních oblastí proudí naprosto zanedbatelné množství energie, a jádro tak „nechladne“.

Nechladnoucí kupy

V případě kupy galaxií v Panně bylo srovnáním numerických simulací s pozorováními v rádiovém a rentgenovém oboru zjištěno, že jádro kupy poměrně přesně odpovídá předpokladům „promíchávání“ vnitřní magnetické struktury a výše popsaný mechanizmus by tedy mohl být zodpovědný za udržování celé soustavy dlouhodobě v „nevychládají-

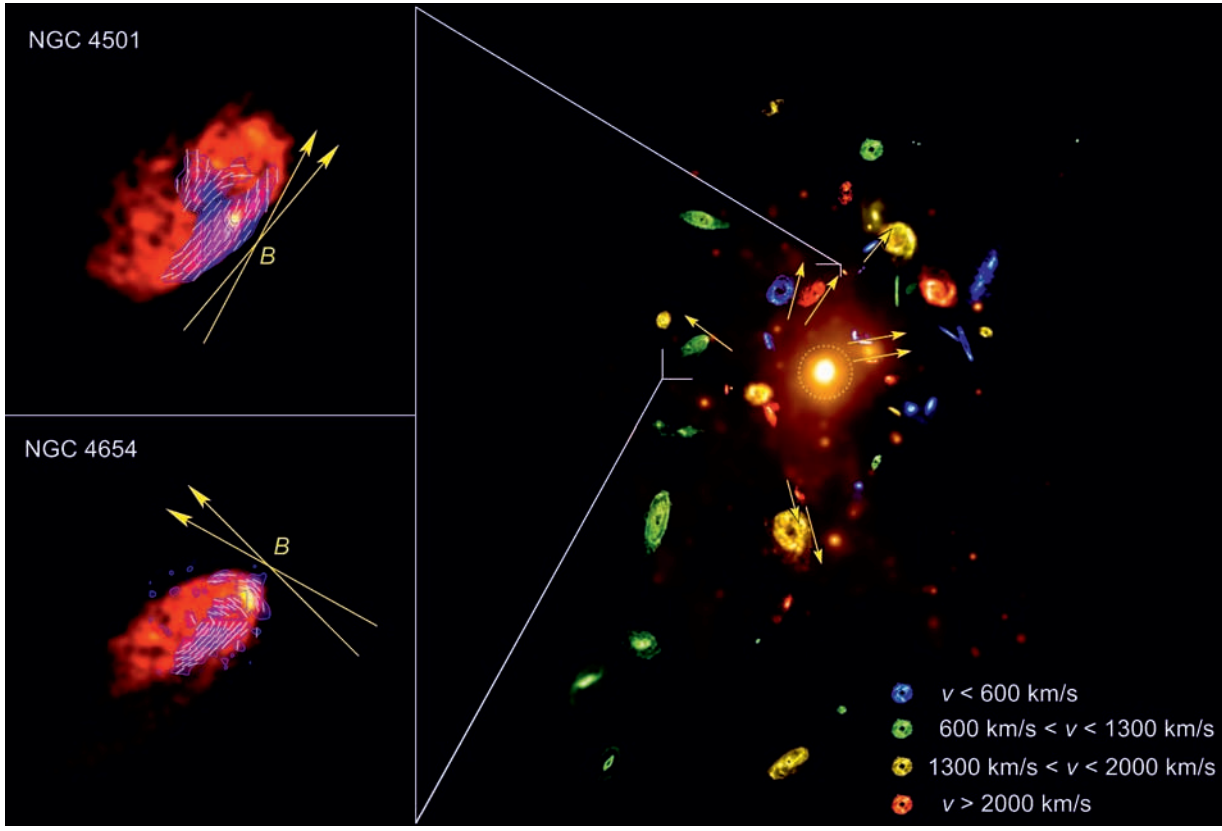


Kupa galaxií v Panně v rentgenovém záření, jehož zdrojem je horký mezigalaktický plyn. Jádro kupy je soustředěno okolo obří eliptické galaxie M 87, která se na snímku nalézá ve středu červenofialové skvrnky uprostřed. Barevné oblasti znázorňují různé koncentrace mezigalaktického plynu. Na snímku je patrné, jak hustým prostředím se galaxie uvnitř kupy mohou pohybovat. Zdroj: NASA.

Plazma – *kvazineutrální soubor nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Lidsky to znamená, že se v dané látce nachází alespoň malé množství elektricky nabitých částic, které jsou jako celek v každém objemu elektricky neutrální a jsou schopny 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, galaxiích i galaktických kupách.. Přes 99 % atomární látky ve vesmíru je v plazmatickém skupenství.*

cím“ stavu. Pro vytváření velkoprostorových struktur a jejich následnou dlouhodobou stabilizaci to znamená, že existuje mechanizmus, díky němuž se galaktické kupy mohou nacházet v ustálených podmínkách poměrně dlouhou dobu, alespoň co se jejich vnitřních oblastí týče. Samotné jednotlivé galaxie se v kupě pohybují v energeticky ustáleném prostředí a je dokonce možné, že energii, kterou do mezigalaktického plynu jejich hvězdy a mezihvězdná látka vyzáří, mohou získávat nějakým dosud nepozorovaným mechanizmem zase zpátky.

■ Ivan Havlíček, 15. 4. 2016, AB 15/2016



Mapování orientace magnetického pole kupy z polarizace synchrotronní emise spirálních galaxií. Vlevo je vlastní pole dvou galaxií. Napravo je mapa kupy z rádiové přehlídky VIVA (VLA Imaging of Virgo in Atomic gas), oranžová podkresba je rentgenový signál zachycený observatoří ROSAT. Žluté šipky zobrazují orientaci magnetického pole v galaxiích, u nichž lze z rádiových dat rozlišit polarizaci. Zdroj: Nature.

Parádní trefa

Rádiová galaxie 3C 321 se na první pohled od jiných obdobných galaxií příliš neliší. Uvnitř se podle našich představ nachází obří černá díra, ze které unikají výtrysky částic kolimovaných a urychlovaných magnetickým polem. Podobně jako u desítek jiných radiogalaxií interagují výtrysky s okolním mezigalaktickým prostředím a na jejich konci se nacházejí typické radiové laloky. Ve výtryscích jsou přítomny, stejně tak jako u dalších radiogalaxií, zauzleniny látky. Takové uzlíky ale nikdy nemění směr výtrysku daný magnetickým polem v okolí černé díry. Při podrobnějším výzkumu se ukázalo, že radiogalaxie 3C 231 je jiná než ostatní. Ve skutečnosti jde o dvojici kolem sebe obíhajících galaxií a jeden z výtrysků se trefil do okraje druhé galaxie, která změnila jak jeho původní směr, tak celkovou strukturu. Unikátní objekt se nachází v souhvězdí Hada ve vzdálenosti 1,2 miliardy světelných roků.

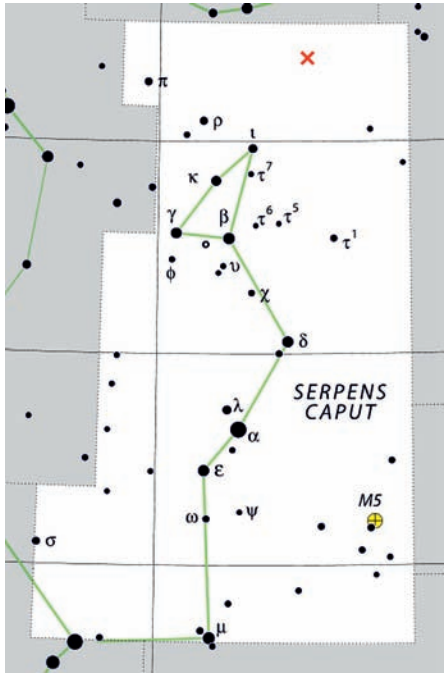
AGN – *Active Galactic Nuclei, aktivní jádra galaxií. Tato jádra produkují netepelné pulzní UV a RTG záření, v centru sídlí velmi hmotná černá díra obklopená akrečním diskem (koncentrace ~ 10^{16} částic v cm^3, teplota ~ 10^5 K, magnetické pole ~ 0,2 T). Přepojení siločar magnetického pole je doprovázeno ohřevem elektronů až na teplotu 10^9 K a rentgenovým či gama zábleskem. Existuje celá řada galaxií s aktivními jádry, například Seyfertovy galaxie, linery, blazary a kvazary.*

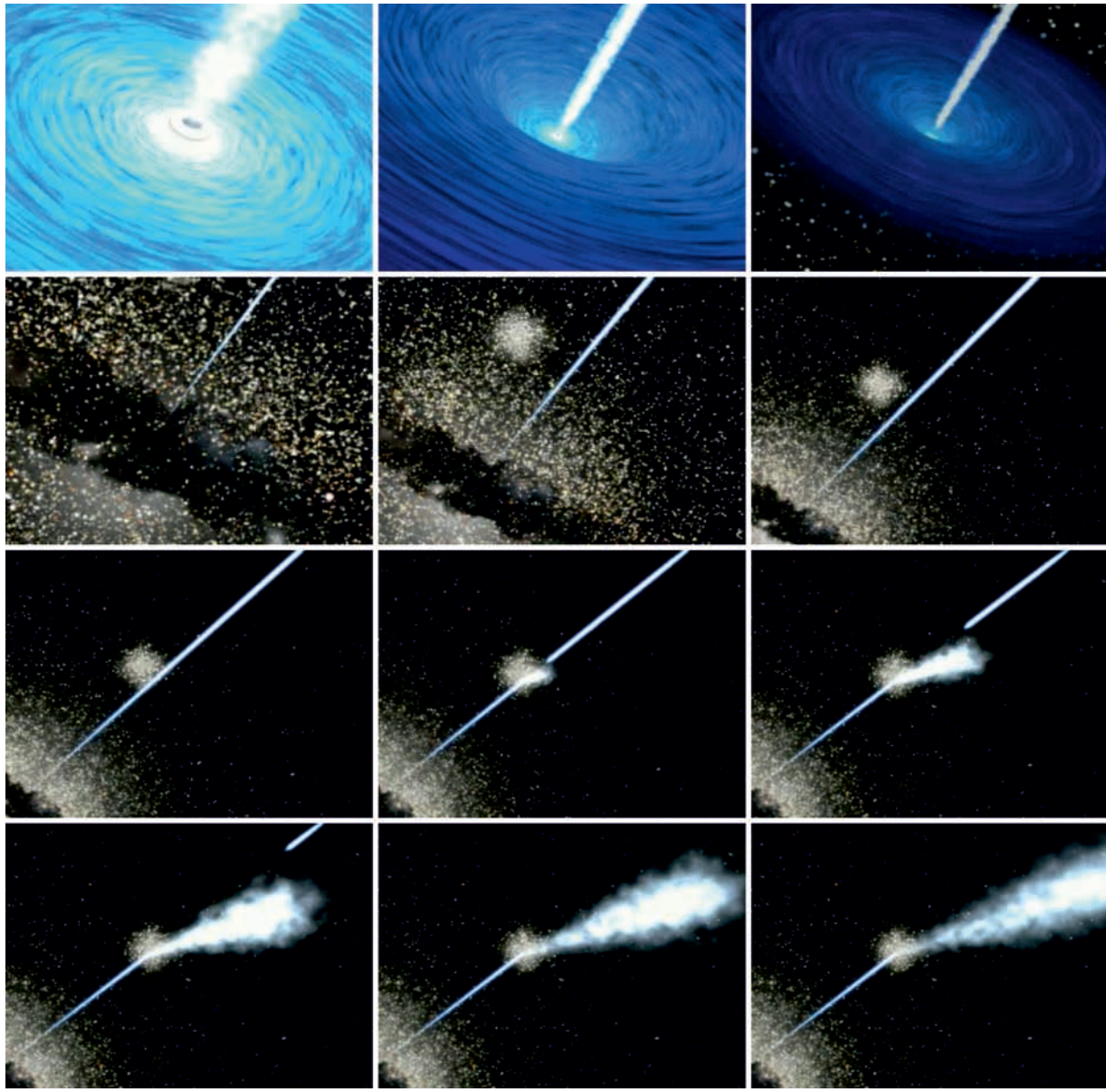
Černá monstra

Když Hubblův dalekohled v první polovině devadesátých let 20. století objevil v jádrech galaxií první černé díry, šlo o velké překvapení. Obří monstra měla hmotnosti mnoha milionů Sluncí (největší až miliardy Sluncí) a nikdo netušil, jakou hrají v galaktických jádrech roli. Jak léta plynula, staly se tyto objekty samozřejmostí, a dnes se divíme, pokud je objevena galaxie a její centrum nejeví známky přítomnosti obří černé díry. Kolem černé díry se nachází akreční disk žhavého plazmatu, ve větší vzdálenosti plynoprachový torus a v ose rotace vznikají dva výrazné výtrysky relativistických částic, které směruje magnetické pole. Struktura okolí je stejná jako u hvězdných černých děr (ty vznikají v závěrečných fázích vývoje některých hvězd a jejich hmotnosti jsou několikanásobkem hmotnosti Slunce), jen je vše v mnohanásobně větším měřítku. I naše Galaxie má svou centrální černou díru. Má hmotnost „jen“ 4 miliony Sluncí a nachází se od nás ve vzdálenosti přibližně 25 000 světelných roků.

Radiogalaxie 3C 231 nevypadala na prvních snímcích nijak extravagantně. Z centrální černé díry se do okolí rozprostírají obří výtrysky, jejichž rádiové laloky jsou ve vzdálenosti 850 tisíc světelných roků od mateřské galaxie. Výraznou změnu přinesl až kompozitní snímek z roku 2007, na němž je detailně znázorněna centrální oblast výtrysků v několika spektrálních oborech (od rentgenového po rádiový). A na

Mapa souhvězdí Hada s vyznačenou polohou radiogalaxie 3C 321. Zdroj: Sky & Telescope.

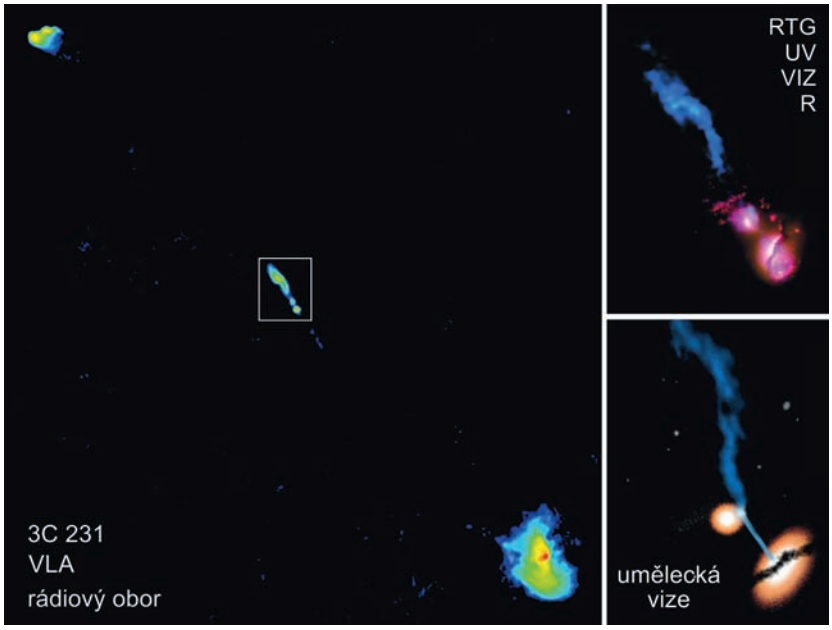




tomto snímku je dobře patrné, že se jeden z výtrysků ve vzdálenosti přibližně 20 000 světelných roků od mateřské galaxie „ohne“ o okraj blízké galaxie. Místo interakce výtrysku s materiálem galaxie intenzivně září v rádiovém oboru. Na výzkumu se podílely observatoř Chandra (rentgenový obor), Hubblův dalekohled (vizuální obor), infračervený dalekohled Spitzer a radioteleskopické sítě VLA a Merlin.

V palebném úhlu

Podrobná analýza plynu v okolí obou galaxií, způsobu narušení výtrysku a horké skvrny v místě interakce ukázala, že celý jev trvá astronomicky krátkou dobu, a je tedy velmi vzácný. Obě galaxie mají ve svých centrech černé díry. Menší galaxie obíhá kolem větší a do oblasti látky vyvrhované výtryskem doputovala před méně než milionem roků (poloha radiového laloku se ještě nezměnila). V horké skvrně v místě interakce je proto dosud patrné urychlování částic. Dostat se do palebného úhlu takového výtrysku nemusí být nic příjemného. Pokud by se ve směru výtrysku nacházely nějaké planety, přišly by nejen o atmosféry, ale i o případný život na povrchu. I my se občas díváme do výtrysků z černých děr velmi vzdálených galaxií – takovému jevu říkáme blazar. Jde ale naštěstí o vzdálenosti, ze kterých nás tyto výtrysky nemohou nijak ohrozit. Výtrysk z galaxie 3C 231 zasahuje satelitní galaxii ve vzdálenosti velmi malé – srovnatelné se vzdáleností Země od středu Galaxie – a ničí vše, co mu stojí v cestě.



Nalevo: Rádiové laloky ve vzdálenosti 850 000 ly zobrazené sítí radioteleskopů VLA. Je patrné, že vnitřní část výtrysku nemíří přesně k radiovému laloku. Vpravo nahoře je kompozitní výřez střední části struktury. Patrné jsou obě galaxie a změna směru a struktury výtrysku po interakci. Kódování barev: nachová (RTG), červená (vizuální), oranžová (UV), modrá (radiovlny). Dole napravo je umělecké ztvárnění situace pro ty, kdož mají malou fantazii. Zdroj: VLA/Chandra/University of Manchester.

← Na protější straně jsou nakresleny jednotlivé fáze, v nichž se satelitní galaxie blíží do oblasti výtrysku a začne s ním interagovat. Zdroj: NASA/Chandra.

■ **Petr Kulhánek, 13. 5. 2016, AB 18/2016**

Je galaxie v Andromedě dvojčetem Mléčné dráhy?

Velká galaxie v Andromedě – *spirální galaxie vzdálená od nás přibližně 2,5 milionu světelných roků. Svým tvarem a velikostí odpovídá naší Galaxii, je jen o něco málo větší. Jako galaxii tento objekt rozlišil Edwin Hubble v roce 1923. Šlo o první galaxii detekovanou po naší Mléčné dráze. Za přibližně 4 miliardy let se galaxie v Andromedě prolne s naší Galaxií a po několika následujících miliardách roků postupně obě galaxie splynou.*

Elektronvolt – *jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením v potenciálovém rozdílu jeden volt, 1 eV = 1,6×10^{-19} J. V jaderné fyzice se používají spíše větší násobky této jednotky, kiloelektronvolt keV (103 eV), megaelektronvolt MeV (106 eV), gigaelektronvolt GeV (109 eV) nebo teraelektronvolt TeV (1012 eV). V těchto jednotkách se také vyjadřuje hmotnost (E=mc2) a teplota (E=kT). Jeden elektronvolt odpovídá teplotě přibližně 11 600 K.*

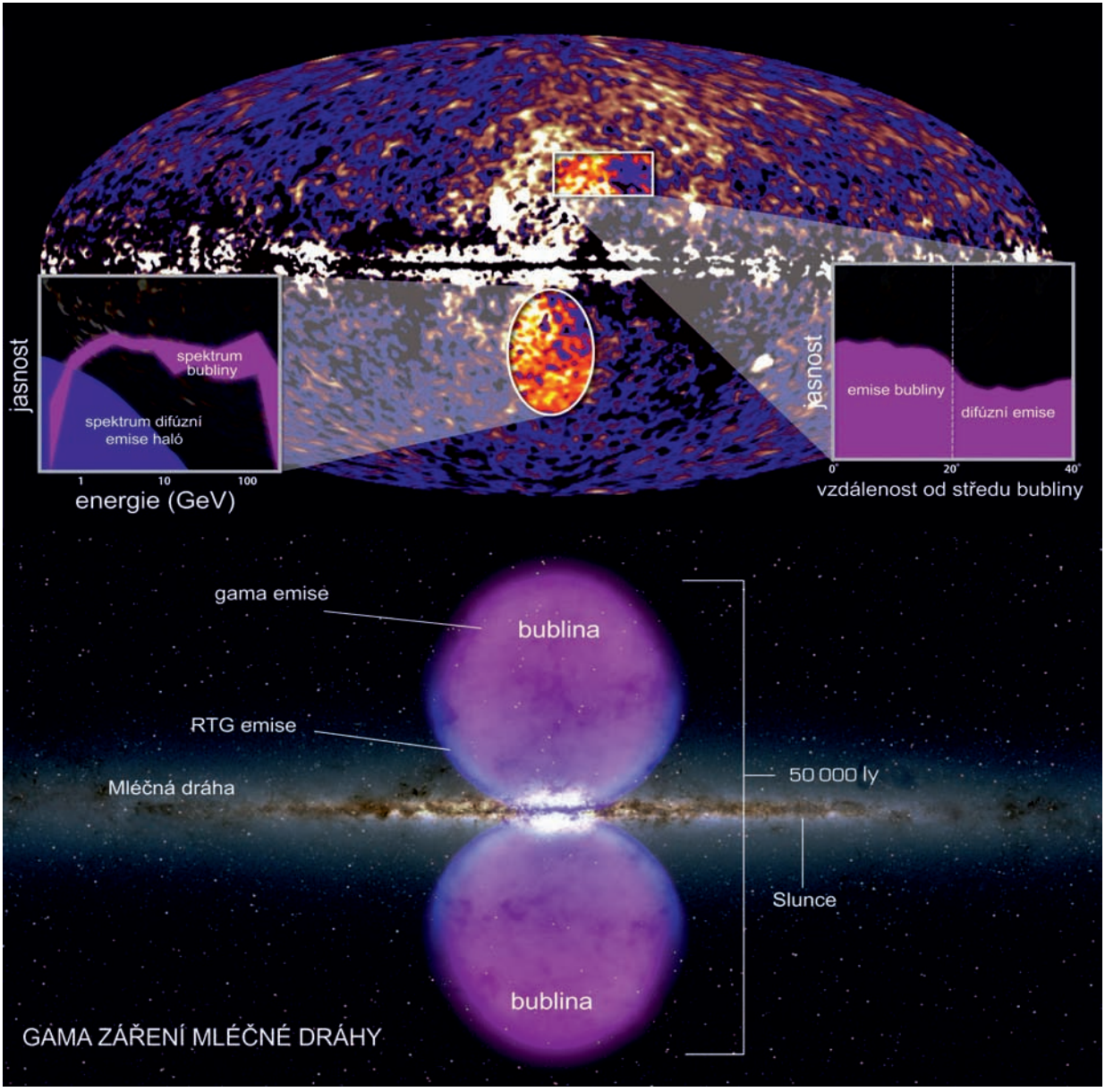
WIMP – *zkratka z Weakly Interacting Massive Particle, vážný kandidát na částice temné hmoty. Mělo by jít o reliktní superpartnery z období po Velkém třesku, kterým fyzikální zákony zabránily v následném rozpadu. Wimpy by měly s běžnou látkou interagovat gravitační a slabou interakcí. Jsou usilovně hledány v několika desítkách experimentů, tři z nich mají nenulový signál, jehož interpretace je zatím nejasná.*

Observatoř Fermi má za sebou již osm a půl roku sledování okolního vesmíru. První celooblohová přehlídka byla dokončena už za pouhých 95 hodin pozorovacího času. Jejímu předchůdci, Comptonově observatoři, trvalo dosažení stejného výsledku roky. Postupně bylo vytvořeno několik specializovaných katalogů různých zdrojů gama záření od pulzarů, pozůstatků po supernovách a mlhovin ovlivněných pulzary, velmi hmotných binárních soustav a jiných galaktických zdrojů, aktivních galaktických jader a vzdálených zdrojů. Jejich pozorování neustále probíhá a v roce 2013 byla mise prodloužena o další pětiletý cyklus naplánovaný prozatím až do roku 2018. Překvapivě, zhruba třetinu zdrojů gama záření pozorovaných observatoří Fermi, se dosud nepodařilo spolehlivě identifikovat jako konkrétní astrofyzikální typ. Mnohá provedená pozorování mají současně i několik interpretací a není jasné, které z nich budou nakonec lépe odpovídat skutečnosti. Observatoř Fermi je unikátní přístroj, díky němuž lze dnes zaznamenat bezkonkurenčně nejvyšší energie, a astronomové žádný srovnatelný dalekohled k dispozici nemají.

Mléčná dráha

Na podzim roku 2010 byl publikován úžasný objev. Naše Galaxie Mléčná dráha má zřetelně aktivní jádro, jehož projevy observatoř Fermi zaznamenala vysoko nad galaktickou rovinou. Na obě strany od galaktického rovníku se až do výše okolo 50° galaktické šířky vypínají obrovité laloky horkého plazmatu (ionizované látky) zářícího v gama oboru, které lze podle spektra odlišit od difúzního svitu plynu galaktického haló. Tyto zářící oblasti dosahují skutečně galaktických rozměrů – vypínají se od jádra na obě strany do vzdálenosti nejméně 25 000 světelných roků. Příčinou takto zářících oblastí jsou nejspíše děje spojené s akrecí látky kolem galaktické černé veledíry a následná kolimace záření a látky ve volných směrech nezakrývaných okolní hustou látkou galaktického disku.

Plazmatické laloky nemohly být zpozorovány žádným předchozím přístrojem, jelikož žádný dalekohled dosud nepokrýval tak energeticky vysoké pásmo jako observatoř Fermi (původní název BLAST).


jasnost
spektrum bubliny
spektrum difúzní emise haló
1
10
100
energie (GeV)
jasnost
emise bubliny
difúzní emise
0°
20°
40°
vzdálenost od středu bubliny
gama emise
bublina
RTG emise
Mléčná dráha
50 000 ly
Slunce
bublina
GAMA ZÁŘENÍ MLÉČNÉ DRÁHY

Temná hmota – *hmota nebaryonové povahy, která není složena z kvarků. Temná hmota udržuje pohromadě svítící objekty velkých rozměrů, které díky ní v periferních oblastech obíhají rychleji, než odpovídá gravitačnímu zákonu aplikovanému na viditelnou hmotu. Podle posledních odhadů existuje ve vesmíru 5 % baryonové hmoty, 26 % temné hmoty a 69 % temné energie. Existuje několik hypotetických částic, které jsou vhodnými kandidáty na částice temné hmoty, dosud však nebyly objeveny. Termín „temná hmota" zavedl v roce 1933 Fritz Zwicky, když zjistil, že se členové kupy galaxií ve Vlasech Bereniky pohybují v průměru rychleji, než by odpovídalo gravitačním účinkům viditelné látky.*

V dubnu 2014 bylo publikováno zjištění, že v jádru naší Galaxie (Mléčné dráhy) dochází k nadmíru vysoké emisi gama záření. Po odstranění všech známých zdrojů stále zůstává přebytek energie, který se nedařilo teoreticky vysvětlit a současně takové vysvětlení potvrdit jiným nezávislým pozorováním. Tento přebytek představuje poměrně významnou část energie vycházející z galaktického jádra v pásmu 1 až 3,16 GeV, množství pak až miliardakrát převyšuje energii vyzářenou odtud ve viditelné oblasti a proniká z jádra až do vzdálenosti 5 000 světelných roků. Teoretici nabízeli širokou škálu částic temné hmoty, například wimpy, které by mohly vzájemně anihilovat, neboť by wimp měl být sám sobě antičásticí. Právě toto anihilační záření by mohlo být totožné s pozorovaným zářením gama. Záření je rozprostřeno kolem galaktického jádra rovnoměrně, a pokud by šlo o anihilaci temné hmoty, tak by hmotnost takových částic měla být v intervalu někde mezi 31 až 40 GeV. Prozatím se ale taková teorie jinými pozorováními nepotvrdila. Dalším uvažovaným mechanizmem je gama záření unikající z pulzarů, kterých by mělo být v centrálních oblastech velkých galaxií značné množství. Existují ale i další mechanizmy geneze gama záření, takže je jeho zdroj stále nejasný.



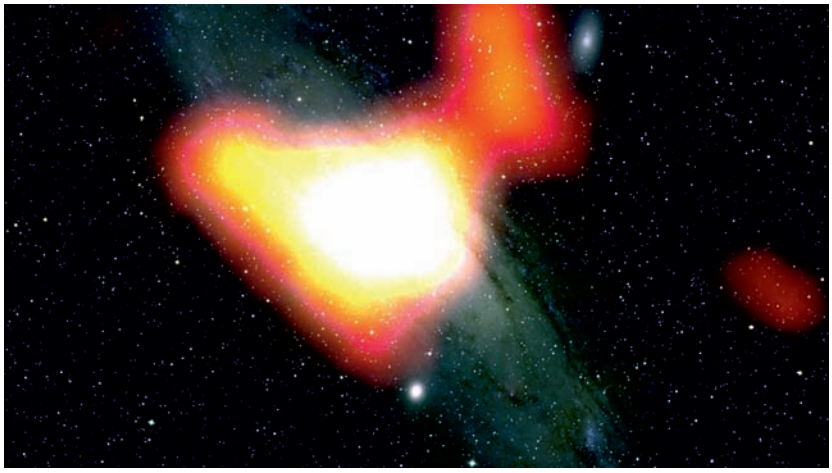
Více než polovina zdrojů gama záření nad 10 GeV byla identifikována jako oblasti blízké galaktickým černým veledírám – jako aktivní galaktická jádra. Současně se ale zhruba ke třetině zdrojů dosud nepodařilo nalézt odpovídající protějšek v jiném spektrálním oboru. Tyto zdroje elektromagnetického záření gama jsou tedy prozatím označovány jako neznámé. Zdroj: Fermi.

Andromeda

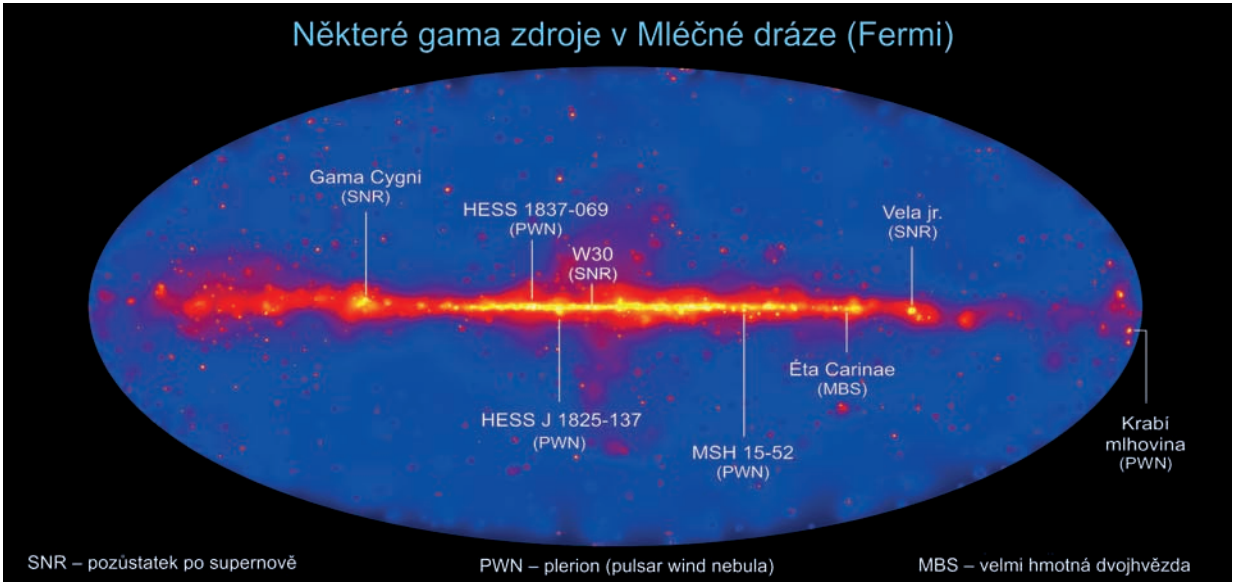
V současnosti se ale zablýsklo na lepší časy překvapivě úplně odjinud. V nám nejbližší obrovské spirální galaxii M 31 v Andromedě, vzdálené cca 2,5 milionu světelných roků, se observatoři Fermi podařilo napozorovat téměř identické záření z jejího jádra jako v roce 2014 z jádra Galaxie naší. Objev byl publikován v únoru 2017 jako nerecenzovaná novinka na serveru NASA a v říjnu 2017 byl oznámen na mezinárodní konferenci „*7th International Fermi Symposium*" v Německu. Dalším krokem bude podrobná analýza záření z jádra sousední Andromedy a srovnání se

zářením z naší Galaxie. Pokud by část záření byla skutečně způsobena vzájemnou anihilací částic temné hmoty v centrálních oblastech velkých galaxií, tak bychom snad byli opět o krůček blíž k rozřešení záhady temné hmoty. Podle komentáře Reginy Caputo, odbornice Goddardova letového střediska NASA v Greenbeltu v Marylandu a spoluautorky tohoto objevu to prý vypadá, jako bychom žili ve světě, kde sice nejsou zrcadla, v nichž bychom se mohli uvidět, ale naštěstí máme hned vedle své dvojče a můžeme se tedy uvidět tak, že budeme pozorně sledovat jeho.

■ **Ivan Havlíček, AB 8/2017**



Fotografie velké galaxie v Andromedě M 31 se zakreslením isofot gama záření pozorovaného observatoří Fermi. V březnu 2016 bylo publikováno pozorování plazmatických laloků zářících v gama oboru a majících původ také nejspíše v centrální galaktické veledíře v M 31, stejných jaké se podařilo pozorovat u Mléčné dráhy v roce 2010. Pozorným srovnáváním naší Mléčné dráhy a galaxie v Andromedě se možná podaří nalézt společné vysvětlení obou téměř identických dějů. Zdroj: NASA/GSFC.



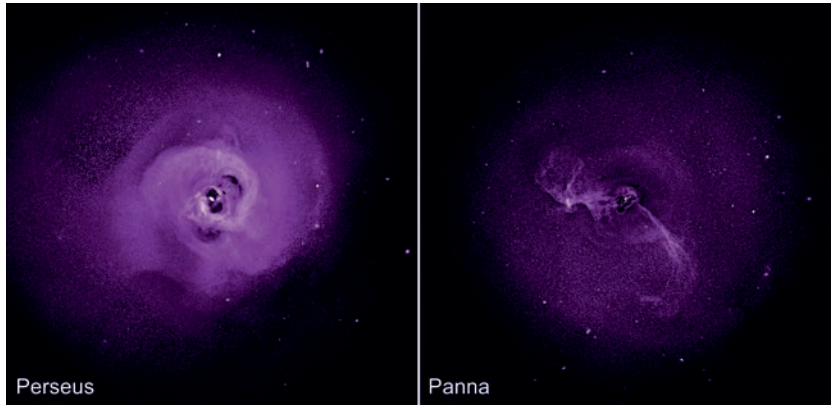
Turbulence v galaktických kupách

Chandra – *družicová observatoř NASA zkoumající vesmír v rentgenovém oboru elektromagnetického spektra. Byla vypuštěna v roce 1999. Na palubě observatoře je rentgenový dalekohled o průměru 1,2 m a ohniskové vzdálenosti 10,05 m, tvořený čtyřmi soubory souosých paraboloidně-hyperboloidních zrcadel o délce 0,85 m, se zorným polem o průměru 1,0° a s rozlišením 0,5".*

Kupy galaxií jsou nejrozsáhlejšími objekty ve vesmíru, které jsou gravitačně udržovány pohromadě. Souběžně s temnou hmotou představuje největší podíl jejich hmotnosti horký mimogalaktický plyn. Plyn mezi galaxiemi tvoří většinu baryonové látky galaktických kup. Jde o prostředí s teplotou kolem desítek až stovek milionů kelvinů. Postupné chladnutí horkého mezigalaktického plynu, pozorované jako vyzařování energie převážně v rentgenovém oboru, by mělo vést k překotné tvorbě hvězd v jednotlivých galaxiích. Tento jev se však v odpovídajícím měřítku pozorovat nedaří. Hvězd v okolních galaxiích vzniká mnohem méně, než kolik by odpovídalo souhrnné energii vyzařované mezigalaktickým prostředím. Plyn energii evidentně vyzařuje, měl by tedy postupně chladnout. Pokud ale jeho chladnutím nevznikají v odpovídajícím měřítku nové hvězdy, buď celý děj probíhá jinak, nebo plyn vyzařovanou energii opět přijímá nám neznámým mechanizmem, který jsme dosud neobjevili, a v celkové bilanci nechladne. Jde o dlouho diskutovaný rozpor teorie s pozorováním, který dosud neměl uspokojivé řešení.

Turbulence na scéně

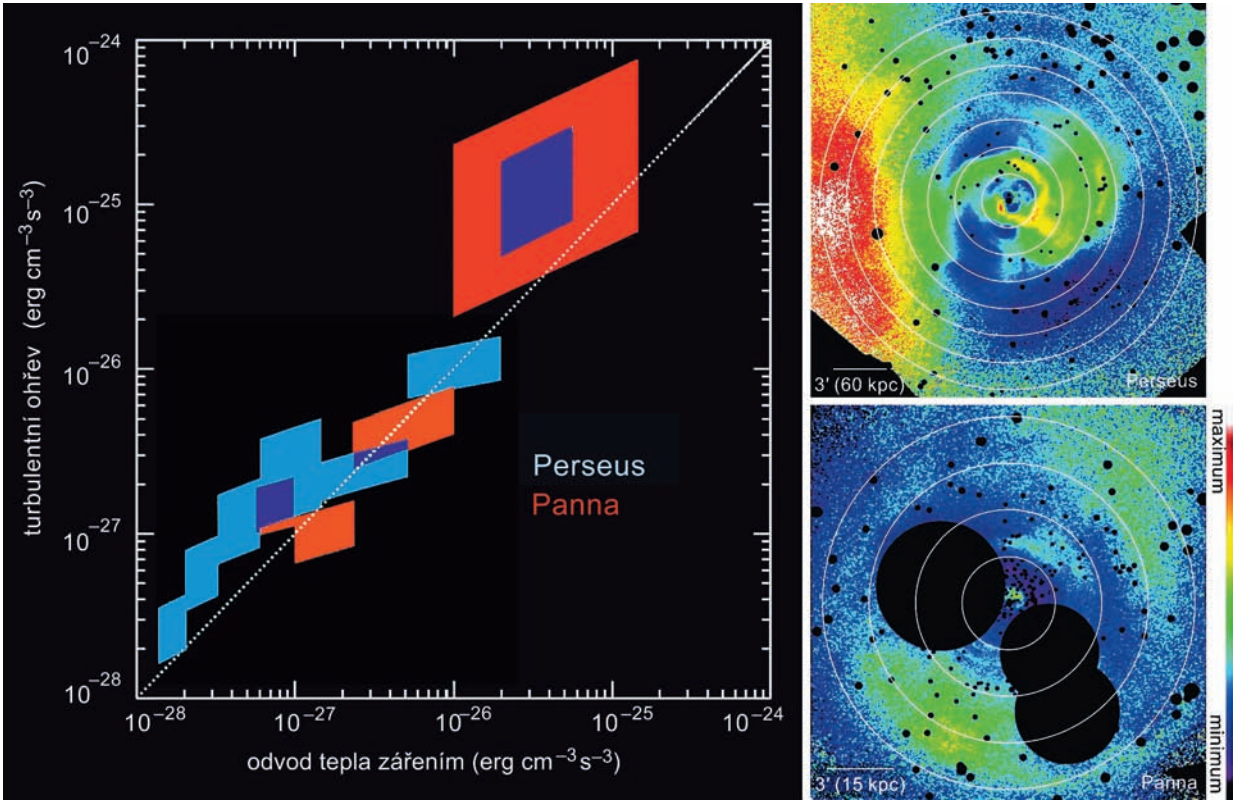
Nedávné výsledky rentgenové observatoře Chandra nabízejí spojitost mezi turbulencemi, tepelnou bilancí plynu a možnou tvorbou hvězd v galaxiích uvnitř galaktické kupy. Ve dvou galaktických kupách v Perseovi a v Panně jsou velkorozměrové turbulence horkého mezigalaktického plynu pozorovány. Jde o blízké galaktické soustavy, a lze je je proto sledovat v dostačujících podrobnostech. Kupa v Panně je vzdálená 54 milionů světelných roků, světlo z kupy v Perseovi k nám cestuje pětkrát déle. V centru obou kup jsou usazeny obří galaxie. V jádru každé z nich se

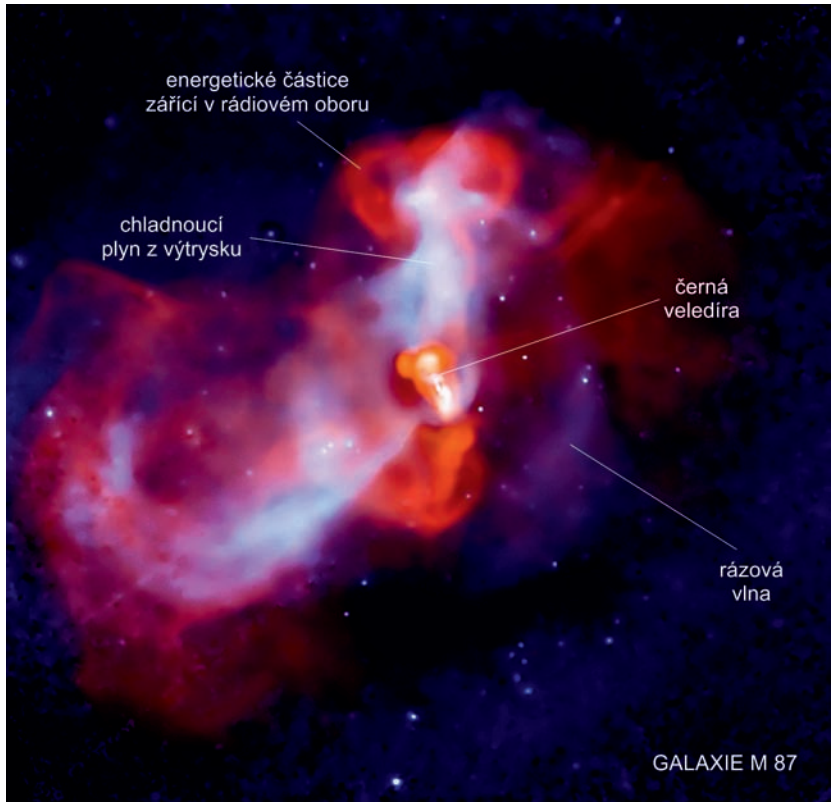


Struktury mezigalaktického plynu v kupě galaxií v Perseovi (vlevo) a turbulentní proudění a struktury mezigalaktického plynu v kupě galaxií v souhvězdí Panny (vpravo) na snímcích z rentgenové observatoře Chandra. Zdroj: Chandra.

nalézá černá galaktická veledíra. Veledíry největších galaxií v jádru kupy v Panně mají hmotnosti od stovek milionů až po miliardy Sluncí. Hmotnost veledíry v jádru tamní největší galaxie M 87 se odhaduje na 3 miliardy Sluncí. Z okolí černých veleděr prýští do prostoru vysoce energetický černoděrový vítr. Tento proud záření a látky je orientován do dvou protilehlých směrů rotací akrečního disku a dosahuje daleko za hranice centrálních galaxií. Proud kavituje do mimogalaktického plynu. Vznikají obří dutiny, do nichž prýští energie odnášená z okolí galaktických veleděr. Vnější mimogalaktický plyn tuto energii přejímá, ohřívá se, a ve stěnách dutin vznikají hustotní nerovnoměrnosti, tlakové vlny, chaotické pohyby a turbulentní proudění. Tento mechanizmus dokáže udržet mezigalaktický plyn horký po miliardy roků.

Napravo: zvolená mezikruží, v nichž byla předpovězena a následně měřena energetická závislost. Nahoře obraz kupy v Perseovi, dole kupa v Panně. Na grafu vlevo je teoretická závislost mezi energií vyzářenou do prostoru ochlazováním a energií získanou prostřednictvím vypočtených turbulencí. Každé mezikruží je zobrazeno barevnou plochou, v níž horní a pravá hrana značí nejvnitřnější vypočtenou hodnotu a spodní a levá zase nejvzdálenější hodnotu. Zdroj: ArXiv Cornellovy univerzity.





Kompozitní snímek okolí galaktické černé veledíry v galaxii M 87. V rádiovém oboru (červeně, VLA) září chladné nízkoenergetické subatomární částice. Zřetelný je tok látky vyvrhovaný do dvou směrů. U proudu směřujícího na snímku vzhůru je evidentní čelo rázové vlny včetně zpětně se pohybujících vírových proudů. V rentgenovém oboru (modře, Chandra) září horký plyn, který stykem s okolním prostředím chladne. Výrony plynu kopírují výtrysky chladnější látky, přičemž ji současně ohřívají. V rentgenovém oboru je navíc zřetelná sférická rázová vlna pocházející nejspíše z dávné sféricky symetrické exploze. Dnes se tato vlna šíří prostorem jako zvětšující se bublina. Velikost celé zobrazené oblasti napříč činí zhruba 50 kpc. Zdroj: VLA/Chandra.

Simulace a pozorování mezigalaktického plynu

Podle numerických modelů, které byly na základě pozorování vypracovány, by úbytek energie vyzařováním do okolního prostoru mohl být dostatečně kompenzován právě energií pocházející z turbulencí vznikajících na rozhraní mezi černoděrovými výtrysky a mezigalaktickým plynem, kterou obstarává předávání energie černých veleděr mimogalaktickému plynu. Jelikož současná rozlišovací schopnost rentgenových observatoří neumožňuje měřit rychlosti plynu v potřebném rozlišení přímo, byla ve zvolených mezikružích (viz str. 91) proměřena energie a plošné zastoupení fluktuací. Z toho pak byly odvozeny vlastnosti mezigalaktického plynu potřebné pro výpočet. Výsledkem je závislost mezi energií vyzářenou do prostoru ochlazováním a energií získanou prostřednictvím vypočtených turbulencí, které by měly v mezigalaktickém plynu probíhat. Pro každé mezikruží je stanoven interval, v němž by se skutečnost mohla odehrávat. Tato teoretická očekávání lze pozorováním ověřit. V současné době jde ale jen o nepřímá pozorování, která vycházejí z velmi komplikované interpretace rozložení energie v celkovém obrazu obou galaktických kup. Je možné, že s pokročilejší technikou se podaří studovat očekávané turbulentní proudění v galaktických kupách přímo a současné výsledky založené převážně na matematických simulacích ověřit přímým pozorováním.

■ Ivan Havlíček, 28. 11. 2014, AB 39/2014

Gioiello – klenot ve Velrybě

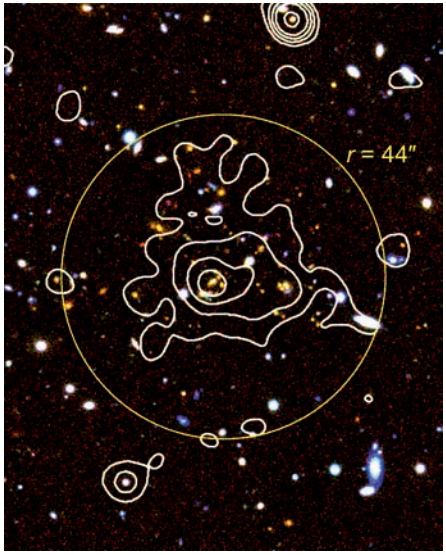
Raný vesmír byl v době krátce po svém vzniku ve srovnání s vesmírem dnešním v mnohém odlišný. Dnes je vesmír starý zhruba 13,8 miliardy roků, je poměrně chladný a v našem galaktickém okolí plují v temné vesmírné prázdnotě velké hvězdné ostrovy, kterým říkáme galaxie. Galaxie nalézáme ve skupinách označovaných galaktické kupy. Vývoj velkorozměrových struktur lze úspěšně sledovat právě na galaktických kupách. Jelikož při zvětšujících se vzdálenostech současně putujeme v čase směrem k počátečním vesmírným obdobím, platí, že čím je od nás taková kupa vzdálenější, tím je součástí mnohem mladšího vesmíru. Ty nejvzdálenější galaktické kupy proto měly na své utváření nejméně času a můžeme v nich pozorovat mnohem mladší hvězdné ostrovy, než jaké poletují v blízkosti Místní skupiny galaxií. Studiem velmi vzdálených galaktických kup je možné domýšlet za jakých podmínek a z čeho se utvořily dnešní blízké velké galaxie čítající stovky miliard hvězd a obrovská oblaka mezihvězdné látky. V raném vesmíru bylo na veškeré množství látky mnohem méně místa, galaxie musely být blíže sobě, často se srážely a mezigalaktické prostředí bylo hustší a teplejší, než jaké pozorujeme dnes.

Numerické simulace

Přiblížit se dějům, které se za takových podmínek mohly odehrávat, nám pomáhají matematicko-fyzikální simulace, které jsou prováděny na nejvýkonnějších superpočítačích současné doby. Příkladem může být simulace *Illustris*, jejíž výsledky byly zveřejněny v roce 2015. Hlavním cílem bylo zobrazení vzniku a vývoje galaxií včetně tvorby hvězd. Simulace se snažily popsat vesmír od nejranějších fází až po současnost a porovnat matematický model s reálnými pozorovacími daty. Simulace byla prováděna na superpočítačích *Curie* (Francie) a *SuperMUC* (Německo). Při výpočtu bylo využito bylo 8 192 procesorových jader, 19 milionů hodin procesorového času a 25 terabajtů paměti RAM a vznikly z ní nádherné animace ukazující, jak mohl vývoj vesmíru zhruba vypadat.

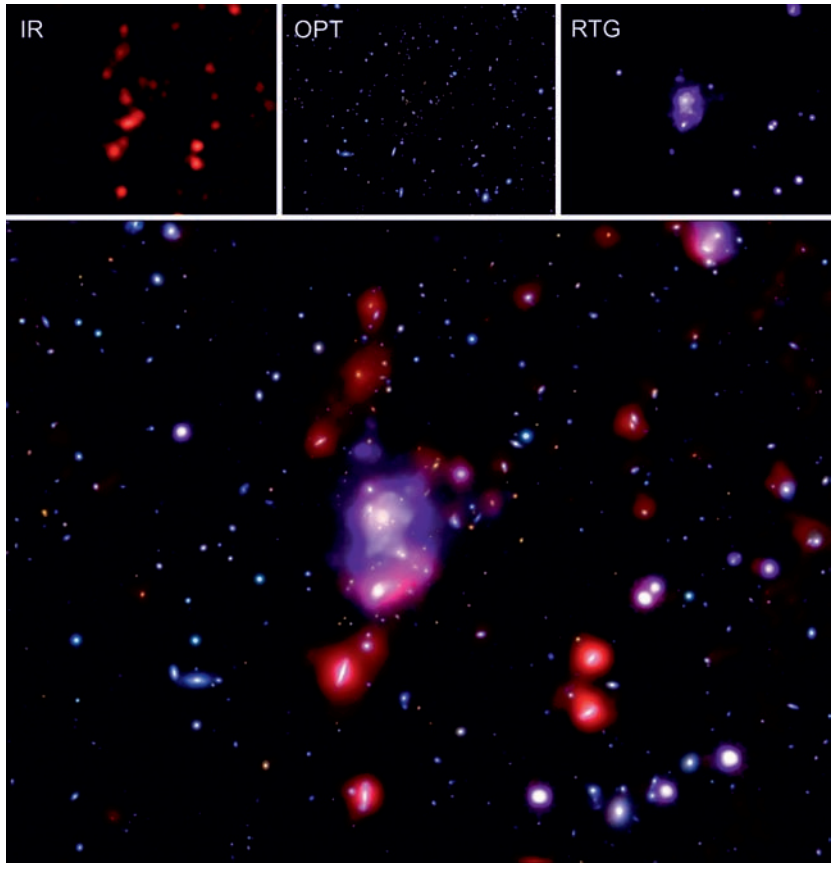
Klenot Gioiello

Rentgenovou observatoří Chandra byl objeven olbřímí shluk galaxií v raném vesmíru. Nově objevená galaktická kupa XDCP J0044.0-2033



Snímek oblasti XDCP0044 ve viditelném světle s vyznačením obrysu kupy Gioiello zachycené observatoří Chandra. Jednotlivé křivky odpovídají oblastem zvyšující se intenzity RTG signálu. Do snímku je promítnut kruh o poloměru 44" (1,2 milionu světelného roku ve vzdálenosti 9,6 miliard světelných roků). Zdroj: ArXiv.

Místní skupina galaxií – *gravitačně vázaná soustava tří velkých spirálních galaxií: galaxie v Trojúhelníku M 33, Velké galaxie v Andromedě M 31 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. Nejznámějšími trpasliky jsou Magellanova oblaka – satelity Mléčné dráhy viditelné na jižní obloze a satelity galaxie v Andromedě označované M 32 a M 110. Termín Místní skupina (Local Group) zavedl Edwin Hubble v roce 1936 v knize „Říše mlhovin" (The Realm of the Nebulae).*



Snímky galaktické kupy XDCP J0044.0-2033 Gioiello. Snímek v infračerveném světle byl pořízen vesmírným teleskopem Herschel, snímek ve viditelném světle zachytily dalekohledy Subaru a VLT a rentgenový obraz byl pořízený observatoří Chandra. Velký snímek je kompozicí všech tří spektrálních oken. Zdroj: Chandra.

v souhvězdí Velryby byla pojmenována *Gioiello*. Gioiello znamená klenot, ozdoba nebo také šperk. Stejným jménem se ale pyšní současně i vila poblíž Florencie, v níž strávil poslední roky svého života v domácím vězení Galileo Galilei. Kupa má červený kosmologický posuv $z = 1{,}58$ a vzdálenost cca 9,6 miliardy světelných roků. Kupu Gioiello pozorujeme ve věku 800 milionů roků, kupa se mohla začít utvářet někdy v době 3,3 miliardy roků po Velkém třesku. Rozpoznatelný obraz kupy Gioiello zabírá na obloze oblast o velikosti poloměru 44″, což v této vzdálenosti odpovídá 1,2 milionu světelných roků. Z naměřených údajů byly stanoveny vlastnosti mezigalaktického prostředí kupy a z nich pak určena hmotnost celé struktury. V oblasti o poloměru zhruba 800 tisíc světelných roků by mohla hmotnost útvaru dosahovat přibližně $1{,}2\times10^{14}$ hmotnosti Slunce. Extrapolací do velikosti poloměru až 1,8 milionu světelných roků by celková hmotnost kupy Gioiello vzrostla až na zhruba $3{,}2\times10^{14}$ Sluncí. V tak obrovské vzdálenosti jde o největší galaktickou kupu a objevy tohoto druhu ve větší vzdálenosti než 8 miliard světelných roků jsou poměrně vzácné. Celková expoziční doba potřebná pro získání obrazu kupy Gioiello odpovídá 104 hodinám a 13 minutám.

Srovnatelně rozsáhlou strukturu Chandra zobrazila také v souhvězdí Hydry. Jde o galaktickou kupu RDCS 1252.9-2927 ve vzdálenosti 8,6 miliard světelných roků ($z = 1{,}24$). V oblasti o poloměru 3,26 milionů světelných roků se zde nachází takové množství látky, jejíž hmotnost odpovídá 7×10^{14} Sluncí. V tak mladém vesmíru jde nejspíše

o nejhmotnější galaktickou kupu, o které v současnosti víme. Za největší galaktickou kupu v bližším vesmíru je považován objekt ACT-CL J0102-4915 v souhvězdí Fénixe známý pod jménem *El Gordo*, což by v češtině mohlo znamenat třeba Cvalík. Kupa El Gordo měří 7,72 milionů světelných roků a je od nás vzdálena 7,2 miliardy světelných roků. Hmotnost El Gordo je odhadována na 3×10^{15} Sluncí.

Vývoj galaktických kup až do současnosti

Dosud předpokládáme, že z takto objemově rozsáhlých a hmotných galaktických kup pozorovatelných v mladém vesmíru se do současnosti vyvinula tenká velkorozměrová vlákna a galaktické stěny, které pozorujeme v našem okolí. V místním vesmíru jsou ale struktury velkých měřítek poznamenány dlouhým vývojem. Poměrně nedávno byly nalezeny hranice mezi místními gravitačně a tedy i pohybově vázanými největšími vesmírnými strukturami. Podrobněji se tomuto určení hranic mezi místními galaktickými kupami budeme věnovat v následujícím textu věnovanému nadkupě *Laniakea*. Otázkou pro budoucí podrobnější výzkum zůstává, zda se tyto dnes nejvzdálenější kompaktní galaktické kupy mohou postupně vyvíjet také do obdobných útvarů, jaké jsme rozeznali v naší bezprostřední blízkosti. Laniakea obsahuje látku odpovídající zhruba 10^{17} hmotností slunečních. Hmotnostně jde tedy ve vzdáleném vesmíru o útvary, jejichž spojováním by mohly po několika miliardách roků vyrůst nejrozsáhlejší nadkupy galaxií, které známe z našeho blízkého vesmíru.

■ **Ivan Havlíček, 9. 1. 2015, AB 2/2015**



El Gordo je nejrozsáhlejší a nejhmotnější galaktickou kupou ve vzdáleném vesmíru. Struktura je rozměrově velká 7,72 milionů světelných roků a je od nás vzdálena 7,2 miliardy světelných roků. Hmotnost El Gordo je odhadována na 3×10^{15} M_S. Snímky byly získány observatořemi Chandra a HST. Fialově je zobrazen rentgenmový obor, modrá barva znázorňuje temnou hmotu dopočtenou z gravitačního působení. Zdroj: NASA.

Laniakea

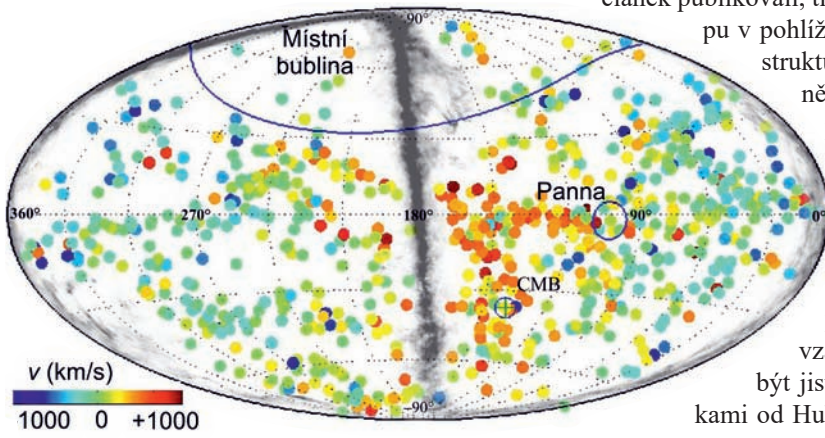
Hubblův zákon – *Edwin Hubble zjistil v roce 1929, že čím je galaxie vzdálenější, tím vyšší rychlostí se od nás vzdaluje. Koeficient úměrnosti se nazývá Hubblova konstanta a označujeme ji H (její hodnota je přibližně 67 km/s na megaparsek). Tento vztah samozřejmě platí jen pro velmi vzdálené galaxie, pro blízké galaxie je rychlost expanze malá a převládají vzájemné pohyby galaxií.*

Tullyho-Fischerův vztah – *experimentálně zjištěná závislost mezi hmotností a rotací u spirálních galaxií. Hmotnost se projevuje svítivostí a rotace zase rozšířením spektrálních čar. Změřením šířky spektrálních čar lze tedy určit absolutní svítivost galaxie a porovnáním s přímo změřenou jasností pak lze dopočíst její vzdálenost.*

Pohyby galaxií ve velkém měřítku jsou známy od dvacátých let minulého století, kdy začalo být díky Hubblovým objevům zřejmé, že se vesmír rozpíná. Ale až do osmdesátých let byl obraz vesmíru poměrně homogenní. Galaxie se pohybovaly tím rychleji, čím jsou od nás vzdálenější. Tento jev byl uznán jako přírodní zákon. Pokud byly nalezeny nějaké odchylky od všeobecně přijímaného Hubblova zákona, byly interpretovány jako lokální poruchy, které se zvětšením měřítka v určitém rozměru vyšetřované oblasti zmizí. V astronomii velkých měřítek byl jako samozřejmost uznán předpoklad, že vždy bude možné nalézt dostatečně velkou oblast, ve které budou pohybové odchylky jednotlivých vnitřních struktur oproti rychlosti Hubblova rozpínání zanedbatelné. Vesmír se až do roku 1987 choval naprosto spořádaně a do všech směrů se rozpínal stejně, přesně podle zažitého paradigmatu.

Velký atraktor

Dne 1. března 1988 vyšel článek popisující pohyb galaxií do dosud nepozorovaného supergalaktického centra. Desetiletá práce, jejíž výsledky zde byly publikovány, byla původně vedena snahou „jen“ zpřesnit Hubblovu konstantu. Pro nově objevený koordinovaný pohyb obrovského množství vesmírné matérie se později ujal název Velký atraktor. Donald Lynden-Bell, Sandra Moore Faber, David Burstein, Roger Davies, Alan Dressler, Roberto Terlevich a Gary Wegner, kteří pilotní článek publikovali, tímto objevem započali novou etapu v pohlížení na velkorozměrové vesmírné struktury. Vesmír přestal být monotónně se rozpínajícím homogenním prostorem vyplněným hvězdnými ostrovy, mezi nimiž neustále spořádaně narůstá vzdálenost. Souběžně s mapováním galaktických kup a měřítkově vyšších struktur bylo nutno velmi pečlivě proměřovat také jejich vzájemné pohyby, o nichž přestalo být jisté, že jsou jen lokálními odchylkami od Hubblova kosmologického rozpíná-



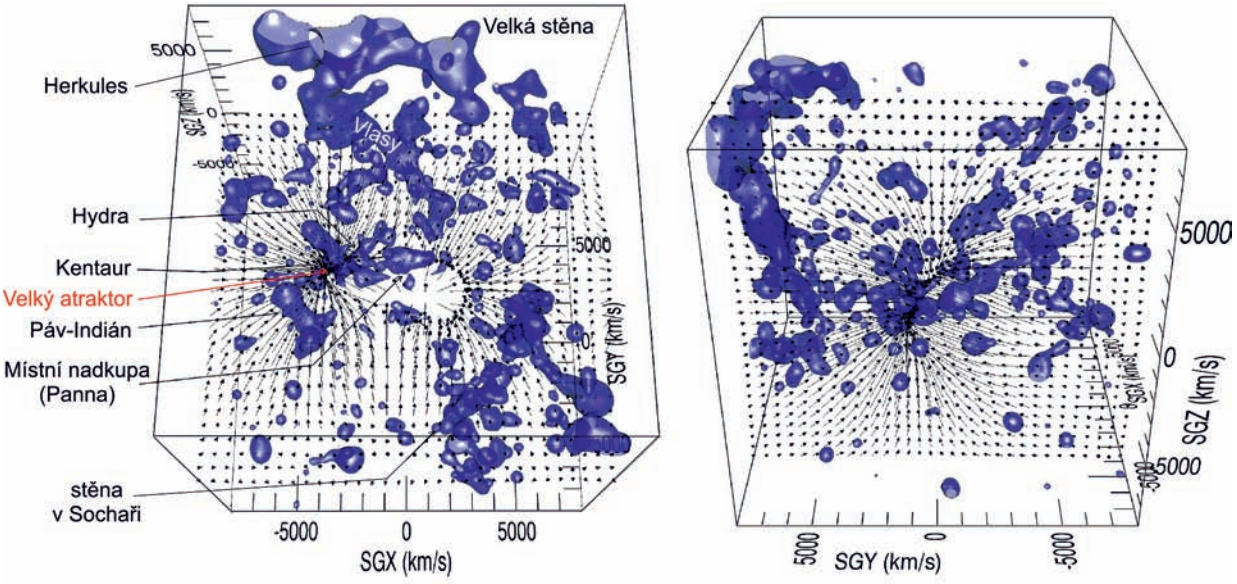
Celooblohový rozvinutý průmět změřených 742 vlastních pohybů velkorozměrových struktur. Jedině v tomto promítání jsme schopni okolní vesmírné toky na nebi ze Země pozorovat. Vše ostatní je již prostorová interpretace vyžadující změnu místa pozorovatele. Šedou barvou na okrajích a svisle uprostřed je znázorněna extinkce Mléčné dráhy. Zdroj: Cosmicflows-1.

ní. Současný popis dynamiky velkorozměrových struktur spočívá ve snaze oddělit pohyby způsobené koncentracemi látky a jejich gravitací ve velkém měřítku od příčin kosmologických, vyplývajících ze samotného rozpínání časoprostoru.

Struktura vesmíru

Galaxie jsou ve vesmíru nahloučeny v kupách a nadkupách, které se mohou propojovat do dosud nejrozsáhlejších oblastí označovaných jako vlákna nebo stěny. Všechny tyto termíny jsou dosti neostré, navíc jsou mimo tyto koncentrace látky známy zase mnohem rozlehlejší oblasti, v nichž galaxie úplně chybí a které jsou označovány jako bubliny. Tento popis našeho vesmírného okolí je od devadesátých let poměrně ustálený a neustále se pokračuje v jeho zpřesňování. Slouží k tomu nejrůznější spektroskopické přehlídkové projekty, které jsou od té doby soustavně prováděny. Za předpokladu známé rychlosti rozpínání časoprostoru, tedy co možná nejpřesnějšího určení Hubblovy konstanty, lze vlastní vzájemné pohyby jednotlivých viditelných galaktických uskupení získat už jen přímým odečtením kosmologické složky od naměřených hodnot. Předpokládáme, že takto získané vlastní pohyby jsou

Kosmografie – *mapování vesmíru nejrůznějšími prostředky. Donedávna šlo zejména o 3D mapy založené na přehlídkovém snímání oblohy prováděném na základě kompilace dat pořízených satelitními observatořemi a projekty obdobnými Sloanově digitální přehlídce oblohy (SDSS). Základ tvoří fundamentální katalogy. Přesnost astronomických map klesá v čase na obě strany od data pořízení mapy a v prostoru se vzdáleností od místa pozorovatele. V současnosti se postupně přechází na časoprostorová zobrazení, tedy 4D mapy.*



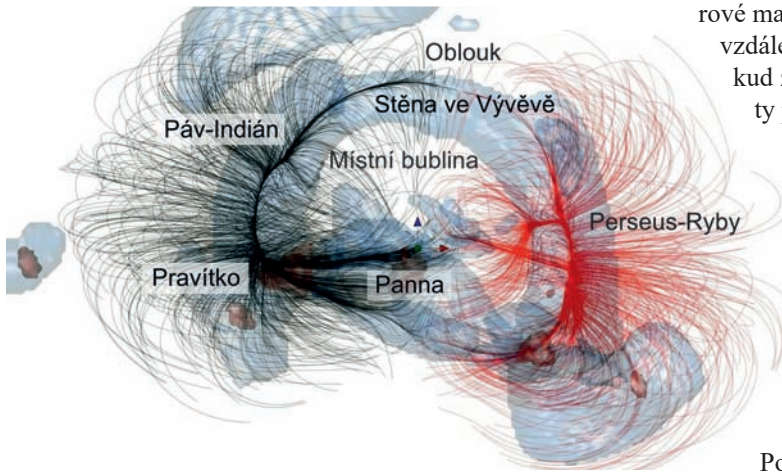
Vizualizace naměřených rozložení hustoty látky v supergalaktických souřadnicích spolu s rychlostním polem vlastních pohybů. Použitá data pocházejí z mikrovlnné přehlídky oblohy 2MASS a jsou omezena na katalog V8k (rychlost nižší než 8 000 km·s^{-1}), což je zřejmé z velikosti zobrazené oblasti – měřítka na hraně krychle. Místní skupina galaxií je ve středu obou krychlí. Zdroj: ArXiv.

Cefeidy – *proměnné hvězdy se známou závislostí perioda/svítivost, využívají se při odhadech vzdáleností. Pojmenovány jsou podle hvězdy δ 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.*

v přímé souvislosti s gravitačním působením nerovnoměrně rozložené vesmírné látky v časoprostoru. Znamená to, že přesnost, s jakou se podaří změřit vzájemné vlastní pohyby, odpovídá podrobnosti získané vesmírné mapy.

ČESKÉ A ANGLICKÉ NÁZVY VELKÝCH VESMÍRNÝCH STRUKTUR	
skupina	group
kupa	cluster
nadkupa	supercluster
vlákno	filament
stěna	wall
bublina, prázdnota	void
kosmický tok	cosmic flow

Zobrazení dvou galaktických nadkup pomocí černých (Laniakea) a červených (Perseus-Ryby) proudnic rychlostního pole vlastních pohybů. Hustota látky je vyznačena modrými a červenými oblastmi. Kosmický proud v nadkupě Laniakea vtahuje kupy galaxií do oblasti poblíž kupy v Pravítku, kde je vznikající vlákno znázorněno nejhustšími černými proudnicemi. Oblouk a rozpínající se Stěna ve Vývěvě tvoří most – rozhraní – mezi oběma nadkupami. Mléčná dráha se v Místní skupině nachází uprostřed obrázku v průsečíku šipek, poblíž kupy galaxií v Panně. Zdroj: ArXiv.



Vlastní pohyby lze dnes měřit ve velmi širokém spektrálním oboru. Pro takto vznikající 4D kosmografii (v prostoru a čase) jsou prozatím nejlépe použitelná měření ve viditelném, infračerveném a mikrovlnném oboru. Jen v těchto pásmech prozatím existují dostatečně rozsáhlé databáze pokrývající celou oblohu. Nezbytnou podmínkou pro prostorové mapování je také dostatečně přesné určování vzdáleností vyšetřovaných struktur. Jedině pokud známe vzdálenost, lze z naměřené hodnoty pohybu odečíst správnou hodnotu kosmologické složky rychlosti, a co zbývá, je hledaným vlastním pohybem.

Skupina Richarda Brenta Tullyho a Hélène M. Courtois postupně od roku 2012 publikovala velmi rozsáhlou databázi měření a jejich interpretací. Výsledkem je popis kosmických toků ve velkých rozměrových škálách až do vzdáleností charakterizovaných rychlostí vzdalování objektů 16 000 km·s^{-1}. Podmínkou správné interpretace je dosta-

tečně přesné převedení naměřených rychlostí vzdalujících se objektů na délkovou míru. Při určování vzdáleností jsou proto kombinována a vzájemně porovnávána data získaná měřením cefeid, Tullyho-Fischerovou relací, svítivostí větve červených obrů, supernov Ia a ještě jinými metodami. V současnosti jde o nejrozsáhlejší kosmografický projekt. Výsledek je ve dvourozměrné podobě téměř nesrozumitelný, pokud člověk není zrovna architektem s vycvičenou prostorovou představivostí. Publikace v odborném tisku byly proto vždy doprovázeny pohyblivým prostorovým grafem propojujícím 3D mapu rozložení gravitačně působící matérie s rychlostním polem, které toto rozložení v časoprostoru způsobuje.

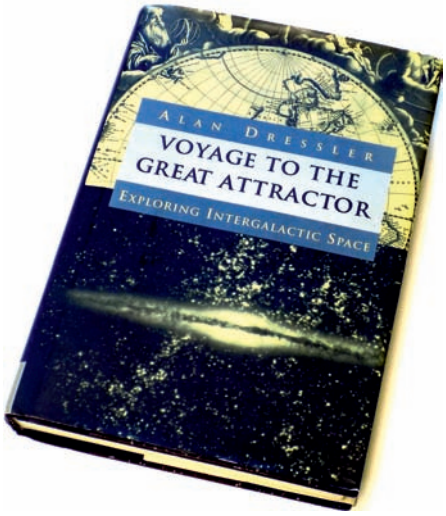
Laniakea

Nadkupa naší Mléčné dráhy je pojmenována Laniakea, zabírá oblast o průměru zhruba půl miliardy světelných roků, na hranici Laniakey dosahují galaxie rychlosti až 12 000 km·s^{-1}. Laniakea obsahuje látku odpovídající hmotnostně zhruba 10^{17} hmotností Slunce (Mléčná dráha čítá cca 10^{11} hmotností Slunce). Vně nadkupy Laniakea byly nalezeny podobně se chovající sousední galaktické nadkupy Perseus-Ryby, Vlasy Bereničiny a Shapleyho koncentrace. Do všech těchto sousedních nadkup natéká matérie podobnými kosmickými toky jako do Velkého Atraktoru v nadkupě Laniakea, jíž jsme součástí. Nadkupy jsou pletivem velkorozměrových struktur sestávajících z vláken, stěn a bublin. Teprve dlouhotrvající celooblohové přehlídky posledních dvou desetiletí a výpočetní možnosti 21. století umožnily takto detailně zobrazit velkorozměrovou strukturu vesmíru. Jde o historicky první skutečné poznání hranic nejbližších galaktických nadkup, které jsou určeny dynamicky. Největší vzájemně gravitačně vázané struktury v blízkém vesmíru se podařilo přesně oddělit díky jejich vlastním pohybům.

■ **Ivan Havlíček, 21. 11. 2014, AB 38/2014**

Červení obři – *hvězdy v závěrečné fázi vývoje. Počáteční hmotnost na hlavní posloupnosti je 1,5 až 10 Sluncí. Ve fázi obra hvězda zvětší své rozměry maximálně na několik desítek původního průměru, svítivost se zjasní maximálně o dva řády původní svítivosti při nízké povrchové teplotě. S rostoucí počáteční hmotností přechází větev obrů v HR diagramu do oblasti veleobrů. Spektrální typ se pohybuje zhruba v intervalu O5 až M5, kde obři s nejnižší hmotností mají spektrum F5. Hmotnost roste směrem ke spektrálnímu typu M, povrchová teplota opačným směrem.*

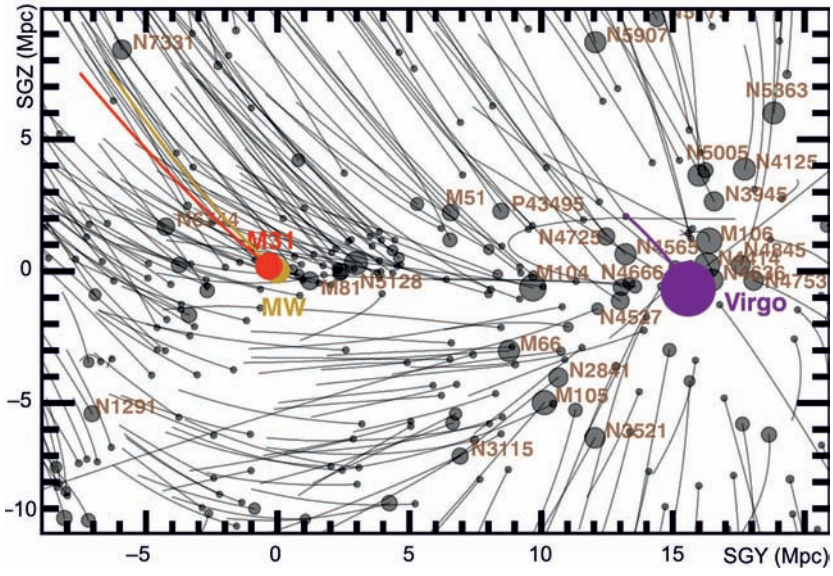
Kniha Alana Dresslera z roku 1994, v níž popisuje cestu za Velkým Atraktorem. Stejný název si pro popis vesmírných toků zvolila ve svých prezentacích také skupina R. Brenta Tullyho a Hélène M. Courtois v roce 2012. Zdroj: Ivan Havlíček.



Kosmická rychlostní síť

Wienerův filtr – *matematická procedura využívaná při zpracování signálů, při níž je nejprve zjištěno spektrum šumu při známém signálu, a poté je šum snížen matematickým filtrem, který minimalizuje střední kvadratickou chybu mezi náhodným a cílovým procesem.*

Astronomové zabývající se velkorozměrovými strukturami, kteří poznávají vesmír ve velkém měřítku, se v posledních několika letech propracovali k poměrně detailnímu popisu pohybů velkorozměrových soustav. Jedním z prvních, který nabídl popis galaktických nadkup ve formě pohybového pole, byl projekt Cosmicflows započatý v únoru 2007. Projekt si původně kladl za cíl zpřesnit některé kosmologické parametry, jako například Hubblovu konstantu. První výsledky popisující blízké kupy galaxií jako pohybové struktury byly publikovány v roce 2012, kdy již probíhala druhá generace projektu – Cosmicflows-2 program (CF2). CF2 obsahuje 8 188 galaxií. V roce 2016 byly publikovány výsledky již třetí generace tohoto grandiózního kartografického projektu, který předchozí soubor rozšířil na více než dvojnásobek – byly zde popsány astrofyzikální charakteristiky 17 669 galaxií. Takto velké soubory dat lze dnes za pomoci komplikovaných matematických metod využít ke stále se zpřesňujícímu popisu dynamiky velkorozměrových struktur. Klíčovou metodou je při analýze napozorovaných dat a jejich interpretaci Wienerův filtr a jeho parametrizace.



Minulost dynamiky galaxií Místní skupiny za dobu 13,25 miliard roků. Zobrazení vzniklo extrapolací současných vesmírných toků do minulosti. V grafu jsou vyznačeny polohy Mléčné dráhy (MW) a galaxie v Andromedě (M 31). Kupa galaxií v Panně je reprezentována velkým fialovým kroužkem. Linie táhnoucí se za každým kroužkem reprezentujícím jednotlivé galaxie jsou dráhy, po kterých se tyto objekty v časoprostoru pohybovaly. Zobrazení je v trojrozměrných supergalaktických souřadnicích SGX, SGY a SGZ, které jsou obdobné soustavě SGL a SGB (viz strana 104). Zdroj: PhysOrg.

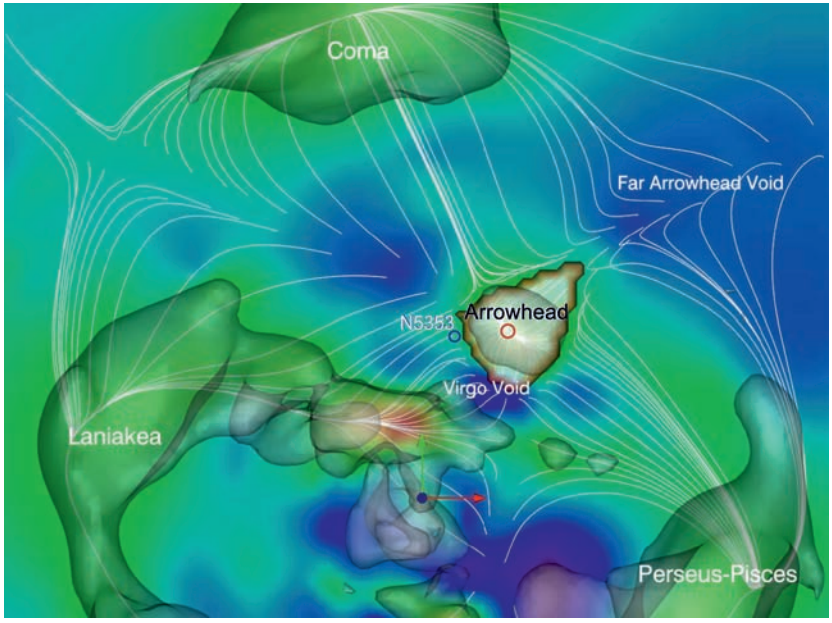
Vesmírná kartografie dnes už probíhá jen na superpočítačích, díky kterým je možné nalézat vztahy mezi jednotlivými galaxiemi nesenými vesmírnými toky a ovlivňujícími se přitom navzájem. Na počátku právě probíhajícího desetiletí se astronomům z Havajské univerzity pod vedením Richarda Brenta Tullyho podařilo v blízkých nadkupách galaxií rozpoznat hranice dané právě směrováním rychlostních toků. Poprvé tak byla ohraničení mezi galaktickými nadkupami určena jejich vzájemnými gravitačními vztahy a ne podle jejich zdánlivé hustoty jednotlivých členů na statických snímcích oblohy, jek se dělo dosud. Podrobněji

je tomu věnován předchozí článek Laniakea. Kartografové velkorozměrových soustav dnes už umějí popisovat skutečné rozložení galaktických nadkup také v čase. Otevřela se tak možnost předpovídat nejen jejich budoucí vývoj, ale hlavně je možné vysledovat i historii, kterou by galaktické kupy měly mít za sebou, aby struktura vesmíru byla taková, jakou ji dnes pozorujeme.

Drobná galaktická nadkupa Šípový hrot

Podrobným poměřováním struktury blízkého vesmíru na základě projektu CF2 byla objevena oblast v Honících psech okolo galaxie NGC 5353, která prostorově balancuje mezi třemi soupeřícími gravitačními centry: Laniakeou, nadkupou Perseus – Ryby a nadkupou ve Vlasech Bereniky. Jádro této nadkupy se nachází na souřadnicích α = 12h 05m, δ = + 58°; l = +134°, b = +57°; SGL = +57°, SGB = +7°; ve vzdálenosti ~2 700 km·s^{-1}. Oblast byla určena právě pohybovým polem, které zde vyděluje mezi výše uvedenými třemi nadkupami drobnou oblast v níž se galaxie pohybují koncentricky. Rozhraní, od něhož se galaxie pohybují dovnitř nebo ven z nadkupy, má tvar šípového hrotu a podle toho byla tato drobná nadkupa také pojmenována. Část nadkupy Šípový hrot byla zachycena již v katalogu *Nearby Galaxies Atlas* (Tully & Fisher 1987) jako struktura nazvaná Oblak v Honících psech a Žirafě a Oblak v Pastýři (*Canes Venatici–Camelopardalis Cloud*, *Boötes Cloud*). Nejvzdálenější objekty tohoto atlasu z roku 1987 byly od nás vzdáleny jen 3 000 km·s^{-1}, proto byla z nadkupy Šípový hrot zachycena jen čelní blízká stěna, v níž dominuje galaktická kupa s hmotností 3×10^{13} Sluncí, jejímž jádrem jsou galaxie NGC 5353 a NGC 5354 ve vzdálenosti 2645 km·s^{-1}, což odpovídá 35 Mpc (2008). Velikost nadkupy Šípový hrot je

Kosmologické vzdálenosti – *vzhledem k nejistotám vznikajícím při měření velkých – kosmologických – vzdáleností, neudávají se velké vzdálenosti v obvyklých délkových mírách, jako jsou světelné roky nebo parseky. Na velkých vzdálenostech lze změřit výhradně vlastnosti světla vzdálených zdrojů, tedy jasnost a spektrum. Za určitých předpokladů lze tyto vlastnosti interpretovat jako vlastnosti vzdáleností ovlivněné – například čím je zdroj dál, tím rychleji by se od nás měl díky Hubblově toku vzdalovat. Jelikož je ale rychlost*



Drobná galaktická nadkupa Šípový hrot se nalézá na okraji nadkupy Laniakea na rozhraní mezi nadkupou Perseus – Ryby a nadkupou ve Vlasech Bereniky. Šípový hrot je od Místní skupiny galaxií oddělen Bublinou za kupou v Panně (Virgo Void). Dále se za Šípovým hrotem rozprostírá prázdnota (Far Arrowhead Void), z níž jsou galaxie vytahovány do dvou směrů – do centra nadkup ve Vlasech Bereniky a Perseus – Ryby. Zdroj: Astrophysical Journal.

vzdalování veličina přímo měřitelná a Hubblova konstanta je jen veličina odvozená na základě mnoha nejistých předpokladů, udávají se velmi velké vzdálenosti v kosmologických textech pro jistotu jen v hodnotách změřeného červeného posuvu spektrálních čar, popř. z něj odvozené rychlosti vzdalování. Odpadá tak pro budoucí interpretace nutnost zpětného zjišťování metody, s jakou byl červený posuv na vzdálenost přepočítán a jaké předpoklady byly brány pro výpočet v úvahu.

Astronomické souřadnice – *umožňují udávat v astronomii polohu několika způsoby. Pozorovatel vyhledávající objekt na obloze z pozorovacího místa na Zemi používá souřadnice zohledňující jeho polohu, tedy souřadnice vztažené k zeměkouli a jejímu pohybu ve vesmíru. V tomto případě jde nejčastěji o souřadnice rovníkové. Pro potřeby orientace ve středním měřítku, kdy je potřeba zohlednit polohu extragalaktického objektu vůči výhledu z Mléčné dráhy, byly zavedeny souřadnice galaktické. Pro studium rozměrných mimogalaktických struktur byl ustaven nejrozsáhlejší systém souřadnic – supergalaktické souřadnice (SG).*

Rovníkové souřadnice – *poloha se udává úhlem ve směru rovníku a vzdáleností od rovníku (deklinací označovanou δ) ve stupních v rozmezí od –90° do + 90°. Jelikož se Země otáčí kolem své osy, rovníkové souřadnice jsou dvojího druhu. První druh udává ve směru rovníku hodinový úhel od místního poledníku promítnutého na nebeskou sféru (meridiánu). Hodnoty hodinového úhlu přibývají k západu a tato souřadnice se s časem rychle mění. Souřadnice druhého druhu používají pro počátek ve směru rovníkovém jeden z průsečíků nebeského rovníku a ekliptiky – jarní bod. Úhel rovníkový se zde nazývá rektascenzí (α), měří se směrem východním od jarního bodu a s časem se pro potřeby běžného pozorovatele nemění.*

Galaktické souřadnice – *poloha se udává galaktickou délkou a šířkou. Základní rovinou je galaktická rovina procházející Sluncem. Úhel v galaktické rovině se měří ve stupních, označuje se jako galaktická délka (l) a od směru ke středu Galaxie přibývá obdobně jako rektascenze směrem východním. Vzdálenost od roviny Galaxie se označuje jako*

1800×3000×3800 km·s^{-1}, tato nadkupa hmotnostně odpovídá 10^{15} Sluncím. Pro srovnání je Laniakea rozměrově zhruba pětkrát tak veliká a hmotnostně zahrnuje o dva řády více látky – 10^{17} Sluncí.

Dipólový repeler

Místní skupina galaxií se vůči mikrovlnnému záření kosmického pozadí (CMB) pohybuje rychlostí 631±20 km·s^{-1}. Spolupodílí se tak na hromadném toku, který je možno vysledovat až do vzdáleností ≈20 000 km·s^{-1}. Pátrání po zdrojích těchto pohybů vyústilo k objevení dipólového charakteru reliktního záření. Donedávna bylo všeobecně přijímaným předpokladem, že za podobné pohybové výstřednosti jsou odpovědné nerovnoměrnosti v rozložení galaxií. Galaxie jsou vyplavovány kosmickými proudy z oblastí s velmi malou hustotou a směřují do míst, kde je hustota galaxií větší. Tato skutečnost se dá ale obtížně ověřit, jelikož řídké oblasti se díky nedostatku světla z chybějících galaxií, které zde nejsou, velmi obtížně mapují. Před více než deseti roky to vypadalo, že oblast s nízkou hustotou zhruba ve vzdálenosti 15 000 km·s^{-1} na severní polokouli je sice významnou, ale přeci jen náhodnou nerovnoměrností okolního kosmického toku. V roce 2017 se však analýzou dat CF2 podařilo prokázat, že okolní hromadný kosmický tok má dipólový charakter. Hromadný tok směřuje do Shapleyho koncentrace. V Shapleyho koncentraci se nachází nejmohutnější zdroj přitahování všech velkorozměrových struktur nacházejících se od nás do vzdálenosti ≈ 20 000 km·s^{-1}. Tento tok má ale svůj protipól – místo, ze kterého jsou veškeré vesmírem plující struktury vypuzovány s obdobnou intenzitou, s jakou přitékají do Shapleyho koncentrace. Toto místo nazvěme s ohledem na dipólový charakter celého děje *Dipólový repeler* (*Dipole Repeller*). Dipólový repeler se od nás nachází na opačné straně než Shapleyho koncentrace ve vzdálenosti 16 000 ± 4 500 km·s^{-1}. Dipólový repeler bude nejspíše ztotožněn s velmi řídkou oblastí, v níž se nenacházejí téměř žádné galaxie.

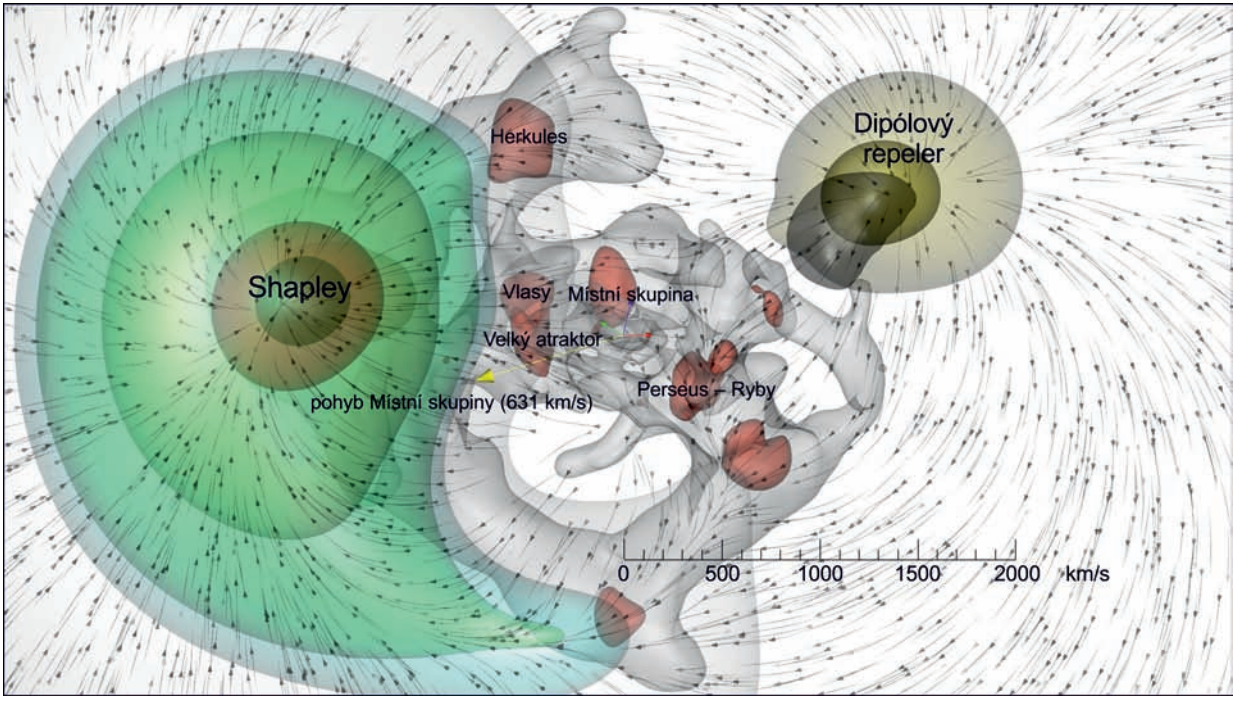
Kosmická rychlostní síť

V posledních několika málo letech se pohled astronomů na velkorozměrové struktury radikálně změnil. Jde o podobný zvrat, jaký zažívali fyzikové při přechodu od Newtonova mechanického popisu světa k popisu světa pomocí nejrůznějších polí moderní fyziky na přelomu 19. a 20. století, který vyústil do relativistické fyziky současníků Al-

berta Einsteina. Statický popis přestal existovat a namísto galaxiemi jako body v kulisách trojrozměrného prázdného prostoru se vesmírná kartografie začala zabývat rychlostními poli a popisem nejrůznějších toků vesmírné matérie, jíž jsou galaktické kupy jen velmi malou součástí. Tyto grandiózní toky látky by nemohly probíhat tak, jak je pozorujeme, kdyby měly být způsobeny jen gravitací svítících hvězdných ostrovů, tedy galaxií a viditelné mezigalaktické hmoty. Ve vesmírných strukturách hraje mnohem výraznější podíl látka, kterou nevidíme, která se ale také na jejich tvorbě podílí. Jde o matérii nazývanou temná hmota, které je oproti baryonové látce zhruba pětkrát tolik a která by se podle odborníků na velkorozměrový vesmír měla z dobrých důvodů spíše nazývat látkou průhlednou než temnou. V současnosti neustále probíhá mapování a neustále se opakují měření mnoha tisícovek samostatných galaxií ve vesmíru do vzdálenosti zhruba půl miliardy světelných roků. Díky tomu jsme schopni popisovat dynamiku této oblasti

galaktická šířka (b), měří se obdobně jako deklinace ve stupních na obě strany. Počátek galaktických souřadnic, má v rovníkových souřadnicích polohu α = 17h 45m 37s, δ = −28° 56′ 10″ a galaktický severní pól α = 12h 51m 26s, δ = +27° 07′ 42″ (epocha J2000).

Dipólový repeler zobrazený v krychli o hraně 40 000 km·s^{-1} na základě dat CF2. Místní skupina galaxií, která se pohybuje ve směru velké žluté šipky vůči CMB, je na grafu uprostřed. Hustotní nerovnoměrnosti v rozmístění galaktických nadkup jsou znázorněny oranžovošedými obalovými plochami vyjadřujícími srovnatelnou hustotu. Nejhustší oblasti jsou oranžové. Podobně jsou zelenavou barvou vyjádřeny stejné intenzity gravitačního gradientu obou protipólů – Shapleyho atraktoru a Dipólového repeleru. Zdroj: IRFU.

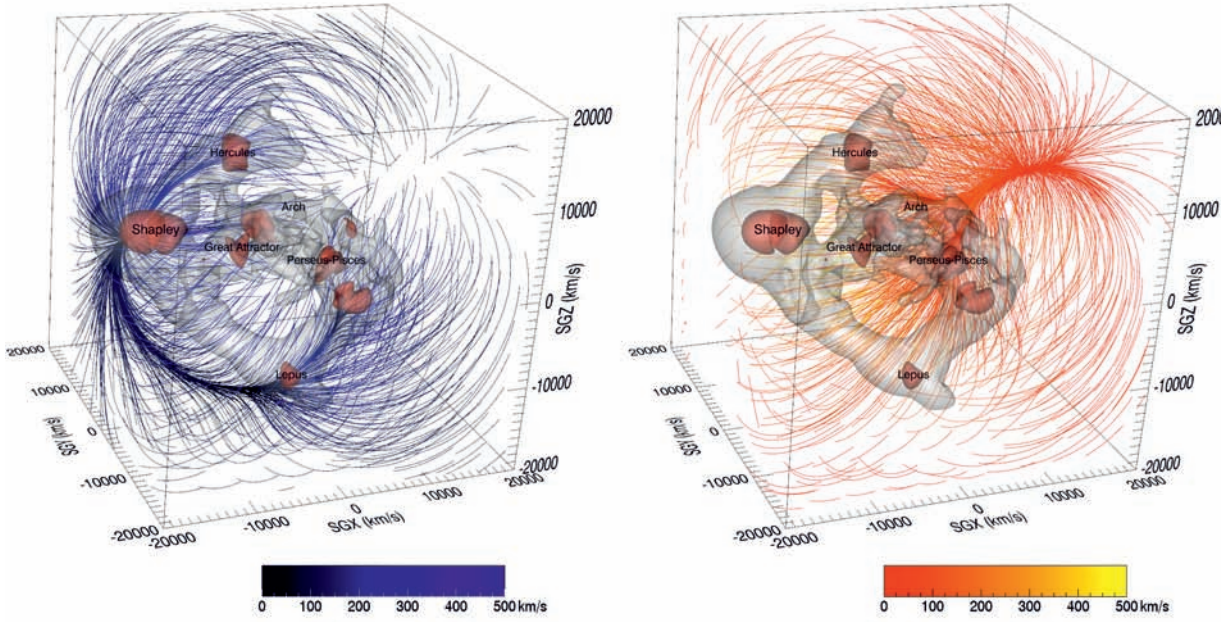


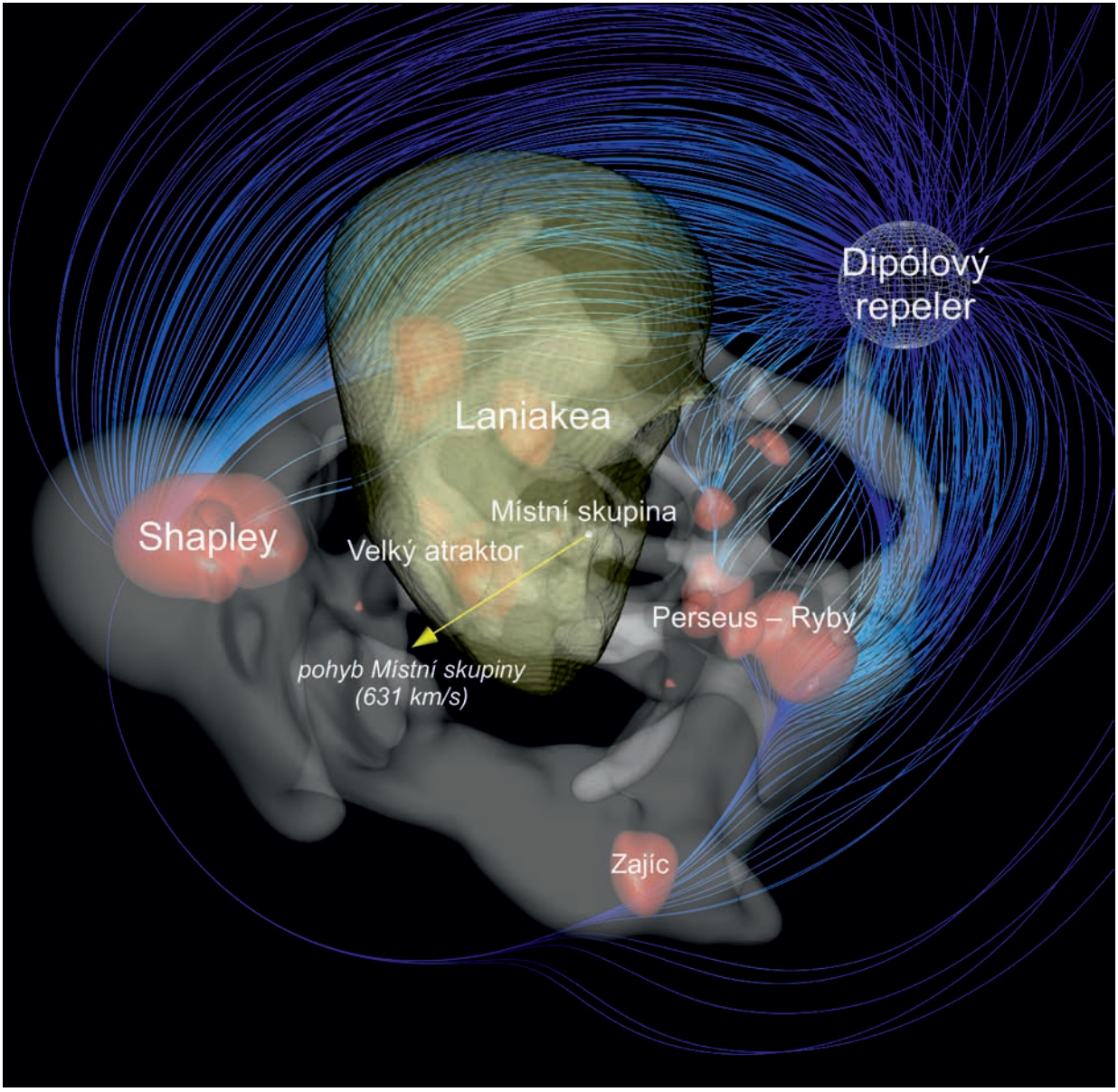
Supergalaktické souřadnice (SG) – *základní rovinu definoval v roce 1953 Gerard de Vaucouleurs jako rovinu protínající nejhustší oblasti našeho galaktického okolí. Rovina protíná vláknitou strukturu obsahující Místní galaktickou nadkupu, nadkupu ve Vlasech Bereniky, nadkupu v Rybách a ve Velrybě a Shapleyho koncentraci. Tato základní rovina současně protíná dvě velmi řídké oblasti – Severní a Jižní místní prázdnoty (supervoids). Počátek je stanoven v α = 2h 49m 14s, δ = +59° 31' 42", a SG severní pól je v α = 18h 55m 01s, δ = +15° 42' 32", (epocha J2000). Supergalaktické souřadnice se označují a měří ve stupních obdobně jako souřadnice galaktické: délka SGL a šířka SGB.*

mnohem přesněji a podrobněji, než jak tomu bylo dosud. V dynamice velkostruktur tak lze rozpoznat nejrůznější hierarchie vesmírných toků od lokálních proudů směřujících k hlavním vláknům a uzlům až po grandiózní řeky táhnoucí se několik stovek milionů světelných roků ustálenými směry. Dřívější představa o vesmíru jako temném místě, v němž se tu a tam rozsvítí nějaký hvězdný osamocený galaktický ostrov, je minulostí. Vesmír současný je plný pohybu a vesmírný řád je reprezentován uspořádáním velkorozměrových toků, které se díky pohybům tisícovek galaxií podařilo objevit. Dnešní třírozměrná zobrazení velkorozměrových struktur nabízejí fascinující ukázku současné vesmírné kartografie v nejrůznějších měřítkách. Celá dnes známá hustotní a pohybová struktura je rozložitelná až po detailní náhled zevnitř jednotlivých vláken ukazující kupy galaxií tak, jak je ještě popisovali kartografové druhé poloviny dvacátého století.

■ **Ivan Havlíček, 23. 2. 2018, AB 8/2018**

Rychlostní síť vesmírné matérie v našem okolí do vzdálenosti zhruba 20 000 km·s^{-1} na všechny strany. Místní skupina galaxií je uprostřed.



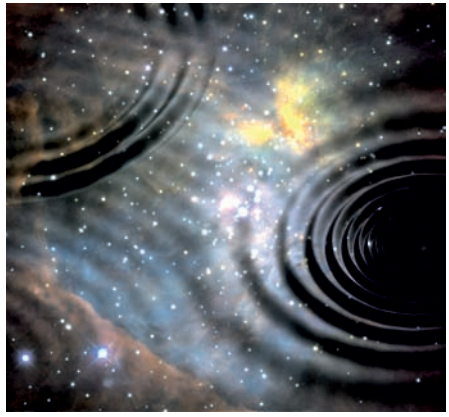

Dipólový repeler
Laniakea
Místní skupina
Shapley
Velký atraktor
Perseus – Ryby
pohyb Místní skupiny
(631 km/s)
Zajíc

Na gravitačních vlnách

Gravitační interakce – *interakce působící na všechny částice bez výjimky. Má nekonečný dosah a její intenzita ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Současnou teorií gravitace je obecná relativita zveřejněná Albertem Einsteinem v roce 1915. Podle této teorie kolem sebe každé těleso zakřivuje prostor a čas a v tomto pokřiveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách. Obecná relativita předpověděla řadu jevů, které z Newtonovy teorie gravitace neplynou.*

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 oba americké přístroje LIGO.*

Gravitační vlny jsou jemné záhyby časoprostoru šířící se rychlostí světla. Zdroj: Pierre Binétruy, APC, Paris.



Gravitační vlny jsou jemné záhyby v předivu časoprostoru, které mohou být generovány mnoha způsoby. K nejznámějším patří oběh dvou hvězd (nejsilnější signál dávají obíhající kompaktní objekty, jako jsou bílí trpaslíci, neutronové hvězdy či černé díry). Existenci gravitačních vln předpověděl na základě své obecné relativity Albert Einstein v roce 2016, tedy před více než sto lety.

Od prvních pokusů o zachycení gravitačních vln uplynulo přes půl století. Současné interferometrické systémy LIGO a Virgo prošly po roce 2010 důkladnou rekonstrukcí, při které se zvýšila jejich citlivost natolik, že jsou schopny gravitační vlny zachytit. Jako první byl úspěšný americký detektor LIGO v září 2015. Objev byl oznámen na slavnostní tiskové konferenci ve Washingtonu dne 11. února 2016, tedy téměř přesně sto let od předpovědi existence gravitačních vln. Od té doby jsme detekovali již několik záblesků vzniklých sloučením dvou černých děr a jeden záblesk spojený se sloučením dvou neutronových hvězd. Zcela nová fyzika gravitačních vln začala nabírat na obrátkách.

Gravitační vlny

Gravitační vlny nejsou vlněním hmotného prostředí, jak je tomu například u zvukových vln, ale jde o rozvlnění samotného časoprostoru. Základní podmínkou vzniku gravitačních vln je kvadrupólová nesymetrie pohybujících se objektů. Nemůže jít o rotující kuličku (sférická symetrie) nebo tyčku otáčející se kolem podélné osy (dipólová symetrie). Pohybující se objekt musí mít složitější rozložení hmoty. Typickým příkladem, který vede na genezi gravitačních vln, je vzájemně se obíhající dvojice hvězd. Gravitační vlny ale vznikají i při nesymetrických explozích supernov, při spojení černých děr nebo při inflaci vesmíru, kdy zvětšení fluktuací způsobí chaotické rozvlnění časoprostoru.

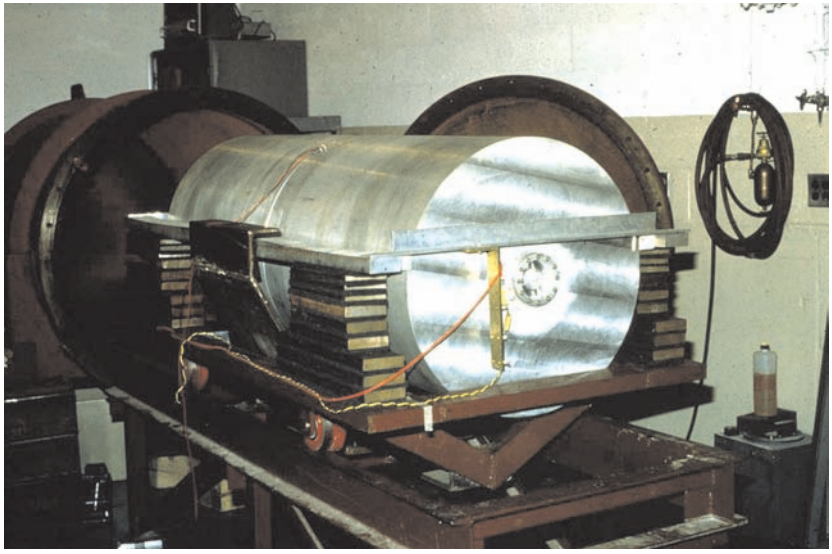
Gravitační vlny mají dvě nezávislé polarizace skloněné pod úhlem 45° (u elektromagnetických vln jsou také dvě nezávislé polarizace kmitů, ale ty svírají úhel 90°). Gravitační vlny se šíří, obdobně jako vlny elektromagnetické, maximální možnou rychlostí šíření informace, tj. rychlostí zhruba 3×10^8 m·s^{-1}. Jejich zachycení je obtížné, protože se blízká tělesa na vlně pohupují podobným způsobem a jejich vzájemná poloha se příliš nemění. U elektromagnetické vlny je tomu zcela jinak: kladně a záporně nabité částice se pohybují opačným směrem, navíc

oproti okolí, a detekce jejich pohybu je velmi snadná. Navíc s rostoucí vzdáleností od zdroje amplituda gravitačních vln výrazně klesá. K detekci gravitačních vln velkých vlnových délek jsou potřebné detektory velkých rozměrů. Ideální je měření dvou navzájem kolmých vzdáleností, protože při průchodu gravitační vlny se jeden rozměr zkracuje a druhý současně prodlužuje. Pro taková měření jsou vhodné interferometry se dvěma kolmými rameny. Na takovém zařízení byly nakonec gravitační vlny poprvé detekovány.

Kvadrupólová symetrie – *rozložení hmoty, které má nižší symetrii než sférickou (rotující kulička) nebo dipólovou (tyčka rotující kolem podélné osy). Typickým případem kvadrupólové symetrie jsou dvě vzájemně se obíhající hvězdy. Dalším příkladem je pád objektu do černé díry. Kvadrupólová nesymetrie také vzniká při nesymetrických explozích supernov nebo k ní došlo v raných fázích vesmíru, když se prvotní kvantové fluktuace zvětšily v průběhu inflace do makroskopických objektů. Všechny tyto jevy jsou doprovázeny genezí gravitačních vln.*

První pokusy

O první detekci gravitačních vln se pokusil americký fyzik Joseph Weber (1919–2000). Gravitační vlny se pokoušel chytat v 60. letech 20. století za pomoci hliníkových rezonančních válců. Hmotnost válců byla 1,5 tuny a rezonanční frekvence přibližně 1,5 kHz. Weber předpokládal, že se válec při průchodu gravitační vlny rozkmitá a tyto kmity bude detekovat piezoelektrickým snímačem na boku válce. Provozoval vždy dva válce současně (na Marylandské univerzitě ve Washingtonu D.C. a v Argonnské národní laboratoři na Chicagské univerzitě) ve vzdálenosti přibližně 1 000 kilometrů a hledal koincidence kmitů. V průběhu 60. let vyrobil větší množství těchto válců, ale jeho zařízení bylo příliš málo citlivé na to, aby vlny detekovalo. Weberovy válce byly schopné zachytit jednu jedinou (rezonanční) frekvenci a v principu s nimi nebylo možné změřit charakteristický průběh frekvence při gravitačním záblesku ze splynutí dvou objektů. Weber byl také autorem menšího gravitačního experimentu, který dopravilo na povrch Měsíce Apollo 17.



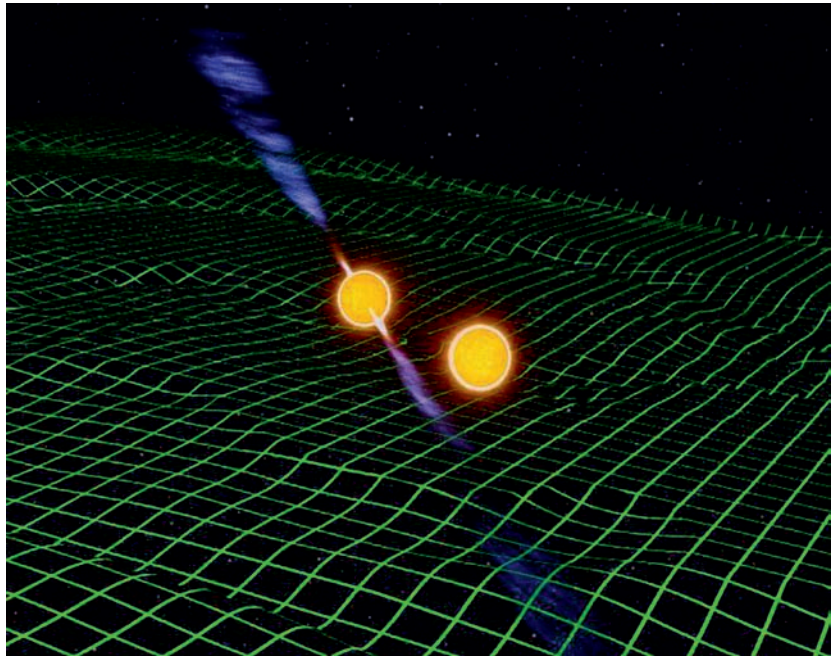
Jeden z Weberových válců. V levé části je patrný úchyt pro piezoelektrický snímač. Zdroj: ILBE.

K první úspěšné detekci gravitačních vln, byť nepřímé, došlo až při systematickém pozorování podvojného pulzaru PSR 1913+16 ze souhvězdí Orla radioteleskopem v Arecibu. Ve skutečnosti je název poněkud matoucí, pulzarem je jen

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. 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. Za první dva roky po rekonstrukci bylo zachyceno pět prokazatelných signálů a jeden statisticky málo průkazný.*

jedna z neutronových hvězd tvořících podvojný systém. Zkracování periody vzájemného oběhu neutronových hvězd odpovídalo velmi přesně úniku energie ze systému spojeného s genezí gravitačních vln. Obě neutronové hvězdy se při každém oběhu k sobě přiblíží zhruba o tři milimetry (splynou za 400 milionů let) a jejich oběžná doba 7h:45 minut se zkrátí cca o 76 mikrosekund za rok. Za systematický průzkum tohoto podvojného pulzaru obdrželi Nobelovu cenu za fyziku Russel Hulse (1950) a Joseph Taylor (1941) v roce 1993. Hmotnosti složek systému jsou přibližně 1,4 hmotnosti Slunce a vzájemná vzdálenost je při největším přiblížení pouhých 700 000 km (přibližně poloměr Slunce). Dvojice neutronových hvězd je ideální relativistickou laboratoří, v níž je možné zkoumat různé jevy obecné relativity. Dnes známe další podvojné systémy s ještě lepšími parametry, příkladem může být podvojná neutronová hvězda J0737+3039 ze souhvězdí Lodní záď, u níž se relativistickými jevy pericentrum stočí o 17° za rok (u PSR 1913+16 jsou to „jen“ 4° za rok). Detekce unikajících gravitačních vln je považována za zcela průkaznou, ale je třeba zdůraznit, že jde jen o detekci nepřímou. Bylo jasné, že bude třeba pozorovat nějaký předmět, který se na gravitačních vlnách bude pohupovat.

Periodické zakřivení časoprostoru v okolí dvojice neutronových hvězd, z nichž jedna je pulzarem. Obdobným systémem je například PSR 1913+16. Zdroj: John Rowe.



Interferometrické detektory

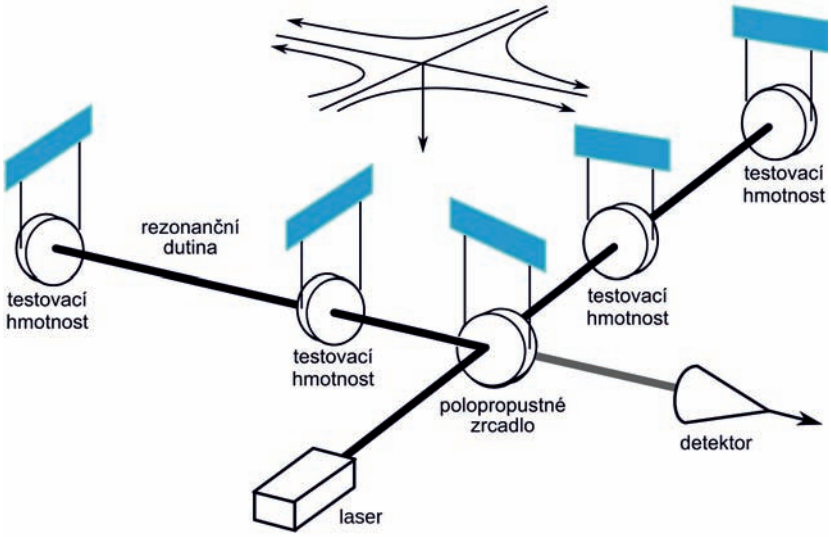
Duchovními otci současných úspěšných detektorů jsou američtí fyzikové Reiner Weiss (*1932), jehož rodina do USA emigrovala z Německa přes tehdejší Československo, a americký teoretik Kip Thorne. Reiner Weiss je vynálezcem laserové interferometrie, která je klíčovou technologií v detektorech tohoto typu. Zdrojem světla je laser, jehož paprsek je rozdělen do dvou kolmých ramen. Na koncích ramen je testovací hmotnost reprezentována zavěšeným zrcadlem.

Paprsky z obou ramen interferují v detektoru a z posunu interferenčních proužků lze rozpoznat změnu délky ramen, resp. vzájemný pohyb obou koncových zrcadel. Při správném tvaru signálu může jít o zachycení průchodu gravitační vlny.

V roce 1991 byl v americké Pasadeně ve dvou kolmých univerzitních chodbách na univerzitě Caltech (Kalifornský technologický institut) zprovozněn první funkční interferometrický detektor MARK s délkou ramen „pouhých" 40 metrů. Do nového konceptu detektoru se vkládaly veliké naděje. V dnešních systémech se délka ramen, a tím přesnost detekce koncového zrcadla, uměle zvětšuje rezonanční dutinou tvořenou koncovým a jedním polopropustným zrcadlem, kde dochází k mnohanásobnému odrazu svazku (dvěstěkrát až třistakrát).

Největší zařízení současnosti je americké LIGO se čtyřkilometrovými rameny – jeden přístroj je v Hanfordu (západ USA), druhý v Livingstonu (východ USA), vzdálené jsou 3 000 kilometrů. Třetím velkým detektorem je evropské Virgo s tříkilometrovými rameny, které se nachází u vesničky Cacsina, pouhých deset kilometrů od Pisy, kterou většina turistů zná díky slavné šikmé věži. Všechna tři velká zařízení prošla po roce 2010 rozsáhlou rekonstrukcí, jejímž cílem bylo zvýšení přesnosti detektorů. Rekonstrukce přístroje LIGO byla ukončena dle plánu v září 2015 a hned v testovacím provozu byl zachycen první gravitační impulz. Rekonstrukce detektoru Virgo vázla a spuštění detektoru bylo neustále odkládáno (původně měla rekonstrukce skončit současně s rekonstrukcí detektoru LIGO). Nakonec se ale dobrá věc podařila a Virgo se k detektoru LIGO připojilo v první pozorovací kampani, která proběhla v srpnu 2017. A hned v průběhu tohoto jediného měsíce byly detekovány dva gravitační impulzy. První souvisel se spojením dvou černých děr, druhý se spojením dvou neutronových hvězd.

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 podstatné 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).*



Princip interferometrické detekce gravitačních vln. Laserový paprsek je rozdělen do dvou kolmých ramen za pomoci polopropustného zrcadla, které slouží jako dělič paprsku. Základní testovací hmotnosti jsou na koncích ramen. Ramena jsou uměle prodloužena rezonančními dutinami, do kterých paprsky vstupují dalšími polopropustnými zrcadly (jde o tzv. Fabryho-Perotovu rezonanční dutinu). Zdroj: LIGO.

K těmto pozorováním se ještě vrátíme. V Japonsku se staví další detektor KAGRA, který bude mít ramena dlouhá tři kilometry, bude pod zemí v lokalitě, kde je dnes slavný detektor neutrin Super-Kamiokande a měl by doplnit tři stávající detektory, což umožní výrazně přesnější lokalizaci polohy zdrojů gravitačních vln. Okamžik uvedení do provozu lze těžko odhadnout, původní plán byl v roce 2018, ale tento termín bude mít pravděpodobně výrazné zpoždění.

LIGO

Detektor LIGO je typický interferometrický detektor. Infračervený paprsek (1 064 nm) generovaný laserem je rozdělen do dvou paprsků,



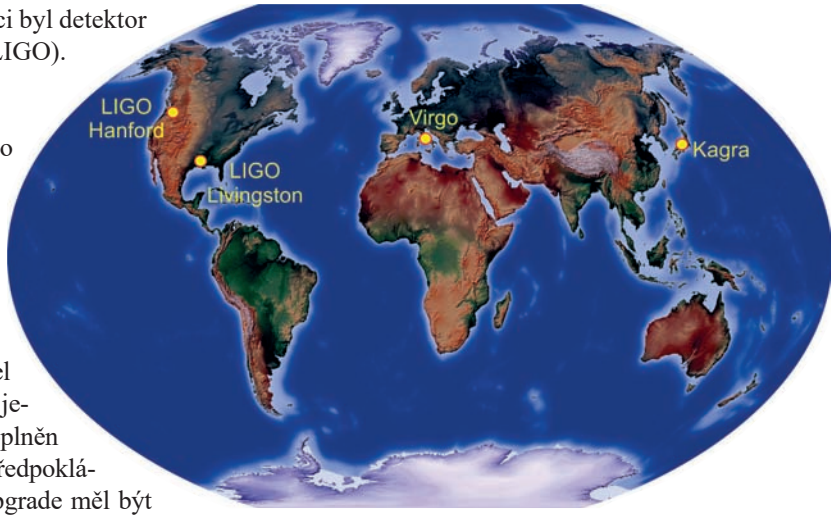
Detektory LIGO a Virgo. V horní řadě jsou záběry z observatoře LIGO: 1. Celkový pohled na přístroj v Hanfordu. 2. Montéři v tubusu u závěsu zrcadla. 3. Instalace pomocné optiky v tubusu. V dolní řadě jsou záběry z observatoře Virgo: 4. Letecký pohled „rybím okem". 5. Jedna ze součástí vakuového systému. 6. Dělič svazku (polopropustné zrcadlo). Není bez zajímavosti, že lasery pracují v infračervené oblasti na vlně 1 064 nm, pro viditelné světlo jsou zrcadla kupodivu docela dobře průhledná. Zdroj: NSF/LIGO/Virgo/Caltech/MIT.

které putují navzájem kolmými vakuovanými rameny k zavěšeným zrcadlům, od nichž se odrazí a v detektoru vytvoří interferenční obrazec. Z něho se dá vyčíst, zda se zrcadla zhoupla na gravitační vlně. Jak už jsme se zmínili, detektory jsou postaveny dva, jeden v Hanfordu (stát Washington, spravuje Caltech), druhý v Livingstonu (stát Lousiana, spravuje MIT). Jejich vzájemná vzdálenost je 3 000 km, což dobře umožňuje hledat koincidence signálu. Kromě dvou základních čtyřkilometrových detektorů existuje v Hanfordu ještě dvoukilometrový testovací detektor. Projekt financuje americká Národní vědecká nadace NSF (bohatší obdoba naší grantové agentury GAČR).

Od roku 2010 do září 2015 proběhla rozsáhlá rekonstrukce detektoru, jejímž hlavním cílem bylo podstatné zvýšení citlivosti přístroje. Komplet byla vyměněna optika, přibylo další zrcadlo, laser zvýšil výkon z 10 W na až 200 W, k razantní změně došlo i v konstrukci testovacích hmotností (zrcadel): průměr se zvýšil z 25 cm na 34 cm a hmotnost z 11 kg na 40 kg. Díky novým zrcadlům se podstatně snížil šum systému. Kompletní výměnu také prodělala čtecí a kontrolní zařízení. Nahrazeno bylo i stínění tlumící zemětřesné projevy s doprovodnou hydraulikou, práh citlivosti na pohyby v zemské kůře poklesl z 40 Hz na 10 Hz. Celkový frekvenční rozsah přístroje se změnil z 40 až 2 000 Hz na 10 až 10 000 Hz. Z optického hlediska jde o Michelsonův interferometr s Fabryho-Perotovou rezonanční dutinou v každém rameni. Po rekonstrukci byl detektor přejmenován na Advanced LIGO (aLIGO).

Caltech – *California Institute of Technology, 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 JPL (Jet Propulsion Laboratory) americké NASA, analyzuje data ze Spizerova vesmírného dalekohledu a spravuje hanfordskou část detektoru gravitačních vln LIGO.*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology, prestižní americká univerzita sídlící v massachusettském Cambridge. Univerzita byla založena Williamem Bartonem Rogersem v roce 1861. Skládá se z pěti škol a jedné koleje. Přestože jde o soukromou univerzitu, je podporována i státem. Spravuje livingstonskou část detektoru LIGO.*



Mapa světa s vyznačenou polohou velkých interferometrických detektorů gravitačních vln. Detektory na čtyřech místech umožní ze zpoždění signálů relativně přesně lokalizovat zdroje gravitačních záblesků. Mapa: Ktrinko.

Virgo

Upgrade evropského detektoru Virgo byl obdobný a započal v roce 2011 (Virgo se pokoušelo o detekci gravitačních vln od roku 2007 do roku 2011). Nový laser má výkon zatím „jen“ 60 wattů, v roce 2018 se počítá s výměnou za laser s výkonem 200 wattů. Hmotnost nových zrcadel stoupla z 21 kg na 42 kg, zvětšil se i jejich průměr. Vakuový systém byl doplněn na koncích ramen o kryolapače, předpokládá se, že se tlak stonásobně sníží. Upgrade měl být

KAGRA – *Kamioka Gravitational Wave Detector, tříkilometrový podzemní interferometrický detektor gravitačních vln, který je budován v Japonsku v blízkosti neutrinového detektoru Super-Kamiokande. Jako první detektor na světě bude mít chlazená koncová zrcadla, což sníží jejich tepelný šum a umožní větší frekvenční rozsah přístroje. Po zprovoznění, které se očekává po roce 2018, doplní stávající detektory LIGO (USA) a Virgo (Itálie), čímž se zvýší přesnost lokalizace zdrojů gravitačních vln. Původní název detektoru byl LSGT (Large Scale Gravitational Wave Telescope).*

dokončen v roce 2015 – tak, aby experimenty mohly započít koordinovaně s observatoří LIGO, ale nakonec se práce neskutečně vlekly a detektor byl zprovozněn až na počátku srpna 2017. Webové stránky projektu měly dlouhodobě značné problémy – nebyly aktualizované a mnohé odkazy nikam nevedly. Po rekonstrukci se stránky poněkud zlepšily, jsou doplňovány informace o detekcích a některé odkazy už vedou i na správná místa. Doufejme, že tento trend bude pokračovat a stránky budou plnohodnotnou vizitkou této špičkové observatoře. Pojmenování Virgo dnes slouží jen pro vlastní gravitační anténu a obdobně jako u detektoru LIGO došlo po rekonstrukci k přejmenování na Advanced Virgo (zkratka AdV). Celá observatoř (tedy nejen samotná anténa) se nazývá EGO (*European Gravitational Observatory*).

Rozsáhlé rekonstrukce detektorů LIGO a Virgo znamenaly podstatné zvýšení šance pro detekci gravitačních vln a všeobecně panující optimizmus, že po rekonstrukci budou konečně gravitační vlny polapeny, se nakonec bohatě vyplnil.



Třikilometrový detektor KAGRA stavěný v Japonsku, v blízkosti neutrinového detektoru Super-Kamiokande, bude mít chlazená zrcadla a doplní detektory LIGO a Virgo. Zdroj: KAGRA.

KAGRA

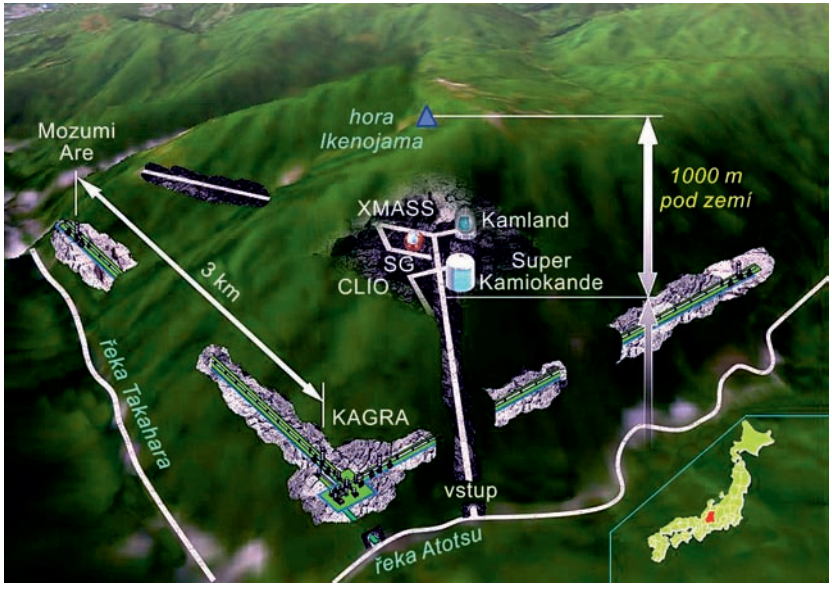
LIGO a Virgo mají v současnosti společné měřící kampaně. Přidává se k nim ještě menší německý detektor GEO-HF s délkou ramen 600 metrů. Jeho citlivost byla ale pro dosud zachycené signály nedostatečná. Z doletu čela vlnoplochy k jednotlivým detektorům se dá přibližně dopočítat směr, ze kterého signál přiletěl. U samotných detektorů LIGO je přesnost zaměření velmi malá. Po spuštění evropského Virgo ze přesnost zaměření zdroje zvýšila dvacetinásobně. V budoucnosti doplní trojici těchto obřích observatoří ještě japonská KAGRA (*KAmioka GRAvitational Wave Detector*). Opět jde o detektor se dvěma kolmými rameny, která budou dlouhá tři kilomet-

ry. Detektor se buduje v podzemním tunelu (ten byl připraven v roce 2013) a jako první detektor tohoto druhu bude mít kryogenní (chladicí) systém. Se zprovozněním se dle plánu počítalo v roce 2018, nicméně stavbu doprovází řada problémů a termíny se neustále posouvají. Detektor využije zkušenosti z 300 metrů dlouhého detektoru TAMA 300, který byl provozován v japonské Mitace (v blízkosti Tokia) od roku 1999 do roku 2008. Detektor KAGRA bude umístěn v blízkosti neutrinového detektoru Super-Kamiokande. V tomto místě je také testován malý kryogenní prototyp CLIO (*Cryogenic Laser Interferometer Observatory*) s rameny dlouhými 100 metrů a zrcadly chlazenými na teplotu 20 kelvinů. Detektor KAGRA se stane čtvrtým velkým detektorem gravitačních vln v pořadí a umožní detekovat gravitační vlny současně na třech kontinentech.

Super-Kamiokande – *japonská neutrinová observatoř z roku 1996 umístěná 1 000 m pod povrchem hory Ikenojama ve starém zinkovém dole poblíž městečka Kamioka. Horniny nad detektorem jsou ekvivalentní 2 700 metrům vodního sloupce. Nádoba detektoru obsahuje 50 000 tun vody, na stěnách je 13 000 fotonásobičů, průměr nádoby je 40 metrů. Detektor detekuje Čerenkovovo záření elektronu nebo mionu vzniklého srážkou elektronového nebo mionového neutrina s neutronem. Z tvaru kužele Čerenkovova záření lze snadno odlišit elektronové a mionové neutrino. V průměru je zachyceno jedno atmosférické neutrino za hodinu a půl. V roce 1998 byl oznámen objev oscilací neutrin. V roce 2001 byl detektor vážně poškozen. Oprava trvala 5 let a stála 25 milionů USD. V blízkosti se staví detektor gravitačních vln KAGRA.*

Zachycené signály

Citlivost detektorů LIGO a Virgo je stále natolik malá, že není možná přímá detekce gravitačních vln generovaných blízkými dvojhvězdami. Přímá detekce gravitačních vln těmito detektory zatím znamená čekání na náhodu: asymetrickou explozi supernovy v naší Galaxii, splynutí černých či neutronových hvězd nebo jiný katastrofický jev. Dne 14. září 2015 zachytily oba detektory LIGO podezřelý signál, jehož důkladná analýza trvala několik měsíců. Signál byl porovnáván s numerickými simulacemi různých zdrojů gravitačních vln. Nakonec bylo zjištěno, že se čekání na náhodu vrchovatě vyplatilo. Byl totiž polapen signál ze splynutí dvou černých děr. Každá z nich měla před splynutím hmotnost přibližně 30 Sluncí (29 Sluncí a 36 Sluncí). Nejistota určení hmotností je ±4 sluneční hmotnosti. Hmotnost nově vzniklé černé díry není pouhým součtem hmotností původních černých děr. Je nižší, pro-

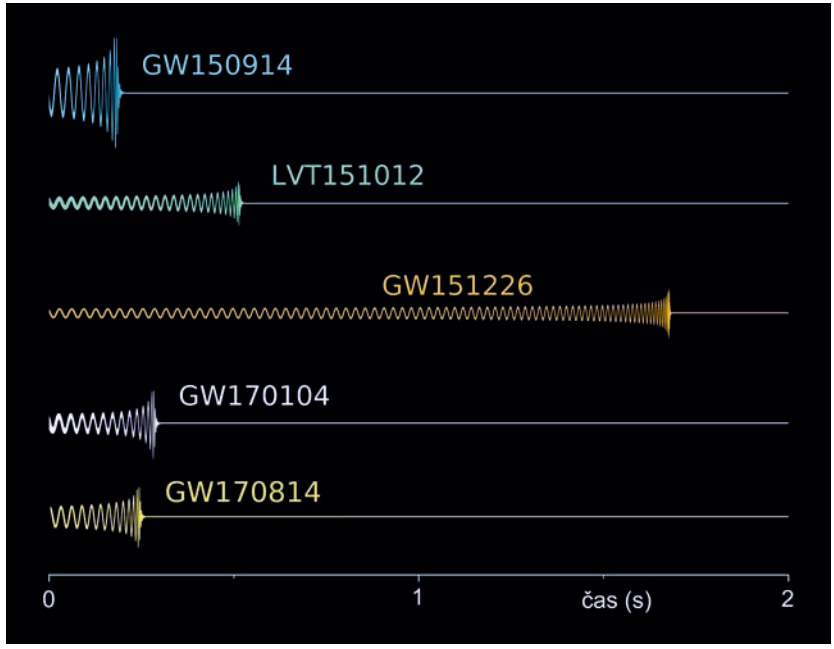


Umístění detektorů XMASS, CLIO a Super Kamiokande pod horou Ikenojama. Zdroj: KAGRA.

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 USD. NSF financuje stavbu a provoz detektorů LIGO.*

tože se na gravitační vlny přeměnila látka o hmotnosti rovné přibližně trojnásobku hmotnosti Slunce. Signál přišel ze vzdálenosti 1,3 miliardy světelných roků, tj. zhruba z oblasti vzdálené desetinu rozměru pozorovatelného vesmíru. Amplituda vlny byla v našem okolí tak malá, že se vzdálenost odpovídající průměru Země změnila zhruba o rozměr protonu. Směrová charakteristika není příliš přesná, existuje jen odhad oblasti, ve které k této mimořádné události došlo. Jde o jižní oblohu ve směru Magellanových oblaků (ta jsou ale samozřejmě mnohem blíže). V období zachycení prvního signálu ještě nebyl provozu evropský detektor Virgo. Ten se do pozorování zapojil až v roce 2017.

První přímá detekce gravitačních vln byla fyzikálním svátkem, byl to dlouho očekávaný okamžik, který doslova otevřel další okno do vesmíru. Dozvěděli jsme se, že je opravdu možné procesy ve vesmíru pozorovat pomocí gravitačních vln. Možná jednou přijde i okamžik, kdy zachytíme reliktní gravitační vlny, posly z období úplného počátku vesmíru, a dozvíme se, jak vznikl vesmír. Objev ale nebyl pouhou detekcí gravitačních vln. Byl také prvním pozorováním splynutí černých děr a ukázal, že naše představy o černých dírách jsou správné. Tyto objekty kolem sebe mohou obíhat. Při každém oběhu ztrácejí energii díky vyzařování gravitačních vln a nakonec splynou v jedno jediné těleso. Fyzika získala nástroj k výzkumu extrémních jevů a dostala se do zcela nové etapy poznávání vesmíru. Je symbolické, že se tak stalo právě sto let po předpovědi existence gravitačních vln.



Pět dosud zachycených záblesků splynutí černých děr. Všechny křivky mají charakteristický průběh: narůstání amplitudy a frekvence, maximum amplitudy a doznívání gravitačního impulzu. Data z impulzu LVT151012 nejsou natolik kvalitní, aby ho bylo možné definitivně označit za skutečnou událost. V označení záblesků je zakódováno datum pozorování: 14. září 2015, 12. října 2015, 26. prosince 2015, 4. ledna 2017 a 14. srpna 2017. Dosud nejdelší impulz z 26. prosince 2015 trval téměř dvě sekundy, ostatní signály trvaly pouze několik desetin sekundy. Na grafu není splynutí neutronových hvězd ze 17. srpna 2017, graf se týká jen černých děr. Zdroj: Caltech.

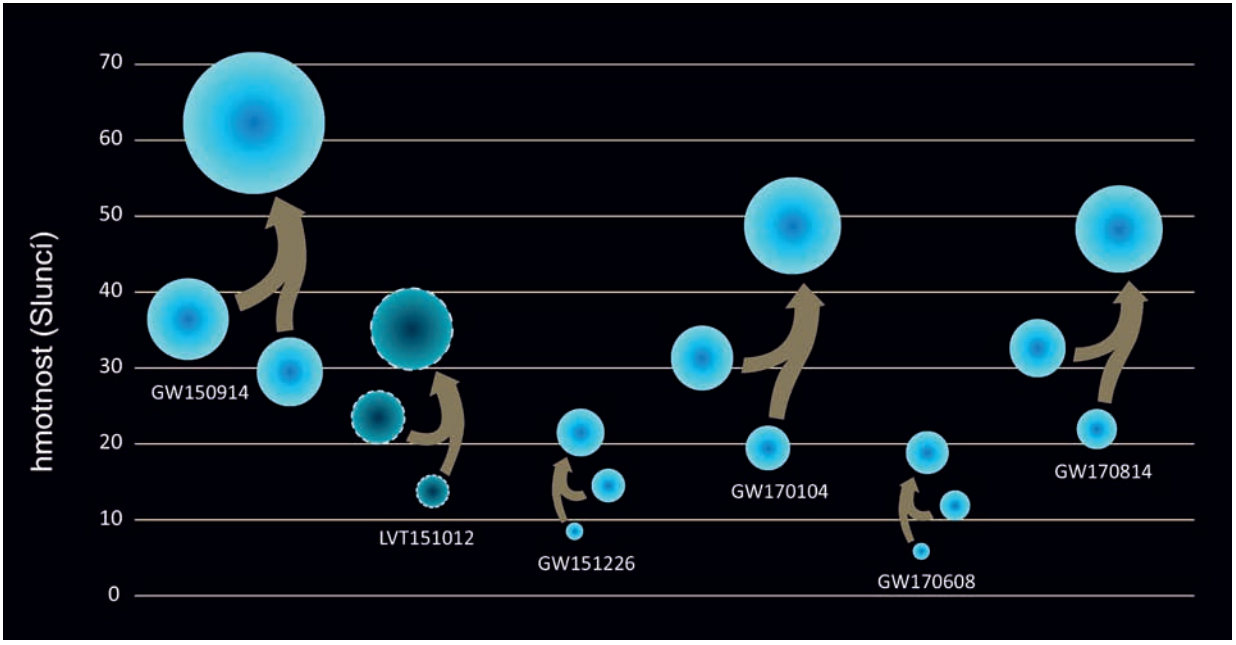
Objev byl ohlášen o pět měsíců později, 11. února 2016 na tiskové konferenci svolané do Washingtonu, D. C. Tenkrát jsme si kladli otázky: Jde o náhodný jev? Měla observatoř LIGO výjimečné štěstí, nebo budou další objevy následovat? V tu chvíli nikdo neznal odpověď. Fascinace z toho, že lidstvo

poprvé spatřilo sloučení dvou černých děr na vlastní oči, byla doprovázena údivem nad tím, že ve vesmíru kromě hvězdných černých děr a galaktických veleděr také existují černé díry středních hmotností několika desítek Sluncí. Dnes je jisté, že nešlo o náhodu. Od spuštění detektoru na podzim v roce 2015 byla bilance detektoru LIGO přímo skvělá: do konce roku 2017 pozoroval pět dalších gravitačních záblesků (s vysokou mírou statistické věrohodnosti) a jeden nepotvrzený (pravděpodobný, ale statisticky málo věrohodný). U dvou posledních záblesků ze srpna 2017 už bylo v provozu i evropské Virgo, které je také úspěšně detekovalo. Žijeme v opravdu převratné době. Sen našich předchůdců o otevření gravitačního okna do vesmíru se stal skutečností a nese první ovoce. A počáteční rozpaky nad existencí černých děr středních hmotností vystřídalo první logické vysvětlení jejich vzniku. Stačí se „jen" dívat. V přímém přenosu vidíme vznik těchto objektů při postupném slučování menších černých děr.

Až do 17. srpna 2017 se veškerá pozorování gravitačních vln týkala spojení dvou černých děr. Není divu, takový signál je mimořádně



Řídicí středisko experimentu LIGO. Zdroj: Aldebaran.



Černé díry známých hmotností. Observatoř LIGO nalezla několik černých děr středních hmotností a zdokumentovala jejich vznik jako důsledek sloučení menších černých děr. Pozorování, v němž jsou hranice objektů čárkované, je statisticky málo průkazné. Další pozorování lze označit za statisticky věrohodná. Zdroj: LIGO/Caltech.



Aldebaran u detektoru LIGO, srpen 2017.

intenzivní a pozorovatelný i z velké vzdálenosti. Detektory LIGO a Virgo ale nepracují v současnosti na své maximální citlivosti. Parametry se postupně dolaďují. Detektory mají největší citlivost v okolí frekvence 200 Hz a zatím všechna pozorování byla právě v této frekvenční oblasti. Při splynutí dvou černých děr jsou detektory LIGO a Virgo schopné zachytit pouze závěrečnou fázi splynutí dvou černých děr, při níž má signál největší intenzitu. Toto závěrečné stadium trvá jen několik desetin sekundy, například první zachycený záblesk trval necelých 0,5 sekundy. Průběh záblesku je zcela charakteristický. Oba objekty ztrácejí vyzařováním gravitačních vln energii, přibližují se k sobě a obíhají stále rychleji. Amplituda gravitačních vln se zvětšuje a jejich frekvence narůstá. Z nárůstu frekvence lze odhadnout hmotnost obíhajících se objektů. Maximum amplitudy gravitačních vln nastává v okamžiku splynutí obou objektů. Výsledný objekt má přibližně kulovou symetrii a taková tělesa gravitační vlny nevyzařují, proto gravitační záblesk končí charakteristickou fází prudkého poklesu amplitudy vln. Toto typické „doznívání“ se označuje anglickým slovem „*ringdown*“. Z průběhu signálu je možné určit uvolněnou gravitační energii a ze skutečně pozorované amplitudy vln potom vzdálenost objektu. Největším problémem je určení polohy zdroje. K tomu se dá částečně využít zpoždění signálu mezi oběma detektory LIGO navzájem a detektorem Virgo, lze zohlednit i orientaci ramen jednotlivých detektorů.

Červeným písmem je ve druhém sloupci zanesen nepotvrzený záblesk. V posledních dvou sloupcích jsou modrým písmem zaneseny záblesky, při nichž již fungovalo evropské Virgo, v posledním sloupci je splynutí dvou neutronových hvězd, které způsobilo jev kilonovy.

TABULKA DOSUD ZACHYCENÝCH GRAVITAČNÍCH ZÁBLESKŮ

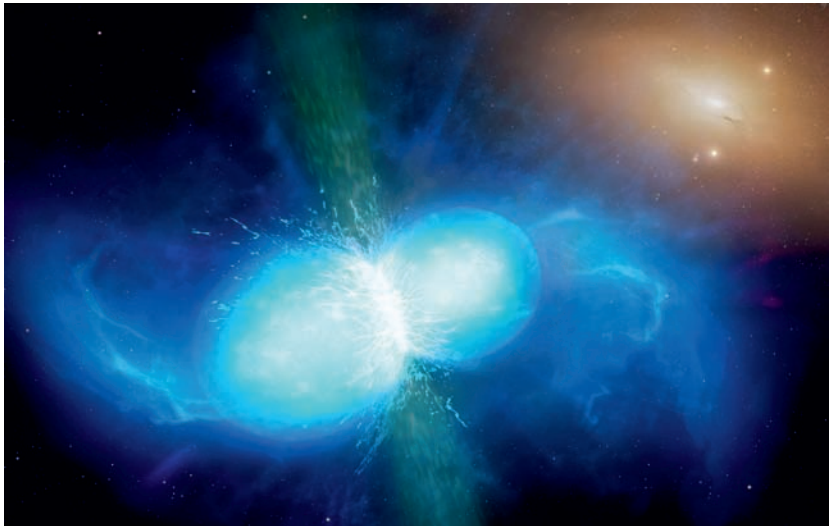
událost	GW150914	LVT151012	GW151226	GW170104	GW170814	GW170817
datum zachycení	14. 9. 1015	12. 10. 2015	26. 12. 2015	4. 1. 2017	14. 8. 2017	17. 8. 2017
hmotnost 1	36 M_S	23 M_S	14 M_S	31 M_S	31 M_S	1,5 M_S
hmotnost 2	29 M_S	13 M_S	8 M_S	19 M_S	25 M_S	1,3 M_S
výsledná hmotnost	62 M_S	35 M_S	21 M_S	49 M_S	53 M_S	< 2,74
výsledná rotace	0,67	0,66	0,74	0,64	0,7	?
vzdálenost	$1{,}3\times10^9$ ly	$3{,}3\times10^9$ ly	$1{,}4\times10^9$ ly	$2{,}9\times10^9$ ly	$1{,}8\times10^9$ ly	130×10^6 ly
červený. posuv	0,09	0,2	0,09	0,18	0,12	–
vyzářená energie	3 M_S	1,5 M_S	1 M_S	2 M_S	2,7 M_S	> 0,025 M_S

Vzhledem k malému počtu dosavadních pozorování je každý z nalezených záblesků něčím pozoruhodný. Záblesk ze 4. ledna 2017 má dvě zajímavosti. Především jde o dosud nejvzdálenější pozorovaný objekt, vzdálenost této dvojice černých děr se odhaduje na téměř tři miliardy světelných roků. Mnohem zvláštnější je ale fakt, že z hmotností objektů a pozorovaného množství uvolněné energie lze učinit závěr, že by alespoň jedna z černých děr mohla mít retrográdní rotaci, tj. rotovala v opačném směru, než obíhala svého souputníka. Pokud je to pravda, je vysoce pravděpodobné, že černé díry nevznikly spolu, ale každá odděleně a teprve později došlo k jejich vzájemnému gravitačnímu záchytu. Takový mechanizmus by mohl vysvětlit postupné narůstání hmotnosti černých děr a možná i vznik veleděr v galaktických jádrech. Proto je toto pozorování z vědeckého hlediska mimořádně zajímavé a jeho další analýzy mohou přinést ještě překvapivé výsledky.

Kilonova – *jev sloučení dvou neutronových hvězd, při němž dojde ke vzniku intenzivních gravitačních vln doprovázených elektromagnetickým zářením ve všech oborech spektra. V gama oboru září rozpadající se radioaktivní jádra velmi těžkých prvků, která vznikají v rázových vlnách. V ostatních oborech světla září odhozená obálka, synchrotronní emise elektronů a plazma zahřáté rekonekcemi magnetického pole. Dosvit v rádiovém oboru může trvat až několik týdnů.*

Kilonova – sloučení dvou neutronových hvězd

První zachycené záblesky pocházely ze splynutí černých děr středních hmotností. Takový děj by neměl být doprovázen vůbec žádným elektromagnetickým signálem. V srpnu se ke dvěma detektorům LIGO připojil i evropský detektor Virgo, což s sebou přineslo podstatné zlepšení při určení polohy, ze které záblesk přišel. Hned při první společné pozorovací kampani v srpnu 2017 (trvala 25 dní) byly zachyceny dva gravitační záblesky. U prvního z nich (14. srpna) šlo opět o sloučení černých děr středních hmotností. Ale druhý zachycený záblesk (17. srpna), to je poněkud jiné kafe. Šlo o sloučení dvou neutronových hvězd, které je doprovázené intenzivním elektromagnetickým zábleskem v oboru gama a následným dosvitem v celém oboru elektromagnetického spektra. Poprvé proto bylo možné identifikovat i viditelný protějšek události a lokalizovat mateřskou galaxii, v níž ke splynutí neutronových hvězd došlo.

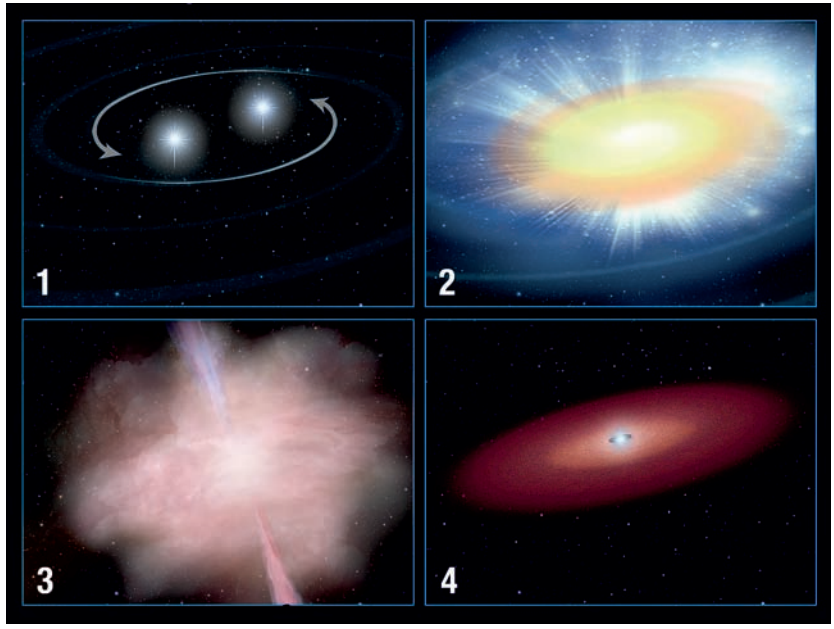


Umělecká vize sloučení dvou neutronových hvězd, které je doprovázeno nejen gravitačním zábleskem, ale i elektromagnetickými projevy od gama oboru až po rádiový obor spektra. Zdroj: University of Warwick/Mark Garlick.

r proces – *proces ve hvězdách, zejména při explozích supernov nebo při splynutí dvou kompaktních objektů, při němž dochází k rychlému záchytu neutronů a vzniku prvků s protonovým číslem vyšším, než má železo, které je nejefektivněji vázaným jádrem. Hojně vznikají i prvky s jádry většími než olovo či vizmut. Písmeno r v názvu procesu vzniklo z anglického „rapid neutron capture" – rychlý záchyt neutronů.*

Hvězdy málokdy bývají o samotě a nejčastější a nejstabilnější formou koexistence malého počtu jedinců jsou dvojhvězdy. Mezi nimi se nezřídka vyskytují dvojice neutronových hvězd. Zpravidla kolem sebe obíhají v malé vzdálenosti a generují gravitační vlny. Tím ztrácejí energii, přibližují se k sobě a frekvence jejich vzájemného oběhu se přitom zvyšuje. Pohybují se po spirále smrti, která končí sloučením obou hvězdných předchůdců buď do neutronové hvězdy, nebo do černé díry. Gravitační vlny jsou nejintenzivnější v okamžiku sloučení obou objektů a poté utichají, neboť sféricky symetrický objekt nemůže gravitační vlny generovat. První scénář samotného sloučení dvou neutronových hvězd navrhl v roce 1998 v Princetonu polský astronom Bohdan Paczyński. Při spojování neutronových hvězd by mělo dojít k překotné tvorbě těžkých prvků s jádry většími než železo. Do vytvořených jader jsou implementovány další neutrony tzv. r procesem (za anglického rapid, což znamená rychlý).

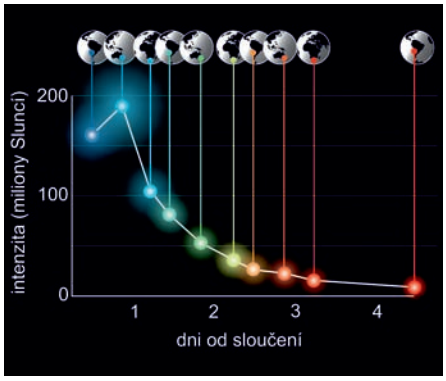
Naprostá většina zlata, platiny a uranu na naší Zemi vznikla kdysi dávno při splynutí neutronových hvězd a při explozích supernov. Velké množství radioaktivního materiálu (nestabilních prvků s velmi hmotnými jádry) se okamžité rozpadá a zahřívá okolní plazma. Vše probíhá velmi rychle a proces sloučení je doprovázen silným záblesk gama. Optické záření je v této fázi blokováno neprůhledným plazmatem. Při sloučení dvou neutronových hvězd by tedy měl být gravitační záblesk následován krátkým gama zábleskem. V další fázi oblast sloučení dvou neutronových hvězd opouští velké množství horkého materiálu bohatého na neutrony, který svítí od infračerveného oboru až po ultrafialové záření. Vyzařovaný výkon je tisíckrát vyšší než u běžných nov, proto se této události začalo říkat *kilonova*. Název poprvé použil Brian Metzger z Princetonu v roce 2010. Al-



Mechanizmus vzniku kilonovy. V první fázi kolem sebe obíhají dvě neutronové hvězdy a ztrácejí energii vyzařováním gravitačních vln. Ve druhé fázi dojde k překotné tvorbě radioaktivních jader s velkou hmotností, jejich rychlému rozpadu a genezi gama záblesku. Ve třetí fázi kilonovu opouští svítící materiál bohatý na neutrony. V poslední fázi v okolí vzniklé černé díry (nebo neutronové hvězdy) zůstává jen relativně málo svítící akreční disk. Zdroj: NASA/ESA/HST.

ternativními názvy pro intenzivní elektromagnetický tok následující po sloučení dvou neutronových hvězd jsou *makronova* nebo *supernova způsobená r procesem*. Kilonova by měla postupně pohasínat, nicméně interakce vyvrženého materiálu s okolním prostředím může být zdrojem dalšího signálu – rádiové a rentgenové elektromagnetické emise.

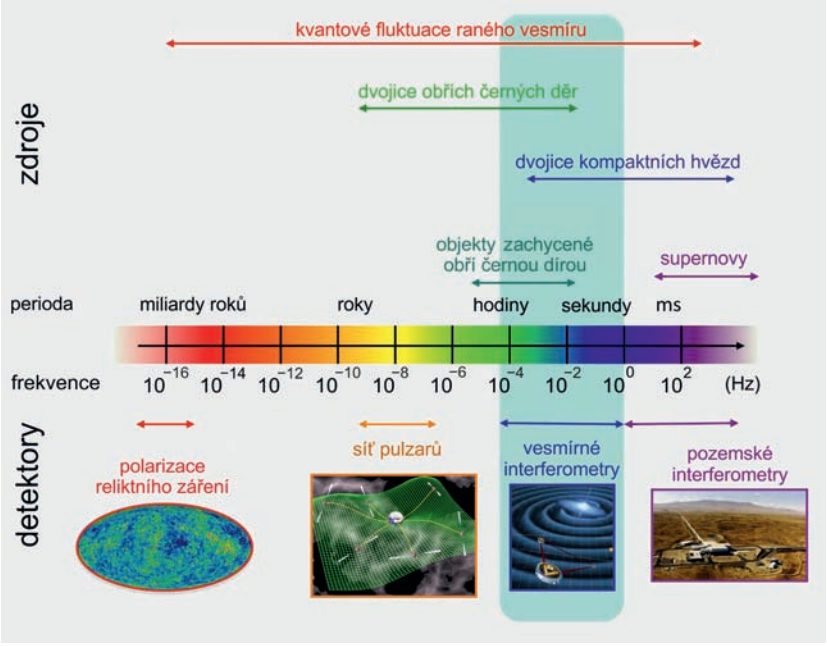
První kandidát na kilonovu byl pozorován dne 3. června 2013. Nejprve zaznamenala rentgenová observatoř Swift záblesk gama trvající necelé dvě sekundy (GRB1306603B). Optický protějšek poté identifikoval Hubblův dalekohled. Vzdálenost objektu byla z červeného kosmologického posuvu odhadnuta na 4 miliardy světelných roků. Podle propočtů vše nasvědčovalo tomu, že šlo o první pozorování kilonovy. Na základě tohoto pozorování američtí astronomové Jennifer Barnes a Daniel Kasen z Kalifornské univerzity v Berkeley zpřesnili mechanizmus vzniku kilonovy. Na průkazný důkaz existence kilonov se ale muselo počkat až do roku 2017, kdy bylo sloučení dvou neutronových hvězd zaznamenáno nejprve za pomoci gravitačních vln, poté byl pozorován gama záblesk a následoval dosvit v nejrůznějších oborech elektromagnetického spektra.

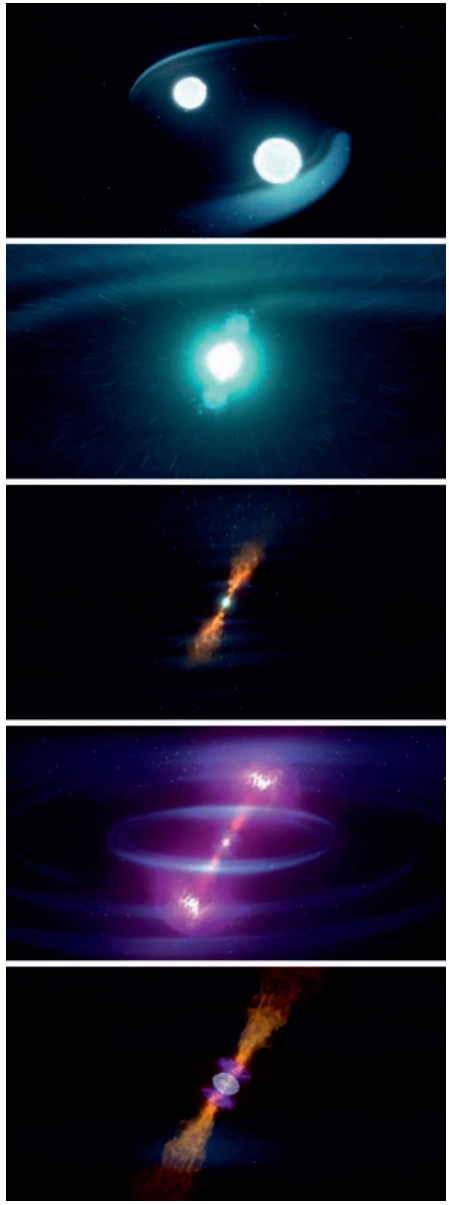


Dosvit první pozorované kilonovy. Barvy korespondují s vlnovou délkou. Zdroj: Las Cumbres Observatory.

Zatím jsme zachytili gravitační vlny v okolí frekvence 200 hertzů. Otevírá se ale před námi celé nové gravitační okno do vesmíru. Zdroj: NASA/GSFC.

Při první společné pozorovací kampani zachytily detektory LIGO a Virgo dne 17. srpna gravitační záblesk GW170817. Analýza záznamu ukázala, že na rozdíl od předchozích gravitačních záblesků způsobených sloučením obíhajících černých děr, jde o první zachycený signál generovaný spojením dvou neutronových hvězd. Následné analýzy ukázaly, že obě složky měly hmotnost někde v intervalu 1,17 až 1,6 Sluncí a výsledný objekt, pravděpodobně černá díra, získal hmotnost 2,74 Sluncí. Při sloučení se v gravitačních vlnách vyzářila energie odpovídající hmotnosti 0,025 Sluncí. Pozorovatelná část záblesku byla dlouhá 100 sekund. Z dat bylo možné odhad-





nout přibližnou vzdálenost na 130 milionů světelných roků. Veškeré parametry se naprosto liší od předchozích detekcí. Gravitační impulz při vzniku kilonovy měl amplitudu gravitační vlny (relativní změna vzdálenosti) 10^{-22}, frekvence signálu začínala na 40 hertzích a postupně se zvyšovala až na 300 hertzů v okamžiku splynutí objektů. V době záblesku byly v provozu 4 detektory gravitačních vln: dva detektory LIGO, detektor Virgo a detektor GEO 600. První tři detektory záblesk zaznamenaly, německý detektor GEO 600 nikoli, záblesk byl pod jeho rozlišovací schopností.

Pouhých 1,7 sekundy po utichnutí gravitačního záblesku zaznamenaly ve stejné oblasti detektory na vesmírných gama observatořích Fermi a INTEGRAL intenzívní gama záblesk, který získal označení GRB170517A. Z naměřených dat bylo jasné, že by mělo jít o unikátní pozorování kilonovy a ihned se rozběhla honba za nalezením optického protějšku záblesku. Jako prvnímu se to podařilo dalekohledu Henrietty Swopeové umístěnému na observatoři Las Campanas v Atacamské poušti v Chile. Optický protějšek byl lokalizován zhruba 11 hodin po sloučení neutronových hvězd a má název AT2017gfo. Následovalo pečlivé pozorování dosvitu zhruba desítkou přístrojů Evropské jižní observatoře a mnoha dalšími přístroji po celém světě. Elektromagnetický signál od infračerveného po ultrafialové záření přicházel z eliptické galaxie NGC 4993 ze souhvězdí Hydry. Vzdálenost galaxie se shoduje s údajem určeným z gravitačního záblesku. Dosvit byl pozorován po řadu dní v nejrůznějších oborech spektra. V průběhu několika dní se maximum vyzařování posouvalo od modré barvy po červenou. Po devíti dnech od události se objevila rentgenová emise (sledovaná rentgenovou observatoří Chandra), a po 16 dnech byla v oblasti detekována rádiová emise (sledovaná například radioteleskopickou sítí VLA). Obě pozdní události pravděpodobně souvisí s interakcí vyvrženého materiálu s okolím. Nepochybně by bylo také zajímavé zachytit neutrina z obdobných událostí. Zatím se to sice nepodařilo, ale kvalifikovaný odhad říká, že největší detektor IceCube má šanci zachytit neutrinový záblesk ze zhruba deseti procent událostí.

Závěr

Zatím detekované signály jsou ve stovkách hertzů do budoucna by bylo dobré mít detektory i na nižších frekvencích a tedy větších vlnových délkách, kde lze očekávat mimořádně zajímavé jevy spojené

s galaktickými černými veleděrami nebo se samotným počátkem vesmíru. Evropská kosmická agentura chce vyslat do vesmíru interferometr eLISA s obřími rameny – půjde o tři sondy vzájemně na sebe svítící lasery ze vzdálenosti několika milionů kilometrů. Start je plánovaný na rok 2034. Za detektor gravitačních vln je ale možné využít celou naši Galaxii. V ní se nachází pulzary tvořící rozlehlou síť velmi kvalitních časových standardů, na jejichž signálu by mohlo být patrné jemné pohupování času způsobené průchodem gravitační vlny. Není ani vyloučeno, že se jednou podaří najít specifický otisk reliktních gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. V takovém případě by za detektor gravitačních vln posloužil celý viditelný vesmír. Pozorování záblesků gravitačních vln se pomalu stává rutinní astronomickou činností a gravitační astrofyzika se rodí přímo před našima očima.

■ **Petr Kulhánek, 16. 1. 2018, AB 41, 42/2015, 6/2016, 20, 22, 36/2017. Aktualizováno z více bulletinů.**



← ↑ *Fáze vzniku kilonovy Zdroj: NASA.*



III. KOSMOLOGIE

Milníky kosmologie

Hubblova konstanta – *koeficient úměrnosti mezi rychlostí vzdalování a vzdáleností objektů při expanzi vesmíru. Dnes se hodnota Hubblovy konstanty odhaduje na 68 km/s na megaparsek.*
Hubblův čas – *převrácená hodnota Hubblovy konstanty, dává hrubý odhad stáří vesmíru za předpokladu expanze úměrné času.*
Kosmologická konstanta – *člen v Einsteinových rovnicích obecné relativity, který je úměrný metrickému tenzoru. Albert Einstein ho zavedl v roce 1917. Jeho účelem bylo, aby rovnice poskytovaly stacionární řešení. Po objevu expanze vesmíru v roce 1929 se tento člen jevil jako zbytečný. Moderní kosmologie o něm opět uvažuje v souvislosti s popisem zrychlené expanze vesmíru.*
Horizont vesmíru – *efekt způsobený zpožděním signálu. Nejdále dohlédneme do oblasti, z níž k nám doletělo světlo od doby vzniku vesmíru. Vzdálenější oblasti jsou pro nás za horizontem a nevidíme je.*

Flammarionova rytina s dobovou představou o uspořádání světa. Kolorováno v pozdější době.



Kosmologie je odvětví astronomie, které se zabývá vesmírem jako celkem – jeho uspořádáním, elegancí, řádem, minulostí a budoucností. Pojmenování kosmologie pochází z řeckého slova *kosmos*, které znamená řád či krásu. Čtenář ho bude znát ze slova „kosmetika“, které má stejný slovní základ. Současný kosmologický model se opírá o teorii velkého třesku – horkého hustého počátku, o němž toho zatím příliš nevíme. Vesmír se do současné podoby vyvíjel 14 miliard roků, atomární látka v něm nyní zaujímá zhruba 5 procent, 26 procent tvoří chladná temná hmota a 69 procent temná energie – mysteriózní složka zodpovědná za pozorované rozfukování vesmíru. Zatím nejchatrnější jsou naše znalosti o temné energii a stále není vyloučeno, že jen nerozumíme gravitačním projevům na velkých vzdálenostech.

Samozřejmě, že k nejzajímavějším okamžikům patří samotný počátek spolu s následujícími 400 tisíci léty, kdy byl vesmír v plazmatickém skupenství a nacházely se v něm volné elektrony intenzivně interagující s elektromagnetickým zářením. Právě tomuto období dnes říkáme velký třesk. Prostředí velkého třesku je neprůhledné pro elektromagnetické záření, a tak se dovnitř, do kuchyně velkého třesku, můžeme přímo podívat jen prostřednictvím reliktních neutrin, která se oddělila od látky v jedné sekundě, nebo díky reliktním gravitačním vlnám, které by měly rozvlnit prostor a čas při samotném vzniku vesmíru. Vesmírnou pralátku jsme schopni také připravit uměle na největších urychlovačích světa a zkoumat ji takříkajíc doma, v našich laboratořích. Současné technické prostředky naší civilizace nám připravily hned několik možností, jak zkoumat velký třesk. Věnujme se nyní chronologicky základním zvratům v moderní kosmologii, která v první polovině dvacátého století postupně nahradila zažitou představu o stálém a neměnném světě, jehož jedinou součástí je naše Galaxie – Mléčná dráha.

Expanze vesmíru

1912 – červený posuv. Americký astronom Vesto Slipher objevuje na Lowellově observatoři ve Flagstaffu (o mnoho let později zde byl jiným dalekohledem objeven Pluto) červený posuv spektrálních čar mlhovin. V té době byly mlhavé obláčky na obloze většinou považovány za mlhoviny v naší Mléčné dráze a jen několik osvícených astronomů

tušilo, že by mohlo jít o hvězdné ostrovy za hranicemi naší Galaxie. Interpretace červeného posuvu byla proto nejasná a nebyla dávána do souvislosti s expanzí vesmíru. Slipher objevil červený posuv Clarkovým refraktorem, fascinujícím čočkovým dalekohledem z roku 1895 o průměru 61 centimetrů a ohniskové vzdálenosti téměř 10 metrů.

1915 – obecná relativita. Na podzim roku 1915 představuje Albert Einstein na přednášce před Pruskou akademií věd svou zbrusu novou teorii gravitace – obecnou relativitu. Gravitační působení chápe jako zakřivení časoprostoru, proto se nové teorii někdy říká geometrická teorie gravitace. Obecná relativita předpovídá jevy, které jsou pro newtonovskou fyziku obtížně uchopitelné: černé díry, gravitační čočky, strhávání časoprostoru rotujícím tělesem, gravitační vlny, nestacionární vesmír a celou řadu dalších úkazů.

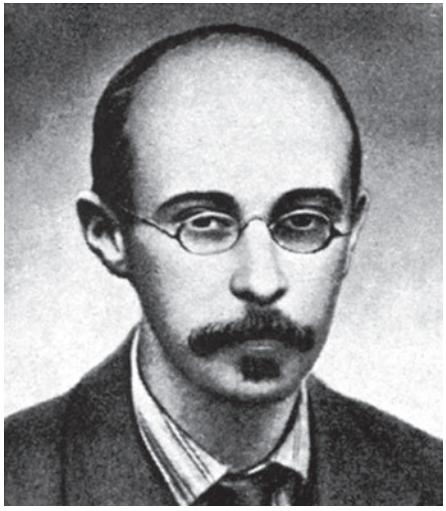
1917 – kosmologický člen. Albert Einstein si byl dobře vědom toho, že jeho nové rovnice pro gravitaci neumožňují statický vesmír. Gravitační interakce přitahuje objekty k sobě a statický vesmír vyplněný látkou by se záhy začal hroutit a smršťovat. V oné době byla představa statického vesmíru natolik vžitá, že Albert Einstein do rovnic zabudoval nový, tzv. kosmologický člen, který měl repulzívní účinky a který se stal protiváhou přitažlivé gravitaci. V témže roce je na západním pobřeží USA transportováno na horu Mt. Wilson 2,5 metru veliké zrcadlo pro nový Hookerův dalekohled. Právě tímto přístrojem budou objeveny expanze vesmíru a temná hmota. A do třetice: v roce 1917 dává ve východní části světa Vladimír Iljič pokyn k výstřelu z Aurory – výstřelu, který změní naše nazírání na svět srovnatelnou měrou jako čerstvě odlité zrcadlo Hookerova dalekohledu.

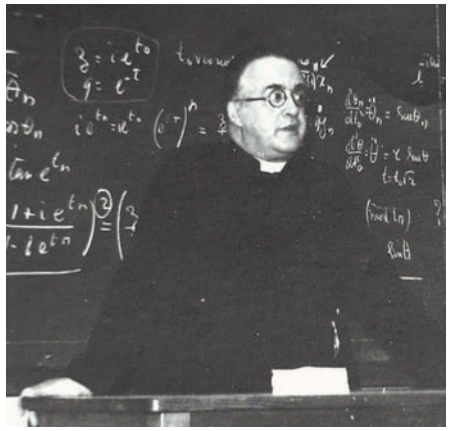
1922 – Fridmanovy modely vesmíru. Ruský meteorolog a matematik Alexandr Fridman provedl analýzu rovnováhy mezi gravitačním přitahováním a repulzí danou kosmologickým členem v Einsteinových rovnicích a zjistil, že nastolená rovnováha je nestabilní. Jakákoli náhodná fluktuace způsobí buď expanzi vesmíru, nebo jeho kolaps. Fridman také ukázal, že pro budoucí vývoj vesmíru je rozhodující jeho hustota. Pro hustotu vyšší než kritickou zvítězí přitahování a vesmír začne kolabovat. Pro nižší hustotu bude vesmír expandovat jednou provždy, a to i bez kosmologického členu. Expanze bude ovšem potřebovat nějaký počáteční impulz, podobně jako vyhození míčku, a bude vždy brzděná (vyhozený míček se také od nás může stále vzdalovat a jeho rychlost bude přitom neustále pomalu klesat).



Albert Einstein, tvůrce nové teorie gravitace, obecné relativity. Bez ní by současná kosmologie byla nemyslitelná.

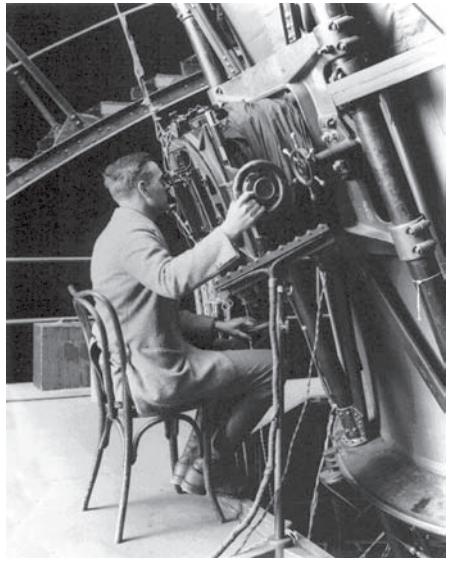
Alexnadr Fridman, autor prvního hlubšího rozboru kosmologických modelů založených na obecné relativitě.





Belgický kněz abbé Georges Lemaître uvažoval o expanzi vesmíru a jeho horkém původu už před Hubblem.

Edwin Hubble pozoruje Hookerovým dalekohledem. Tento přístroj umožnil objev expanze vesmíru.



1923 – Mléčná dráha není sama. Edwin Hubble, ředitel observatoře na Mt. Wilsonu (byl jím od roku 1919 do své smrti v roce 1953) novým Hookerovým dalekohledem zjišťuje, že Velká mlhovina v Andromedě obsahuje hvězdy a že není žádnou mlhovinou, ale vzdálenou galaxií. První z hřebíčků do rakve dřívějších názorů na vesmír byl právě zatlučen. Představa Mléčné dráhy jako jediné galaxie ve vesmíru se hroutí a Hubble v dalších letech objevuje celou řadu galaxií, u nichž pečivě studuje posuvy čar v jejich spektru.

1928 – prvotní atom. Belgický kněz abbé Georges Lemaître vážně uvažuje o možné expanzi vesmíru a ze Slipherových dat dokonce odhaduje rychlost této expanze, tedy hodnotu tzv. Hubblovy konstanty, kterou zavede Edwin Hubble až o rok později. Lemaître své výpočty publikoval v belgickém časopise, který kosmologická komunita nečetla, a tak se o jeho úvahách astronomická veřejnost nedozvěděla včas. Lemaître si byl vědom, že expanze znamená horký a hustý počátek vesmíru a zavádí pro tento stav pojem tzv. *prvotního atomu*.

1929 – expanze vesmíru. Edwin Hubble doplňuje Slipherova měření řadou vlastních měření, zjišťuje, že červený posuv spektrálních čar galaxií je úměrný jejich vzdálenosti (tzv. Hubblův zákon), což znamená, že vesmír expanduje, a to tak, že expanze probíhá současně ve všech jeho místech. Albert Einstein prohlašuje, že zavedení kosmologického členu do jeho rovnic je nadbytečné a že šlo o největší omyl jeho života. Vesmír není statický, jak si generace fyziků před Hubblem myslely.

1979 – inflace. Americký kosmolog Alan Guth uvažuje o velmi krátké fázi prudké expanze v prvních okamžicích vzniku vesmíru. Této fázi se říká inflace a mohla by vyřešit některé problémy našeho popisu raného vesmíru. Inflační model doznal v průběhu dalších desetiletí mnoha změn. Příčinou inflace by mohlo být oddělování interakcí nebo nějaké specifické kvantové pole. Důsledkem inflace by měl být plochý vesmír, který je ve všech směrech na velkých škálách stejný. Při inflaci by měly hojně vznikat gravitační vlny.

Reliktní záření

1948 – první výpočty. George Gamow spolu s Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem počítají chování počátečního horkého a hustého vesmíru. Na základě tehdejších znalostí jaderné fyziky navrhují první model tvorby lehkých jader a předpovídají, že na konci plazmatické fáze ochladne vesmír natolik, že se volné elektrony stanou součástí

atomárních obalů a vesmír bude od této chvíle pro elektromagnetické záření průhledný. Světlo se oddělí od látky a bude bloudit vesmírem až do dnešní doby, kdy se jeho vlnová délka protáhne až do oboru mikrovln. Dnes tento svit z konce velkého třesku nazýváme reliktní záření.

1965 – objev záření pozadí. V roce 1963 ukončily *Bellovy telefonní laboratoře* projekt testování první telekomunikační družice Echo (nafouklé pokovené koule, která pasivně odrážela mikrovlnný signál). S nálevkovitou anténou, která po experimentu zbyla, chtěli Arno Penzias a Robert Wilson, zaměstnanci Bellových laboratoří, vytvořit mapu oblohy na vlně 7,3 centimetru. Už při prvních testech antény je zarazil dosti velký šum, který přicházel ze všech směrů. Po mnoha nejrůznějších úvahách se ukázalo, že by snad mohlo jít o šum z konce velkého třesku, tedy o reliktní záření. K definitivnímu závěru bylo ale zapotřebí proměřit spektrální charakteristiku tohoto „šumu" z oběžné dráhy.

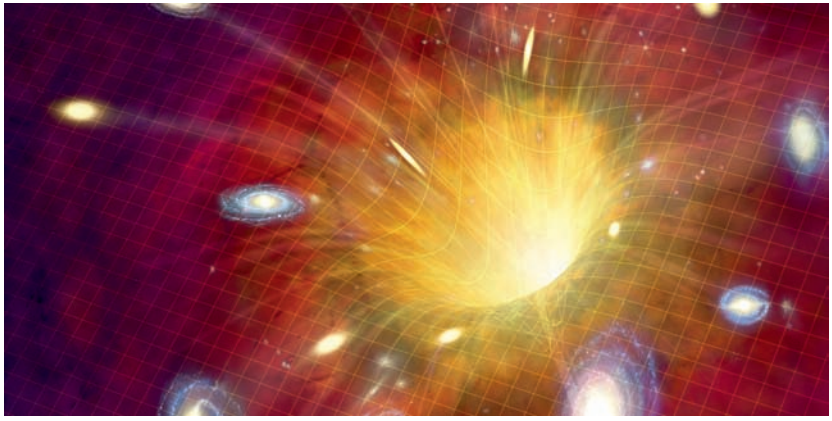
1989 – COBE. V roce 1989 startovala americká družice COBE (*Cosmic Backgroud Explorer*), která zjistila, že Penziasem a Wilsonem objevený šum má teplotu 2,73 kelvinu a závislost jeho intenzity na vlnové délce odpovídá záření absolutně černého tělesa, což je rozhodující charakteristikou reliktního záření. V roce 1992 tato družice objevila fluktuace v reliktním záření (v různých směrech se jeho teplota mírně liší). Detailní analýzu fluktuací ale nebylo možné provést, protože úhlové rozlišení COBE bylo pouhých sedm stupňů.

2001 – MAP. Následující americká sonda pro výzkum reliktního záření, s názvem MAP (*Microwave Anisotropy Probe*), startovala v roce 2001. Tentokrát nešlo o družici obíhající Zemi, ale o sondu umístěnou 1,5 milionu kilometrů za Zemí, v tzv. Lagrangeově bodě L2. Sonda měla úhlové rozlišení 0,3°, což umožnilo detailní analýzu zastoupení fluktuací různé velikosti. Ta byla ukončena v roce 2003 a plynulo z ní stáří vesmíru a procentuální zastoupení atomární látky, temné hmoty a temné energie. Poprvé jsme se dozvěděli, že vesmír je starý zhruba 14 miliard roků. Sonda také datovala (z polarizace reliktního záření) období

Reliktní záření – *záření, které se od látky oddělilo na konci velkého třesku, přibližně 400 000 let po vzniku vesmíru, v době, kdy se vytvářely atomární obaly prvků a končilo plazmatické období vesmíru. Dnes má teplotu 2,73 K a vlnovou délku v milimetrové oblasti. Je jedním ze základních zdrojů informací pro naše poznání raného vesmíru.*

Reliktní neutrina – *neutrina, která se oddělila od látky zhruba v jedné sekundě po vzniku světa. Jejich teplota by dnes měla být přibližně 2 kelviny. Reliktní neutrina zatím nedokážeme našimi přístroji zachytit, neboť mají příliš nízkou energii. V budoucnu budou reliktní neutrina cenným zdrojem informací o průběhu velkého třesku.*

Reliktní gravitační vlny – *gravitační vlny, které měly vznikat při prudkém zvětšení počátečních kvantových fluktuací v průběhu inflační fáze. Existenci reliktních gravitačních vln (jiného spektra) předpovídají ale i další modely vzniku vesmíru. Jejich případná detekce pomůže některé modely vzniku světa spolehlivě vyloučit.*



Umělecká vize vzniku vesmíru. Zdroj: Huffington Post.

Chladná temná hmota (CDM) – *Cold Dark Matter. Chladná temná hmota je složka temné hmoty, která difunduje do menších vzdáleností, než jsou rozměry zárodečných fluktuací galaxií. Jde tak o jedinou složku temné hmoty, která je schopná tvořit makroskopické struktury. Předpokládá se, že většina temné hmoty je právě chladná temná hmota.*

Horká temná hmota (HDM) – *Hot Dark Matter. Horká temná hmota je tvořena částicemi s vysokou rychlostí, které se za dobu existence vesmíru dostaly do vzdálenosti srovnatelné s rozměry viditelného vesmíru. Tato složka zárodečné fluktuace rozmělňuje. Jelikož se tyto fluktuace vyvinuly v dnes pozorovatelné struktury, musí horká temná hmota tvořit jen zanedbatelnou část temné hmoty. K této složce patří například neutrina.*

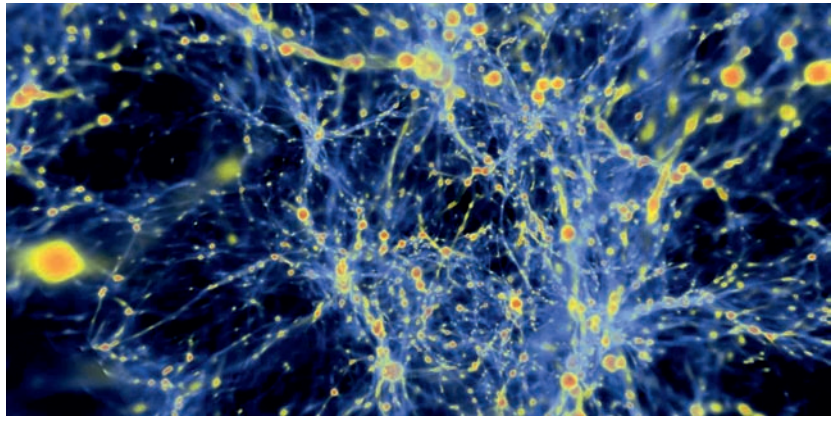
vzniku prvních hvězd, i když zatím jen nepřesně (400 milionů roků, dnes udávaná hodnota je 550 milionů roků). V roce 2003 byla sonda přejmenována po šéfovi projektu na WMAP (*Wilkinson MAP*).

2009 – Planck. V roce 2009 startovala evropská sonda Planck, zatím nejlepší sonda pro výzkum reliktního záření. Teplotní rozlišení měla 1 mikrokelvin a úhlové rozlišení 5 obloukových minut. Sonda pořídila nejpřesnější mapu reliktního záření a podrobné měření jeho polarizace. Zpřesnila měření většiny kosmologických parametrů, objevila řadu velmi vzdálených galaktických kup a provedla dosud nejpreciznější frekvenční analýzu fluktuací reliktního záření.

Temná hmota a temná energie

1933 – kupy galaxií. V roce 1933 už jsou známy nejen galaxie, ale i kupy galaxií. Švýcarsko-americký fyzik Fritz Zwicky sleduje na Mt. Wilsonu pohyby jednotlivých členů kupy galaxií ve Vlasech Bereniky a zjišťuje, že množství jejich pohybu neodpovídá gravitačním účinkům viditelné látky. Dochází k závěru, že v kupě musí být mnohem více hmoty, než je pozorovatelné našimi přístroji. V té době předpokládá, že jde o nesvítící atomární látku. Až později se ukázalo, že jde o exotické elementární částice, které nebyly objeveny dodnes. S okolní látkou interagují gravitačně a nejspíše i slabou interakcí. Neinteragují ale ani elektromagneticky, ani slabě, proto je tato látka průhledná.

1968 – spirální galaxie. V roce 1968 pozoruje stejný jev americká astronomka Vera Rubinová ve spirálních galaxiích. Látka na periferii (jak hvězdy, tak oblaka plynu) obíhá galaxie s vyšší rychlostí, než odpovídá gravitačnímu zákonu. Důsledek je stejný – přítomnost neviditelné látky. Další vývoj vede k zakládání mnoha podzemních laboratoří, které se snaží tajemné částice polapit. První nenulový signál má detektor DAMA (*DArk MAtter*) v italské laboratoři Gran Sasso (od roku 1996), po roce 2000 se přidávají další detektory.

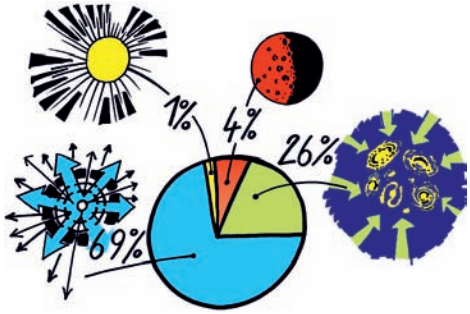


Numerická simulace pavučinové sítě vláken temné hmoty (modře) a galaxií a látky atomární povahy (žlutě). Zdroj: Argonne National Laboratory.

1998 – temná energie. Několik vědeckých skupin se snaží zjistit,

jakou měrou je expanze vesmíru brzděná. Poprvé je k dispozici rozumné měření vzdálenosti galaxií za pomoci supernov typu Ia, které při své explozi uvolní zhruba stejné množství energie a z jejich jasnosti lze pak odhadnout vzdálenost mateřské galaxie. Pokud se podaří pořídit spektrum této galaxie, je vyhráno – máme údaje o vzdálenosti i o rychlosti vzdalování. Na konci roku 1998 zjistily dvě skupiny (jedna vedená Adamem Riessem v Baltimoru a druhá Saulem Perlmutterem v Berkeley), že expanze není brzděná, ale naopak zrychlená, což vede ke vzkříšení Einsteinova kosmologického členu. Tato šokující zpráva obletěla svět, neboť to znamenalo, že za expanzi není odpovědná gravitace (ta expanzi vždy brzdí) ale jakási nová entita, která dostala pracovní název *temná energie*. Později se obdobné závěry učinily na základě sledování fluktuací reliktního záření a ukázalo se, že existence temné energie plyne i z pozorování velkorozměrových struktur. Situace s temnou energií je dodnes nejasná. Za expanzi vesmíru by mohly být odpovědné kvantové fluktuace vakua, nová síla či kvantové pole nazývané *kvintesence*, nebo o zrychlenou expanzi nejde, a jen nerozumíme gravitačnímu působení na velkých vzdálenostech. Všechny tři varianty jsou stále ve hře.

2000 – mapy a simulace. Z gravitačního působení na světlo se daří rekonstruovat rozložení temné hmoty, nacházet vlákna mezi kupami galaxií a pořizovat mapy temné hmoty. Ukazuje se, že temná hmota tvoří ve vesmíru síť vláken a stěn, v jejichž křížení se nacházejí ostrovy atomární látky, kterým říkáme galaxie. Vše doplňují podrobné numerické simulace prováděné na největších superpočítačích na světě. Vesmírná mozaika nabývá neostrých obrysů a dává tušit, že řešení otázky původu temné hmoty je snad nablízku.



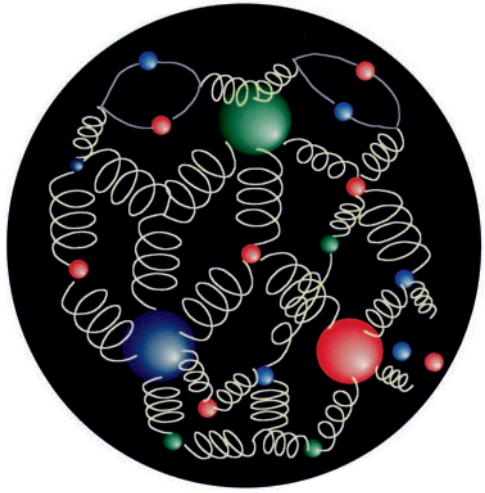
Z celkové hmoty a energie ve vesmíru tvoří 1 % atomární svítící látka, 4 % atomární nesvítící látka, 26 % temná hmota a 69 % temná energie. Kresba: Ivan Havlíček.

Kvarkové gluonové plazma (QGP)

1994 – CERN. V urychlovačovém komplexu CERN je odstartován program, jehož cílem je vytvořit při srážce těžkých jader olova pralátku, která byla ve vesmíru přítomna v čase kolem jedné mikrosekundy. Jde o tzv. kvarkové-gluonové plazma, z něhož se ve vesmíru v čase kolem deseti mikrosekund tvořily první protony a neutrony. Úloha to nebyla nikterak jednoduchá a experimenty trvaly dlouhých šest let, než se v roce 2000 poprvé podařilo vesmírnou pralátku připravit.

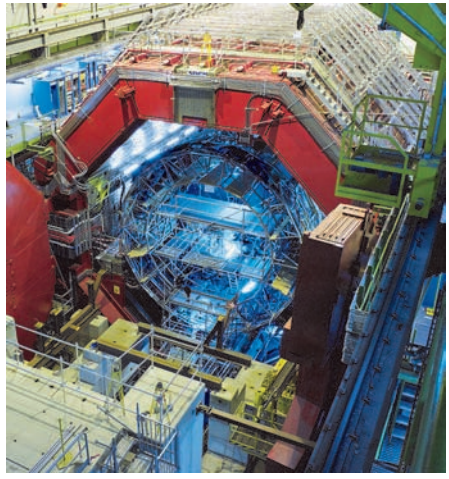
2000 – příprava QGP. V roce 2000 bylo na urychlovači SPS (*Super Proton Synchrotron*) poprvé kvarkové-gluonové plazma na kratičký

Uvnitř protonu. Větší barevné kuličky představují kvarky, menší gluonové pojivo. Zakreslené šroubovice jsou linie v tzv. Feynmanových diagramech. Zdroj: Wikipedia.



Kosmologický posuv – *posuv spektrálních čar k červenému konci spektra způsobený expanzí vesmíru. Při rozpínání dochází nejen ke vzájemnému vzdalování galaxií, ale i k prodlužování 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* λ_0 *je vlnová délka spektrální čáry v okamžiku vyslání paprsku,* λ *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 (Hubblově konstantě, křivosti, procentuálním zastoupení temné energie atd.) a není jednoduché z naměřeného kosmologického posuvu vzdálenost přesně určit.*

ALICE, detektor na urychlovači LHC, kde se dnes připravuje při vstřícných srážkách jader olova kvarkové-gluonové plazma, pralátka existující ve vesmíru do přibližně deseti mikrosekund. Zdroj: CERN.



okamžik připraveno (10^{-22} sekundy). Experimentům se začalo říkat „malý třesk“. Vzhledem k tomu, že v CERN začínala stavba největšího urychlovače světa LHC (*Large Hadron Collideru*), probíhaly další experimenty ve Spojených státech na urychlovači RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) na Long Island v blízkosti New Yorku. Urychlovač patří Brookhavenské národní laboratoři a bylo na něm provedeno nejvíce experimentů s kvarkovým gluonovým plazmatem vůbec.

2009 – ALICE. Do Evropy se experimenty vrátily v roce 2009. „Malý třesk“ se uskutečňuje na detektoru ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) urychlovače LHC. Experimenty se provádějí vždy ke konci roku, při srážce dvou jader olova se interakční oblast zahřeje na teplotu o šest řádů vyšší, než je v nitru Slunce. Obdobné experimenty ve Spojených státech využívají jádra zlata. U obou experimentů jde o vstřícné svazky, na rozdíl od roku 2000, kdy byla urychlená jádra olova nastřelována na statický terčík.

A co dál?

V posledních dvou letech se razantně zlepšila naše znalost velkorozměrových struktur a poprvé jsou mapována i rychlostní pole obřích galaktických kup. Vesmír se ze statického systému mění před našima očima v dynamický rej plný pohybu na největších škálách. Je to ale jen jedna strana mince. Dokud nebudeme vědět, co je temná energie, sotva můžeme předvídat chování těchto struktur v budoucnosti a další osud našeho vesmíru.

Obraťme pohled naopak do minulosti. Naše představy o vzniku světa jsou stále nejasné. Na největších urychlovačích světa dokážeme připravit látku ve stavu, která odpovídá látce ve vesmíru v čase 10^{-13} sekundy (desetinu biliontiny sekundy). Do tohoto času jsme naše představy schopni ověřovat a korigovat. V časech kratších jde spíše o snění, jak by mohl vesmír dle našich představ vypadat. Snad se nám jednou podaří zachytit reliktní gravitační vlny, což by napomohlo vyloučit ty modely vzniku světa, které nejsou ve shodě s pozorováním. Jedině další experimenty ukáží, nakolik se naše představy o raném vesmíru shodují s realitou.

■ **Petr Kulhánek, 5. 3. 2018, AB 7/2018**

Kde se vzaly černé veledíry v raném vesmíru?

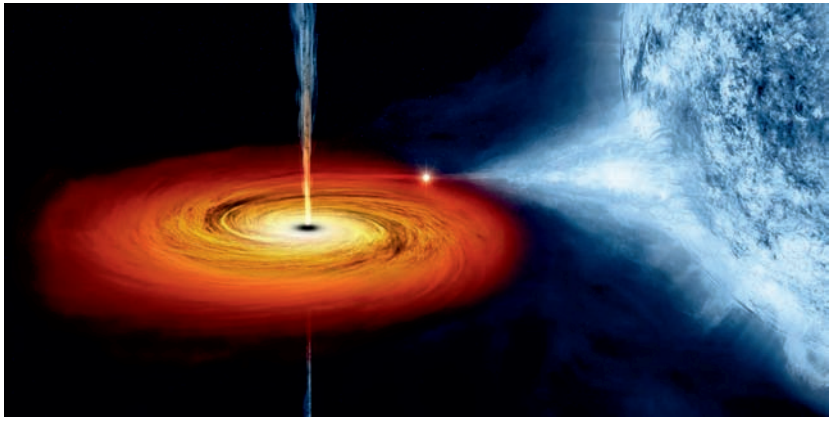
Existence černých děr je v dnešním vesmíru prokázána v téměř nesčetném množství případů. Černé díry jsou mj. známy coby průvodci viditelných hvězd v binárních soustavách. Takové černé díry se prozrazují nejen svým gravitačním vlivem na pohyb viditelného souputníka, ale často také nasávají jeho látku a při akreci se v bezprostředním okolí uvolňuje extrémní množství energie. V tomto měřítku jde o tzv. hvězdné černé díry, které nejspíše vznikly v závěrečném stádiu hvězdného života, pokud měla původní hvězda více než deset slunečních hmotností. Známe ale i černé díry, které sídlí v srdcích velkých hvězdných soustav, jimiž jsou obří kulové hvězdokupy nebo i velké galaxie. Takové galaktické veledíry jsou hmotností srovnatelné s miliony až miliardami Sluncí. Není jasné, zda vůbec existuje nějaká horní hranice jejich velikosti. Dnes je nejhmotnější známou galaktickou veledírou blazar S5 0014+81 v aktivním galaktickém jádru v souhvězdí Kefea poblíž severního nebeského pólu. Blazar S5 0014+81 by měl mít 40 miliard slunečních hmotností a je tedy ještě šestkrát hmotnější než veledíra v jádru galaxie M 87, jež je centrem galaktické kupy v Panně. Černá veledíra v jádru naší Mléčné dráhy má „jen“ čtyři miliony Sluncí.

Blazar – *nejenergetičtější skupina galaxií s kompaktním aktivním jádrem. Buď jde o rychle proměnné kvazary OVV (Optically Violently Variable) nebo o proměnné galaxie typu BL Lacertae.*

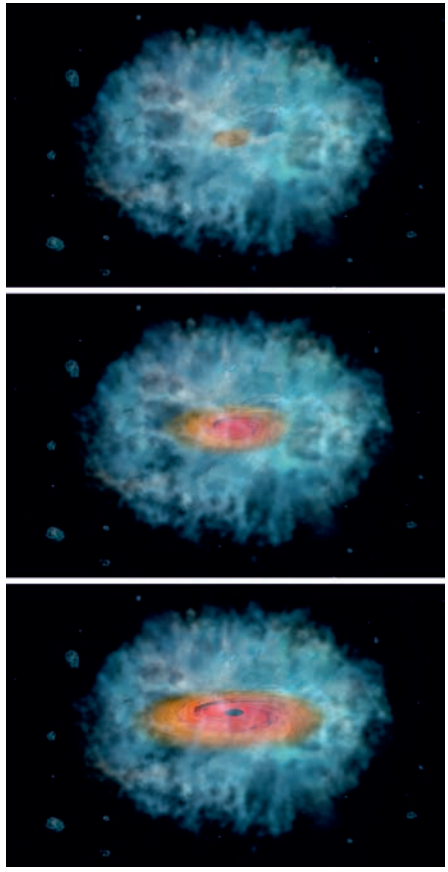
GOODS – *Great Observatories Origins Deep Survey, program zaměřený na sledování vývoje velmi starých objektů. Vedlejším produktem je řada pozorování supernov SN Ia. Do projektu jsou zapojeny 4 vynikající vesmírné dalekohledy: HST (vizuální obor), SST (IR obor), Chandra (RTG obor) a XMM Newton (RTG obor). K pozorování byly vybrány dvě malé oblasti (20×16 obloukových minut) oblohy: na severní obloze ve Velké Medvědici a na jižní obloze v souhvězdí Pece.*

Počátky galaxií

Obrovské galaktické černé díry neustále rostou. Vtáhnou do sebe všechno, co se dostane do jejich blízkosti. Galaktická jádra jsou oblasti velmi bohaté na galaktický plyn, prach a je zde také vysoká koncentrace hvězd. Galaxie čítají stovky až tisíce miliard hvězd a poměrně velká část jejich svítící látky je vždy soustředěna poblíž jádra soustavy. Na podrobných snímcích galaxií je přímo vidět, že jádra velkých galaxií jsou nejhustějšími oblastmi těchto hvězdných soustav.



Ilustrace hvězdné černé díry strhávající látku z blízké hvězdy v těsném binárním systému. Při akreci vzniká typický akreční disk – zde je zbarven žlutooranžově – a výtrysky orientované ve směru rotační osy černé díry. Děje probíhající v akrečním disku a někdy i ve výtryscích podél rotační osy lze pozorovat v celém spektrálním oboru od rentgenového až po rádiové záření. Zdroj: BBC.



Ilustrace zobrazující vznik zárodku galaktické veledíry z oblaku mezihvězdné látky podle scénáře DCBH. Plynný oblak je zobrazen modře, akreční disk je červenooranžový. Na prvním obrazu je jen samotný oblak mezihvězdného plynu, na druhém vzniká v jeho středu rotující disk zhuštěné látky a třetí obraz již ukazuje zrodivší se černou díru. V okolí tohoto objektu plují vesmírem podobná plynná oblaka. Zdroj: Chandra.

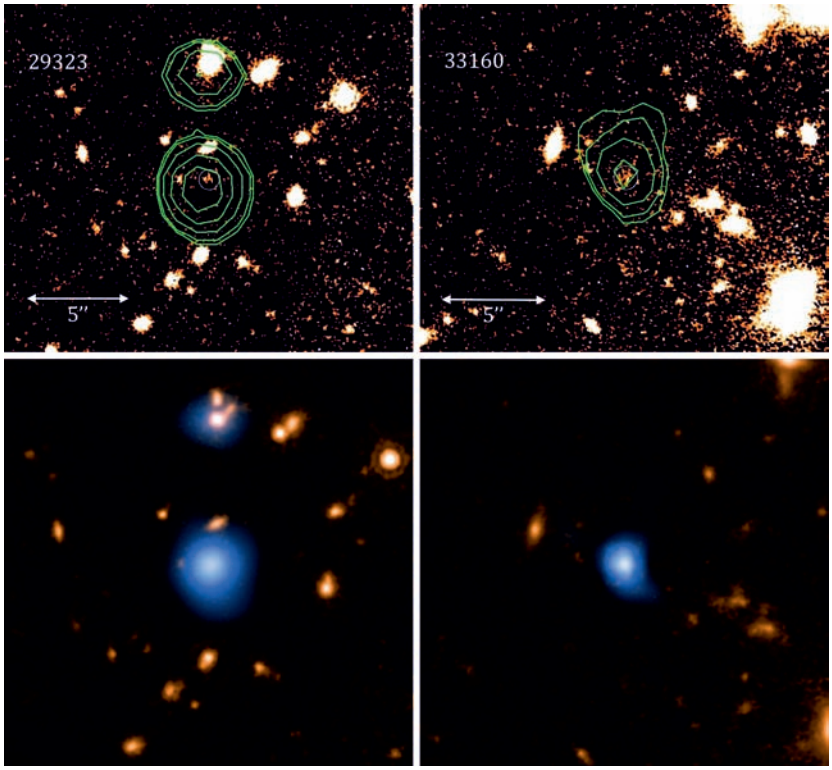
Galaktická veledíra tedy dnes může růst jako Otesánek. Kosmologové se domnívají, že zárodky galaktických veleděr sehrály při formování struktury vesmíru mladšího než 500 milionů roků klíčovou roli a přispěly k vývoji dnešních velkých hvězdných soustav. Jak ale vznikly takové obří objekty v raném vesmíru, v době, kdy se galaxie teprve počínaly formovat? Nabízejí se dvě možné cesty.

První možností je postupné slučování hvězdných černých děr, které vznikly z první generace obřích vodíkových hvězd žijících, díky své obrovské hmotnosti, velmi krátkou dobu. První hvězdy mohly dosahovat mnoha stovek hmotností Slunce, a doba jejich života se tak mohla pohybovat jen kolem několika milionů roků. Lze se tedy domnívat, že prvotní černé díry vznikaly z hvězd poměrně překotně a záhy. Nejasným při takovém ději ale zůstává, zda se takové objekty v mladém vesmíru nacházely alespoň někde v dostatečně vysoké koncentraci, aby se mohly překotně spojovat do objektů větších. Nárůst hvězdných černých děr do velikosti něčeho, co je milionkrát nebo až miliardkrát větší, je podmíněn rozložením vesmírné látky a přítomností již existujících černých děr nejlépe ve velmi vysoké koncentraci v daném místě. Rostoucí díry by měly nasávat ze svého okolí nejen okolní černé díry, ale vše, včetně mezihvězdného plynu a jiných hvězd. Pokud bychom předpokládali tento scénář, je nutné, aby růst veledíry proběhl velmi rychle. Jedině tak zůstane dostatek času potřebného pro vlastní vývoj hvězdné soustavy, v jejímž jádru dnešní veledíra sídlí. Raný vesmír ale pozorujeme v těch největších vzdálenostech a rozpoznat tam něco velikostně srovnatelného s hvězdou je stále téměř nemožné. Při postupném slučování hvězdných černých děr do galaktických veleděr jde o poměrně složitý mechanizmus a těch podmínek, které lze jen obtížně ověřit pozorováním, je stále poněkud mnoho.

Druhou možností je vznik černé veledíry z plynného oblaku přímo. Kolapsem oblaku o hmotnosti srovnatelné alespoň se 100 000 hmotnostmi slunečními může přímo vzniknout zárodek srovnatelně velké veledíry bez výše popsaných mezikroků a vývojových podmíněností. Celý zrod „kondenzačního“ galaktického jádra proběhne mnohem rychleji. Veledíra vznikne najedenkrát jedinou událostí a pro vývoj samotné galaxie bude pak mnohem více času než v případě předchozím. Pro tento scénář se ujal termín DCBH (*Direct Collapse Black Hole*) – černá díra vzniklá přímým kolapsem.

Hledání kandidátů na přímý kolaps

Při hledání černých děr vzniklých přímým kolapsem (DCBH) byla použita data z rentgenové observatoře Chandra, HST a SST z přehlídky GOODS. Ve velkých vzdálenostech, v nichž má v daném případě smysl pátrat po černých děrách DCBH (s kosmologickým posuvem $3{,}5 \leq z \leq 10$) bylo vytipováno 2 037 objektů, z nichž vysoký kosmologický posuv ($6 \leq z \leq 10$) byl zjištěn u 97 zdrojů. Čím větší kosmologický červený posuv objekt vykazuje, tím se objekt nachází blíže počátku vesmíru. Pozorování byla analyzována a porovnávána s numerickými simulacemi kolabujících plynných oblaků. Při počáteční hmotnosti oblaku kolem 100 000 hmotností Slunce by takový kolaps na černou díru mohl trvat necelých 150 milionů roků. Ze simulací byl získán také odhad týkající se spektra DCBH. Hmotnější DCBH by měly mít spektrum posunuté více k červenější barvě. Plyn okolo hmotnější černé díry by měl být mnohem koncentrovanější, a tudíž by měl být schopný vyzařovat více energie na kratších vlnových délkách. Ze simulací ale současně vyplynulo, že objekty pod hmotnostní hranicí $6{\times}10^4$ Sluncí nelze současnou technikou zjistit. Analýzou dat se podařilo odhalit dva horké kandidáty na zárodky galaktických veleděr vzniklých v raném vesmíru přímým kolapsem. Pro rozhodnutí, zda v raném vesmíru vznikaly černé veledíry spíše kolapsem obřích plynných oblaků než spojováním malých černých děr, bude nutno objevit takových objektů ještě mnohem více.



Dva kandidáti na zárodky galaktických veleděr v raném vesmíru. Objekt 33160 má červený posuv $z \approx 6{,}1$, druhý objekt 29323 je mnohem dále, jeho $z \approx 9{,}7$. Hmotnost odpovídá podle charakteristik vyzařování poměrně přesně nasimulované hodnotě $5{\times}10^6$ Sluncí. Snímky zobrazují prolnutí rentgenového obrazu (zelené kontury) v pásmu (1 až 4 keV) s vizuálním zobrazením v H pásmu (blízké infračervené pásmo se středem na 1,65 mikrometru). V dolní řadě jsou modrou barvou kódované rentgenové snímky. Zdroj: ArXiv, Chandra.

■ Ivan Havlíček, 10. 6. 2016, AB 21/2016

Dark Energy Survey

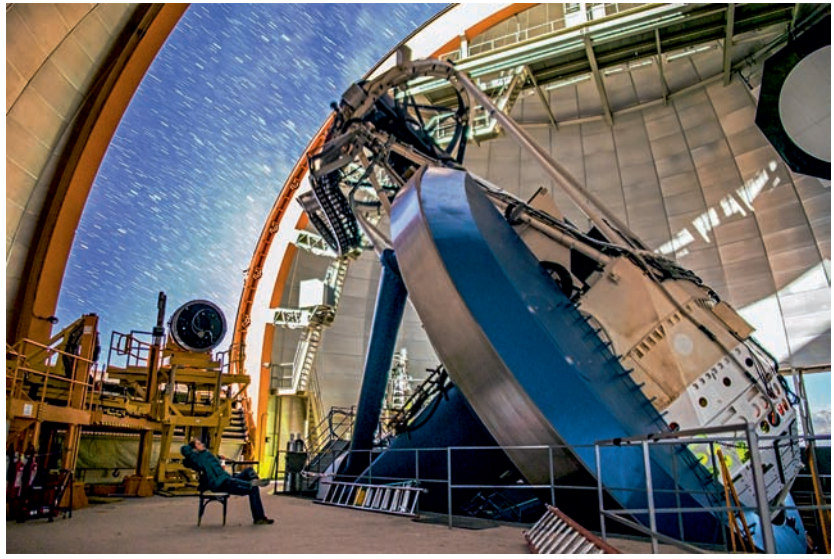
Dark Energy Survey (DES) je název unikátního pětiletého projektu mapování oblohy, který si klade velmi nelehký úkol, a to katalogizovat stovky milionů galaxií na jižní obloze, vyhledávat supernovy typu Ia, s pomocí nichž lze přesně určit vzdálenosti mateřských galaxií a zpřesnit naše znalosti o zrychlené expanzi vesmíru, jejíž podstata zůstává stále zahalena tajemstvím.

CCD – Charge Coupled Device, *zařízení s nábojovou vazbou, umožňuje převést paralelní analogový signál (elektrický náboj kumulovaný v potenciálových jámách) na sériový signál, daný časovou posloupností proudových pulzů úměrných kumulovanému náboji. Při serializaci paralelní informace CCD funguje jako posuvný registr, který umožňuje postupné posouvání náboje změnou potenciálového profilu řízenou hodinovým signálem. (Přesun náboje si lze přestavit podobně jako řetěz lidí předávajících si při požáru na povel různě naplněná vědra s vodou. S každým povelem se konkrétní vědro posune o krok blíže k požáru. Časový průběh proudu vody vylitého do ohně odráží prostorové rozložení objemů vody ve vědrech.)*

Expanze vesmíru

V roce 1915 představil Albert Einstein obecnou teorii relativity, která se opírala o jiný pohled na gravitaci než dosavadní Newtonova teorie. Jedná se o teorii geometrickou, která oproti newtonovskému přístupu neužívá pojem síly. Ta je v obecné relativitě nahrazena křivým časoprostorem, v němž se objekty pohybují po nejrovnějších dráhách, tzv. geodetikách a zakřivení časoprostoru je vytvářeno každým hmotným objektem, ať už stacionárním, nebo pohybujícím se. Tyto úvahy vedly Einsteina k formulaci 10 nelineárních parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu pro deset neznámých, kterým dnes říkáme Einsteinovy rovnice. Vzhledem k tomu, že Einstein požadoval jako řešení svých rovnic statický, tj. časově neměnný vesmír, tak o dva roky později do své soustavy přidal tzv. kosmologický člen, který zajišťoval, aby vesmír neexpandoval ani nekolaboval. Ovšem již v roce 1929 objevil Edwin Hubble, že se vesmír rozpíná, a tím Einsteinův kosmologický člen pozbyl významu. Na výsluní se začal vracet až v 80. letech 20. století, v době úvah o inflaci – stádiu prudké expanze raného vesmíru.

Čtyřmetrový dalekohled Victora Blanca na observatoři Cerro Tololo v chilských Andách, na němž probíhá přehlídkový projekt DES. Zdroj: Reidar Hahn/Fermilab.



Na konci 90. let 20. století byl učiněn jeden z nejvýznamnějších objevů v kosmologii. Ukázalo se, že se vesmír rozpíná nikoli brzděnou expanzí, ale zrychleně.

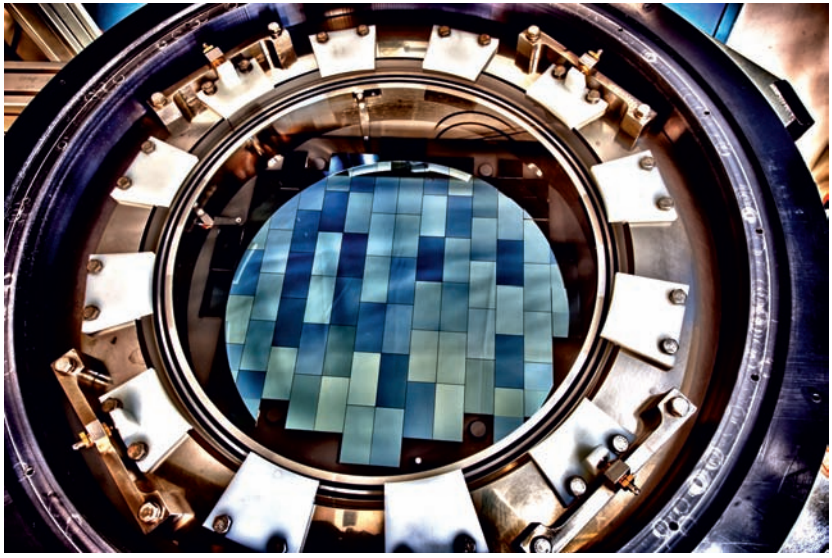
Za tento objev byla v roce 2011 udělena Nobelova cena za fyziku Saulu Perlmutterovi, Adamu Riessovi a Bryanu Schmidtovi, kteří měli na objevu největší podíl. Do Einsteinových rovnic se opět vrátil kosmologický člen, jehož velikost určuje tzv. kosmologická konstanta. Takový člen, bez ohledu na to, co je jeho fyzikální příčinou, působí pro určité hodnoty kosmologické konstanty antigravitačně a zajišťuje zrychlenou expanzi vesmíru.

Temná energie

Z kosmologických výpočtů a měření vyplývá, že atomární látka tvoří ve vesmíru zhruba 5 % hmoty a energie, zbytek vytváří temná hmota a temná energie, přičemž temné energie je podle posledních měření sondy Planck 69 %. Její fyzikální podstata však zůstává stále záhadou. Jednou z nejvíce diskutovaných možností je, že temná energie je energií kvantových fluktuací vakua. Z kvantové teorie je totiž známé, že neexistuje absolutní vakuum, tedy prostor, kde by nebylo vůbec nic. I v tom nejprázdnějším prostoru neustále vznikají fluktuace polí a dvojice částic a antičástic, které po krátkém okamžiku zase anihilují. Chování jednotlivých složek ve vesmíru vystihuje tzv. stavová rovnice, podle níž je v prvním přiblížení tlak, kterým daná entita působí na okolí, úměrný hustotě její energie. Koeficient úměrnosti se označuje písmenkem w a říká se mu parametr w. Závisí na způsobu, jakým daná entita reaguje na expanzi. Například pro elektromagnetické záření je $w = 1/3$, pro nekoherentní prach je $w = 0$ a pro jevy způsobené nenulovou křivostí je $w = -1/3$. Aby se vesmír rozpínal zrychleně, musí platit $w < -1/3$, a tak je jasné, že tyto tři entity zrychlenou expanzi nezpůsobují. Pro kvantové fluktuace vakua vychází $w = -1$, proto jsou ideálním kandidátem na temnou energii. Navíc z výsledků měření sond Planck, WMAP a mnoha dalších pozemských pozorování

Potenciálové jámy mohou být umístěny vedle sebe pouze v jediné řadě (lineární CCD) nebo ve více řadách (plošné CCD). Nejznámějšími CCD jsou fotoelektrické snímače, kdy se rozložení náboje vytváří vnitřním fotoefektem. Mohou však sloužit i jako paměťové prvky (například jako odkládací paměť pro výše zmíněné fotoelektrické snímače). V zobrazovacích zařízeních jsou nejmenší rozměry jednoho CCD pixelu 9×9 mikrometrů a plošné senzory jsou tvořeny maticí velkou až 5120×5120 pixelů. Chlazené CCD senzory pracují s minimálním šumem a jsou citlivé na jednotlivé fotony.

Temná energie – *entita zodpovědná za zrychlenou expanzi vesmíru, která byla objevena na konci roku 1998 (Saul Perlmutter, Adam Riess). Temná energie tvoří 69 % hmoty a energie ve vesmíru. Hustota temné energie je velmi málo proměnná v čase i v prostoru, pokud vůbec. Nejnadějnějším kandidátem na temnou energii je energie vakua.*



Fotografie CCD kamery DeCam s 570 megapixely pro projekt DES. Zdroj: DES/Fermilab.

Inflace – *prudké (exponenciální) zvětšení rozměrů raného vesmíru. Zpravidla se dává do souvislosti s oddělením silné interakce v čase 10^{-35} s 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 v pozorovatelné části vesmíru minimálně 10^{60} GeV a způsobí opětovné ohřátí vesmíru. Nárůst kvantových fluktuací by měl mít za následek 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 našeho vesmíru.*

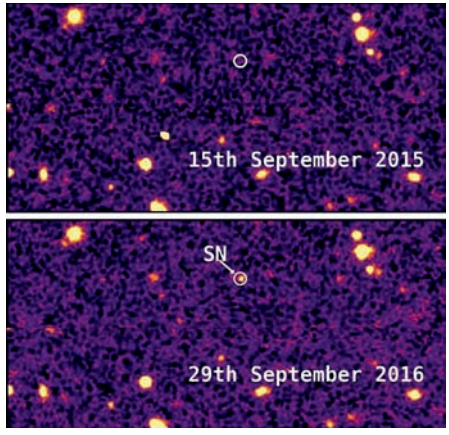
vychází, že parametr *w* má skutečně hodnotu blízkou −1. Přitažlivá gravitace v nás intuitivně navozuje očekávání brzděné expanze, skutečnost je ale, jak se zdá, odlišná. Parametry zrychlené expanze, ať už je způsobena čímkoli, lze určit z měření červeného kosmologického posuvu velmi vzdálených galaxií. K měření vzdálenosti se využívají supernovy typu Ia, které ve vesmíru fungují jako standardní svíčky. Jde o dvojhvězdy, v nichž je jednou složkou bílý trpaslík, na kterého přetéká látka ze složky druhé. K explozi dochází tehdy, když hmotnost bílého trpaslíka překročí 1,4 hmotnosti Slunce. Proto jsou všechny tyto exploze velmi podobné a mohou posloužit k určení vzdálenosti. Zrychlenou expanzi objevily týmy vedené Saulem Perlmutterem a Adamem Riessem právě na základě měření červeného kosmologického posuvu mateřských galaxií supernov Ia.

Dark Energy Survey

Dark Energy Survey (DES) je projekt, díky kterému získáme tak obsáhlý soubor dat o kosmologickém červeném posuvu galaxií, že na něm bude možné udělat velmi kvalitní statistickou analýzu, a tím zpřesnit naše informace o rozpínání vesmíru. Kvůli tomuto projektu byl upraven čtyřmetrový dalekohled Victora M. Blanca na observatoři Cerro Tololo v chilských Andách. Na dalekohled byla namontována speciální CCD kamera DeCam (*DES Camera*) obsahující 62 CCD snímačů s rozlišením 2048×4096 pixelů a 12 CCD snímačů s rozlišením 2048×2048 pixelů. Celkově má tedy kamera přibližně 570 milionů pixelů, což je u astronomických zařízení zcela nebývalé.

Kamera byla na dalekohled instalována v průběhu roku 2012 a v roce 2013 začala vlastní pozorování. Pozorovací kampaň je naplánována na 5 roků a každý rok se pozoruje 105 nocí v období od srpna či září do února. Zbytek času je věnován zpracování dat a úpravám přístrojů. Měří se nejen červené posuvy mateřských galaxií supernov typu Ia, ale i červené posuvy dalších galaxií. Během první etapy pozorovací kampaně, která začala 31. srpna 2013 a skončila 9. února 2014, byly pořízeny snímky mnoha milionů galaxií a stovek supernov z oblasti zhruba 2 000 čtverečních stupňů oblohy. V současnosti (2018) je nasnímáno 400 milionů galaxií z oblasti o rozměru 5 000 čtverečních stupňů, což žádný jiný projekt nedokázal. Na projektu se podílí 400 vědců z 25 institucí ze Spojených států, Velké Británie, Brazílie, Německa, Švýcarska a Austrálie.

Nejvzdálenější nalezená supernova s katalogovým označením DES16C2nm, která patří k extrémně svítivým objektům SLSN. Signál ze supernovy k nám letěl 10,5 miliardy roků. Zdroj: Southampton University.



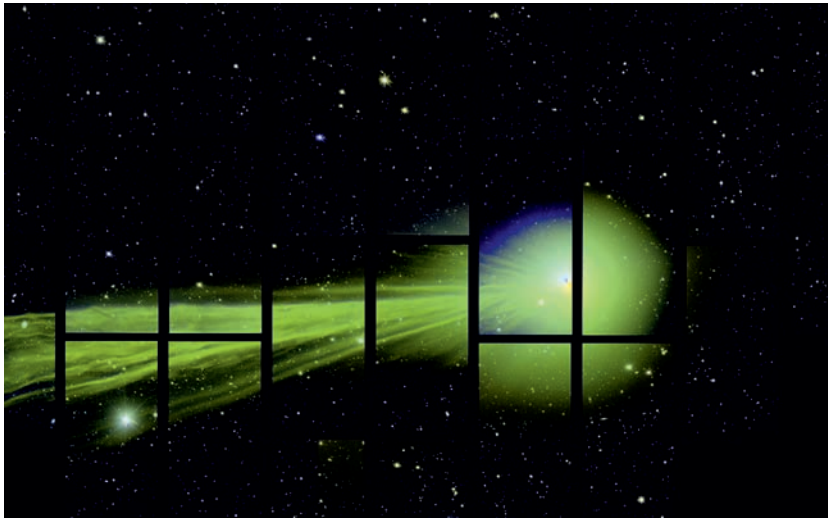
Dva velké objevy

Projekt DES neznamená jen vznikající katalog nebývalé velikosti, ale i mnoho objevů, které jsou při zpracování dat oznamovány průběžně. Zmiňme alespoň dva z nich. V srpnu 2016 byl pořízen záznam bezkonkurenčně nejvzdálenější pozorované supernovy. K její explozi došlo před 10,5 miliardami let ve směru souhvězdí Pece. Supernova získala označení DES16C2nm. V datech ji nalezl kolektiv vědců ze Southamptonské univerzity. Její extrémní vzdálenost potvrdila následující pozorování Velmi velkým dalekohledem, dalekohledem Magellan (oba v Chille) a Keckovým dalekohledem na Havaji. Nejde jen tak o obyčejnou supernovu, patří k velmi vzácným supernovám s extrémní svítivostí, které se označují SLSN *(SuperLuminous SuperNovae*). Při jejich explozi se uvolní větší množství energie, než vyprodukuje Slunce za celý svůj život a jsou stotisíckrát jasnější než běžné supernovy. Informace o tomto závažném objevu, jak už to bývá v poslední době zvykem, vyšla se značným zpožděním. Prestižní časopis *Astrophysical Journal* ji publikoval v únoru 2018.



Kopule observatoře, v níž je umístěný dalekohled Victora Blanca. Zdroj: Reidar Hahn/Fermilab.

Druhý velmi zajímavý objev se týká hvězd z naší Galaxie, které jsou na snímcích také zastoupeny. Bylo objeveno celkem jedenáct hvězdných toků, které jsou pozůstatkem pohlcování malých trpasličích galaxií naší Mléčnou dráhou a jejich následným rozcupováním. Ne vždy musí jít o celou galaxii, některé toky mohou být způsobeny rozcupováním velkých hvězdokup gravitačním působením Mléčné dráhy. Sledování objevených toků může napomoci mapovat temnou hmotu v místech, kudy hvězdy v toku plují, takže i tato „lokální" pozorování mohou napomoci řešit palčivé kosmologické otázky současnosti.



Kometa Lovejoy vyfotografovaná při průletu zorným polem přehlídky DES v prosinci 2014. Zdroj: DES/Fermilab.

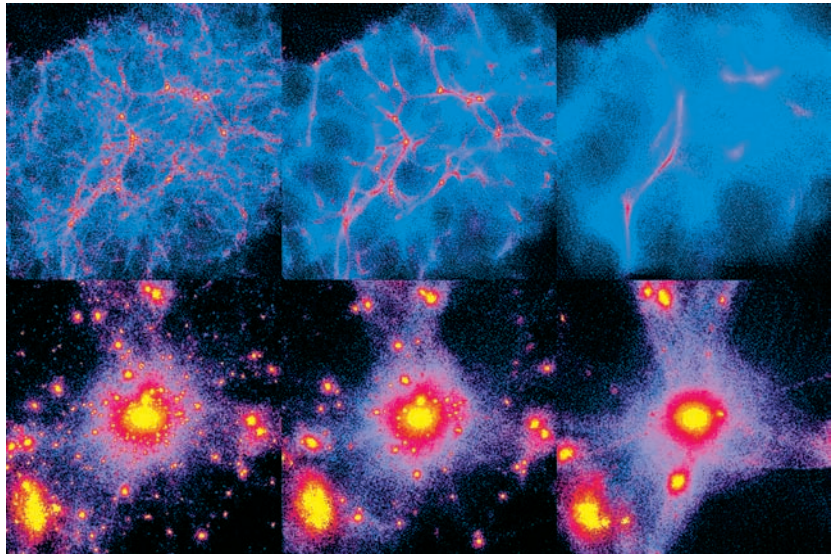
■ Miroslav Horký, 11. 7. 2014, AB 25/2014, aktualizace 2018

Reliktní neutrina

Neutrina – *částice, které nemají elektrický náboj, neinteragují ani silně ani elektromagneticky, a proto dnes látkou většinou procházejí. Spolu s elektrony patří do rodiny tzv. leptonů. Neutrina známe ve třech provedeních – elektronová, mionová a tauonová. Alespoň jedno z neutrin má nenulovou klidovou hmotnost, a proto dochází k tzv. oscilacím neutrin, samovolné přeměně mezi jednotlivými typy.*

Velký třesk probíhal prvních 400 tisíc roků, kdy se vesmír nacházel v plazmatickém skupenství. Na konec tohoto období dohlédneme v elektromagnetickém signálu, ale pozorovat děje v průběhu velkého třesku v elektromagnetickém signálu není možné, prvotní plazma je pro něj neprůhledné. V budoucnosti by mohly umožnit pozorování dějů před koncem velkého třesku reliktní neutrina a reliktní gravitační vlny. První možnost se týká období kolem jedné sekundy, druhá samotného vzniku vesmíru.

Podle našich představ se kolem jedné sekundy existence vesmíru (různé modely udávají od 0,1 s do 2 s) neutrina oddělila od horkého plazmatu. Do jedné sekundy intenzivně interagovala s vesmírným plazmatem, ale jakmile vesmír ochladl pod hodnotu třicet miliard kelvinů, stal se pro neutrina průhledným. To, co se s elektromagnetickým signálem odehrálo na konci velkého třesku, se neutrinům přihodilo v jediné sekundě existence vesmíru. Elektromagnetické záření z tohoto období by dnes mělo červený kosmologický posuv (relativní změnu vlnové délky) 10^{10}. Jak už ale víme, takové záření bylo rozptylováno prvotním plazmatem a není ho možné zachytit. Neutrina, která se od látky oddělila v jedné sekundě, dodnes bloudí vesmírem a nesou v sobě informace o tom, jak tehdy vypadal vesmír. Pomocí reliktních neutrin bychom mohli nahlédnout pod pokličku velkého třesku a podívat se tam, kam v elektromagnetickém signálu nemůžeme dohlédnout.



Numerická simulace vlivu chladné (nalevo) a horké (napravo) temné hmoty na vývoj struktur. V dolní části jsou detaily křížení vláken. Žlutou barvou vyznačeny struktury vznikající z atomární (baryonové) látky. Uprostřed je vliv temné hmoty s rychlostí částic někde mezi rychlostmi typickými pro horkou a chladnou složku. Na první pohled je patrné, že horká temná hmota potlačuje vznik malých struktur. Zdroj: ITP, Curyšská univerzita.

Ochlazování fotonů a neutrin

Elektromagnetický signál se oddělil od prvotního plazmatu v období 400 000 roků a dnes je jeho teplota (poprvé přesně změřená družicí COBE) 2,73 K, čemuž odpovídá vlnová délka maxima vyzařování jeden milimetr. Reliktní záření se

často označuje zkratkou CMB (*Cosmic Microwave Background*, mikrovlnné záření pozadí). Neutrina se oddělila mnohem dříve, v jedné sekundě, a z teoretických úvah plyne, že by dnes měla mít teplotu 1,94 K. Na první pohled se to zdá být divné – neutrina přestala s látkou interagovat v mnohem teplejším vesmíru než fotony, a přesto je jejich teplota dnes nižší.

SLOŽKA	ZKRATKA	ODDĚLENÍ	TEPLOTA	
			ODDĚLENÍ	DNES
fotony	CMB	400 000 let	5×10^3 K	2,73 K
neutrina	CNB	1 s	30×10^9 K	1,94 K

Za to může anihilace elektronů a pozitronů, která začala probíhat, když průměrná energie částic ve vesmíru poklesla pod dvojnásobek klidové hmotnosti elektronu. Je-li energie částic vyšší, mohou samovolně vznikat páry elektronů a pozitronů, je-li nižší, není to možné. Anihilace elektronů a pozitronů probíhala v čase kolem tří až deseti sekund. Při anihilaci elektronů a pozitronů se uvolnila energie, která okolní částice zahřála. Tento ohřev se ale už netýkal reliktních neutrin, protože v té době byla oddělená od látky a s látkou neinteragovala. Naopak se týkal fotonů, a proto je dnes teplota reliktních fotonů o 40 % vyšší než reliktních neutrin. Z teorie vychází přesná hodnota podílu teploty reliktních neutrin a reliktních fotonů $(4/11)^{1/3}$.

Reliktní neutrina často označujeme zkratkou CNB nebo CvB (*Cosmic Neutrino Background*). Jejich teplota 1,94 K odpovídá velmi nízké energii. Často hovoříme o neutrinech s ultranízkou energií. Taková neutrina zatím neumíme zachytit, žádný ze současných detektorů nemá schopnost polapit částice s tak nízkou energií. Proto jsme odkázáni na více či méně nepřímé metody: prvotní nukleosyntézu, rezonanci Z a rozpad tritia.

Neutrino elektronové – *částice patřící mezi leptony, vzniká spolu s pozitronem při slabých rozpadech. Jde o částici velmi malé hmotnosti, která interaguje s hmotou jen slabou interakcí, snadno proto hmotou proniká. Jeho existenci předpověděl Wolfgang Pauli v roce 1930 na základě analýzy beta rozpadu. Název neutrino mu dal Enrico Fermi po objevu neutronu v roce 1932 (v italštině znamená neutrino malý neutron). Jeho existence byla potvrzena po více než čtvrt století, v roce 1956, v jaderné elektrárně Savannah River v Jižní Karolíně (Frederick Reines, Clyde Cowan).*

Umělecká vize letících neutrin všech tří typů letících v urychlovači. Zdroj: Symmetry Magazine.



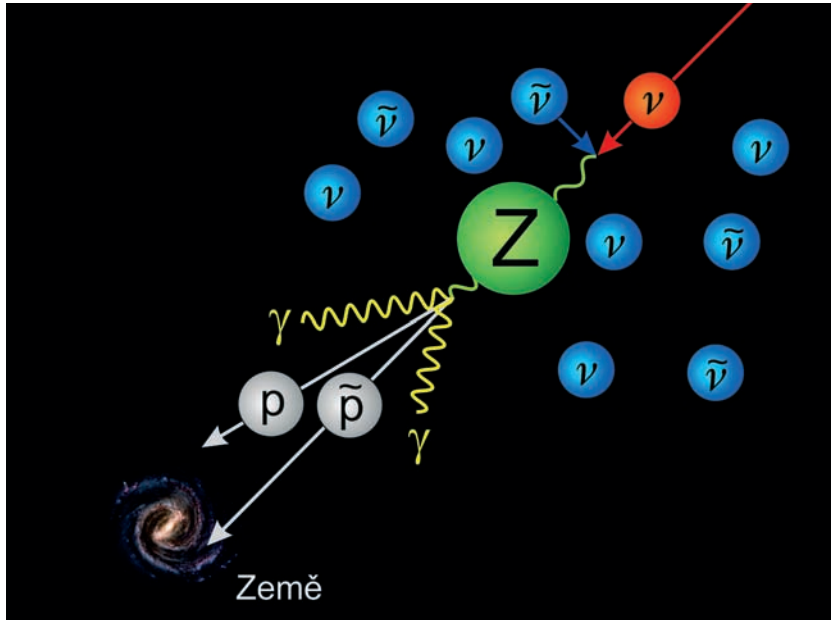
Neutrino mionové – *doprovází při slabých rozpadech mion (těžký elektron). Má podobné vlastnosti jako neutrino elektronové. Mionové neutrino objevili Leon Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger v roce 1962 na urychlovači v Brookhavenské národní laboratoři (Long Island, USA). Za tento objev obdrželi Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1988.*

Neutrino tauonové – *doprovází tauon (supertěžký elektron) při slabých procesech. Bylo objeveno v laboratoři Fermilab v roce 1999 v experimentu DONUT (Do Nu Tau). Šlo už o období obřích kolaborací, kdy jsou na objevitelských článcích někdy i stovky jmen a lze jen těžko určit, kdo je skutečným objevitelem.*

Prvotní nukleosyntéza

Do oddělení neutrin se v počátečním plazmatu nacházely v tepelné rovnováze převážně elektrony, pozitrony, neutrina, antineutrina a baryony složené z kvarků. Mezi ně patří zejména neutron a proton. Neutrina byla onou ingrediencí, která udržovala rovnováhu mezi protony a neutrony. Neustále probíhaly srážky s neutriny a antineutriny, při kterých se protony měnily na neutrony a pozitrony a naopak neutrony se měnily na protony a elektrony. Neutronů a protonů bylo v tomto období stejné množství. Po oddělení neutrin se vše změnilo. Protony zůstaly stabilními částicemi a neutrony se staly nestabilní částicí s poločasem rozpadu 611 sekund (10 minut). Přímým důsledkem oddělení neutrin je tedy rozpad neutronů.

Dnes už ve vesmíru žádné volné neutrony z počátečního období nenalezneme. Neutrony se pro budoucnost mohly zachránit jedině vazbou s protony. Vázaný neutron totiž stabilní částicí je. K vytváření struktur z protonů a neutronů (lehkých atomárních jader) docházelo v čase několika minut existence vesmíru. Dříve to nebylo možné, protože průměrná energie částic byla natolik veliká, že by srážky jádra opět rozbily. Později už byly srážky příliš málo časté a volných neutronů díky jejich nestabilitě valem ubývalo. Prvkotvorné období tedy probíhalo přibližně v čase 1 až 15 minut. V té době vznikala lehká jádra (deuterium, dva izotopy helia, lithium a mizivé množství dalších lehkých jader). A právě poměrné zastoupení těchto lehkých prvků v současném vesmíru je nepřímým svědectvím procesu oddělení neutrin, následné nestability neutronu a jeho záchytu v lehkých jádrech.



Rezonance Z vedoucí na anihilaci neutrina kosmického záření (červeně) s reliktním antineutrinem (modře) a následnou sprškou různých částic. Zdroj: Formaggio.

Neutrina a temná hmota

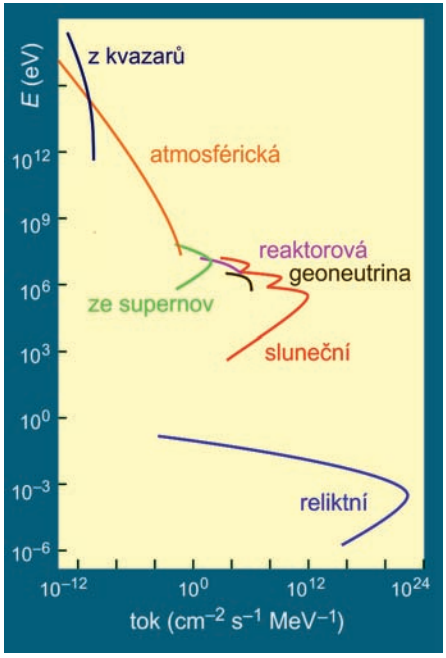
Neutrina jsou nedílnou součástí temné hmoty, tvoří její tzv. horkou složku, která má zásadní vliv na rozvoj prvotních fluktuací atomár-

ní látky, pozorovaných v reliktním záření. Neutrina mají nenulovou klidovou hmotnost. Z kosmologických pozorování plyne, že součet hmotností všech tří typů neutrin je nižší než 0,7 eV, z experimentů s oscilacemi neutrin plyne, že součet hmotností všech typů neutrin je vyšší než 0,05 eV. Hmotnost nejhmotnějšího neutrina je proto někde v intervalu od 0,05 eV do 0,7 eV. Při této hmotnosti je neutrinová složka temné hmoty ve výrazné menšině a velmi málo přispívá k dynamice vesmíru jako celku. Nicméně neutrina jsou v době oddělení od látky relativistická a zasahují výraznou měrou do tvorby vesmírných struktur (například galaktických haló), neboť narušují tvorbu jakýchkoli shluků na malých škálách. Studiem vesmírných struktur je tedy možné nepřímo pozorovat důsledky existence reliktních neutrin v době tvorby těchto struktur.

Přímější metody detekce

Jednou ze zajímavých metod detekce reliktních neutrin je tzv. Z rezonance. Země je neustále atakována neutriny kosmického záření s extrémními energiemi. Tato energetická neutrina mohou anihilovat se svými nízkoenergetickými reliktními protějšky (neutrina s antineutriny a antineutrina s neutriny). Pokud je energie neutrina kosmického záření rovna určité konkrétní hodnotě, dojde ke vzniku částice Z, neutrální polní částice slabé interakce s hmotností 91 GeV. Tato částice se následně rozpadá na snadno detekovatelnou spršku fotonů, protonů a antiprotonů. Rezonance Z se jeví jako nadějná metoda záchytu reliktních neutrin, zatím ale žádný pokus tohoto druhu nebyl úspěšný.

Jako nejnadějnější se v současnosti jeví záchyt neutrina radioizotopem tritia a následný inverzní beta rozpad. Tuto metodu detekce navrhl Steven Weinberg již v roce 1962. Tritium je izotop vodíku se dvěma neutrony v jádře, který se s poločasem rozpadu 12,32 roku rozpadá na ^{3}He, elektron a elektronové antineutrino. Tento beta rozpad lze ale obrátit. Pokud je namísto emise antineutrina absorbováno reliktní neutrino, dojde k témuž výsledku – tritium se přemění na ^{3}He a elektron. Největším problémem ovšem bude oddělení užitečného signálu od pozadí. Dosavadní i plánované experimenty využívají molekulární tritium T_2, které se rozpadá na molekulu ^{3}HeT, jejíž rotační a vibrační stavy se nacházejí kolem energie 0,36 eV, což snižuje limitní rozlišení metody. Použití atomárního tritia by bylo lepší, ale zatím velmi obtížné. Snad k tomu dojde u přístrojů následujících generací.



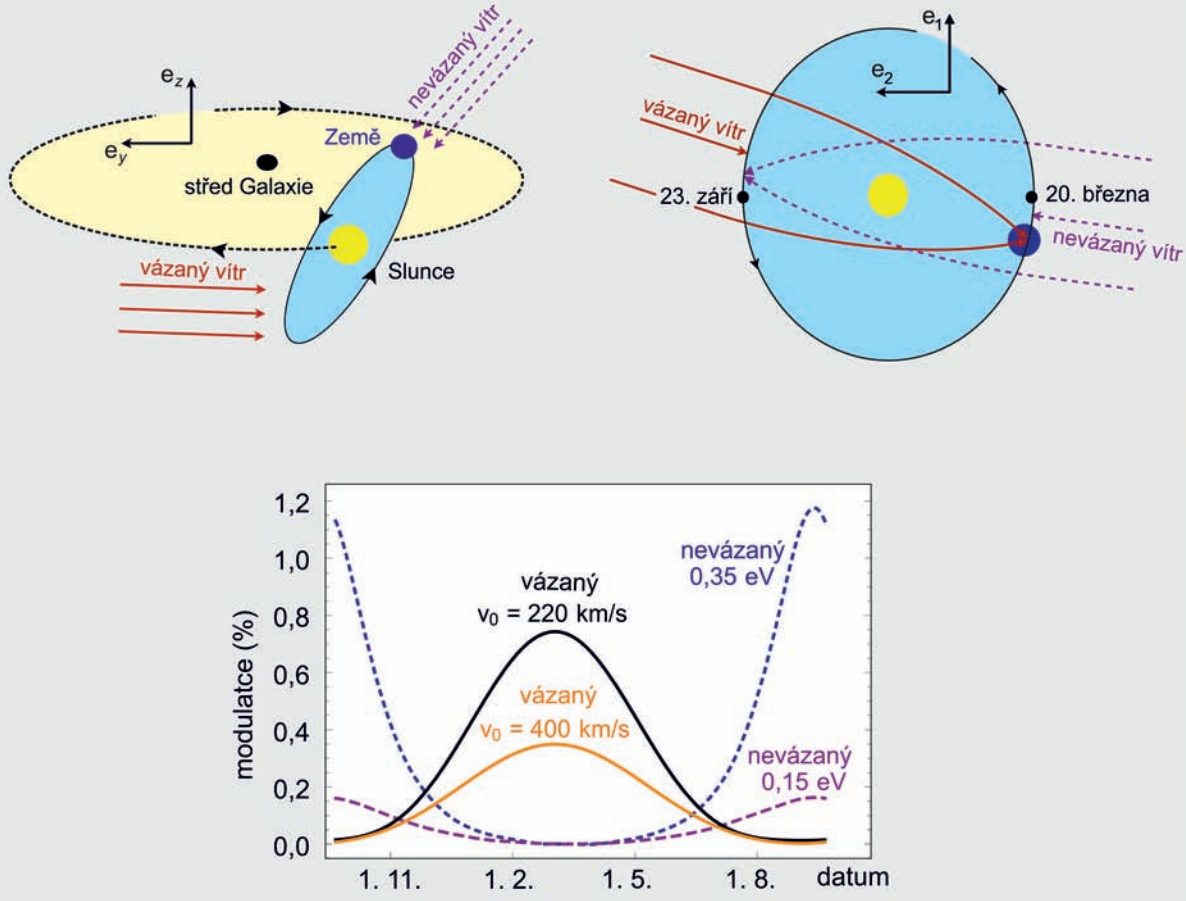
Toky různých druhů neutrin u Země. Zdroj: AGA.

Transport obřího spektrometru KATRIN ulicemi Karlsruhe na univerzitu. Foto: Sandbiller.



MODULACE TOKU NEUTRIN V TRITIOVÝCH EXPERIMENTECH ZPŮSOBENÁ GRAVITAČNÍM ČOČKOVÁNÍM

(Joseph Formaggio, MIT, Princeton)



Ze současných experimentů připomeňme experiment PTOLEMY (*Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield*), který jako zdroj využívá tritium nanesené v tenké vrstvě na podklad z grafenu, součástí experimentu jsou dvě cívky vytvářející magnetické pole, elektrické pole urychlující vznikající elektrony a chlazený kalorimetr. Jiným experimentem je KATRIN (*Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment*), unikátní spektrometr o hmotnosti 200 tun, který začal pracovat v roce 2017. Jeho primárním cílem je sice určení hmotnosti elektronového neutrina, ale detekce vlivu reliktních neutrin na rozpad tritia není vyloučená. O tomto detektoru se podrobněji zmíníme v bonusu ke čtvrté kapitole.

Kolektiv z MIT a Princetonu vedený Josephem Formaggio předpověděl, že by signál z tritiových experimentů mohl mít charakteristickou modulaci. Tu by měla způsobit gravitační fokusace neutrin prolétajících kolem našeho Slunce a je jiná pro neutrina vázaná na naši Galaxii a neutrina nesvázaná s naší Galaxií. Neutrina vázaná na naši Galaxii by měla vykazovat maximum kolem 1. března, naopak neutrina nesvázaná s naší Galaxií by měla mít maximum kolem 11. září. Ukazuje se tak možnost zjistit, jaké množství reliktních neutrin je gravitačně zachyceno naší Galaxií. Detekce reliktních neutrin přestává být nereálným snem a zdá se, že by mohla být uskutečněna v nejbližších letech.

■ **Petr Kulhánek, 5. 12. 2014, AB 40/2014, aktualizováno**

Tritium – *velmi těžký vodík, v jádře má jeden proton a dva neutrony. Jde o nestabilní jádro s poločasem rozpadu 12,32 let, které podléhá beta rozpadu a přeměňuje se samovolně na helium, elektron a elektronové antineutrino. Rozpad tritia by také mohl vyvolat záchyt nízkoenergetického reliktního neutrina. Tritium spolu s deuteriem by se mělo stát základním palivem budoucích termojaderných elektráren.*



Experiment Ptolemy v Princetonu se pokusí zachytit reliktní neutrina. Na obrázku nastavuje přístroj Chris Tully. Zdroj: Princeton.

Reliktní gravitační vlny, eLISA a LISA Pathfinder

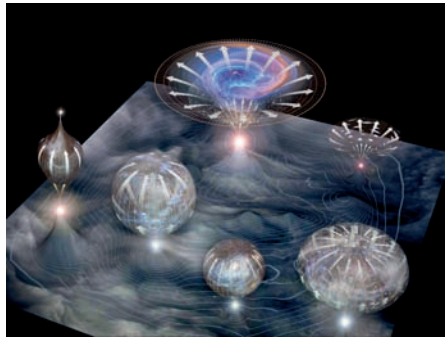
LISA – *Laser Interferometry Satellite Antenna, společný projekt tří sond ESA a NASA obíhajících kolem Slunce. Jejich cílem mělo být interferometrické měření gravitačních vln. Ramena interferometru (vzájemná vzdálenost sond) měla být 5 000 000 kilometrů. Realizace se postupně odsouvala, v roce 2011 NASA 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). V současnosti je projekt opět vzkříšen pod názvem eLISA (evolved LISA), ramena interferometru by měla být veliká milion kilometrů a zařízení by mělo startovat v roce 2034. V roce 2017 se projekt dostal pod označením L3 do úzkého výběru velkých (L, Large) misí Evropské kosmické agentury.*

Zdrojem gravitačních vln – periodických záhybů v čase a prostoru – mohou být obíhající dvojhvězdy, splynutí dvou kompaktních objektů, nesférická exploze supernovy, ale i samotný vznik vesmíru. V průběhu velkého třesku, který trval prvních 400 000 let existence vesmíru, bylo plazmatické prostředí pro elektromagnetický signál neprůhledné. Proto se můžeme o zrození světa dozvídat jen jinými kanály, například prostřednictvím reliktních neutrin, která vznikala v období kolem jedné sekundy nebo reliktních gravitačních vln, které by měly být podle našich modelů generovány právě při zrodu vesmíru. Každý z modelů vzniku světa předpokládá nějaké spektrum gravitačních vln (zastoupení různých vlnových délek). Záchyt reliktních gravitačních vln by umožnil opustit ty modely, které by nebyly v souladu s přímým pozorováním. Z podrobné analýzy reliktních gravitačních vln by bylo možné se dozvědět alespoň nějaké informace o původu našeho vesmíru.

Modely vzniku vesmíru

Naše představy o vzniku světa jsou velmi mlhavé. Z počátku se hovořilo o oblasti s nekonečnou hustotou a teplotou. K takové představě vedla extrapolace k počátku provedená na základě současné expanze vesmíru. V raném období se ale uplatňovala nejen gravitace, hustý a horký svět byl ovládán především kvantovými zákony a v jejich světle se vize počáteční singularity rozplynula jako pára nad hrncem. V rámci fyzikálního popisu světa máme celou řadu modelů, jak ke vzniku vesmíru mohlo dojít. Představme si nyní některé z nich – ty, o nichž se v poslední době hovoří nejčastěji. To ale neznamená, že musí být některý z těchto modelů správný. O jejich správnosti či nesprávnosti může rozhodnout jedině pozorování, nikoli naše obliba té či oné myšlenky.

Zrod multiverza (mnoha vesmírů) z jedné prabrány. Jedna z mnoha vizí vzniku vesmíru. Slovo „vize" je zde plně namístě. Zdroj: MoonRunner Design.



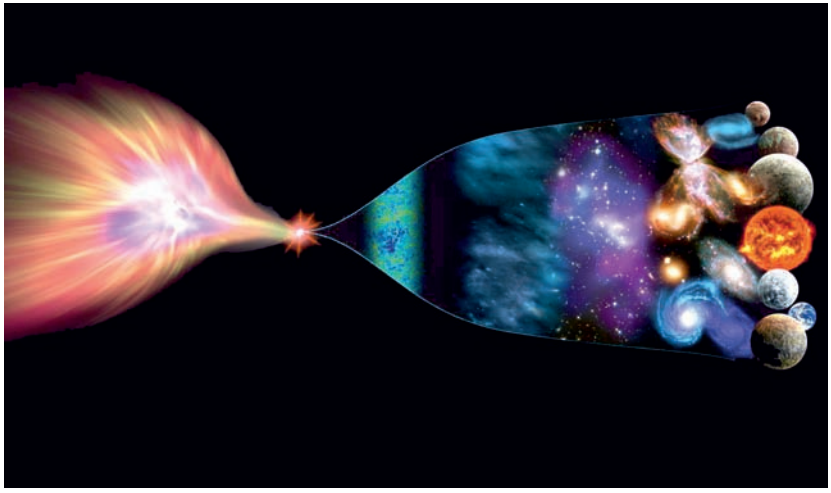
Inflační model. Představu, že na počátku vesmíru došlo k prudké expanzi, navrhl jako první americký teoretik Alan Guth. Model později rozpracovali do epické šíře rusko-americký teoretik Andrej Linde a americký fyzik Paul Steinhardt. Taková velmi krátká a rychlá expanze řeší některé problémy standardního kosmologického modelu. Inflační model vzniku vesmíru doznal od svého zrodu mnoha změn. Dodnes není jasné, co by takovou inflaci mohlo způsobit. První mode-

ly za původce inflace považovaly Higgsovo pole, dnes je ve hře celá plejáda dalších možností. Mohlo by jít například o fázový přechod související s oddělením silné interakce od ostatních, nebo se uvažuje o novém kvantovém poli, kterému se začalo říkat inflatonové. Pokud inflace skutečně proběhla, zcela se při ní změnil charakter vesmíru. Z prvopočátečních divokých kvantových fluktuací (někdy se hovoří o kvantové pěně) se vynořil předchůdce našeho vesmíru. Kvantové fluktuace se v průběhu inflace zvětšily na makroskopické útvary a tyto prudké změny podle výpočtů musely vést ke vzniku gravitačních vln, jež se dodnes toulají vesmírem a mají charakteristické spektrum.

Ekpyrotický model. Slovo ekpyrotický znamená „z ohně pocházející“. Autory tohoto modelu vesmíru z roku 2002 jsou jihoafrický teoretik Neil Turok a americký fyzik Paul Steinhardt. Představují si, že žijeme v mnohorozměrném světě, v němž je mnoho méněrozměrných brán a náš vesmír se transformoval z jedné takové brány díky náhodnému dotyku s bránou jinou. Právě tento dotyk se v našem vesmíru projevil jako velký třesk. Myšlenka paralelních světů je natolik šílená, že by jí nikdo nevěnoval příliš pozornosti. Turok a Steinhardt ale spočetli, jaké gravitační vlny by při takovém doteku brán vznikly. A pokud nějaký model dává měřitelné výsledky, musíme se jím vážně zabývat, ať se nám zdá sebešílenější. Navíc je spektrum gravitačních vln vzniklých při doteku dvou brán zcela odlišné od spektra vzniklého při inflaci. Další příbuzný model předpokládá existenci jedné prabrány, z níž se kvantovými fluktuacemi vynořilo značné množství vesmírů a náš je jen jedním z nich.

Vesmír z černé díry. Dosti oblíbená je představa, že počátek vesmíru nějak souvisí s černou dírou. V původní podobě takový scénář nemůže fungovat, protože tzv. Schwarzschildova metrika – řešení pokřiveného časoprostoru v okolí černé díry – je vnější řešení, pozorovatel musí být vně černé díry, což pro celý vesmír nemůže nikdy fungovat. Můžeme si ale pomoci

Multiverzum – *představa, že náš vesmír je jen jedním z mnoha navzájem se prolínajících vesmírů. Každý z vesmírů může mít jiné základní fyzikální konstanty, jiný počet dimenzí atd. Multiverzum využívají některé modely vzniku vesmíru, zpravidla jsou současnými prostředky jen těžko ověřitelné.*



Zrod vesmíru jitří fantazii teoretiků desítky let. Jedním z mnoha modelů je vznik vesmíru z černé díry (ta ovšem musí přicházet z extradimenzí, tedy dalších dimenzí, které nevnímáme). Model pochází z roku 2014, autorsky se na něm podepsali Niayesh Afshordi, Robert Mann a Razieh Pourhasan z Univerzity ve Waterloo a z Kanadského institutu pro teoretickou fyziku. Přestože byl tým genderově vyvážený, je životaschopnost modelu těžko odhadnutelná. V budoucnu by mnohé mohlo napovědět zachycení gravitačních vln z počátku vzniku světa.

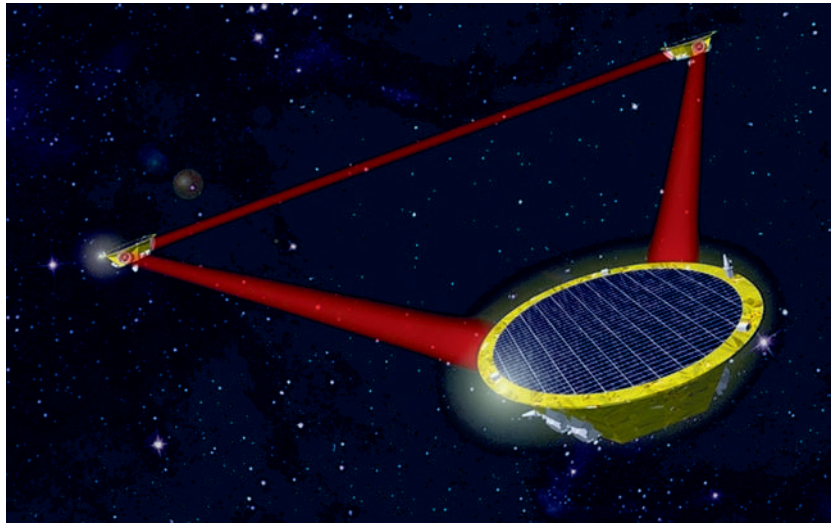
Polarizace elektromagnetického záření – *jde o vlastnost, pomocí níž popisujeme způsob kmitání elektromagnetické vlny. Elektromagnetické záření lze ve vakuu popsat příčným vlněním kmitů elektrického a magnetického vektoru, které jsou kolmé jak na sebe navzájem, tak na směr šíření vlny. U nepolarizované vlny opisují koncové body obou vektorů chaotické křivky. U polarizovaného světla je naproti tomu průmět obou vektorů do roviny kolmé na směr šíření vlny přesně definován. Podle tohoto průmětu pak rozlišujeme polarizaci rovinnou, kruhovou, a eliptickou. Polarizaci posuzujeme dohodou podle směru elektrického vektoru. Příkladem polarizovaného záření je například záření odražené od rovinného zrcadla. Polarizovaný elektromagnetický signál vydávají také elektrony interagující s elektromagnetickým zářením, které přichází z různých stran s různou frekvencí.*

kouzelnými extradimenzemi a předpokládat, že černá díra, která doslova vyvrhla náš vesmír, přicestovala do našeho časoprostoru z jiných, námi nepozorovatelných dimenzí. Možná, že je tento model ještě šílenější než ekpyrotický model, ale nemalá skupina fyziků o něm v současné době vážně uvažuje.

Podpis v reliktním záření

Dokážeme reliktní gravitační vlny z počátku vesmíru vůbec ulovit? Úloha to nebude lehká, ale zdá se, že snad řešitelná hned dvěma způsoby. První z nich je nepřímý, jde o hledání otisku gravitačních vln v polarizaci reliktního elektromagnetického záření. K tomu by mělo dojít na konci velkého třesku, těsně před oddělením reliktního elektromagnetického záření od látky. Gravitační vlny v některých oblastech komprimují prostor a s ním i elektromagnetický signál, v jiných oblastech dochází naopak k natahování. Důsledkem toho je, že k volným elektronům přichází z různých směrů elektromagnetický signál různých frekvencí. Elektron se současně rozkmitá na více frekvencích a vyšle typicky polarizované světlo. Tato polarizace, která je způsobená gravitačními vlnami, je jiná než polarizace, za niž jsou zodpovědné hustotní a teplotní fluktuace látky na konci velkého třesku. Obě polarizace od sebe umíme odlišit. Polarizaci reliktního záření měřila například evropská sonda Planck, ale dosud se jí otisk reliktních gravitačních vln v polarizaci reliktního elektromagnetického záření nepodařilo nalézt. Pravděpodobně bude třeba využít ještě přesnějších měření polarizace některým z přístrojů dalších generací v budoucnosti.

Obří interferometr eLISA složený ze tří sond bude měřit laserovým paprskem polohu vznášejících se krychlí na vzdálenost milion kilometrů. Zdroj: ESA.



Přímá detekce – eLISA

Druhou možností je přímá detekce obří gravitační anténou, která bude schopná přijímat gravitační vlny v milihertzové oblasti. Nízkofrekvenční gravitační vlny generuje celá řada objektů, a tak není stavba nízkofrekvenčního detektoru roz-

hodně jednoúčelovým zařízením. Zachytit dlouhé gravitační vlny je výzvou pro obří kosmické interferometry, jejichž ramena budou mít i miliony kilometrů. Nejde o žádné scifi, jedna taková observatoř se právě usilovně připravuje, i když její historie nebyla přímočará.

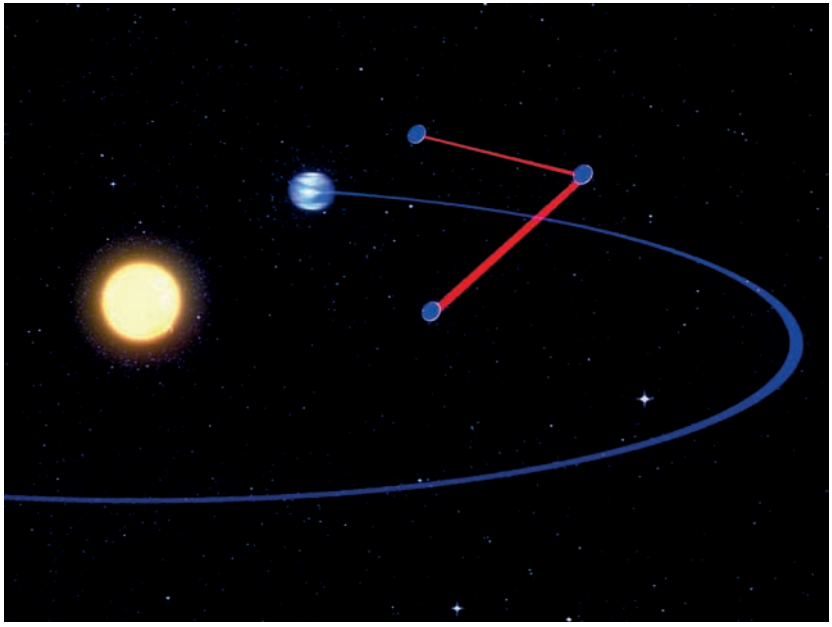
O vyslání obřího detektoru gravitačních vln do vesmíru se uvažovalo na konci 20. století. Celý projekt získal základní obrysy kolem roku 2000, kdy započala hlubší spolupráce mezi americkou vesmírnou agenturou NASA a její sesterskou agenturou ESA v Evropě. Původně se uvažovalo o trojici sond na samostatné dráze kolem Slunce s názvem LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*). Sondy měly letět ve formaci rovnostranného trojúhelníku a za pomoci laserů velmi přesně zaměřovat polohu testovacích těles – krychlí ze slitiny zlata a platiny o hraně 40 cm. Vzdálenost mezi sondami měla být 5 milionů kilometrů. Dne 8. dubna 2011 Spojené státy z projektu jednostranně vystoupily. Evropská kosmická agentura se rozhodla v přípravě mise pokračovat pod novým názvem NGO (*New Gravitational Observatory*). Projekt poněkud zeštíhlel, vzdálenost mezi sondami se snížila na milion kilometrů a jen jedna (centrální sonda) měla komunikovat s dvěma koncovými sondami. Interferometr Nové gravitační observatoře tedy měl být jen dvouramenný. V roce 2012 ale tento projekt zcela propadl v konkurenci jiných projektů.

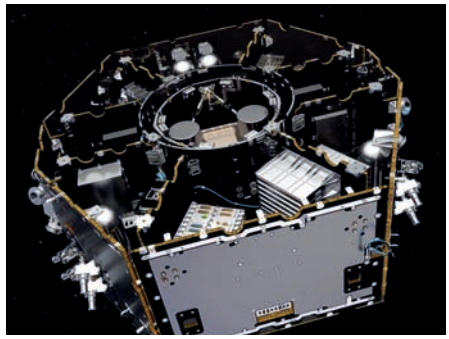
Tým vědců, který se podílel na vývoji projektů LISA a NGO se ale nevzdal. Hned v roce 2012 bylo založeno konsorcium eLISA (*evolved Laser Interferometry Satellite Antenna*), které mělo za cíl pokračovat v započatém díle a připravit životaschopný projekt obřího detektoru, který nemá v historii lidského snažení o poznání přírody obdoby.

Konsorcium eLISA je složeno z osmi členských zemí: na přípravě se podílí Dánsko, Francie, Holandsko, Itálie, Německo, Španělsko,

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Roku 1958 ukázal Charles Townes spolu s Arthurem Lawrencem Schawlowem, že je možné zkonstruovat podobné zařízení jako již existující MASER (pracuje v mikrovlnné oblasti) také pro světlo. První laser podle jejich myšlenky zkonstruoval Theodor Maiman v roce 1960. Jako aktivní prostředí posloužily ionty chrómu v syntetickém rubínovém krystalu.*

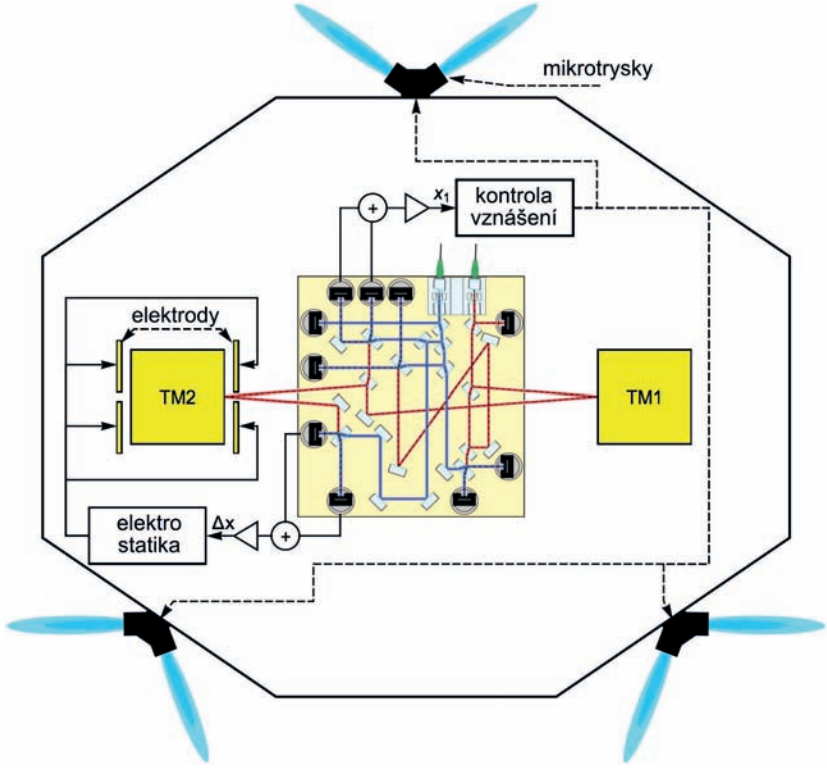
Tři sondy eLISA poletí v trojúhelníkové formaci kolem Slunce na samostatné dráze kopírující orbitu Země, a to 20° za ní. Vzdálenost mezi sondami bude milion kilometrů. Zdroj: ESA/NASA.





Celkový pohled na sondu LISA Pathfinder. Obě testovací hmotnosti (pod dvěma válcovými kryty) jsou spolu s optickou lavicí uprostřed sondy. Zdroj: ESA.

Švýcarsko a Velká Británie. Dvouramenný interferometr budou tvořit tři sondy, velikost ramen bude 1 milion kilometrů. Interferometr bude umístěn v Lagrangeově bodě L3 soustavy Země-Slunce. Konsorcium vede prof. Karsten Danzmann, který byl vedoucím týmu, jenž připravoval původní projekt LISA. Prof. Danzmann je ředitelem Ústavu Alberta Einsteina v Hannoveru (tento prestižní ústav je součástí MPI). Největším problémem je samozřejmě zaměření testovací krychle na koncové sondě. Laserový paprsek na takovou vzdálenost výrazně ztratí na intenzitě. Pokud by laser vysílal z centrální sondy svazek s výkonem jeden watt, odrazná krychle na koncové sondě zachytí pouze 250 pikowattů. Vezmeme-li v úvahu ještě cestu odraženého svazku zpět k centrální sondě, jde o útlum v řádu 10^{-20}, což znamená, že na mateřskou sondu by se vrátil jeden jediný foton jednou za tři dni. Takové měření by bylo samozřejmě k ničemu. Proto se na přijímací sondě zachytí informace o fázi dopadajícího svazku a zpět se vyšle zesílená replika signálu se stejnou fází. Detektor eLISA by měl být nejcitlivější v oblasti frekvencí 0,1 mHz až 100 mHz. To umožní detekovat nejen signál od nejbližších kompaktních dvojhvězd, ale zejména signál z obřích černých děr v centrech galaxií. Mělo by být možné zachytit gravitační vlny generované při spojení dvou černých děr, při pádu objektů do obří černé díry a při vzniku galaxií. Observatoř eLISA by také mohla zachytit stochastické reliktní gravitační vlny generované při vzniku vesmíru.



První krok: LISA Pathfinder

Technologii bezchybného plutí odrazných krychlí časoprostorem a zaměření jejich polohy testoval

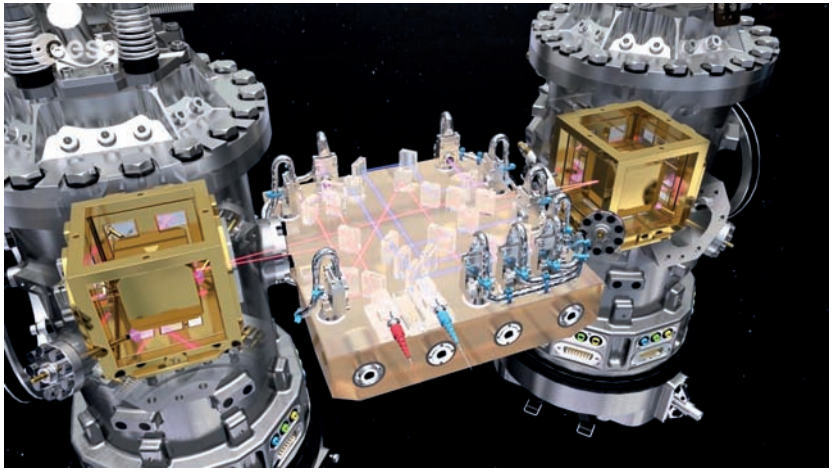
jakýsi předskokan mise, sonda LISA Pathfinder, jejíž výsledky předčily veškerá očekávání. Všechny testy proběhly na výbornou, a tak se můžeme těšit, že na počátku 30. let dokážeme detekovat i gravitační vlny s frekvencemi až do tisícin a možná desetitisícin hertze. A třeba se podaří zachytit i ony reliktní gravitační vlny, které by nám mohly napovědět, co se odehrávalo při vzniku vesmíru.

Sonda LISA Pathfinder odstartovala z jihoamerického kosmodromu v Kourou dne 3. prosince 2015 a vydala se na pouť do Lagrangeova bodu L1 soustavy Země-Slunce, kde započala vědecký program dne 8. března 2016. Srdcem sondy byly dvě odrazné krychle, zmenšeniny skutečných krychlí, které budou použity u observatoře eLISA. Odrazné krychle se „smrskly“ ze 40 centimetrů na pouhých 46 milimetrů. Vyrobeny byly ze slitiny zlata a platiny, která má vynikající odraznou schopnost a je odolná vůči vnějším vlivům. Hmotnost jedné krychle se pohybovala kolem dvou kilogramů. Obě testovací hmotnosti se vznášely v měřicích dutinách (každá ve své). První z nich (TM1) se pohybovala po geodetice, tedy nejrovnější možné dráze v křivém časoprostoru. Její poloha byla přesně sledována kapacitními a optickými senzory. Jakmile se tato testovací hmotnost nepatrně posunula z nulové polohy, znamenalo to, že se dráha sondy odchýlila od geodetiky (například tlakem slunečního záření nebo slunečním větrem). Počítač vydal pokyn jemnému manévrovacímu systému, který upravil polohu sondy tak, aby testovací hmotnost stále volně plula prostorem a vzhledem k sondě se nacházela na stále stejném místě. Navádění sondy s takovouto přesností zatím ESA nikdy netestovala. O manévrování sondy se postaraly mikrotrysky s chladným plynem a koloidní mikrotrysky, které vypouštěly malé nabité kapičky ovládané elektrickým polem. Reaktivní síla (s tahem několik mikronewtonů) jemně dorovnávala pohyb sondy, která byla „pouhým obalem“ testovací hmotnosti TM1.

Dále se pak velmi pečlivě sledovala poloha obou testovacích



Čtveřice koloidních trysek pro jemnou navigaci sondy LISA Pathfinder. Zdroj: ESA.



Ukázka vnitřní části sondy LISA Pathfinder. Dominantou jsou dvě odrazné krychle a optická lavice umístěná mezi nimi. Zdroj: ESA.

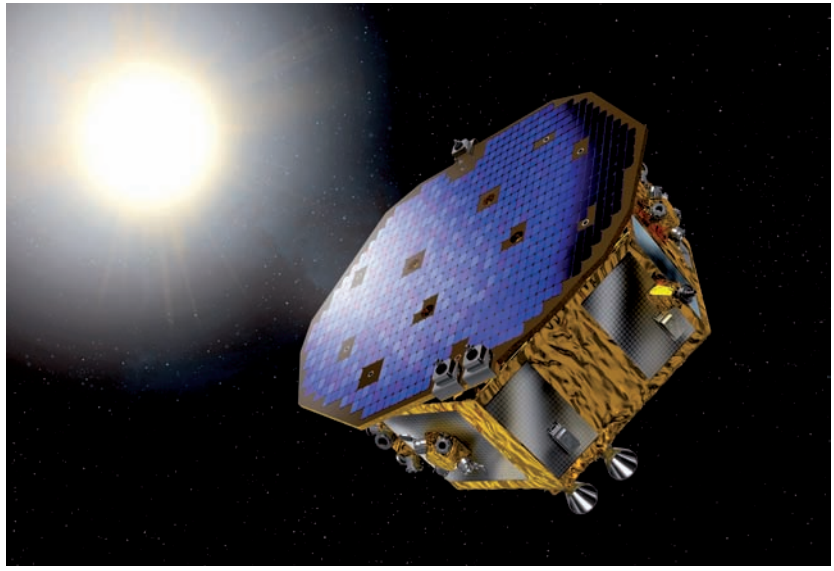


Sonda LISA Pathfinder v německé testovací laboratoři ESO IABG v Ottobrunnu. Zdroj: Astrium UK.

hmotností vůči sobě. Podle údajů laserové interferometrie bylo možné s druhou testovací hmotností manévrovat pomocí kapacitních (bezdotykových) aktuátorů. Celý experiment umožnil otestovat precizní manévrování sondy, detailní měření polohy obou testovacích těles, sledování sil působících na sondu a laserovou interferometrii.

Mise předčila veškerá očekávání a zbytkové zrychlení sledované testovací hmotnosti vzhledem k druhému tělesu bylo nejen pod hranicí stanovenou pro misi LISA Pathfinder (LPF), ale dokonce se dostalo i pod hranici stanovenou až pro „ostrý“ let celé formace. Ukázalo se, že navigace za pomoci mikrotrysek je pro cíle observatoře eLISA zcela dostačující. Obdobně vyhovuje i přesnost měření polohy testovacích hmotností. Vše ale neprobíhalo tak hladce, jak by se z výsledků mohlo na první pohled zdát. Objevily se i zajímavé problémy. Do prostoru sondy pronikalo vysoce energetické kosmické záření a také tam pravděpodobně penetrovaly některé částice slunečního větru. Tyto částice nabíjely obě testovací hmotnosti. Jednak docházelo přímo k jejich usazování, a jednak k sekundární emisi při dopadu těchto částic. Oba procesy způsobovaly nabíjení krychlí zhruba dvacetinásobkem kladného elementárního náboje za sekundu. Důsledkem toho vznikaly mezi krychlemi elektrostatické fluktuující síly, se kterými se nepočítalo. Jejich kompenzace elektrostatickým polem ale byla možná za současného snižování kumulujícího se náboje ultrafialovým zářením.

Sonda LISA Pathfider, první test technologií pro budoucí vesmírný interferometr eLISA. Zdroj: ESA.



Samozřejmostí byla kompenzace známých jevů, například odstředivých sil vznikajících rotací sondy. Ta je nutná proto, aby panely slunečních baterií mířily stále ke Slunci. Dále bylo třeba snížit vliv chaotických impulzů vznikajících dopadem atomů a molekul na testovací hmotnosti. Z měřicích dutin postupně atomy a molekuly unikaly do okolního vesmíru, až se jejich působení snížilo pod únosnou mez. Nezanedbatelný je také vliv optických měřicích prvků na samotné

krychle. Laserové zaměřovače vyvíjejí tlak, který je třeba opět elektrostaticky kompenzovat. Veškeré vlivy na zbytkové vzájemné zrychlení se podařilo dostat pod pětinásobek hranice nutné pro budoucí vesmírnou observatoř eLISA. Dle původního plánu byla mise ukončena dne 30. června 2017, neboť veškeré její cíle byly s velkou rezervou splněny.

A co dál?

Leckterý politik obšťastňuje své voliče obskurními vizemi budoucnosti, které se urodily v jeho hlavě nebo které si jen „zapůjčil“ od svých přátel či nepřátel. I fyzikové mají své vize do budoucna, a i když mnohdy znějí velmi nepravděpodobně, bývají většinou podložené léty experimentů a desetiletími výpočtů a simulací. Stavba gigantické observatoře s lasery svítícími na milion kilometrů by mohla být na první pohled považována za utopii. Výsledky mise LISA Pathfinder ale jednoznačně ukázaly, že jde o reálnou představu a pokud vše půjde podle plánů, dočkáme se takového detektoru gravitačních vln už v roce 2034.

■ **Petr Kulhánek, AB 42/2015, AB 22/2017, aktualizováno 2018**



Start nosné rakety Vega se sondou LISA Pathfinder na palubě z evropského kosmodromu ve Francouzské Guyaně, v jihoamerickém Kourou, dne 3. 12. 2015. LISA Pathfinder je prvním krokem ke stavbě obřího vesmírného interferometru eLISA. Zdroj: ESA.

Baryogeneze aneb vítězství hmoty nad antihmotou

ΛCDM – *všeobecně uznávaný model vesmíru obsahující temnou energii popisovanou kosmologickou konstantou (Λ), chladnou temnou hmotu (CDM – Cold Dark Matter) a baryonovou hmotu. Model ΛCDM věrně popisuje náš vesmír, a proto je často nazýván standardním kosmologickým modelem.*

Baryonová látka – *látka složená převážně z baryonů, tj. částic tvořených třemi kvarky. K nejvýznamnějším zástupcům baryonů patří proton a neutron, které jsou součástí jader atomů. Nejpodstatnější složkou baryonové látky je atomární látka, volných baryonů je ve vesmíru málo. Odhaduje se, že baryonová složka tvoří 5 % celkové hmoty-energie ve vesmíru.*

Primordiální nukleosyntéza – *období v raném vesmíru, kdy vznikala první atomová jádra z protonů a neutronů. Primordiální nukleosyntéza intenzivně probíhala od první sekundy do třetí minuty po vzniku vesmíru. V tomto krátkém období mohla vzniknout pouze lehká jádra deuteria, helia a lithia. Po třetí minutě již vesmír ochladl natolik, že protony a neutrony neměly dostatečnou energii k další jaderné syntéze.*

C symetrie – *symetrie vhledem k nábojovému sdružení (C = Charge, náboj). Nábojovým sdružením rozumíme nahrazení částice antičásticí, která má všechny kvantové charakteristiky s opačným znaménkem. O symetrii hovoříme, pokud by se přístroj vybudovaný z antičástic namísto částic choval stejně jako jeho částicový protějšek. Zkrátka vesmír z antihmoty by měl stejné vlastnosti jako vesmír z hmoty.*

CP symetrie – *levopravá symetrie kombinovaná se symetrií částice – antičástice. Označení CP pochází z anglických slov „charge" a „parity". Základní otázkou je, zda experiment připravený podle zrcadlového obrazu z antičástic by fungoval shodně s původním experimentem. Narušení CP symetrie v přírodě prokázali James Cronin a Val Fitch v roce 1964 v experimentech s rozpadem kaonů.*

Při pohledu na noční oblohu jistě řadu lidí napadne otázka, jak vznikla látka, ze které se skládají objekty na obloze i vesmír samotný. Podle současných představ (tzv. model ΛCDM) tvoří 69 procent vesmíru temná energie, 26 procent temná hmota a jen 5 procent hmota atomární (baryonová – většinu hmotnosti tvoří protony a neutrony, které patří do skupiny částic nazývaných baryony) povahy, z níž jsou složeny objekty pozorované na obloze i my samotní. Ve vesmíru se pravděpodobně nevyskytují makroskopické objekty z antihmoty. Toto tvrzení není nikterak samozřejmé. Antičástice běžně vznikají při vysokoenergetických srážkách na částicových urychlovačích za podmínek podobných těm, které panovaly ve vesmíru krátce po jeho vzniku. V raném vesmíru tedy musela být hojně přítomna antihmota, která v průběhu vývoje anihilovala s obyčejnou hmotou za produkce záření. Zajímavou otázkou je, jak a kdy došlo k tomu, že hmota a antihmota neanihilovala zcela.

Podmínky v raném vesmíru

Krátce po vzniku vesmíru zde panovaly zcela jiné podmínky, než známe dnes. Vesmír byl extrémně hustý a horký. Částice dosahovaly relativistických energií a v hustém prostředí často docházelo k jejich srážkám, při kterých vznikaly nejen nové částice, ale také antičástice. Tato primordiální polévka částic a antičástic byla v termodynamické rovnováze se zářením. Počty fotonů, baryonů a antibaryonů (kvarků a antikvarků v časech kratších než 10^{-5} sekundy od počátku) v tehdejším vesmíru byly téměř rovnocenné. V dnešním vesmíru je počet antibaryonů efektivně nulový a podíl počtu baryonů a počtu fotonů (kosmologický parametr η) je přibližně 6×10^{-10}. Na jeden baryon připadá přibližně jeden a půl miliardy fotonů, které tu zbyly jako pozůstatek po téměř kompletní anihilaci částic a antičástic.

Jak se měří podíl baryonové a fotonové složky vesmíru?

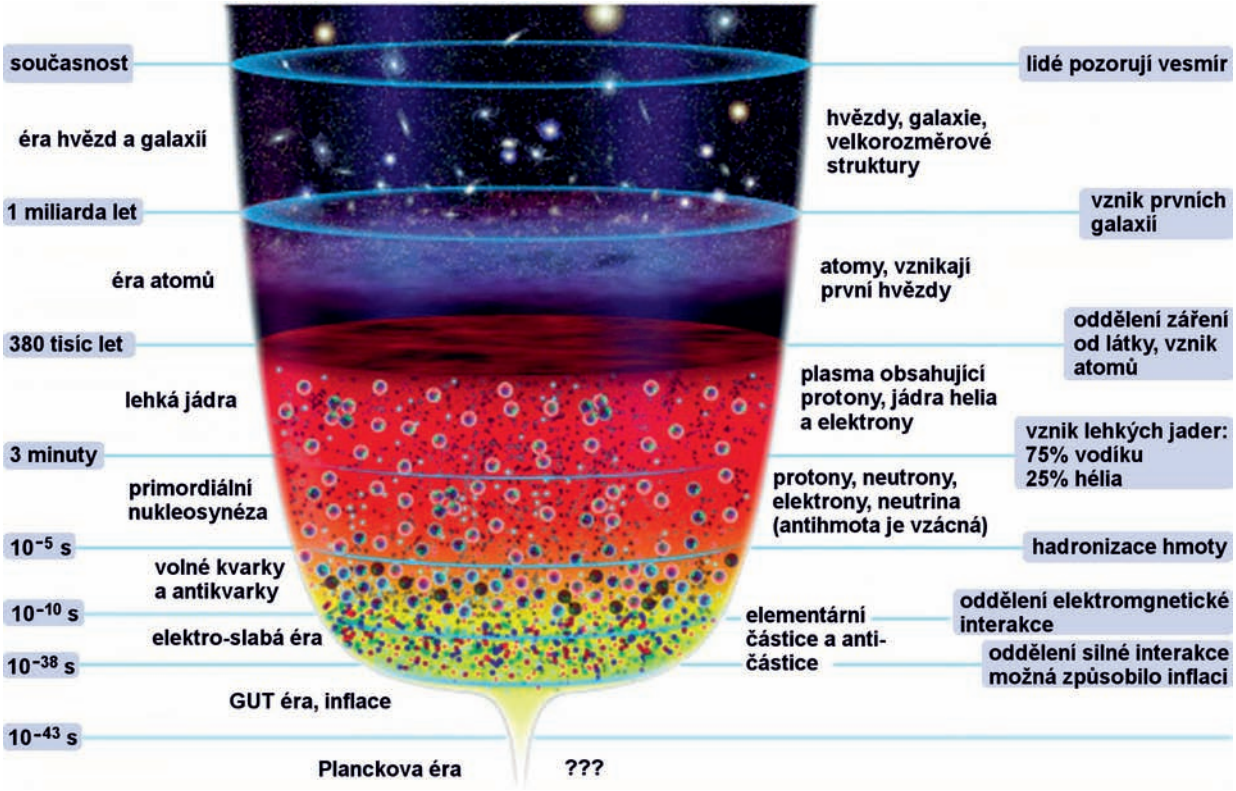
Jedním z procesů citlivých na podíl fotonové složky vesmíru byla primordiální nukleosyntéza, ke které docházelo zejména od jedné sekundy do přibližně tří minut po vzniku vesmíru. Při primordiální nukleo-

syntéze vznikaly za teplot kolem 1 MeV jádra lehkých prvků, jako je deuterium, helium (^{3}He, ^{4}He) a malé množství lithia (^{7}Li). Účinné průřezy těchto reakcí jsou dobře známy (částečně také díky vývoji termojaderných zbraní), a díky tomu je možné vypočítat, jaký musel být podíl fotonové a baryonové složky, aby vzniklo právě takové zastoupení prvků ve vesmíru, jaké pozorujeme.

Koncentrace fotonů v raném vesmíru měla největší vliv na množství vzniklého deuteria (nejstrmější křivka na obrázku na straně 155). Zároveň známe množství deuteria ve vesmíru ze všech prvků nejpřesněji. Odhady množství deuteria jsou založeny na spektroskopickém měření Lymanových spektrálních čar mezigalaktického vodíku a deuteria, které tyto atomy vyzařují, neboť jsou často excitované světlem vzdálených kvazarů.

Sfaleron – *statické řešení rovnic elektroslabé teorie, které nezachovává baryonové a leptonové číslo. Jde o neporuchové řešení, které nelze vyjádřit Feynmannovými diagramy.*

Instanton – *topologicky netriviální řešení kalibrační SU(N) teorie, které minimalizuje integrál energie. Řešení je lokalizováno v časoprostoru, proto má charakter pseudočástice.*



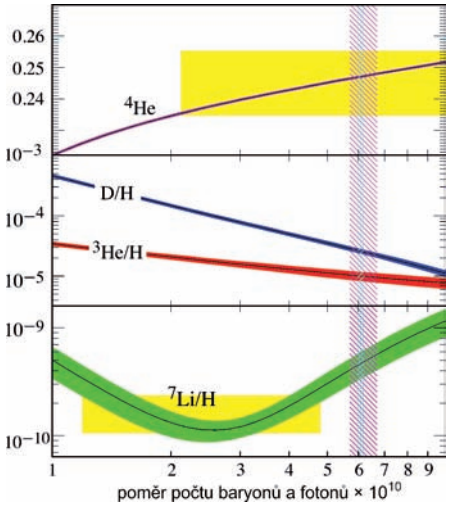
Stručná historie vesmíru od počáteční singularity až po současnost. Zdroj: Addison Wesley.



Galaxie Tykadla jsou dvě srážející se galaxie NGC 4038 a NGC 4039. Pokud by jedna galaxie byla složena z antihmoty a druhá z obyčejné hmoty, byl by tento útvar intenzívním zdrojem gama záření. Anomální produkce gama záření z anihilace nikdy u kolidujících galaxií pozorována nebyla. Zdroj HST.

Za zmínku ještě stojí, že pozorované množství ^{7}Li ve vesmíru nesouhlasí s předpovědí modelu primordiální nukleosyntézy. Deficit ^{7}Li zatím nikdo nedokáže přesvědčivě vysvětlit a je možné, že se zde skrývá nová fyzika.

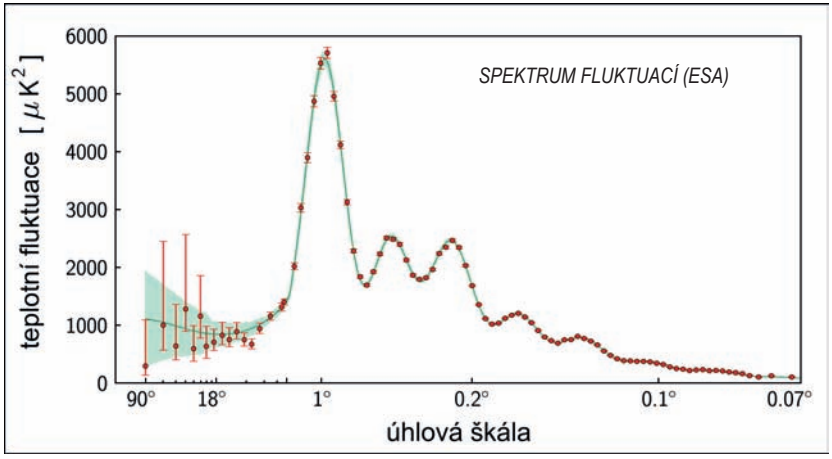
Parametr η (kosmologický parametr) byl rovněž určen zcela nezávislou metodou, a to analýzou spektra teplotních fluktuací reliktního záření, které vykazuje řadu charakteristických maxim (píků). První pík odpovídá fluktuacím největších úhlových rozměrů (asi jeden stupeň). Za tyto fluktuace jsou zodpovědné hustší oblasti, které gravitačně přitahují okolní hmotu a akustické oscilace je dále stlačují a zahřívají. Před oddělením záření od látky však některé části těchto hustších oblastí dosáhly maxima teploty a začaly se rozpínat vlivem tlaku záření (proti gravitaci) a ochlazovat. Tento efekt je zodpovědný za druhý pík ve spektru fluktuací reliktního záření. Na základě poměru velikosti prvního a druhého píku bylo možné velice přesně určit poměr baryonové a fotonové složky ve vesmíru.



Zastoupení lehkých jader v raném vesmíru v závislosti na poměru baryonové a fotonové složky. Plné křivky zobrazují teoreticky vypočtené hodnoty včetně nejistoty dvou směrodatných odchylek. Žluté oblasti vyznačují pozorované množství těchto prvků ve vesmíru a vertikální růžový pás označuje interval shody teoretického modelu primordiální nukleosyntézy s pozorováním. Zdroj: PDG.

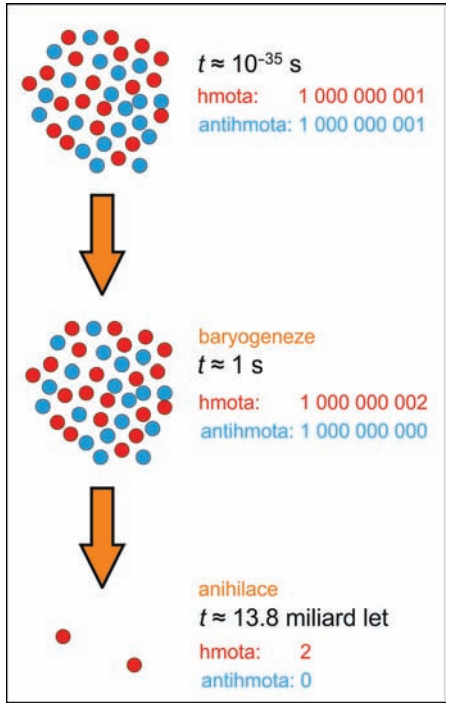
Anihilace hmoty a antihmoty

Současné množství baryonové hmoty ve vesmíru je výsledkem nepatrné asymetrie mezi množstvím částic a antičástic v raném vesmíru. Jaký je zdroj této asymetrie? Vesmír se mohl vyvíjet z již baryo-asymetrických počátečních podmínek podle baryo-symetrických zákonů. Baryo-asymetrické počáteční podmínky ale příliš nezapadají do inflačního scénáře vývoje vesmíru. V preinflační fázi by totiž musela být asymetrie extrémní a energie částic, které by tuto asymetrii představovaly, by řádově překročila energii inflatonového pole (pole, které by mohlo být zodpovědné za inflaci), takže by k inflaci vůbec nemohlo dojít. Vesmír se tedy spíše vyvíjel z baryo-symetrických počátečních podmínek a asymetrie vznikla až v průběhu jeho vývoje, kdy došlo k baryogenezi. Období baryogeneze nastalo pravděpodobně někdy mezi inflací a počátkem primordi-





Andrej Sacharov, autor podmínek pro dominanci hmoty nad antihmotou.



ální nukleosyntézy. Většinou se o tomto období uvažuje v čase kolem jedné až deseti mikrosekund. Baryogeneze patří v současné době k nejvíce akceptovaným scénářům vývoje hmoty ve vesmíru.

Sacharovovy podmínky

Aby z baryo-symetrických počátečních podmínek vznikl vesmír, ve kterém dominuje hmota nad antihmotou, musejí být splněna tři kritéria, která zformuloval v roce 1967 sovětský fyzik Andrej Sacharov (Sacharovovy podmínky):

1) existují procesy, které nezachovávají počet baryonů,
2) existuje narušení C a CP symetrie,
3) probíhaly procesy mimo termodynamickou rovnováhu.

Mohlo ale k takovým procesům v raném vesmíru opravdu docházet? Některé ze Sacharovových podmínek totiž předpovídají dosud nepozorované fyzikální jevy, které představují žhavá témata současné fyziky. Proberme si je postupně.

Zákon zachování baryonového čísla

Baryonové číslo je aditivní kvantové číslo, které se zachovává ve všech pozorovaných interakcích mezi elementárními částicemi. Každý baryon má baryonové číslo rovné jedné a antibaryon minus jedné. Ačkoliv doposud nebyla žádná reakce narušující zachování baryonového čísla pozorována, tak teorie standardního modelu elementárních částic i některé teorie za hranicí tohoto standardního modelu narušení zachování baryonového čísla předpovídají. Ve standardním modelu mohou být za narušení baryonového čísla zodpovědné neporuchové procesy (předpovězené Gerardem 't Hooftem v roce 1976), které není možné popsat Feynmanovými diagramy a vycházejí z netriviální struktury elektroslabého vakua. Mezi tyto procesy patří například *sfaleron* nebo *instanton* a jejich pravděpodobnost závisí exponenciálně na teplotě. V současném vesmíru je pravděpodobnost uskutečnění těchto procesů zanedbatelná, avšak v raném vesmíru mohly být hojné.

Jiné procesy narušující zachování baryonového čísla musíme hledat za hranicemi standardního modelu, zejména v teoriích velkého sjednocení. V časech kratších než 10^{-35} s po vzniku vesmíru dosahovaly částice energií vyšších než 10^{16} GeV. Silná, slabá a elektromagnetická interakce tvořily jedinou interakci velkého sjednocení (tzv. GUT interakci). Existovaly supertěžké (zatím pouze hypotetické) bosony X a Y

schopné přeměňovat kvarky (q) na leptony (ℓ) a naopak. Takové interakce by měly způsobovat rozpad protonu několika možnými způsoby.

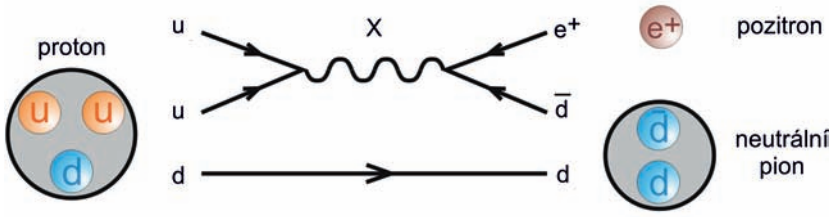
V současném vesmíru jsou tyto interakce extrémně potlačeny díky vysoké hmotnosti (10^{16} GeV) X a Y bosonů a předpovídaný poločas rozpadu protonu je (v závislosti na variantě GUT teorie) kolem 10^{34} let. Po rozpadu protonu v současné době pátrá řada experimentů. Jedná se o experimenty s velkým detekčním objemem, jako je například Super-Kamiokande, který využívá efektivní detekční objem 22 500 tun vody ($7{,}5\times10^{33}$ protonů) a ze kterého pocházejí zatím nejpřesnější odhady hranice doby života protonu. Experiment Super-Kamiokande vyloučil rozpad protonu v časech kratších než $1{,}4\times10^{34}$ let v rozpadovém kanále $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ a $5{,}9\times10^{33}$ let v kanále $p \rightarrow K^+ + \nu$. Existuje ale i řada dalších uvažovaných rozpadových kanálů. Tato experimentální data již vyloučila některé nejjednodušší GUT modely založené na symetrii SU(5). Připravovaný experiment Hyper-Kamiokande otestuje složitější modely teorie velkého sjednocení, které obsahují supersymetrii. Případné pozorování rozpadu protonu by přineslo nové informace nejen o raných fázích vesmíru, ale také o jeho vzdálené budoucnosti, kdy by v důsledku rozpadu protonů přestala atomární látka zcela existovat a naplnila se vize tepelné smrti vesmíru.

GUT – *Grand Unified Theory, teorie velkého sjednocení. Popisuje sjednocení elektroslabé a silné interakce při energiích 10^{16} GeV (GUT škála). Při vyšších energiích než 10^{16} GeV existovaly pouze GUT interakce a gravitační interakce. Teorie velkého sjednocení předpovídá zatím nepozorované procesy, jako je například rozpad protonu.*

Supersymetrie – *SUSY (SUper SYmmetry), symetrie mezi fermiony a bosony, která by se měla projevovat při vysokých energiích. Ke každému fermionu by měl existovat superpartner, který je bosonem, a naopak ke každému bosonu by měl existovat superpartner, který je fermionem. Názvy superpartnerů tvoříme příponou „ino" pro bosony a předponou „s" pro fermiony. Tedy například foton – fotino, elektron – selektron. Přestože se tyto superpartnery zatím nepodařilo experimentálně pozorovat na urychlovači LHC, představuje supersymetrie významnou ingredienci v teorii superstrun.*

Narušení C a CP symetrie

Samotné narušení zachování baryonového čísla není postačující podmínkou pro vznik vesmíru, kde převládá hmota nad antihmotou. Uvažujme hypotetický boson X, který se může rozpadnout na dva kvarky s pravděpodobností r nebo na anti-kvark a anti-lepton s pravděpodobností $1 - r$. Anti-boson $\overline{X}$ se pak rozpadá na dva antikvarky s pravděpodobností $\bar{r}$ a na lepton a kvark s pravděpodobností $1 - \bar{r}$. Pro přehlednost jsou všechny čtyři rozpady popsány v následující tabulce. Pokud jsou si pravděpodobnosti rozpadu částice a antičástice rovny, pak vznikne opět baryo-symetrický vesmír. Je tedy třeba, aby r a $\bar{r}$ byly různé, jinými slovy aby byla narušena symetrie mezi hmotou a antihmotou, tj. C symetrie. Přírodní zákony však ještě rozlišují levotočivé a pravotočivé částice a je tedy nutné, aby byla současně narušena



Jeden z uvažovaných rozpadů protonu na pozitron a neutrální pion. Neutrální pion je ve skutečnosti superpozicí kvarků u ū a d d̄. Takové rozpady předpovídá teorie velkého sjednocení.

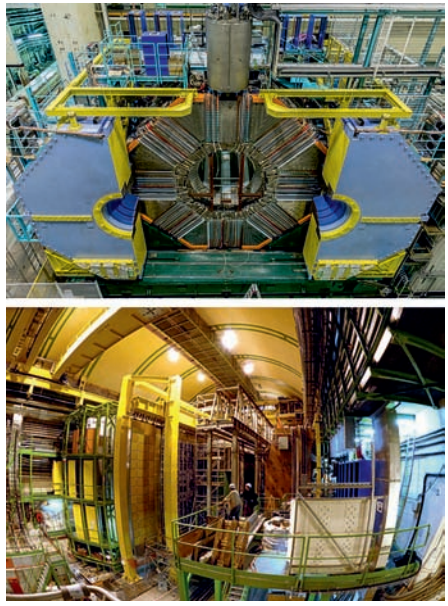
CKM matice – *unitární matice popisující sílu vazby mezi W bosonem a kvarky, popisuje mixáž mezi vlastními stavy hmotnosti kvarků a vlastními stavy působení slabé interakce. Je nazvaná podle počátečních písmen příjmení svých tvůrců (Cabibbo, Kobayashi a Maskawa).*

navíc symetrie mezi levým a pravým. Taková kombinovaná symetrie (částic a antičástic a levého a pravého směru) se označuje CP symetrie.

ROZPAD ČÁSTICE X	PRAVDĚPODOBNOST ROZPADU	BARYONOVÉ ČÍSLO
$X \rightarrow q\,q$	r	2/3
$X \rightarrow \overline{q}\,\overline{\ell}$	$1 - r$	−1/3
$\overline{X} \rightarrow \overline{q}\,\overline{q}$	$\overline{r}$	−2/3
$\overline{X} \rightarrow q\,\ell$	$1 - \overline{r}$	1/3

Ve standardním modelu jsou C a P symetrie maximálně narušeny ve slabých interakcích, avšak CP symetrie platí téměř ve všech procesech. Narušení CP symetrie bylo pozorováno u rozpadů neutrálních kaonů (1964, Cronin a Fitch) a B mezonů (2001, experimenty BaBar a Belle). Studium procesů narušující CP symetrii je v ústředním zájmu současné fyziky a provádí se například na experimentu Belle II (v současné době probíhá upgrade) v Japonské laboratoři KEK nebo na experimentu LHCb v CERNu. Ve standardním modelu elementárních částic popisuje narušení CP symetrie nenulová fáze v CKM matici pro směšování kvarků. Tato CP narušující fáze v CKM matici je přítomna pouze v teoriích se třemi a více generacemi kvarků (standardní model má tři generace kvarků). Pozorovaná míra narušení CP symetrie je však o mnoho řádů menší, než je třeba pro vysvětlení přebytku hmoty nad antihmotou ve vesmíru. Pokud baryogeneze proběhla tak, jak si představujeme, pak musí existovat mechanizmus, který výrazněji narušuje CP symetrii a je prozatím mimo dosah energií současných experimentů.

Experimenty Belle II (nahoře) a LHCb (dole) zkoumají procesy narušení CP symetrie. Zdroj: Belle, LHCb.



Procesy probíhající mimo termodynamickou rovnováhu

Systém v termodynamické rovnováze si lze představit jako systém mnoha částic, mezi kterými probíhají interakce a k nim inverzní interakce stejnou rychlostí. V raném vesmíru probíhala těchto procesů

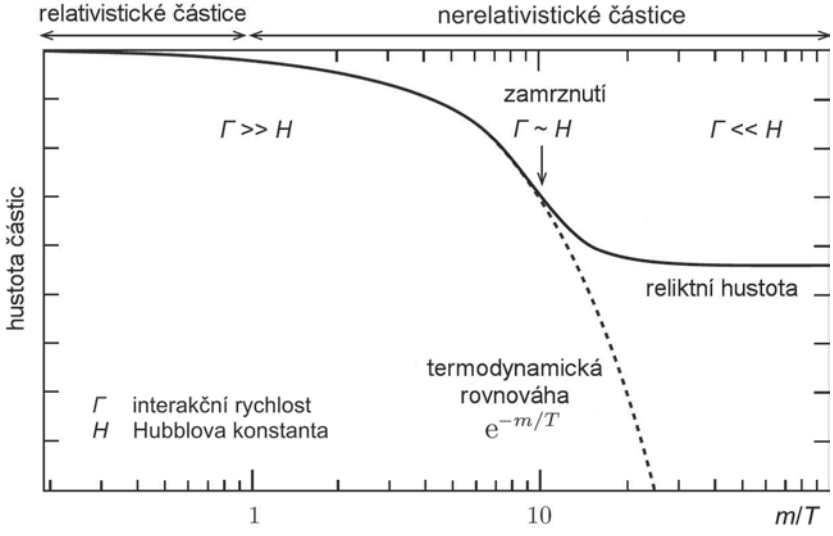
celá řada, příkladem může být kreace a anihilace elektronů a pozitronů ($e^+ + e^- \leftrightarrow \gamma + \gamma$), interakce mezi neutriny, elektrony a pozitrony ($\nu + \bar{\nu} \leftrightarrow e^+ + e^-$), nebo vzájemná interakce fotonů s prvními atomy vodíku ($H + \gamma \leftrightarrow p + e^-$). Podobných reakcí se mohly účastnit také zatím hypotetické X bosony, které mohou vznikat srážkou dvou kvarků a rozpadat se tak, že se nezachovává baryonové číslo. Systém v termodynamické rovnováze má maximální entropii, makroskopicky se v čase nevyvíjí, a proto v takovém systému není možné dynamicky vygenerovat přebytek hmoty nad antihmotou. Baryogeneze proto vyžaduje, aby procesy narušující baryonové číslo a C a CP symetrii probíhaly mimo termodynamickou rovnováhu. Tato třetí Sacharovova podmínka je splněna tím, že se vesmír v raných fázích rozpínal, ochlazoval, a tak definoval šipku času pro procesy, které nakonec způsobily baryonovou asymetrii. Stavu po narušení termodynamické rovnováhy se někdy říká „zamrznutí“ (anglicky freeze-out) a v tomto stavu se již hustota daného typu částic nemění (v souřadnicích, které se rozpínají spolu s vesmírem). K zamrznutí ve vesmíru došlo v historii mnohokrát a často po něm zbyly relikty jako například reliktní neutrina (oddělená 1 s po vzniku vesmíru), reliktní elektromagnetické záření (zhruba 400 000 let po vzniku vesmíru). Je dost dobře možné, že baryonová hmota vznikla podobným způsobem.

Feynmanovy diagramy – *grafické zkratky pro jednotlivé části členů poruchové řady při řešení rovnic kvantové teorie pole. Tyto zkratky lze interpretovat jako elementární procesy interakce kvarků, leptonů a polních částic.*

Majoranova částice – *fermion, který je sám sobě antičásticí. Dodnes nevíme, zda patří neutrino k takovýmto částicím.*

Závěr

Přestože standardní model částicové fyziky obsahuje procesy narušující zachování baryonového čísla i narušení CP symetrie, tak tyto efekty nejsou dostatečně silné na to, aby vysvětlily baryonovou asymetrii ve vesmíru. Baryogeneze je ovšem jen „hmotnější“ polovinou příběhu. Atomární látku tvoří také leptony (elektrony), kterých je stejný počet jako protonů (objekty ve vesmíru jsou elektricky neutrální). Vznik přebytku leptonů nad anti-leptony (leptogeneze) tedy musely provázet podobné procesy, jako



Efekt zamrznutí hustoty částic. V raném vesmíru měly částice často vyšší tepelnou energii než klidovou energii, docházelo ke srážkám, při kterých částice vznikaly nebo anihilovaly. Jak vesmír expandoval a chladl, tyto interakce ustaly a hustota částic v objemu, který se rozpínal spolu s vesmírem, zůstala konstantní.



Umělecká vize baryogeneze v podání profesora fyziky Michaela Ramsey-Musolfa z Wisconsinské univerzity v Madisonu ve Spojených státech.

vznik baryonové asymetrie s tím rozdílem, že místo baryonového čísla se narušovalo zachování leptonového čísla, kde může hrát velkou roli fyzika neutrin (zejména pokud je neutrino majoranovská částice). Je tedy možné, že leptogeneze a baryogeneze spolu úzce souvisí. Možná časem, až experimentální technika pokročí, bude možné testovat více teorií a jednoho dne bude možné správně vypočítat asymetrii mezi hmotou a antihmotou ve vesmíru stejně snadno, jako je dnes možné vypočítat zastoupení lehkých prvků, které vznikly v průběhu primordiální nukleosyntézy.

■ **Miroslav Havránek, 29. 7. 2016, AB 27/1016, AB 28/2016**

Existoval velký třesk?

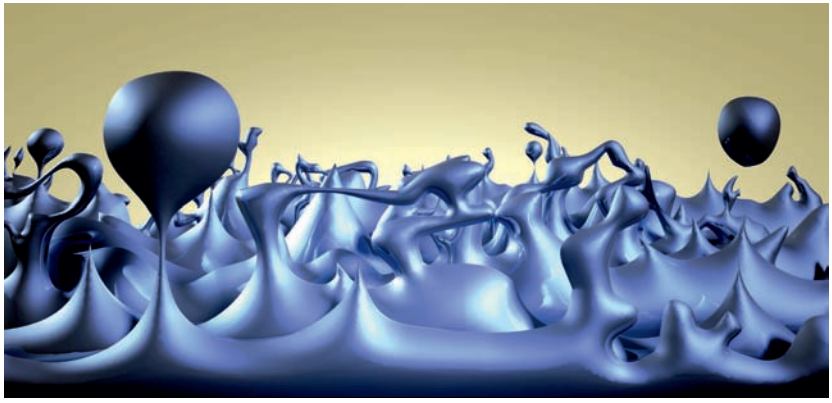
Od roku 1929, kdy Edwin Hubble objevil expanzi vesmíru, víme, že se vesmír rozpíná. V roce 1998 jsme se dozvěděli, že přibližně od poloviny existence vesmíru je tato expanze zrychlená. Téměř okamžitě se nabízí úvaha: pokud se vesmír rozpíná, dříve musel být hustší, teplejší a menší. Limitně dojdeme k tomu, že vesmír musel mít počátek, kdy měl nekonečnou hustotu, teplotu a nacházel se v nulovém objemu. Taková úvaha má dvě základní vady. První je nulový objem. Dosud nevíme, zda má vesmír objem konečný, či nekonečný. V druhém případě byl dříve vesmír hustší a teplejší, nikoli však menší. Druhou vadou na kráse je počáteční singularita (nekonečná teplota a hustota). Extrapolaci zpět v čase nemůžeme provádět na základě našich znalostí gravitační interakce. V extrémně hustých a horkých podmínkách počátku vesmíru se nepochybně uplatňovaly i kvantové jevy, které „zabránily“ nekonečným hodnotám. Například Pauliho vylučovací princip pro fermiony neumožňuje, aby tyto částice sdílely stejné kvantové stavy. Na počátku měla vliv nejen gravitační interakce, kterou v současnosti dobře popisuje obecná teorie relativity, ale i elektřina a magnetizmus, silná interakce a slabá interakce, které jsou dobře popsány kvantovými zákony. Můžeme tedy pouze extrapolovat, že díky probíhající expanzi musel být vesmír na počátku velmi horký a hustý, a nacházel se proto v plazmatickém skupenství.

Kvantová gravitace – *teorie pokoušející se spojit zákony kvantové teorie, která dobře popisuje elektromagnetickou, silnou a slabou interakci, se současnou teorií gravitace, obecnou relativitou. Jednou z možností, ale ne jedinou, je teorie strun. Neexistují ale žádná experimentální fakta, která by alespoň naznačovala, že nejde o slepou uličku. Další, opět neověřenou možností, je Verlindeho teorie, která gravitaci nepovažuje za samostatnou interakci, ale za makroskopické projevy dějů v mikrosvětě souvisící s nárůstem entropie.*

První úvahy

První, kdo uvažoval o horkém původu světa, byl belgický kněz abbé Georges Henri Lemaître. Počátečnímu horkému stavu vesmíru říkal prvotní atom. Lemaître uvažoval o expanzi dokonce rok před Hubblovým objevem, své výsledky ale publikoval v belgickém časopise, který kosmologická komunita neznala a nečetla.

Po druhé světové válce se horkým a hustým původem vesmíru podrobně zabývali američtí fyziko-



V předinflační fázi by měl být vesmír zaplněný divokými fluktuacemi nejrůznějších kvantových polí. Tomuto stavu říkáme kvantová pěna. I v dnešní době jsou ve vakuu podobné fluktuace polí, ale zastoupené v mnohem menší míře. Zkoumat je můžeme jen nepřímo. Zdroj: NASA/ Chandra.

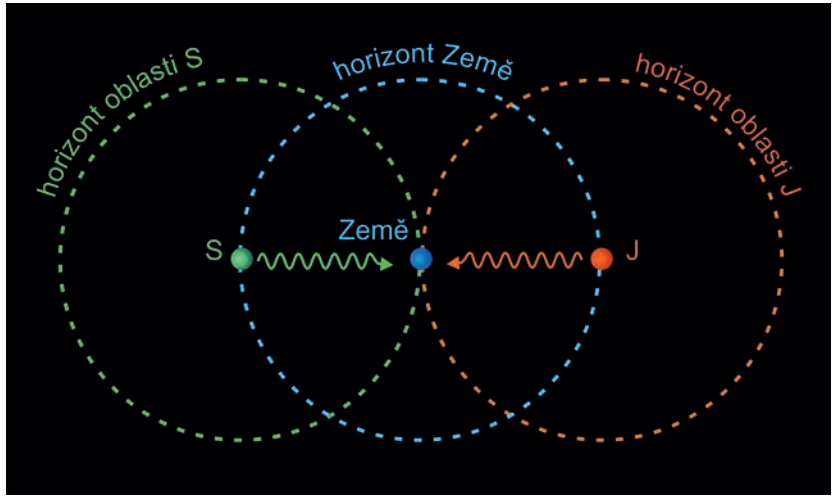
Gravitační interakce – *viz strana 106.*
Elektromagnetická interakce – *interakce působící na všechny částice s elektrickým nábojem. Má nekonečný dosah, mezi tělesy ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Polními částicemi jsou fotony, které vytvářejí mezi nabitými tělesy elektromagnetické pole. Nemají 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. na 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 mo-*

vé George Gamow, Ralph Alpher a Robert Herman. Počítali, jak v prvopočátečním plazmatu vznikala první atomová jádra a jak se takový horký a hustý vesmír choval. Elektromagnetické záření bylo rozptylováno na volných elektronech a neustále probíhal proces pohlcení a opětovného vyzáření. Počáteční vesmír byl pro elektromagnetický signál neprůhledný, ne nepodobně našemu Slunci, které je tvořeno také neprůhledným plazmatem, nebo kanálu blesku.

Teorie horkého původu světa měla značné množství odpůrců. Jedním z nich byl britský fyzik Fred Hoyle, který celou teorii v roce 1949 označil souslovím *Big Bang* – velké plácnutí, velký nesmysl. Negativně laděný název se ovšem ujal a dnes, kdy je horký původ světa nezpochybnitelný, je běžně používán pro plazmatickou éru vesmíru, která trvala přibližně 400 000 roků. Poté vesmír ochladl natolik, že se plazma přeměnilo v neutrální plyn, elektrony se staly součástí atomárních obalů a elektromagnetické záření začalo vesmírným prostředím volně procházet. Toto záření uvolněné v závěru velkého třesku dnes umíme zachytit a analyzovat – jde o tzv. reliktní záření, které je poselstvím z konce velkého třesku.

Na sever a na jih

Standardní model velkého třesku má ale v počátečním období některé problémy. Už jsme se zmínili o fyzikálně nesmyslné singularitě. Představme si nyní, že se zahledíme na noční oblohu a nějakým velmi dobrým přístrojem se budeme dívat na sever a poté na jih. Rozhodně nebudeme tuto úvahu dělat se směrem západním ani východním, kde je situace politicky značně nejistá. Ve vzdálenosti kolem 14 miliard světelných roků uvidíme struktury z konce velkého třesku. Dál se v elektromagnetickém spektru nedostaneme, neboť je pro něj prostředí velkého třesku neprůhledné. V obou směrech uvidíme obdobný obraz. Dnes už v těchto oblastech dávno velký třesk není a vesmír



Na obrázku jsou zobrazeny světelné horizonty (vzdálenosti, do kterých světlo doletí za dobu existence vesmíru) pro Zemi a oblasti S (sever) a J (jih). Za tento horizont nevidíme, i když tam vesmír pokračuje dál.

tam pokračuje dál do oblastí, které nevidíme, neboť signál z nich neměl dostatek času, aby k nám dolétl. Musíme si uvědomit, že se díváme „do minulosti“. Dnes je tam vesmír podobný tomu našemu a možná tam existují nějaké inteligentní bytosti, které se naopak dívají naším směrem a vidí konec velkého třesku u nás.

Námi pozorované oblasti na severu a na jihu od sebe dělí časová propast přibližně 28 miliard roků (takovou dobu by muselo letět světlo, aby dolétlo jedné oblasti do druhé). Vesmír je ale starý necelých 14 miliard roků, proto nikdy nemohl mezi těmito oblastmi prolétnout elektromagnetický signál. Oblasti nejsou kauzálně spojeny, nikdy spolu nemohly komunikovat. Přesto v nich vidíme obdobné struktury. Jak je to možné? Jak je možné, že vesmír na severu je stejný jako vesmír na jihu, aniž by se tyto oblasti mohly někdy v minulosti „domluvit“ – tedy komunikovat spolu? Takových kauzálně nespojených oblastí je v dnešním vesmíru obrovské množství. Hovoříme o tzv. problému horizontu. Fyzikové se snažili hledat mechanizmy, které by umožnily kauzálně nespojeným oblastem v minulosti nějak komunikovat. Tím by se vysvětlil fakt, že v různých směrech vidíme zhruba podobný obraz vesmírných struktur.

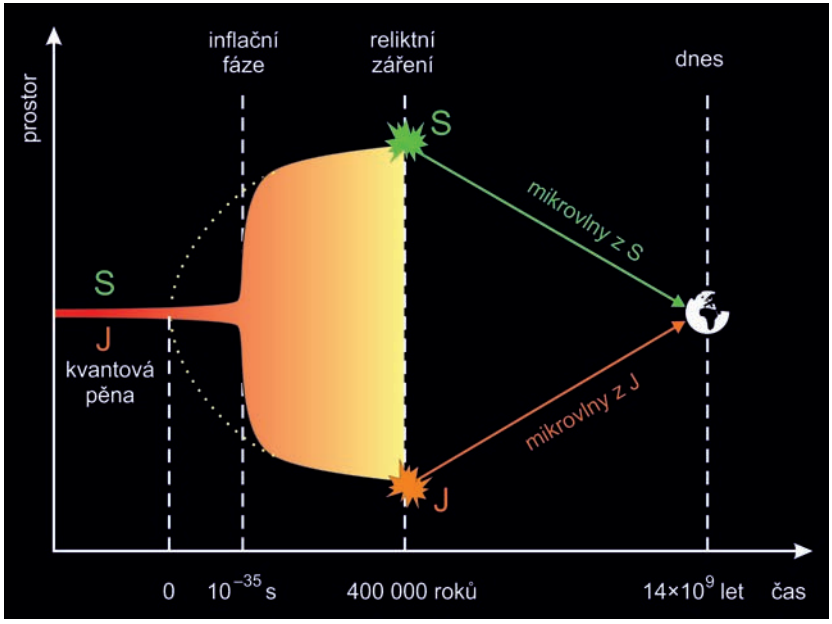
Inflace a časová nula

Problém horizontu je jen jedním z více problémů standardního modelu. V roce 1979 ukázal Alan Guth, že by většinu z těchto problémů vyřešila inflační fáze. Pokud by v raném vesmíru existovalo krátké období prudké expanze, mohly se dnes kauzálně nespojené oblasti „domluvit“ v období před inflací. Inflační model prošel mnoha modifikacemi, autory dnešního inflačního scénáře jsou Andrej Linde, Paul Steindhardt a Andreas Albrecht. Inflace se zpravidla klade do období 10^{-35} sekundy, kdy se podle našich představ měla oddělovat silná interakce od ostatních. Tento fázový

hou působit samy na sebe. Barevný náboj na malých vzdálenostech (při vysokých energiích) slábne a kvarky se chovají jako volné částice. Hovoříme o tzv. asymptotické volnosti kvarků. Teorií silné interakce se nazývá kvantová chromodynamika (QCD).

Slabá interakce – *interakce s konečným dosahem, který je přibližně 10^{-18} 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 GeV až 90 GeV. Typickým slabým procesem je například beta rozpad neutronu. Teorie slabé interakce se nazývá kvantová flavourdynamika (QFD).*

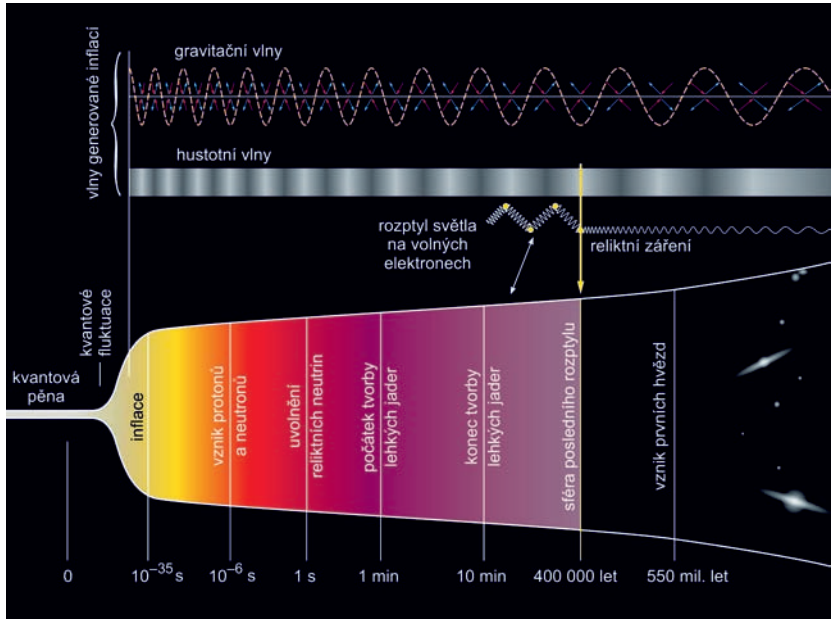
Na obrázku jsou vyznačené dvě oblasti S (severní) a J (jižní), které dnes nejsou kauzálně spojené. Pokud existovala inflační fáze, mohly spolu tyto oblasti komunikovat před ní. Nula na časové stupnici je volena jako zpětná extrapolace poinflační expanze a je zřejmé, že nemá žádný podstatný význam.



Pauliho vylučovací princip – *dva fermiony (částice s poločíselným spinem) 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. Neochota fermionů obsadit stejný stav vede na kvantový tlak, který je protiváhou gravitaci v bílých trpaslících (zde ho vytvářejí elektrony) a neutronových hvězdách (zde je důsledkem Pauliho vylučovacího principu pro neutrony). Pauliho vylučovací princip je neslučitelný s počáteční singularitou při velkém třesku.*

přechod by mohl mít za následek prudkou expanzi rozměrů, která trvala 10^{-37} sekund a v jejím průběhu expandovaly rozměry všech oblastí faktorem 10^{30} až 10^{50}. Pokud byste si z předinflační látky uhnětli malé zrnko prachu, zvětšilo by se v průběhu inflace na velikost dnes pozorovatelného vesmíru.

Nevíme, zda inflační fáze ve vesmíru proběhla, či ne. Nevíme ani, jaké fyzikální jevy za ni mohly být odpovědné. Hovoří se například o inflatonovém poli – kvantovém poli, které by mohlo inflaci vybudit. Mnozí vědci by si ji přáli, neboť vyřeší řadu problémů standardního modelu. Přání ale k platnosti teorie samozřejmě nestačí. Pokud inflační fáze existovala, znamenala faktický počátek našeho vesmíru. Časová nula ve standardním modelu vznikla jako extrapolace dnes pozorované expanze do minulosti. Inflace ale znamená jakýsi fázový přechod. V průběhu inflace vznikal vesmír, jak ho dnes vnímáme a známe. Před ní mohl existovat jiný vesmír s jinými vlastnostmi, možná vesmír plný kvantových fluktuací, jakési kvantové pěny. Nevíme, jak dlouho tato předvesmírná fáze mohla existovat a zda v ní měl pojem času vůbec nějaký smysl. Co je ale hlavní: představa počáteční singularity je v inflačních modelech zbytečná.



Některé důležité etapy života vesmíru. Zdroj: Wikipedia/ Yinweichen, upraveno, doplněno.

Gravitační a hustotní vlny

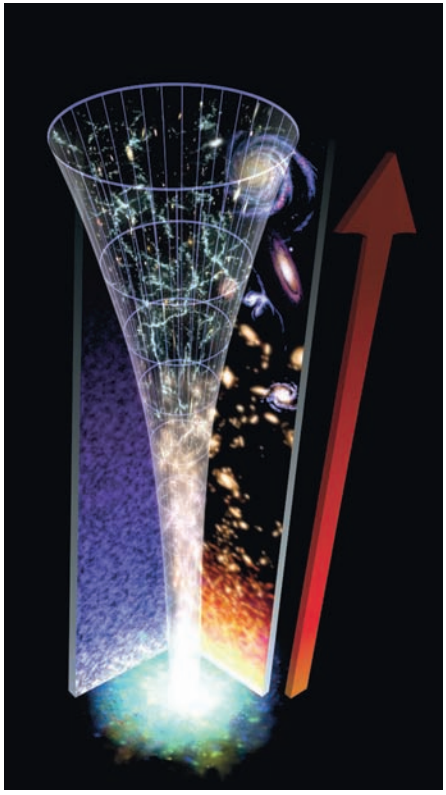
Při prudkém zvětšení kvantových fluktuací by se měl v průběhu inflace čas a prostor rozvibrovat charakteristickým způsobem. Tomuto periodickému rozvlnění časoprostoru říkáme reliktní gravitační vlny. Jiné gravitační vlny s odlišnou závislostí intenzity na vlnové délce předpovídají i další alternativní modely vzniku světa (například ekpyrotický, v němž vesmír vznikl dotykem dvou pravesmírů v mnohorozměrném světě). Reliktní gravitační vlny – pokud existují – v sobě nesou cenné informace o vzniku vesmíru. Měly by mít velmi dlouhou vlnovou

délku, což znamená, že gravitačními anténami typu LIGO nebo Virgo nejsou polapitelné. Naděje se ale vkládají do obřích interferometrů postavených ve vesmíru, jedním z nich je eLISA, trojice sond svítících na sebe lasery na vzdálenost milion kilometrů. Druhou možností je nepřímý záchyt otisku těchto reliktních gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. O obou možnostech jsme podrobněji diskutovali v kapitole Reliktní gravitační vlny.

Existoval velký třesk?

Tahle otázka je poněkud záludná a správná odpověď může být kladná i záporná. Jde totiž o to, co velkým třeskem nazýváme. Pokud jím rozumíme počáteční singularitu, ze které se zrodil vesmír, je vysoce pravděpodobné, že nic takového skutečně neexistovalo. Podle nám známých zákonů by kvantové jevy vzniku takové singularity zabránily. Pokud ale velkým třeskem nazýváme počáteční horké (plazmatické) období, je to něco jiného. O této fázi vesmíru máme řadu experimentálních důkazů. Pozorujeme reliktní záření – svit z konce velkého třesku, přímým důsledkem procesů probíhajících při velkém třesku je procentuální zastoupení lehkých prvků, velký třesk umíme napodobit na velkých urychlovačích, snažíme se nalézt reliktní neutrina a polapit reliktní gravitační vlny. O horkém původu světa tedy není pochyb, a pokud velkým třeskem nazýváme prvních 400 tisíc roků, kdy byl vesmír v plazmatickém skupenství, nepochybně velký třesk existoval.

■ **Petr Kulhánek, 14. 3. 2015, AB 11/2015, aktualizováno 2018**

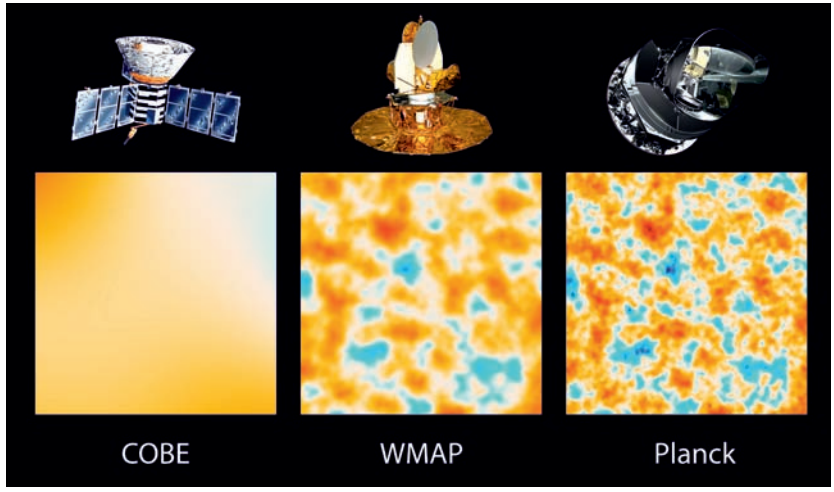


Šipka času. Zdroj: Goddard Media/NASA.

Fenomenální observatoř
Planck

COBE – *Cosmic Background Explorer, družicová observatoř americké NASA vypuštěná v roce 1989. Družice zjistila, že reliktní záření má teplotu 2,73 K a že jde s vysokou přesností o záření absolutně černého tělesa. V roce 1992 družice objevila fluktuace reliktního záření a jeho anizotropii způsobenou naším vlastním pohybem. Rozlišovací schopnost COBE byla 7°. Sonda fungovala 4 roky, deaktivována byla v roce 1993.*

Reliktní záření z konce velkého třesku je jedním z nejvýznamnějších zdrojů informací o raném vesmíru. Postupně ho zkoumaly z vesmíru tři přístroje: americká družice COBE, americká sonda WMAP a evropská sonda Planck. Každá z těchto observatoří výraznou měrou přispěla k našemu poznání počátku světa. Družice COBE startovala v roce 1989, proměřila závislost intenzity reliktního záření na vlnové délce a prokázala, že jde skutečně o reliktní záření o teplotě 2,73 K. V roce 1992 objevila anizotropii tohoto signálu, tj. fakt, že v různých směrech je reliktní záření různě teplé (jde o nepatrnou změnu až na pátém místě za desetinnou čárkou) a je v něm přítomen otisk zárodečných struktur (tzv. fluktuace) z konce velkého třesku, které se později vyvinuly v dnešní útvary – hvězdy, galaxie a kupy galaxií. Sonda WMAP z roku 2001 dokázala jako první naměřit tak detailní data, že bylo možné udělat v roce 2003 jejich frekvenční analýzu. Z ní jsme se dozvěděli stáří vesmíru, jeho zakřivení a procentuální zastoupení jednotlivých entit ve vesmíru. Sonda WMAP také měřila polarizaci reliktního záření a z ní vyplynulo, kdy ve vesmíru vznikaly první hvězdy. V roce 2009 odstartovala na svou misi sonda Planck, která na palubě nesla třetí generaci sofistikovaných přístrojů. Sondě se podařilo zatím nejpodrobněji zmapovat reliktní záření, ale nejen to. Objevila i mnoho dalších zajímavých astronomických jevů.



Porovnání fluktuací reliktního záření pozorovaných na části oblohy o hraně 10° observatořemi COBE, WMAP a Planck. Zdroj: NASA/ESA.

Jaká byla sonda Planck?

Před zahájením skenování byly přístroje kalibrovány za pomoci rádiového signálu z radiačních pásů Jupiteru. Jde o velmi silný a dobře rozpoznatelný signál známých vlastností, který byl objeven už v roce 1954. Sonda Planck snímkovala oblohu v devíti frekvenčních pásmech se středy frekvencí

	COBE	WMAP	PLANCK
start	18. 11. 1989	30. 6. 2001	14. 5. 2009
deaktivace	23. 12. 1993	28. 10. 2010	23. 10. 2013
umístění	oběžná dráha	L2	L2
rozlišení ΔT	400 μK	20 μK	1 μK
rozlišení $\Delta \varphi$	7°	15′	5′
pásma	3	5	9

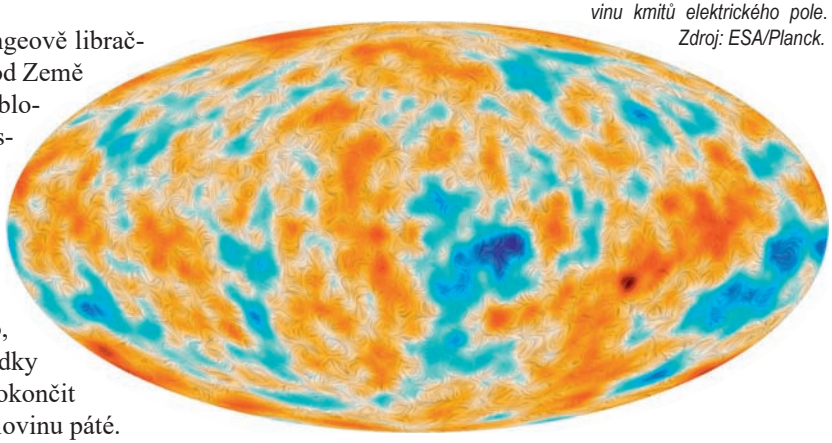
od 30 do 857 gigahertzů, čímž pokryla vlnové délky v rozsahu 0,2 až 10 milimetrů. Množství pásem je důležité pro další zpracování signálu, při němž se odfiltrovávají jiné složky, než je reliktní záření (například svit galaxií, volných elektronů nebo prachu z roviny Mléčné dráhy).

Mikrovlnný signál soustředilo zrcadlo o průměru 1,5 metru do ohniska složeného z řady radiometrů – antének ve tvaru malých trychtýřků. Čtyřstupňové chlazení umožnilo teplotu ohniska udržet na 0,1 kelvinu. Poslední chladicí stupeň využíval změnu teploty kapalného helia při jeho expanzi po protlačení kapilárami, takže životnost sondy byla dána především zásobou kapalného helia. Z ohniska byl signál veden mikrovlnnými vlnovody ke zpracování, při němž bylo možné – díky rozdělení signálu do dvou svazků s odlišnou rovinou kmitů elektrického pole – určit polarizaci signálu.

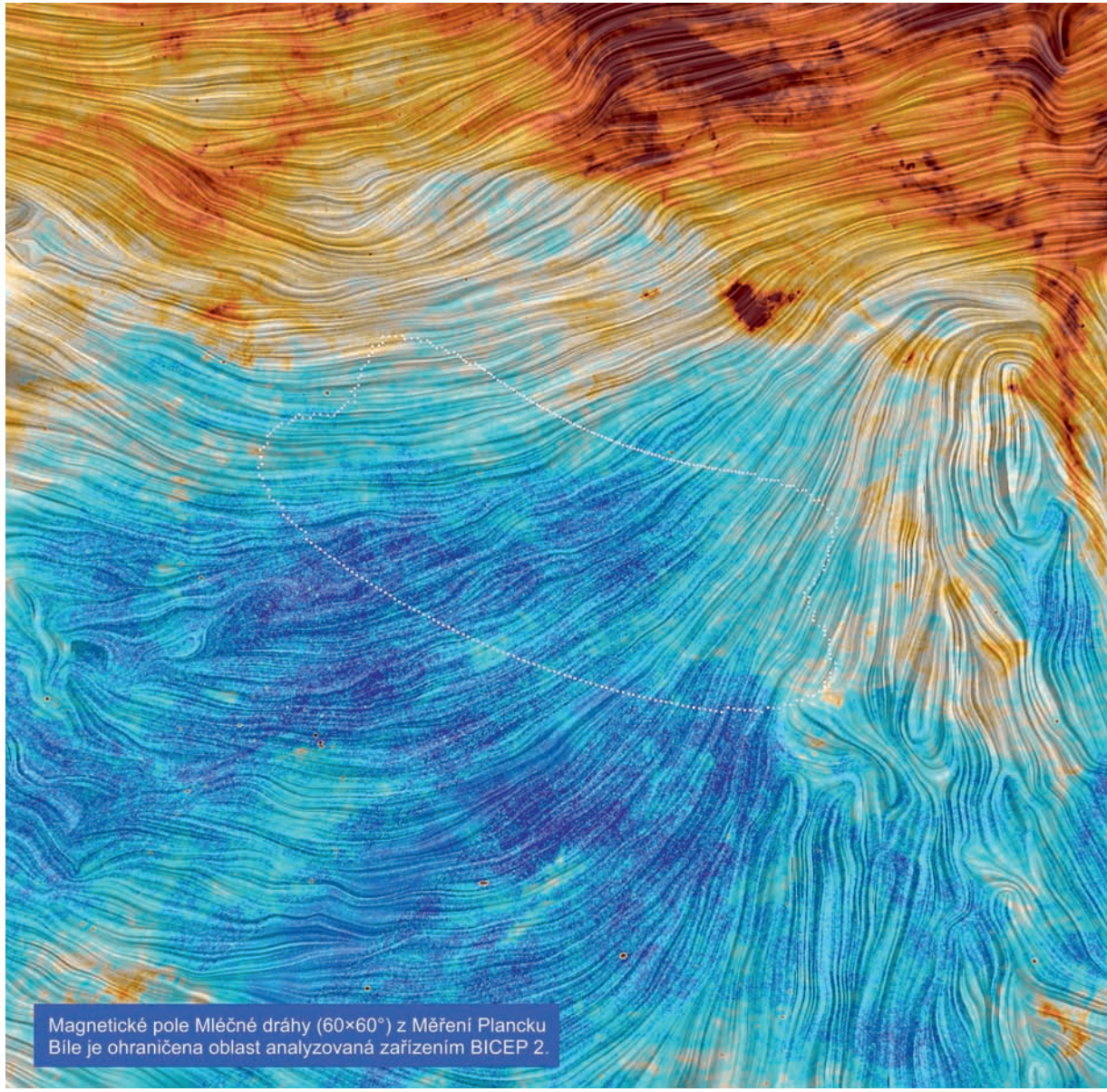
Sonda Planck pracovala v Lagrangeově libračním bodě L2 (1,5 milionu kilometrů od Země směrem od Slunce), kde skenovala oblohu v pásech širokých 15°. Jedno oskenování trvalo zhruba půl roku. Při skenování se využívaly tři pohyby: 1) vlastní rotace sondy, 2) oběh sondy kolem libračního bodu a 3) pohyb sondy spolu s libračním bodem okolo Slunce. Původně bylo plánováno, že sonda Planck uskuteční dvě přehlídky oblohy, ve skutečnosti se podařilo dokončit čtyři celé přehlídky a zaznamenat polovinu páté.

WMAP – *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, sonda americké NASA z roku 2001, která pořídila podrobnou mapu fluktuací reliktního záření s úhlovým rozlišením kolem 15′, což umožnilo provedení frekvenční analýzy. Zrcadlo sondy mělo rozměry 1,4 × 1,6 m a teplota chlazené části byla nižší než 95 K. Sonda byla umístěna v Lagrangeově bodě L2 soustavy Země-Slunce, kde pracovala do roku 2010.*

Planck – *mikrovlnná observatoř Evropské kosmické agentury ESA, která byla vynesena do vesmíru v roce 2009. Byla určena k výzkumu fluktuací reliktního záření a monitorování vesmíru v mikrovlnné oblasti. Měla úhlovou rozlišovací schopnost 5′. Oblohu snímkovala od 0,2 mm do 10 mm. Zrcadlo sondy mělo rozměry 1,9 × 1,5 m. Teplotu vysokofrekvenční části ohniska se podařilo po dobu dvou let udržet na extrémně nízké hodnotě 0,1 K. Činnost sondy byla ukončena v roce 2013.*



Mapa polarizace reliktního záření získaná z dat pořízených sondou Planck. Linie na mapě reprezentují rovinu kmitů elektrického pole. Zdroj: ESA/Planck.



Magnetické pole Mléčné dráhy (60×60°) z Měření Plancku
Bíle je ohraničena oblast analyzovaná zařízením BICEP 2.

Skvělé výsledky

Přestože byla sonda Planck určena především k pozorování mikrovlnného záření z konce velkého třesku, přinesla obrovské množství nových poznatků. Především se jí podařilo vytvořit kompletní mapu mikrovlnné oblohy v rozsahu vlnových délek od 0,2 do 10 milimetrů, na níž na první pohled upoutá svítící prach v Mléčné dráze, rozsáhlá molekulární mračna v Hadonoši a Perseu, radiogalaxie, Magellanova mračna, kvazary a mnohé další objekty. Na základě práce observatoře Planck vznikl katalog kompaktních objektů zářících v mikrovlnném oboru, který nemá svým rozsahem obdoby.

Sonda Planck detekovala spirální ramena Velkého Magellanova oblaku – trpasličí galaxie nacházející se v blízkosti naší Mléčné dráhy, která je patrná i pouhým okem na jižní obloze. Dále se jí podařilo podrobně zmapovat anomální mikrovlnnou emisi galaktického prachu. Z dat sondy je možné pořídit detailní snímky molekulárních oblaků, v nichž se rodí hvězdy. V datech jsou ale ukryty i informace o velmi vzdáleném vesmíru. Horké řídké plazma mezi galaxiemi těch nejvzdálenějších kup a nadkup ovlivňuje signál reliktního záření a vytváří v něm charakteristické oblasti s posunutou frekvencí (tzv. Sunjajevův-Zeldovičův jev). Z jejich analýzy bylo možné objevit mnoho extrémně vzdálených nadkup galaxií, jejichž detekce by ve vizuálním oboru byla zcela vyloučená. Reliktní záření se na své pouti také pohybuje průhlednými oblastmi zaplněnými temnou hmotou. Tyto oblasti sice elektromagnetický signál snadno propouštějí, ale posunou a zdeformují fluktuace obsažené v signálu. Analýza pozměněných fluktuací přináší cenné informace o rozložení temné hmoty ve vesmíru.

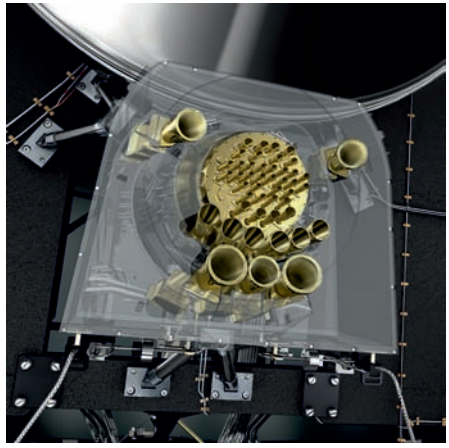
Sonda Planck skenovala oblohu v devíti frekvenčních pásmech. U většiny zdrojů je známa jejich frekvenční závislost, proto bylo možné matematickými metodami rozumně oddělit jednotlivé zdroje signálu a získat extrémně podrobnou mapu fluktuací reliktního záření. První verze byla publikována v roce 2013. Sonda pořizovala i data o polarizaci záření, v roce 2015 byla zveřejněna podrobná mapa polarizace reliktního záření. Z těchto dat vyplynulo, že polarizace reliktního záření pozorovaná v roce 2014 zařízením BICEP II na jižním pólu nijak nesouvisí s reliktními gravitačními vlnami, ale je způsobena magnetickým prachem v rovině Mléčné dráhy. Prachová zrnka v sobě obsahují atomy železa a chovají se jako malé magnety precedující kolem siločar našeho galaktického pole. Přitom vydávají výrazně polarizovaný

Librační bod L2 – *jeden z pěti bodů v sousedství dvou obíhajících hmotných těles, ve kterých je gravitační a odstředivá síla vyrovnána. Polohu těchto bodů poprvé vypočítal italsko-francouzský matematik Joseph-Louse Lagrange, proto se jim říká Lagrangeovy body. Bod L2 soustavy Země-Slunce je vzdálený od Země 1 500 000 km ve směru od Slunce.*

Sunjajevův-Zeldovičův jev – *nízkoenergetické mikrovlnné fotony reliktního záření získávají energii inverzním Comptonovým jevem při průletu horkým mezigalaktickým plynem v nadkupách galaxií. Tuto změnu lze rozpoznat ve spektru reliktního záření pozadí.*

Start sondy Planck proběhl 14. května 2009 z kosmodromu v jihoamerickém Kourou ve Francouzské Guyaně. Na palubě nosné rakety Ariane byl ještě infračervený dalekohled Herschel. Zdroj: ESA.





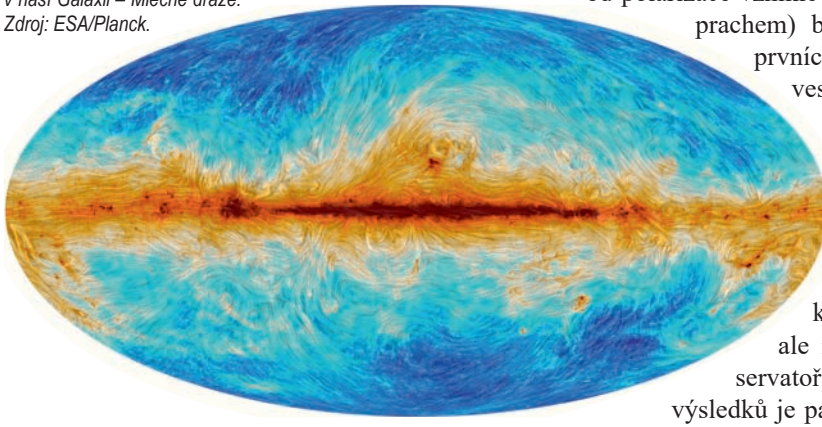
Ohnisková rovina sondy Planck s radiometry. Zdroj: ESA; grafika: AOES Medialab.

NĚKTERÁ DATA ZE SONDY PLANCK (2018)	
stáří vesmíru	13,8 miliardy roků
trvání velkého třesku	380 tisíc roků
vznik prvních hvězd	550 milionů roků
atomární látka	4,8 %
temná hmota	25,8 %
temná energie	69,4 %

elektromagnetický signál, který má shodou okolností vlnovou délku v okolí jednoho milimetru – přesně tam, kde je maximum signálu reliktního záření. Vše špatné je ale pro něco dobré. Z polarizace signálu bylo možné určit průběh siločar magnetického pole Galaxie v těch oblastech, kde se nachází magnetizovaný prach. Znalost magnetického pole Galaxie je velmi důležitá při analýze směru, odkud přicházejí nabité částice kosmického záření, jejichž pohyb magnetické pole dominantně ovlivňuje, a částice proto nepřilétají ze směru od zdroje.

Další část polarizace reliktního záření je způsobena volnými elektrony vznikajícími při interakci hvězdného větru prvních hvězd s okolním prostředím. Z polarizace tohoto typu (lze ji snadno odlišit od polarizace vzniklé reliktními vlnami či magnetizovaným prachem) bylo přesně datováno období vzniku prvních hvězd na 550 milionů let po počátku vesmíru.

Celooblohová mapa siločar galaktického pole pořízená na frekvenci 857 GHz ze záření magnetického prachu v naší Galaxii – Mléčné dráze. Zdroj: ESA/Planck.



Finále

Sonda Planck byla pojmenována po vynikajícím německém fyzikovi Maxu Planckovi (1858–1947). Jeho jméno nese nejen největší síť vědeckých ústavů v sousedním Německu, ale nyní i nejvýkonnější mikrovlnná observatoř všech dob. Z několika zde uvedených výsledků je patrné, jak enormní rozsah dat pořídila.



Jejich zpracování bude trvat ještě mnoho let a můžeme se dočkat i dalších zajímavých objevů. Na konci roku 2011 se sonda začala potýkat s nedostatkem kapalného helia pro chlazení. Od ledna 2012 fungovala už jen nízkofrekvenční část detektorů mikrovlnného záření. Ta poskytovala data až do října 2013. Pak byl vydán povel pro vypuštění zbytků paliva, odpojení baterií a provedeny další kroky k deaktivaci sondy. Poslední příkaz ukončující činnost sondy byl vyslán 23. října 2013.

■ **Petr Kulhánek, AB 11/2018, 30. 3. 2018**

Napříč Amerikou

IAU – *Mezinárodní astronomická unie (International Astronomical Union), organizace založená v roce 1919. Sdružuje astronomické společnosti z celého světa a vydává závazná rozhodnutí ohledně názvosloví těles a útvarů na nich. Vedení IAU sídlí v Paříži. Od roku 1922 (s výjimkou válečných let 1939–1948) zasedá IAU pravidelně každé tři roky na Valném shromáždění IAU. Mezinárodní astronomická unie přeřadila Pluto v roce 2006 z rodiny planet do rodiny trpasličích planet.*

Čas od času se vydáváme na expedice, při nichž navštěvujeme vědecká zařízení, která změnila náš pohled na svět nebo mají šanci to v budoucnosti udělat. V srpnu 2017 nastalo úplné zatmění Slunce, jehož pás totality se táhl napříč celými Spojenými státy. Byla to jedinečná příležitost uvidět nejen zatmění, ale navštívit i observatoř na Mt. Wilsonu, kde byla objevena expanze vesmíru a temná hmota, observatoř Mt. Palomar s pětimetrovým dalekohledem, který pořídil nejrozsáhlejší přehlídky oblohy své doby, Lowellovu observatoř ve Flagstaffu, kde bylo objeveno Pluto a poprvé změřen červený posuv galaxií, sluneční věže v Mohavské poušti, stavbu zcela nového dopravního prostředku Hyperloop, který stále vypadá více jako scifi než skutečnost, nejzachovalejší meteorický kráter v Arizoně či LIGO, unikátní přístroj, se kterým byly objeveny gravitační vlny. A samozřejmě, že byl v plánu i Yellowstonský národní park, Grand Canyon a mnoho dalších pozoruhodných míst. V této krátké reportáži Vám přinášíme některé postřehy z „vědecké“ části expedice.

Prolog

Osmnáct nadšenců z Aldebaranu projelo ve vypůjčených automobilech téměř 9 000 kilometrů a deset států Unie, aby zažili neslýchané, uzřeli nevídané a třikrát otestovali americký záchranný systém. Odhadem na to padlo 3 000 litrů benzínu a nemálo našich sil. Expedice začala dne 1. srpna 2017 a skončila o celý měsíc později. Na cestě jsme prozkoumali mnoho míst, která se významnou měrou zapsala do dějin astronomie, fyziky a techniky. Zpočátku by se průběh mise dal shrnout do jediné věty: kam došlápla noha Aldebaraňáka, tam v těsném závěsu přišla přírodní katastrofa rozsáhlých rozměrů. Na observatoři Mt. Wilson se při vstupu do kopule Hookerova dalekohledu přihnala bouře, blesky zapálily okolní les a observatoř jsme nahonem opouštěli míjejíce majáčky požárních sborů. Návštěva Muzea atomových testů v Nevadské poušti dopadla obdobně, jediným rozdílem bylo, že požární sbory byly přítomny už při našem příjezdu. Výprava za solární elektrárnou do Mohavské pouště nepřinesla tamnímu zařízení pohromu jen proto, že bystrá ostraha elektrárny rozpoznala blížící se nebezpečí a zahnala nás do bezpečné vzdálenosti. Dalším cílem byla stavba testovacího úseku tubusu dopravního systému Hyperloop v Nevadské

Jedním z cílů naší expedice byla návštěva Lowellovy observatoře ve Flagstaffu, kde byla objevena trpasličí planeta Pluto. Snímek pochází ze sondy New Horizons a je zatím nejpodrobnějším zobrazením Pluta. Zdroj NASA.



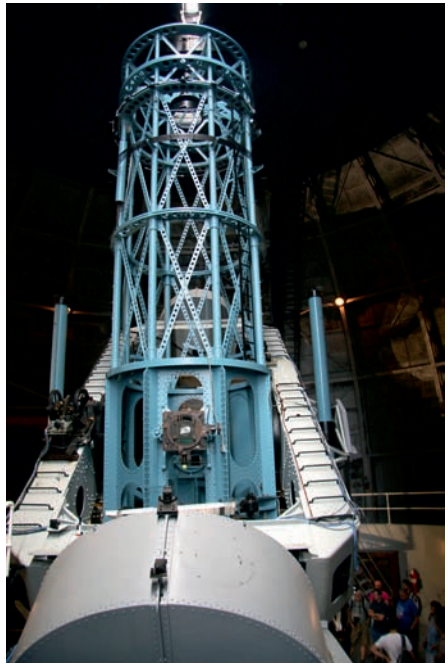

LIGO
Portland
Yellowstone
pozorování zatmění
Denver
Colorado Springs
Údolí smrti
Hyperloop
Hoover Dam
Las Vegas
Grand Canyon
Mt. Wilson
Flagstaff
Los Angeles
Mt. Palomar
PACIFIC OCEAN
SEATTLE
PORTLAND
SALT LAKE CITY
SACRAMENTO
SAN FRANCISCO
LOS ANGELES
SAN DIEGO
PHOENIX
Albuquerque
El Paso
Ciudad Juárez

poušti, kde prší opravdu výjimečně. I zde měla naše návštěva relativně plodný průběh. Obloha náhle potemněla a na vyprahlou půdu se začaly snášet první dešťové kapky…

Observatoř Mt. Wilson

V horách nad Los Angeles se vypíná hora Mt. Wilson, na níž je v současnosti řada astronomických zařízení. *Carnegie Institution of Washington*, která zdejší observatoř spravuje dodnes, zde v roce 1904 vybudovala sluneční pozorovatelnu se sluneční věží. V roce 1908 zde založil George Ellery Hale observatoř, která byla nejprve osazena dalekohledem o průměru 1,5 metru (60 palců). V roce 1917 přibyl slavný Hookerův dalekohled o průměru 2,5 metru (100 palců), který se stal symbolem světové astronomie první poloviny 20. století. V roce 2017 tomu bylo sto let, co dalekohledem prošlo první světlo. Tento dalekohled byl největším dalekohledem světa od roku 1917 do roku 1949. Edwin Hubble (ředitelem observatoře byl v letech 1919–1953) na něm v roce 1923 zjistil, že Velká mlhovina v Andromedě není mlhovinou, ale další galaxií. Zbořil tím dosavadní představy, že vesmír je tvořen jedinou galaxií – Mléčnou dráhou. V roce 1929 se stejným přístrojem objevil expanzi vesmíru a ve třicátých letech Fritz Zwicky temnou hmotu. Vzhledem ke světelnému znečištění oblohy blízkým Los Angeles už tento klenot není využíván k pozorování vzdálených vesmírných objektů, ale slouží ke komerčním účelům.

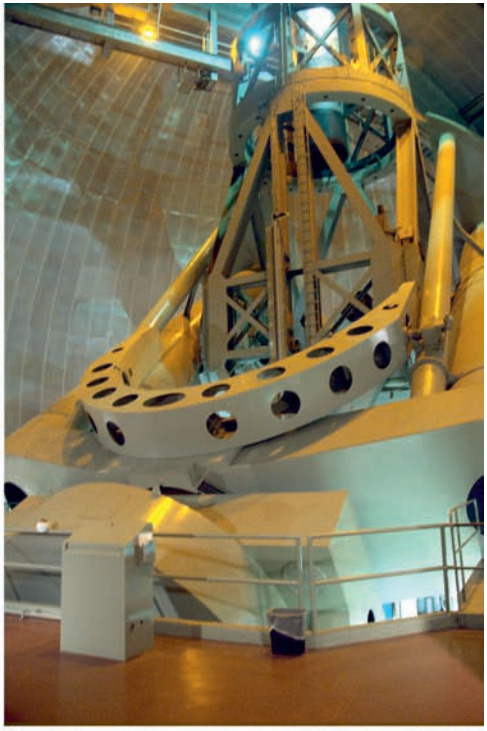
Nejvzácnějším přístrojem na Mt. Wilsonu je Hookerův dalekohled o průměru 2,5 metru. Tímto přístrojem byla objevena expanze vesmíru a temná hmota. V zrcadle dalekohledu je řada bublin a původně bylo vyřazeno jako nepoužitelné. Další zrcadla ale praskla, proto byl nakonec nekvalitní blok vybroušen a díky velké náhodě do odrazné plochy nezasáhla ani jedna bublina a zrcadlo bylo nakonec použitelné.



Observatoř Mt. Palomar

Žezlo největšího dalekohledu světa převzal v roce 1949 Haleův dalekohled na Mt. Palomaru. Lokalita není daleko od Mt. Wilsonu, nachází se necelých 200 kilometrů jihovýchodně od Los Angeles. Zdejší observatoř je provozována Kalifornským technologickým institutem (Caltech) a je zde několik astronomických přístrojů. V roce 1949 prošlo první světlo dalekohledem o průměru 5,1 metru (200 palců), který navrhl americký astronom George Ellery Hale (ten, který založil i observatoř na Mt. Wilsonu). Většinu peněz na postavení dalekohledu poskytla Rockefellerova nadace. Prvním astronomem, který se dalekohledem podíval do vesmíru, byl Edwin Hubble. Palomarská observatoř proslula zejména fascinujícími přehlídkovými projekty a mapováním oblohy na fotografické desky, které se na mnoho desítek let staly standardem pro porovnávání změn nastalých v pozdějších letech.







PALOMAR OBSERVATORY
PALOMAR MOUNTAIN
CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY





Sluneční věže v Mohavské poušti (Ivanpah Solar Electric Generating System).

Úsměvná byla snaha Sovětského svazu za každou cenu vybudovat větší přístroj. K tomu došlo v roce 1976, kdy byl zprovozněn na Kavkaze šestimetrový dalekohled nevalné kvality. Ke skutečnému překonání palomarského dalekohledu došlo až v roce 1993, kdy prošlo první světlo Keckovým dvojčetem na Havajských ostrovech.

Mohavská elektrárna

Už z letadla jsme si nemohli nevšimnout slunečních věží v Mohavské poušti jižně od Las Vegas. Tři oslnivě zářící špičky věží vypadaly jako blyštivé démanty v neutěšené krajině. Jde o sluneční elektrárnu, v níž velké množství odrazných panelů koncentruje sluneční paprsky do tří věží o výšce 140 metrů, v nichž se pod tlakem ohřívá voda na teplotu přes 560 °C. Ta je vedena na turbíny vyrobené společností Siemens a dále probíhá výroba elektřiny klasickým způsobem. Každá z věží je samostatnou jednotkou oddělenou od ostatních. Dohromady dávají věže do sítě 392 megawattů energie. Elektrárna funguje od roku 2014 a je největší elektrárnou se slunečními věžemi na světě. Již dříve byly v tomto místě konány pokusy se slunečními věžemi, stávající elektrárna je třetí generací slunečních elektráren v Mohavské poušti. Pokrývá plochu 2 600 000 m^2, obsahuje 173 500 heliostatů (odrazných ploch), každý z nich má plochu 15 m^2. Oficiální název tohoto veledíla je *Ivanpah Solar Electric Generating System*.

Testovací trať dopravního systému Hyperloop 1.



Hyperloop 1

Tento projekt je nápadem velkého amerického podnikatele a vizionáře Elona Muska, známého jako zakladatele platebního systému PayPal, kosmické společnosti SpaceX, či automobilky Tesla Motors, kterou v současné době vede. V roce 2013 přišel s konceptem kapslí pohybujících se v podtlakovém tunelu za pomoci indukčních lineárních motorů na vzduchovém polštáři. Průměrná cestovní rychlost by se měla pohybovat okolo 970 km/h, maximální je 1 200 km/h. Nápadu se

ujala společnost *Hyperloop Technologies* (není sama), která postavila kilometrovou trať v Nevadské poušti za účelem testování lineárních indukčních motorů. Tyto testy byly úspěšné, ale šlo jen o pohyb motoru, ještě bez tubusu a bez kapsle. Proto byla postavena testovací trať o délce půl kilometru v měřítku 1:1, a to i s podtlakovým systémem. Lineární motor na magnetickém polštáři (zatím bez kapsle) dosáhl v polovině července 2017 rychlosti 112 km/h. Ve stavbě je další, tentokráte tříkilometrová trať, která by už měla být funkčním prototypem včetně kapsle (ta je již vyrobena). Cílem HT je postavit trať mezi Los Angeles a Las Vegas (cca 370 km). Cesta mezi městy by s kapslí Hyperloop trvala přibližně 20 minut, zatímco nám přímý přesun auty trval více než 6 hodin. S realizací se počítá v roce 2021.



Kapsle systému Hyperloop, ve které budou dopravováni cestující. Zdroj: The Verge.

Hoover Dam

Hoover Dam je obří přehrada na dolním toku řeky Colorado, která byla postavena v letech 1931 až 1936 jako zásobárna pitné vody pro Las Vegas. Přehrada je na hranici států Nevada a Arizona. Na stavbě pracovaly tisíce dělníků, přes sto z nich přitom přišlo o život. Výška přehradní hráze je 221 metrů a do roku 1957 byla nejvyšší přehradní nádrží na světě. Co se týče zadrženého objemu vody, jde o největší vodní nádrž USA. Přehradní jezero má délku 180 kilometrů. Přehrada slouží také jako hydroelektrárna s nejvyšším výkonem 1,3 gigawattu, toho lze ale dosáhnout jen při dostatečné hladině vody. Od roku 2010 je kolem přehrady vybudován obchvat, takže hlavní tah mezi Nevadou a Arizonou již nevede po hrázi přehradní nádrže, ale po nově vybudovaném mostě (*Memorial Bridge*), ze kterého je vynikající výhled na přehradní nádrž.

Přehradní nádrž Hoover Dam v době naší návštěvy.



Flagstaff a okolí

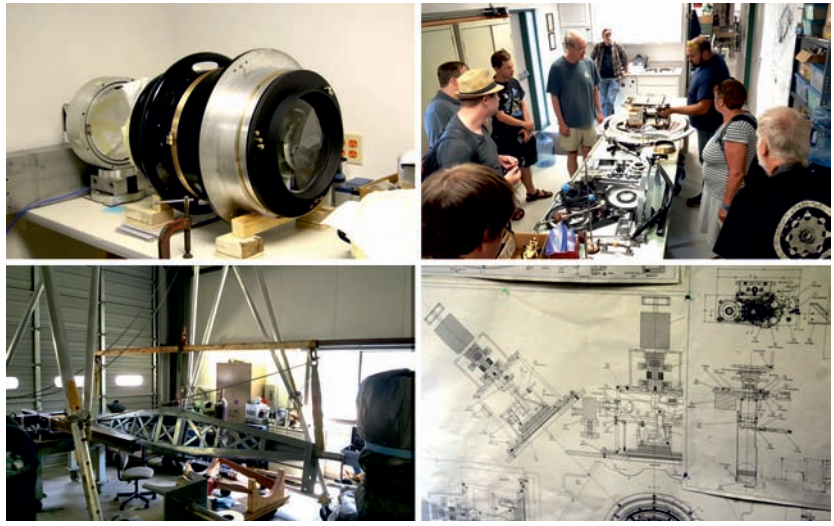
Po Kalifornii a Nevadě jsme se přesunuli přes rozsáhlé arizonské pláně do Flagstaffu, historického



Clyde Tombaugh. Busta objevitele Pluta v areálu Lowellovy observatoře ve Flagstaffu.

centra americké astronomie. Na cestě jsme se na dvě noci zastavili v nezapomenutelném americkém městečku Williams. Typické westernové sídlo s jedinou ulicí obklopenou bary, hotýlky a obchody s kovbojskými klobouky, upomínkovými předměty a nejrůznějšími cetkami. Malebné městečko má několik lákadel. Prochází jím nejslavnější cesta napříč Spojenými státy – Route 66, pouhou hodinu cesty na sever je fascinující Grand Canyon – po Marsu druhý největší kaňon ve Sluneční soustavě a půl hodiny cesty na východ je Flagstaff s bohatou astronomickou minulostí.

Flagstaff je poněkud nevzhledné americké město v dvoukilometrové nadmořské výšce. Nezkušení Evropané zde kolabují jako hrušky padající ze stromu. Přímo ve městě je na Marsovské hoře (připomíná poněkud pražský Petřín) Lowellova observatoř, k ní se ještě vrátíme. V těsném okolí města se to jen hemží dalšími astronomickými pozorovatelnami. K největším patří *Discovery Channel Telescope* se špičkovým zrcadlovým dalekohledem o průměru 4,3 metru, na němž probíhají vědecká pozorování. Dalekohled postavili astronomové z Lowellovy observatoře 40 mil jižně od města, v oblasti se skvělými světelnými podmínkami. Lowellova observatoř vlastní v okolí Flagstaffu i řadu dalších přístrojů, druhým největším je Perkinsův dalekohled se zrcadlem o průměru 1,8 metru. Dalším klenotem v okolí města je *US Naval Observatory* s největším optickým dalekohledem amerického námořnictva se zrcadlem o průměru 1,55 metru (přístroj je z roku 1964). Americké námořnictvo má ve zdejší lokalitě k dispozici ještě další přístroje. Druhým největším je dalekohled se zrcadlem o průměru 1,3 metru, ten je novější – pochází z roku 1999. Nejpřesnějším přístrojem je optický interferometr, který je společným dílem amerického námořnictva a Lowellovy observatoře. Interferometr má tvar písmene Y s největším rozměrem 430 metrů. Je osazen šesti zrcadly a slouží zejména ke zjišťování



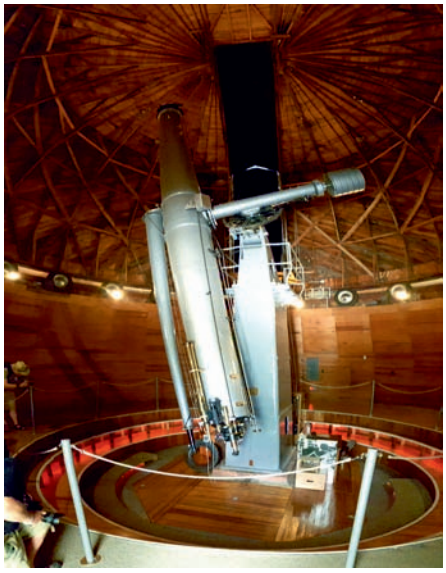
Astrograf, kterým byl objeven Pluto. Objektiv, dílna, montáž a velmi podrobné výkresy.

přesných poloh hvězd. V těsné blízkosti interferometru jsou tři kopule s velkými dalekohledy Lowellovy observatoře (1,8, 1,1 a 0,6 metrů v průměru). Flagstaff je město v horách doslova obklopené astronomickými přístroji. V okolí města jsou ale i dva krátery. Jeden – *Sunset Crater* – je vulkanického původu a druhý – *Arizonský meteorický kráter* – impaktního původu. Není proto divu, že jsme v tomto astronomickém ráji strávili téměř týden času.

Lowellova observatoř

Observatoř ve Flagstaffu založil v roce 1894 americký astronom Percival Lowell. Jeho celoživotní vášní byla planeta Mars, observatoř proto založil za účelem jejího pozorování. V roce 1895 objednal z dílny věhlasných optiků bratří Clarků 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 roce 1912 objevil americký astronom Vesto Slipher Clarkovým refraktorem výrazný červený posuv některých „mlhovin“. Dokonce správně uvažoval, že by mohlo jít o vzdálené hvězdné ostrovy – galaxie. V odborné literatuře se jim ještě do čtyřicátých let říkalo extragalaktické mlhoviny. Doba ale ještě nebyla zralá na to, aby červený posuv interpretoval jako expanzi vesmíru, to udělal až Edwin Hubble na observatoři Mt. Wilsonu o 17 let později. V roce 1914 objevil Slipher rotaci spirálních mlhovin a v roce 1929 sodíkovou vrstvu v atmosféře Země. V šedesátých letech sloužil Clarkův refraktor k pořizování podrobných map Měsíce. Některé z nich využili američtí astronauti programu Apollo, kteří se v nedalekém meteorickém kráteru učili poznávat různé geologické podmínky. Od 80. let slouží dalekohled výukovým účelům. V nedávné době prošel Clarkův refraktor kompletní rekonstrukcí.

Percival Lowell věřil v existenci planety X, která se měla nacházet za planetou Neptun. Za účelem jejího hledání byl na Lowellově observatoři v letech 1928 až 1929



Clarkův refraktor, s nímž byl objeven červený posuv galaxií, rotace spirálních galaxií a sodíková vrstva v atmosféře. Byly zde pořizovány mapy Měsíce. Průměr čočky je 61 centimetrů a ohnisková vzdálenost 9,75 metru.



Mauzoleum s hrobkou Percivala Lowella, zakladatele flagstaffské observatoře. Nachází se přímo v areálu observatoře, která dnes nese Lowellovo jméno.

Meteorit železný – *siderit. Skupina meteoritů tvořená výhradně redukovaným materiálem – slitinami železa a niklu s možnými silikátovými inkluzemi a vzácnými – akcesorickými minerály. Představují pravděpodobně (ve většině případů) materiál z jader planetesimál vzniklý v počátcích vývoje pevných těles.*

Meteorit železno-kamenný – *siderolit, meteorit tvořený rovným podílem slitin železa a niklu a silikátového materiálu. Rozlišujeme skupinu pallasitů (meteority tvořené téměř výhradně silikátovým minerálem – olivínem a slitinami železa a niklu) a mezosideritů (meteority tvořené slitinami železa a niklu společně se směsí silikátových minerálů nejčastěji pyroxeny a plagioklasy).*

Meteorit kamenný – *nejběžnější skupina meteoritů tvořená převážně silikátovými minerály. Tvoří 94 % všech známých meteoritů dopadlých na Zemi. 84 % kamenných meteoritů tvoří tzv. chondrity – chemicky primitivní hmota, která se svým obsahem chemických prvků (mimo lehké prvky) blíží složení sluneční fotosféry, a tedy i složení materiálu ze kterého vznikala sluneční soustava. 8 % tvoří tzv. achondrity – meteority vzniklé obvykle kompletním přetavením chondritů. Zvláštní skupiny achondritů tvoří lunární a marsovské meteority a diferencované meteority nejasného postavení.*

vybudován nový astrograf s objektivem složeným ze tří čoček s aperturou 32,5 centimetru. Světlo bylo soustředěno na fotografické desky o rozměru 35×42,5 centimetru. Novou planetu hledal mladý asistent Clyde Tombaugh pod vedením Vesto Sliphera. V roce 1930 nalezl skutečně planetu, která byla později pojmenována Pluto. První dvě písmena připomínají iniciály zakladatele observatoře Percivala Lowella. Astrograf je znám dnes pod názvem *Pluto Discovery Telescope* a stal se symbolem americké astronomie. V době naší návštěvy probíhala důkladná rekonstrukce astrografu, takže jsme ho mohli obdivovat v dílnách observatoře rozebraný do nejmenších součástek. Pluto byl jedinou planetou objevenou Američany. V roce 2006 na sjezdu Mezinárodní astronomické unie v Praze byl Pluto přeřazen do kategorie trpasličích planet.

Arizonský meteorický kráter

Arizonský meteorický kráter je pravděpodobně nejznámějším kráterem na světě. Nachází se zhruba 60 kilometrů východně od Flagstaffu. Kráter vznikl při dopadu meteoritu před 50 tisíci lety. Nachází se v nadmořské výšce 1 740 metrů (to je výše než Sněžka, ale níže než Flagstaff), průměr má slabě přes kilometr (1 186 metrů) a hloubku 170 metrů. Jde o typický impaktní kráter, který je natolik mladý, že ještě není poničen erozí. Kráter byl objeven americkými osadníky v 19. století. V roce 1903 navrhl důlní inženýr a obchodník Daniel Barringer, že kráter vznikl dopadem meteoritu. Tato hypotéza se později potvrdila. Barringer založil společnost, jejímž cílem byla těžba železa a vzácných kovů z kráteru, neboť předpokládal, že kráter vytvořil železný meteorit. Těžba byla ale neúspěšná, protože se ukázalo, že většina meteoritu

Arizonský meteorický kráter.



se při dopadu odpařila. Podle současných simulací měl meteorit průměr 50 metrů a dopadovou rychlost 13 kilometrů za sekundu. Pozemek kráteru je ve vlastnictví Barringových potomků, jimž zajišťuje obživu na tučném vstupném vybíraném v návštěvnickém centru na okraji kráteru. V 60. letech 20. století byl kráter využíván při tréninku astronautů projektu Apollo. Kráter posloužil také jako kulisa několika filmů.

Zatmění Slunce dne 21. srpna 2017

Neuvěřitelná náhoda tomu chtěla, že na obloze mají Slunce i Měsíc stejný úhlový průměr. Slunce má průměr 1 400 000 km a je vzdálené 150 000 000 km. Podíl obou čísel dá úhlový průměr Slunce na obloze v radiánech. Vyjde 0,009 radiánu, což je 0,5°. Slunce má tedy na obloze úhlový rozměr přibližně půl úhlového stupně. Měsíc je mnohem menší, má průměr 3 476 km, je však blíže, ve vzdálenosti 384 000 km. Podíl dá opět 0,009 radiánu, tedy přibližně půl úhlového stupně.

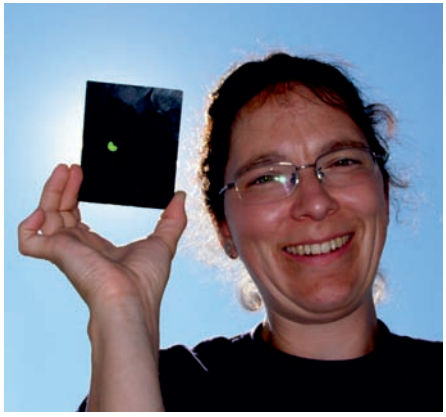
Díky této shodě může tu a tam dojít k zákrytu slunečního kotouče Měsícem. Měsíc se při zatmění nachází mezi Zemí a Sluncem, a musí proto být v novu. Oběžná dráha Měsíce kolem Země je skloněna o 5° vzhledem k oběžné dráze Země kolem Slunce, proto k zatmění nedojde vždy. Měsíc musí být poblíže uzlu své dráhy. Poměrně často dochází k částečným zatměním Slunce, nicméně pro pozorování korónу Slunce a okolních hvězd je nutné zatmění úplné. A ta jsou velmi vzácná. Za období mezi roky 2000 př. n. l. až 4000 n. l., tj. za 6 000 let, proběhlo či proběhne 14 263 zatmění Slunce, z toho jen 3 797 úplných, tj. v průměru 0,63 úplného zatmění ročně. Úplná zatmění probíhají jen v tzv. pásu totality, který může být široký maximálně 270 km. Na jednom konkrétním místě na povrchu Země statisticky dojde k úplnému zatmění Slunce jednou za 360 let. Například v Praze bylo poslední úplné zatmění viditelné v roce 1706 a další bude vidět v roce 2135. Je tedy zřejmé, že za úplnými zatměními Slunce je třeba cestovat, často i do exotických krajin. Když uvážíme, že úplná fáze trvá zpravidla několik minut, jde o cesty mimořádně náročné na kvalitu přípravy, protože jakékoli pochybení v průběhu kratičkého zatmění může být osudné. Nejdelší možná doba úplné fáze zatmění Slunce pro pozorovatele stojícího na zemském povrchu je 8 minut.

Území Spojených států je obrovské, a tak zde tu a tam k úplným zatměním Slunce občas dochází. Většinou ale proběhnou jen na malé části území a pás totality sotva „lízne“ několik států Unie. Zatmění



Tak tohle místo kdesi ve wyomingské poušti je naše, tady jsme se rozhodli pozorovat zatmění Slunce.

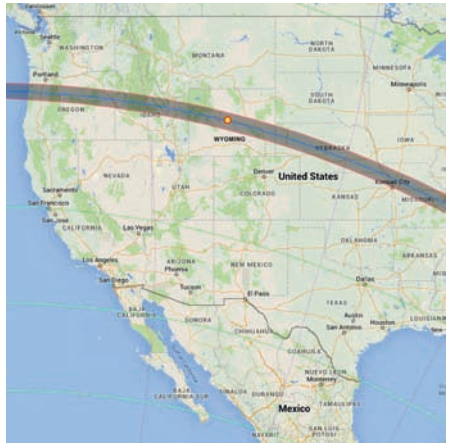
Wyoming, srpek Slunce, Jiřina a svářečské sklo.





Hoteliéři a další obchodníci se rozhodli využít životní šance. Fenomén zatmění ovládl celou střední část Spojených států amerických.

Pás totality se táhl napříč celým kontinentem. Naše poloha při pozorování je vyznačena žlutým kroužkem.



ze dne 21. srpna 2017 bylo výjimečné tím, že pás totality procházel napříč celým kontinentem. Poslední zatmění obdobného rozsahu se uskutečnilo před 99 lety, dne 8. června 1918. Proto Ameriku ovládlo cestovatelské šílenství a mnoho obyvatel se snažilo dostat do pásu totality a spatřit tento vzácný přírodní děj na vlastní oči. Hoteliéři s ubytovacími kapacitami v blízkých lokalitách se chopili příležitosti a ceny za ubytování se vyšplhaly na několikanásobek běžné částky. Inu příležitost dělá podnikatele. Někteří si svou životní šanci ale uvědomili až pozdě. Jejich hotel byl plně obsazen rok dopředu a majitelé netušili proč. Po procitnutí do podnikatelské reality nastalo mnohde rušení starých rezervací a jejich obnovování za větší peníze. To už má ale s podnikáním málo společného a jde o docela obyčejnou zlodějnu. My jsme pro naše cíle vybrali Wyoming, kde je minimální osídlení, takže se dalo eliminovat množství čumilů a rozlehlá prérie mající blízko do pouštního prostředí slibovala relativně stabilní počasí. Snad nejhorší je pozorovat zatmění v blízkosti velkých vodních ploch. V průběhu zatmění totiž teplota poklesne o několik stupňů a následná kondenzace vodní páry leckdy pozorování znepříjemní.

V dobách dřívějších měla zatmění Slunce velký vědecký význam. Díky určení přesných okamžiků vstupu a výstupu Měsíce do a ze slunečního kotouče se podařilo zpřesnit vzdálenosti a rozměry zúčastněných těles. Šance spatřit blízké hvězdy i za dne umožnila změřit jejich polohy a určit odklon jejich paprsků v blízkosti slunečního kotouče, což vedlo v roce 1919 k prvnímu průkaznému ověření obecné relativity. Při úplných zatměních Slunce je také možné pozorovat blízkou korónu a její struktury. V dřívějších dobách neexistoval jiný způsob, jak pozorovat plazma v těsném okolí Slunce, v současnosti máme natolik skvělé sondy (SOHO, SDO), že i tato role úplného zatmění Slunce je potlačena do pozadí. Zatmění ale nadále zůstává zcela výjimečným a neopakovatelným zážitkem, který nelze popsat žádnými slovy, fotografií ani videem. Musíte zažít, jak se barva oblohy změní do ocelově modré šedi, v širé planině vůkol se objeví letící stíny, křik zmatených ptáků utichne a později přejde ve vyděšené skřehotání, nevědoucí řidiči rozsvěcují světla, aby viděli na potemnělou cestu netuše, že se nad jejich hlavami odehrává jedinečné nebeské divadlo, poslední sluneční paprsky prodírající se nerovnostmi měsíčního povrchu vytvoří jasné ohraničené oblasti, kterým říkáme Bailyho perly, a nakonec se rozzáří sluneční koróna, při povrchu slunečního kotouče vytrysknou oranžové

protuberance a na nebi se rozžehnou i za dne nejjasnější hvězdy a planety. Dobrodružství, za kterým stojí za to jet přes půl světa. Přečtěte si nyní autentické zážitky Ivana Havlíčka, jednoho z pozorovatelů, které vám asi nejlépe přiblíží atmosféru zatmění.

Časy kontaktů při zatmění Slunce – *čtyři klíčové okamžiky při zatmění Slunce. T1: první kontakt měsíčního kotouče se slunečním diskem. T2: počátek úplné fáze zatmění. T3: konec úplné fáze zatmění. T4: poslední kontakt měsíčního kotouče se slunečním diskem.*

Pás totality – *oblast úplného zatmění Slunce na povrchu Země. Pás totality je široký maximálně 270 kilometrů. Samotná úplné fáze trvá řádově minuty, maximálně 8 minut.*

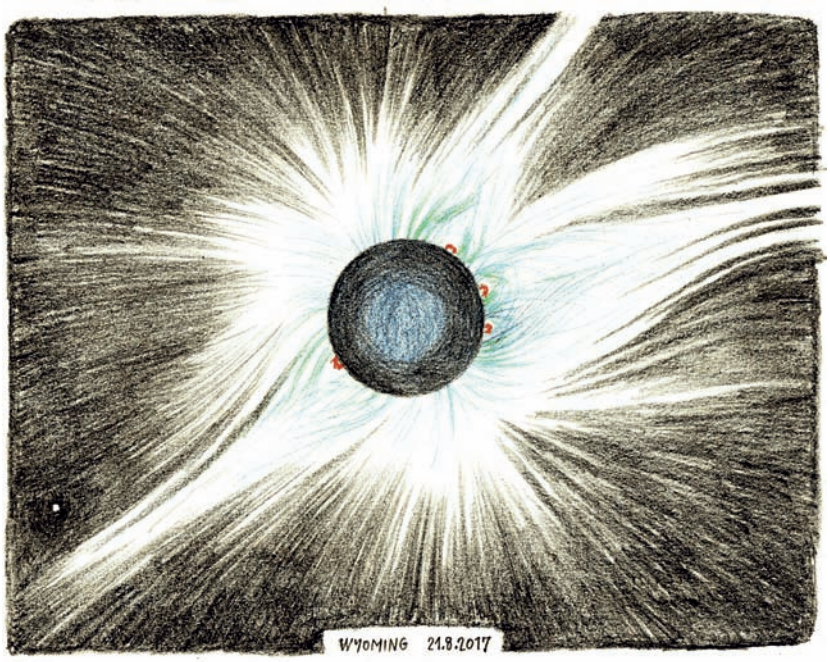
Ivanův deníček: 21. srpna, neděle

Předpověď počasí večer potvrdila výběr pozorovacího místa. Vyjíždíme ve čtyři ráno do noci. Obloha plná hvězd. Ze zadního okna vidím Orion a Venuši a východní obzor světlá kolem šesté. Benzina v Shoshoni – usnul jsem. Obzor je již růžový a pak Moneta. Nad východem růžovo rudý sloup a vyhoupne se lupínek červeného Slunce. Zastavujeme a sledujeme každodenní vznik nového dne. Každý den je to zázrak. Jistotou či banalitou se východ Slunce může stát jen pro ty, kteří jej nikdy neviděli. Je světlo a Slunce stoupá nad obzor. Nalezení včera Vladimírem objeveného místa na centrální linii je jízdou opatrnou sice pomalé, ale jsme zde kolem sedmé stále ještě poměrně sami.

Je sedm, do začátku zbývají ještě více než tři hodiny. Vladimír dopočítal pro tady také ještě kdy. Tady znamená 43°4,931′ severní šířky, 107° 42,836′ západní délky a 1 742 metrů nad mořem. Kdy je nastaveno následovně:

T1 = 10:20:29
T2 = 11:40:09
T3 = 11:42:33
T4 = 13:06:35

Vše je v místním čase, tedy u nás V Evropě bude v té samé době místního času o 10 hodin víc. Do prvního kontaktu zbývá mnoho času. Domýšlíme, zda by nebylo lepší odjet ještě někam jinam – na západě se nasouvá vysoká oblačnost, která postupuje pomalu. Mezi osmou a devátou jsou cirry už nad námi. Oblaka se ale trhají a kolem půl desáté je jasné, že oblačnost





Nejen při příjezdu, ale i při odjezdu se tvořily dlouhé kolony automobilů.

pozorování neznemožní. Každý se pokouší s nervozitou živeným očekáváním události, kvůli které jsme přijeli, vypořádat po svém. Do toho Jiříček chce vytvořit filtr na monokulár, který neudělal včera, protože prý v době výroby filtrů jedl. Podaří se mi to zbastlit z kelímku od Coca Coly. A mělo by to fungovat. Slunce a jeho skvrny jsou vidět desetkrát blíž. Najednou je deset a už jen něco málo do prvního kontaktu. Jdu do auta pro normální brýle – mám na to jen asi tři minuty, uvědomuji si, že při zatmění bude i tma a v brýlích slunečních bych potmě viděl prd. Dvě minuty do prvého kontaktu. Uléhám na zem s triedrem a po chvíli je vidět Měsíc vykrajující ze Slunce černou vsuvku na půl druhé. Vše jde poměrně rychle.

Na úplných zatměních je asi nejpůsobivější – hned po plné fázi – jak se viditelný srpek sluneční ztenčuje a ke konci vypadá, jako by se obloha smála. Je vidět stále ještě Slunce dost, jen aby druhý kontakt nikdo neprošvihl. Vše ostatní je v druhém plánu. Ležím na zádech, na očích triedr Helios 10×42 a čekám na druhé setkání okrajů slunečního a měsíčního kotouče. Pak by měla nastat tma a obloha na obzoru by měla hrát všemi barvami. Hlavně je potřeba zůstat v klidu.

Odkládám filtr právě včas. Všude kolem je hnědofialová tma. Na takovou tmu s oranžovo růžovým okružím při obzoru jsme překonali vzdálenost čtvrtiny obvodu zemského rovníku. A teď je už vše možná nadosah. Pak růžově zářící protuberance při jihovýchodním okraji Měsíce a postupně přivykám tmě. V triedru je Slunce za modročerným Měsícem, který se jeví čím dál tím světlejším. Pak jsou vidět tři hlavní proudy korony a zvykáním na tmu se vyjevují vlákna helmetů slunečních. Přesně jako na nejlepších fotografiích. Koróna je šedo-stříbřitě-modrá. Vlevo dole je na zhruba dva sluneční kotouče na osmé hodině Regulus. Vystupují růžovo červené a do zelené se prolínající obzory protuberancí na západní straně, kudy Měsíc počal prve pouť přes Slunce. Vše probíhá opět velmi pomalu a důstojně. Prohlížím si Slunce leže na zádech. S triedrem se snažím vše vypozorovat do detailů, jichž je triedr schopen.

Ztraceni ve wyomingské pustině.



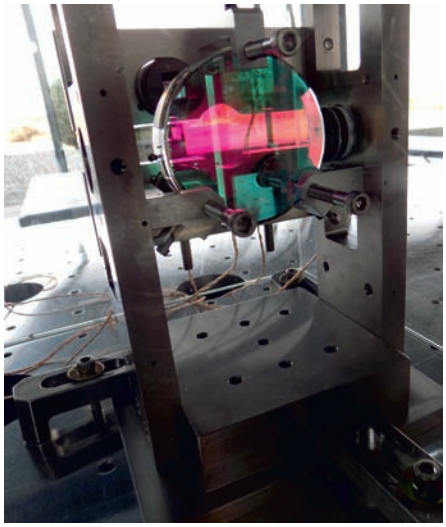
Nevnímám tmu kolem, jen oči přisáté k okulárům a ticho uvnitř sebe. Nutím se vše si zapamatovat, abych mohl vše v klidu zakreslit navečer, až se ubytujeme. Světle stříbřitá koróna konečně není jen čímsi zvláštním, co bychom dostali jen tak. Jde o nedocenitelné poznání, které každý musí sám sobě uvěřit. Třetí kontakt a je po všem. Vše probíhá ohromně rychle. Tma mizí. Ocelově hnědé vše se barví opět do dne. Nedoceněné překvapení a překvapující radost. Tentokrát se – díky triedru – neotevřela díra do nebe, ale koróna se nadýchla jako éterická krajka se čtyřmi rubínově růžovými oblouky protuberancí. Dotyky Měsíce v zelených perlách, z nichž by mohly i bolet oči, ale vše tak rychle, že zbyl čas jen na krásu.

Pak uklízíme, fotografujeme sami sebe s československou vlajkou a odjíždíme do druhé poloviny dne, která bude mnohem únavnější, náročnější a hlavně plná aut, která se odtud chtějí dostat. Jedeme přes Shoshoni, Riverton, a Farson do Pinedale, kde bychom měli strávit noc, snad něco kolem sedmi hodin v kolonách. Postupně sem nepozorovaně najelo ještě jednou tolik lidí, než kolik jich žije v celém Wyomingu a silnice je všechny naráz tak rychle nepojmou. Musíme jet pomalu a čekat trpělivě v kolonách. Je večer, stmívá se a Pinedale je malé městečko okolo jedné ulice s jedním velkým obchůdkem a ještě několika otevřenými pumpami. Kreslím večer na pokoji obraz zatmění. Nejkrásnějšího zatmění, které jsem dosud viděl.

LIGO na závěr

Na konci cesty jsme nemohli minout obří čtyřkilometrový interferometr LIGO v Hanfordu, kterým byly na konci roku 2015 poprvé detekovány gravitační vlny. Jejich objevu i celému přístroji je věnována samostatná kapitola v této knížce, proto se zde omezíme jen na konstatování, že šlo o krásnou tečku za mnohdy vysilující expedicí, která, slovy jednoho z účastníků „byla nádherným výletem upevňujícím charaktery, posilujícím soudržnost a zocelujícím přátelství mezi národy“. Let domů přes turecký Istanbul, svíjející se v křečích výjimečného stavu, proběhl kupodivu bez jakýchkoli incidentů a mimořádných událostí a členové expedice se bezpečně dopravili domů, aby mohli postupně vstřebávat obrovské množství zážitků vymykajících se poklidnému životu okolního člověčenstva.

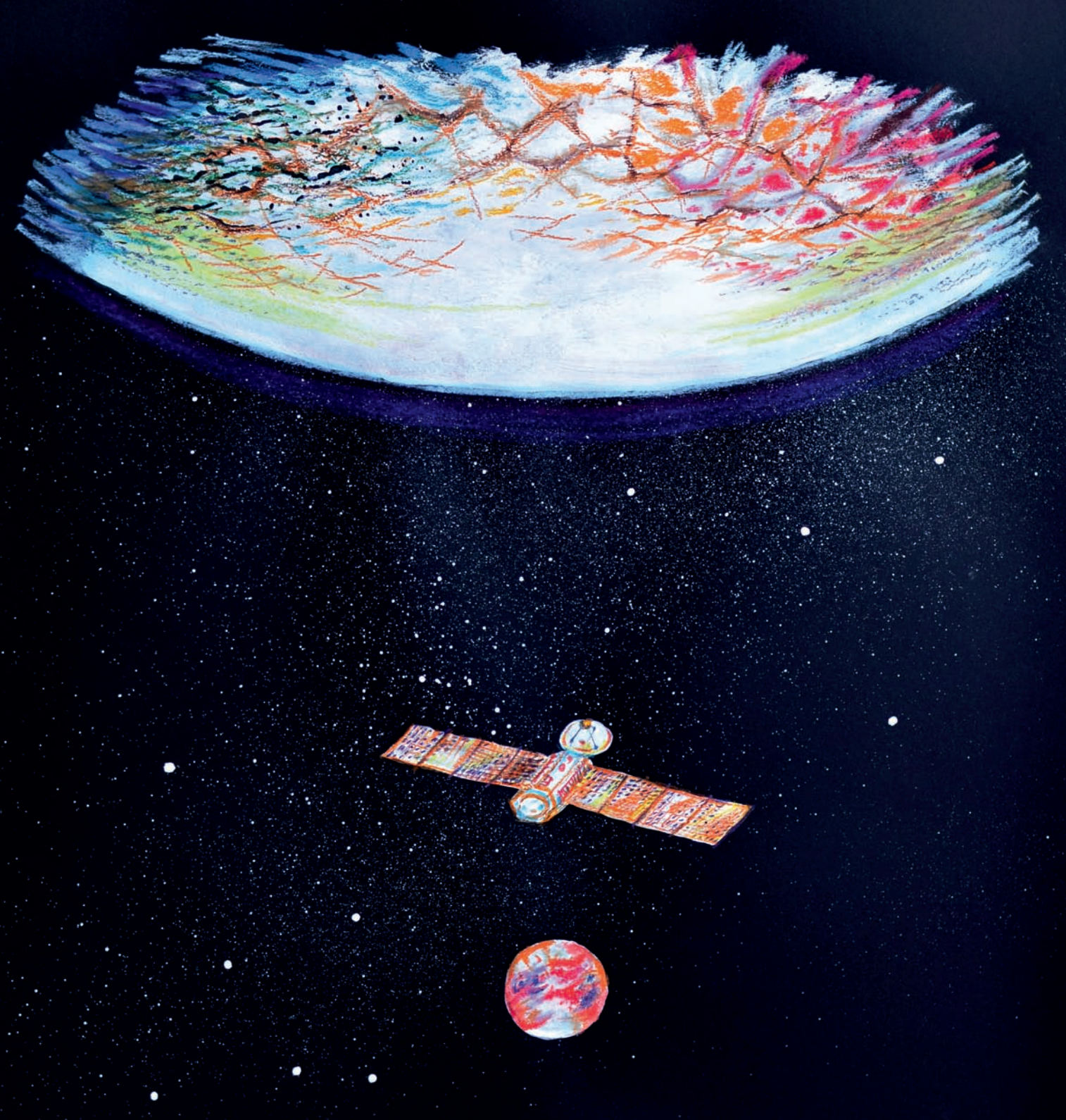
■ **Petr Kulhánek, 28. 3. 2018, AB 27–29/2017**



Jedno ze zrcadel pro LIGO, které nebylo použito. Ve vizuálním oboru je zcela průhledné, v infračerveném oboru, v němž svítí laser, je dokonale odrazné.

Vnitřní část tubusu pro LIGO. Z fotografie si lze představit, jaký průměr má vnitřní prostor interferometru.





IV. NOVÁ TECHNIKA

Oko nebes přebírá žezlo od Areciba

Arecibo – *do roku 2016 nejvýkonnější radioteleskop světa, ostrov Portoriko. Průměr antény 304 metrů, anténa vyplňuje celé údolí. Povrch tvoří 40 000 hliníkových desek. Postaven byl v roce 1963. Objevy: první extrasolární planeta, změření periody rotace Merkuru, objev podvojného pulzaru PSR 1913+16 (nepřímé potvrzení existence gravitačních vln), potvrzení Jarkovského jevu u planetky Golevka a mnohé další.*

Arecibo (nahoře) – po dlouhých 53 let největší radioteleskop světa. Nepohyblivá mísa má průměr 304 metrů a nad ní je zavěšeno částečně pohyblivé ohnisko. RATAN 600 (dole) – sovětský pokus o překonání amerického Areciba. Odrazné desky jsou jen na obvodu přístroje, a tak RATAN nemůže Arecibu konkurovat, i když má větší průměr. Zdroje: BYU, Extreme Tech.





V září 2016 byl v Číně spuštěn po šesti letech stavby a deseti letech plánů největší radioteleskop světa FAST (*Five hundred meter Aperture Spherical Telescope*), kterému Číňané přezdívají „Oko nebes“. Radioteleskop v Arecibu s průměrem 304 metrů si držel prvenství dlouhých 53 let. Po více než půl století přichází na scénu nový stroj o průměru 500 metrů. A není to stroj ledajaký. Konstruktéři se poučili z provozu Areciba a v některých konstrukčních prvcích přicházejí se zcela novými revolučními řešeními. FAST je neuvěřitelná stavba a i když se spuštění do provozu protáhlo o tři roky, nic to nemění na tom, že budoucí generace astronomů dostávají do vínku stroj, nad jehož konstrukcí se tají dech a který bude na dlouhá léta nejvýznamnějším radioastronomickým dalekohledem světa.

Předchůdci – Arecibo a RATAN

Některé radioteleskopy využívají přírodních sníženin nebo údolí jako přirozeného podkladu pro nepohyblivé antény. Výhodou je možnost stavby velkých antén, nevýhodou jejich nepohyblivost, kterou lze jen omezeně kompenzovat pohyblivým ohniskem a rotací Země. Dosud největším gigantem s plně funkční anténou tohoto druhu byl radioteleskop postavený v blízkosti Areciba na ostrově Portoriko. Průměr antény je 304 metrů a vyplňuje celé údolí. Povrch je složen z 40 000 hliníkových desek, jež tvoří kulovou plochu o poloměru křivosti 265 m, jejíž maximální odchylka od správného tvaru je nejvýše 2,2 mm. Radioteleskop byl postaven v roce 1963, v roce 1997 byl kompletně zrekonstruován. Provozuje ho Cornellova univerzita spolu s americkou nadací NSF.

Teleskop pokrývá rozsah vlnových délek od 2,5 cm do 1 m (0,3 až 12 GHz). K nejvýznamnějším objevům patří: změření rotace Merkuru (1964), změření periodicity pulzaru v Krabí mlhovině (1968), objev podvojného pulzaru PSR 1913+16 – vynikající relativistické laboratoře (1974), která vedla k nepřímému potvrzení existence gravitačních vln, objev prvního milisekundového pulzaru PSR B1937+21 (1982), první přímé zobrazení planetky (Castalia, 1989), objev pulzaru PSR B1257+12 (1990), u něhož se v roce 1994 našla první exoplaneta, ma-

pování ledu na Merkuru (1994), potvrzení Jarkovského jevu (ovlivnění dynamiky tělesa pohlcováním slunečního záření) u planetky Golevka (2003) a objev hydrokyanidových molekul metaniminu v mezihvězdném prostředí (2008). Radioteleskop Arecibo proslul i programem na hledání mimozemských civilizací. V roce 1974 byla vyslána obrazová zpráva směrem ke kulové hvězdokupě M 13 obsahující 73 řádků a 23 sloupců a od roku 1999 běží pasivní program SETI pro vyhledávání mimozemských civilizací. Radioteleskop v Arecibu se stal i kulisou v mnoha filmech, například v bondovce Zlaté oko.

Jak už bývalo v dobách sovětského impéria zvykem, bylo třeba mít prvenství v mnoha oborech lidské činnosti za každou cenu. Tak vznikl i projekt největšího radioteleskopu světa RATAN 600 s průměrem antény 576 metrů. Stranický úkol byl splněn a Sověti dosáhli svého. Od roku 1974 vlastní co do průměru největší radioteleskop na světě, odrazné panely jsou ale jen po obvodu kruhu. Je zde rozmístěno 895 desek o rozměrech 2×7,4 metru. Dalekohled může fungovat buď jako jeden jediný celek s centrálním ohniskem, nebo jako 4 oddělené části. Celková odrazná plocha je cca 20 000 m^2, což je necelá třetina odrazné plochy Areciba, které tak v té době zůstalo nejvýkonnějším radioteleskopem světa. RATAN je zkratka z ruského „*RAdioTeleskop Akademii Nauk*“. Přístroj je součástí observatoře SAO (*Special Astrophysical Observatory*) a nachází se na území dnešního Ruska v severním Kavkazu, v nadmořské výšce 995 metrů, v blízkosti vesnice Zelenčukskaja, pouhých 20 km od šestimetrového optického dalekohledu, který měl kdysi předčít Haleův pětimetrový dalekohled na Mt. Palomaru, což je podobně beznadějná kapitola sovětských snah. Použitelný vlnový rozsah RATANu je údajně od 1 cm do 50 cm (frekvenční rozsah 0,6 až 30 GHz). O tom lze ale dosti pochybovat, zejména v krátkovlnné oblasti by jednak musel být přístroj mimořádně přesně sesazen, a jednak by musel být chlazený, aby nevadil tepelný šum. Celý projekt RATAN je spíše nafouklou bublinou a s kvalitou Areciba se nedá srovnávat.

RATAN 600 – *sovětský radioteleskop vybudovaný na Kavkaze v roce 1974. Průměr má 576 metrů, 895 odrazných segmentů je umístěno jen po obvodě a jejich celková plocha je třetina odrazné plochy amerického Areciba. Vlnový rozsah je údajně od 1 cm do 50 cm (frekvenční rozsah 0,6 až 30 GHz).*
SETI – *Search for ExtraTerrestrial Intelligence, vyhledávání signálů od mimozemských civilizací. Projekt fungující od roku 1999 na radioteleskopu Arecibo. Data z projektu zpracovávají spořiče milionů počítačů na celém světě (projekt SETI@home). I kdyby byl jediným výsledkem hledání mimozemských civilizací gigantický paralelní výpočet využívající nečinné počítače, měl projekt svůj smysl. Dnes se tato technologie využívá u mnoha typů vědeckých výpočtů.*

FAST – trocha historie

Touha vybudovat v Číně velký radioteleskop je staršího data. První vážnější úvahy se objevily v roce 1994, tedy 22 let před zprovozněním radioteleskopu. V roce 2001 byla dokončena předběžná studie a Čínská akademie věd zařadila stavbu mezi realizovatelné projekty. V roce 2007 se stavba radioteleskopu stala klíčovým projektem národního

Radioteleskop FAST se nachází v místě označeném žlutým kroužkem. Podklad je převzat z Google Maps. Poloha radioteleskopu je 25,652917, 106,856583.



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 prolákline 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).*

zájmu a v červenci 2007 rozhodla vládní organizace NFRC (*National Development and Reform Commission*), že bude velkolepý projekt financovat, a uvolnila první prostředky ve výši 675 milionů jüanů, což byly přibližně dvě miliardy českých korun. Konkrétní návrhy technologických řešení se objevily v roce 2008. Radioteleskopu FAST již nic nestálo v cestě a dne 26. prosince 2008 byl položen základní kámen observatoře. Ve skutečnosti byl tento akt pouhou politickou taškařicí, nikoli skutečným zahájením stavby (zemní práce započaly až v roce 2010). Čínští soudruzi pokládali základní kámen observatoře v slušivých sáčcích a vyleštěných polobotkách přímo z rudého koberce. Naštěstí základní kámen umístili bokem od budoucí observatoře, takže při vlastní stavbě nijak nepřekážel.

Čínští inženýři vytipovali řadu lokalit, ve kterých stavba přicházela v úvahu. Zohledněny byly: tvar terénu, elektromagnetické znečištění z okolí, dostupnost lokality, kvalita podloží a další parametry. Konečné rozhodnutí padlo na krasovou proláklinu Ta-wo-tang o průměru 800 metrů, jež se nachází v provincii Kuej-čou v blízkosti města Tu-jün (100 000 obyvatel) v jihozápadní části Číny poblíž obratníku Raka. Lokalita je vzdálená 170 km od Kuej-čou – hlavního města provincie. Tvar prolákliny téměř přesně odpovídá kulové ploše radioteleskopické mísy, a tak bylo zapotřebí minimálních terénních úprav. V údolí původně stálo dvanáct obydlí. Celkem 61 farmářů bylo postupně přestěhováno do nově vzniklého městečka Kche-tu ve vzdálenosti 60 kilometrů od radioteleskopu. Okolní kopce dobře stíní rušivý elektromagnetický signál z pozemských zdrojů a jde o rádiově velmi klidnou oblast.

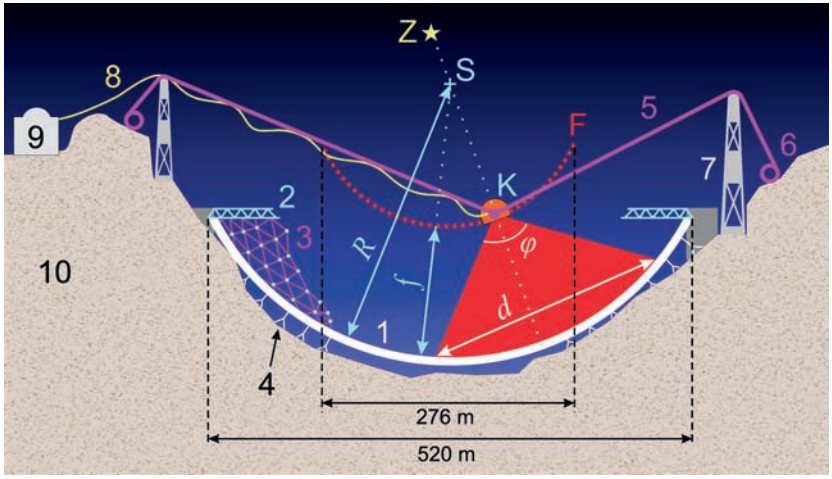


Pokládání základního stavebního kamene dne 26. prosince 2008. Čínští soudruzi se při této náročné činnosti ani nezapotili, ani neumazali. Zdroj: NFRC/FAST.

FAST – odrazná plocha

Odrazná plocha je držena sítí kabelů, které tak trochu připomínají hustou rybářskou síť, jejíž okraje

jsou zavěšeny na obvodové konstrukci. Umisťování kabelové sítě započalo v červenci 2014. Síť tvoří 7 000 úseků ocelových lan a 2 400 uzlů. Z každého uzlu vede kotvící lano k motorovému navijáku upevněnému v dolomitovém podloží pod radioteleskopem. Napínáním kotvících lan je možné zformovat tvar odrazné mísy do základní kulové plochy s průměrem 500 metrů a poloměrem křivosti 300 metrů. Správný tvar odrazné plochy se vyhodnocuje pomocí zaměřovacího systému a následné fotogrammetrie. Toto řešení je naprosto unikátní a nebylo použito na žádném jiném radioteleskopu. Proto čínští odborníci v letech 2004 až 2006 nejprve zkonstruovali funkční model radioteleskopu v měřítku 1:10, tj. s průměrem mísy 50 metrů. Všechny systémy pracovaly podle předpokladů a úspěšně byla detekována čára neutrálního galaktického vodíku s vlnovou délkou 21 cm. Na kabelovou síť byly umístěny vlastní odrazné segmenty, které mají trojúhelníkový tvar (to samo je poněkud atypické, většinou se používají obdélníky nebo šestiúhelníky). Plochu tvoří celkem 4 600 segmentů, což je výrazně méně než u Areciba (tam je 40 000 segmentů). Snížení počtu segmentů znamenalo menší problémy při jejich umísťování. Aby při tak malém počtu segmentů nedošlo ke snížení přesnosti tvaru odrazné plochy, nemohly být použity rovinné segmenty – jejich povrch je výsečí kulové plochy.



Základní součásti radioteleskopu FAST: Z – zdroj signálu, S – střed křivosti, K – kabina s detektorem, F – ohnisková plocha, 1 – mísa radioteleskopu, 2 – obvodová nosná konstrukce, 3 – nosná lanová síť, 4 – kotvící lana, 5 – polohovací lana, 6 – ukotvený naviják, 7 – věž, 8 – optické vlákno, 9 – observatoř, 10 – podloží. Poloměr křivosti odrazné plochy R = 300 m, ohnisková vzdálenost f = 0,4655 poloměru R, průměr aktivní sběrné plochy d ≈ 300 m, vrcholový úhel φ ≈ 60°.

FAST – ohnisko

Radioteleskopy s nepohyblivou mísou mají jednu nevýhodu. Nelze je namířit do libovolného místa oblohy. Přesto nemusí hledět jen nad sebe, jak by se na první pohled mohlo zdát. Pokud jsou přístroje, které v ohnisku zachytávají elektromagnetické vlny z odrazné plochy, umístěny v pohyblivé kabině, je možné změnou její polohy částečně ovlivnit směr pozorování. Radioteleskop FAST má přijímané frekvence rozděleny do devíti pásem a každé z nich je přijímáno jiným přístrojem. Všechny přístroje jsou umístěné v kabině o průměru 11 metrů

Snímek zachycuje fázi osazování kabelové sítě trojúhelníkovými segmenty. Zdroj: NFRC/FAST.





Stavba podpůrné konstrukce. Zdroj: NFRC/FAST.

	ARECIBO	RATAN	FAST
první signál	1963	1974	2016
zeměpisná šířka	18,34417	43,826167	25,652917
zeměpisná délka	−66,75278	41,586683	106,856583
apertura	304 m	576 m	500 m
odrazná plocha	70 000 m^2	20 000 m^2	270 000 m^2
poloměr křivosti	265 m	žádný	300 m
počet segmentů	40 000	895	4 600
vlnová délka	0,025 až 1 m	~0,1 až 0,5 m	0,1 až 4 m
frekvence	0,3 až 12 GHz	0,6 až 3 GHz	0,07 až 3 GHz
pokrytí oblohy	20° od zenitu	neuvádí	40° od zenitu

FAST aneb Oko nebes těsně po dokončení stavby. Jeho mísa je vyplněna 4 600 trojúhelníkovými odraznými segmenty. Na šesti obřích věžích, dobře patrných na periferii mísy, je zavěšena pojízdná kabina, v níž je instalována řada ohniskových přístrojů. Zdroj: NFRC/FAST.



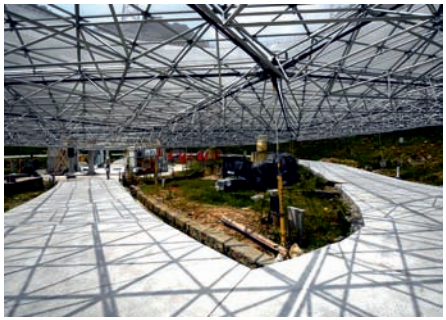
zavěšené na lanech zakotvených na šestici podpůrných věží. Taháním za lana je možné kabinou pohybovat. V ohnisku je přijímán signál odražený jen z části povrchu radioteleskopu. Tato „aktivní skvrna“ má průměr 300 metrů a spolu s kabinou vznášející se v ohniskové rovině definuje směr příjmu signálu. Radioteleskop se díky tomuto triku může podívat do oblastí vzdálených až 40° od zenitu, a to s přesností zaměření 8″ a rozlišením 2,9′. Ale to není vše. Část odrazné plochy, ze které právě přichází signál do ohniska, lze dočasně zdeformovat do parabolického tvaru! Jak jsme se již zmínili, podpůrná lanová síť je napínána lanovými úchyty zakotvenými na motorových navijácích. Pomocí nich je možné dočasně změnit aktivní část mísy radioteleskopu na parabolu a dosáhnout ideálního zobrazení. Opět jde o zcela průkopnickou technologii, která nebyla u žádného jiného radioteleskopu dosud použita. Přístroje pro frekvence vyšší než 560 MHz jsou chlazeny kapalným heliem, které

je v kabině uchováváno v Dewarově nádobě. U přijímaného signálu je sledována i jeho polarizace, a to v plném rozsahu frekvencí. Z kabiny je signál veden datovými kabely (zavěšenými s nosnými kabely mezi kabinou a podpůrnými věžemi) do observatoře umístěné v těsné blízkosti radioteleskopu. Celý provoz zajišťuje 71 stálých zaměstnanců.

Budoucnost

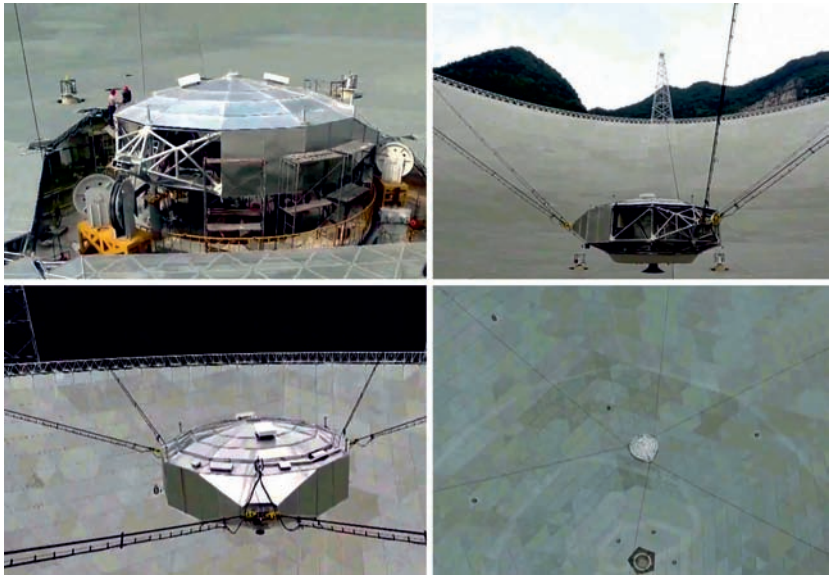
Náplň práce radioteleskopu FAST bude obdobná jako u ostatních obřích přístrojů: přehlídka oblohy v čáře neutrálního vodíku, výzkum pulzarů, spektroskopie mezihvězdných molekul a výzkum nejchladnějších zákoutí vesmíru. Dalekohled se zapojí do mezinárodních interferometrických sítí a sítí hledajících za pomoci pulzarů gravitační vlny. Vzhledem k bezkonkurenčně nejlepším parametrům lze očekávat řadu nových objevů na poli radioastronomie. Doba, kdy se všechny výrobky z Číny považovaly za podřadné zboží, je nenávratně pryč. Dnes jsou integrovanými obvody z Číny osazovány špičkové přístroje, čínské optické prvky včetně zrcadel mají mnohdy lepší parametry než obdobné prvky od jiných renomovaných výrobců a i radioteleskop FAST patří k tomu nejlepšímu, co má dnešní radioastronomie k dispozici. Vůbec nevadí tříletý skluz spuštění radioteleskopu oproti původnímu plánu. Jedinou vadou na kráse je snad anglická mutace domovské stránky dalekohledu, kde klikání na odkazy připomíná náročnou hru, jejíž výsledek vás může dovést kamkoli, jen ne na avizovanou stránku.

■ **Petr Kulhánek, 27. 1. 2017, AB 4/2017**



Pod radioteleskopem FAST. Zdroj: NFRC/FAST.

Kabina s přístroji má 11 metrů v průměru a pohybuje se na lanech v ohniskové rovině nad mísou teleskopu. Na prvním snímku je kabina zachycena v centru odrazné plochy těsně před zdvižením. V kabině je devět přístrojů pro různé části spektra. Zdroj: NFRC/FAST.



XFEL – první světlo

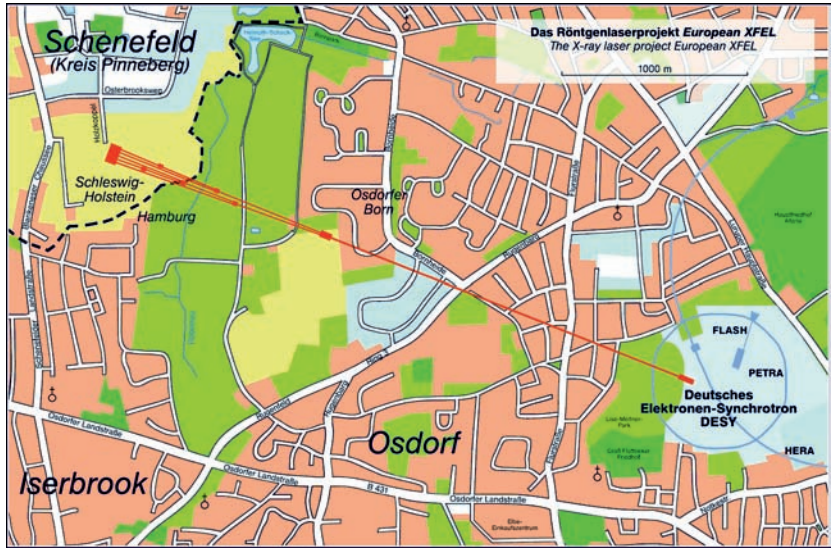
DESY – *Deutsches Elektronen SYnchrotron, německé výzkumné centrum částicové fyziky s laboratořemi v Hamburku a Zeuthenu, které bylo založeno v roce 1959. K nejvýznamnějším zařízením patří urychlovač PETRA a laser na volných elektronech FLASH. V září 2017 byl spuštěn provoz obřího, více než třikilometrového evropského laseru na volných elektronech XFEL.*

LCLS – *Linac Coherent Light Source, rentgenový laser na volných elektronech provozovaný v americkém urychlovacím středisku SLAC (Kalifornie, Menlo Park) od roku 2007. Laser má délku 2 kilometry a pokrývá vlnové délky od 0,13 nm do 6,2 nm. Po zprovoznění evropského laseru XFEL v září 2017 se stal druhým největším rentgenovým laserem světa.*

V roce 2012 jsme při expedici Aurora, jejímž hlavním cílem bylo pozorování polárních září v severním Norsku, navštívili také německou částicovou laboratoř DESY v Hamburku. Už tehdy jsme věděli, že je zde v plném proudu stavba největšího rentgenového laseru na světě, a tak jsme si staveniště obra XFEL o délce 3,4 kilometru nemohli nechat ujít. Budoucí experimentální hala s podlahou 40 metrů pod úrovní země tehdy ještě neměla střechu a připomínala spíše obří jámu, do níž by se vešlo celé náměstí. Uplynulo pouhých pět let a dne 4. května 2017 prošlo zařízením první „světlo“. Samozřejmě jde o světlo v přeneseném slova smyslu, ve skutečnosti šlo o obří rentgenové impulzy, které byly prvním testem připravenosti zařízení k oficiálnímu uvedení do provozu, ke kterému došlo v září 2017.

Základní informace o laserech XFEL

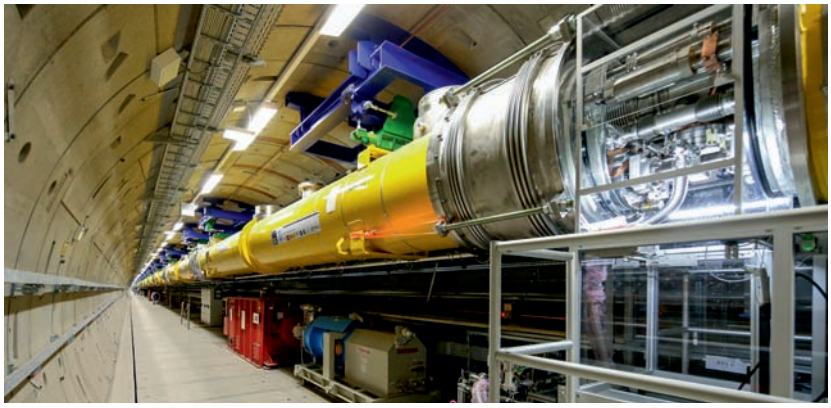
Všechny lasery XFEL (*X ray Free Electron Laser*, rentgenové lasery na volných elektronech) jsou ve skutečnosti obří lineární urychlovače elektronů. Jednotlivé shluky elektronů jsou urychleny elektrickým polem v mikrovlnných dutinách na rychlost blízkou rychlosti světla. Poté elektrony přecházejí z urychlovací části do undulátoru. V něm se střídají severní a jižní pólové nástavce a magnetické pole zmítá shluky elektronů ze strany na stranu a tyto shluky začnou generovat synchrotronní záření, které letí jen o něco rychleji než rozkmitané elektrony, vznikající rentgenový impulz je tedy předběhne. Shluk elektronů generuje koherentní laserové světlo v rentgenové oblasti. Na konci undulátorové části jsou elektrony vychýleny magnetickým polem do útlumového členu a vzniklý laserový impulz je veden do haly s experimenty. Dosud největším laserem XFEL byl americký LCLS o délce



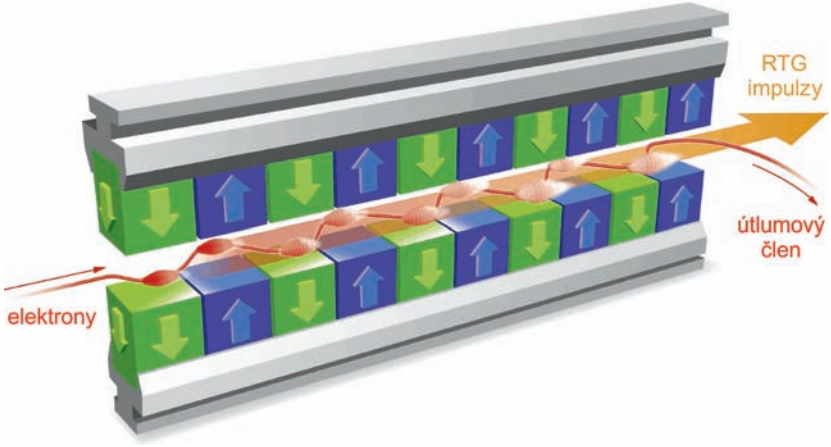
Mapa s vyznačením trasy tunelu evropského laseru XFEL v Hamburku. Dobře je patrné závěrečné dělení do pěti dceřiných tunelů vstupujících do experimentální haly umístěné v Schenegeldu. Zdroj: XFEL/DESY.

dva kilometry, ale v září 2017 převzal pomyslné žezlo evropský laser European XFEL s celkovou délkou 3,4 kilometru.

Lasery na volných elektronech jsou vynikajícími nástroji pro vědecký výzkum na hranici našeho poznání. Na rozdíl od jiných laserů jsou laditelné a lze v určitém rozsahu měnit jejich vlnovou délku. To je samozřejmě při hledání neznámých fyzikálních zákonitostí výhodné. Lasery na volných elektronech mají především dvě oblasti použití. První z nich je vytváření extrémních stavů látky, které se na Zemi za běžných podmínek nevyskytují. Interakce laserového impulzu s látkou dokáže vytvořit látku v dosud neznámých formách, které se mohou vyskytovat například v nitrech hvězd. Druhou oblastí jsou různé zobrazovací techniky. Rentgenové záření má velmi krátkou vlnovou délku a je možné pomocí něho zobrazit procesy na úrovni molekul, tedy i jejich strukturu, chemické reakce, vibrace, molekulární dynamiku a podobné jevy. V tomto případě laser XFEL slouží jako obrovský mikroskop. Vzhledem k tomu, že elektrony jsou urychlovány v po sobě jdoucích shlucích, mohou mít vycházející laserové impulzy vysokou frekvenci, a proto bychom spíše než o mikroskopu měli hovořit o vysokofrekvenční kameře s mimořádným rozlišením. Molekulární reakce, které známe ze stránek školních učebnic, lze pozorovat za pomoci laserů XFEL doslova v přímém přenosu.



Pohled na tunel urychlovací části laseru European XFEL. Zdroj: XFEL/DESY.



Princip undulátoru. Shluk elektronů je rozkmitán střídajícími se pólovými nástavci tak, že se začne pohybovat po zvlněné dráze a generuje koherentní rentgenové záření. Na konci undulátoru jsou elektrony vychýleny do útlumového členu, zatímco laserový impulz pokračuje k experimentům. Zdroj: XFEL/DESY.

Hamburský gigant

V komplexu DESY (komplex částicových laboratoří v Hamburku) započala stavba tohoto obřího laseru XFEL v roce 2008. Nešlo o počin



Dnešní podoba nadzemních podlaží experimentální haly. Fotografie je z roku 2017. Zdroj: XFEL/DESY.

SACLA – *SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser, rentgenový laser na volných elektronech, který je od roku 2011 provozován v japonském komplexu urychlovačů Spring-8 v prefektuře Hjógo. Délka zařízení je 0,7 km. Na poměrně krátké vzdálenosti je možné generovat elektromagnetické záření s vlnovou délkou 0,06 nm. Po zprovoznění evropského laseru XFEL v září 2017 se stal třetím největším laserem tohoto druhu na světě.*

Undulátor – *struktura periodicky se střídajících magnetů, která se využívá k vybuzení synchrotronního záření prolétávajícího svazku nabitých částic. Trajektorie částic se vlivem střídajícího se pole zvlní a nabité částice proto vyzařují. Pro velkou amplitudu oscilací částic se zařízení nazývá wiggler. Původně se undulátorem nazýval zapisovací přístroj pro podmořskou telegrafii sestrojený Lauritzenem. Skládal se ze 4 vinutých elektromagnetů se střídající se orientací a dvou otočných obloukovitých magnetů na hřídeli. Elektrický proud procházející vinutými magnety vybudil pole, které otáčelo pohyblivými magnety a jejich pohyb byl přenášen na zapisovací zařízení.*

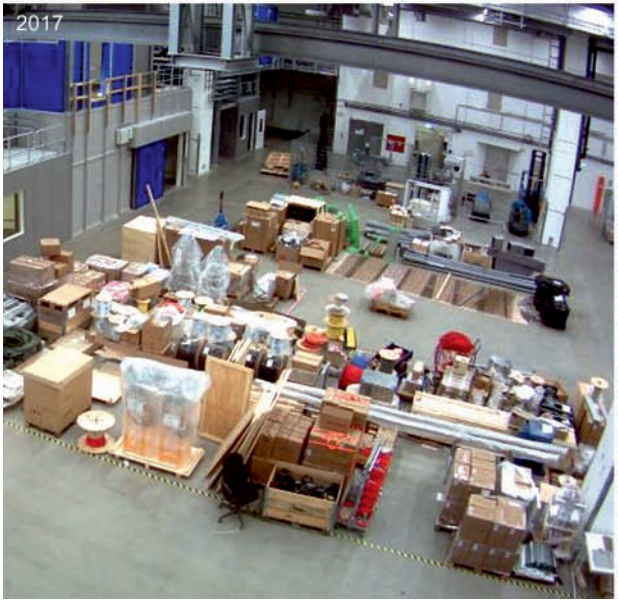
na „zelené louce“, ale v DESY je již delší dobu provozován čtvrtkilometrový laser na volných elektronech FLASH, na kterém byly získány bohaté zkušenosti. Evropský laser XFEL je vybudován 40 metrů pod zemí. Jeho tunel je veden z centra DESY pod hamburskými čtvrtěmi Osdorf a Shenefeld. Před vstupem do experimentální haly se tunel větví do pěti menších tunelů, z nichž je pak elektromagnetický signál rozváděn k experimentům. Pro stavbu podzemní experimentální haly byla použita speciální betonová směs, která zabraňuje průsakům vody z okolních hornin do podzemní budovy. Stačila by nepatrná trhlina a podzemní experimentální hala by se stala nejdražším bazénem světa.

Samotný urychlovací tunel má délku 2,1 kilometru a elektrony v něm získají v supravodivých mikrovlnných rezonančních dutinách energii 17,5 GeV. Za urychlovací částí následuje undulátorová část, v níž je na délce 210 metrů rozmístěno 17 290 permanentních magnetů. Celková délka laseru od injektoru elektronů až po ústí do experimentální haly je 3,4 kilometru. V „mikroskopickém“ režimu by mělo být dosaženo rozlišení 0,1 nanometru, což je dostatečné pro sledování detailů v běžných molekulách. První rentgenový impulz se podařilo vygenerovat dne 4. května 2017 a záření mělo vlnovou délku 0,8 nanometru. Opakovací frekvence impulzů byla 1 sekunda. Rutinní provoz laseru započal v září 2017. Postupně se zvyšuje opakovací frekvence impulzů, cílem je 27 000 impulzů za sekundu. Gigantický laser v sousedním Německu je nejvýkonnější vysokorychlostní kamerou světa v rentgenovém oboru.

■ **Petr Kulhánek, 5. 5. 2017, AB 16/2017**


2012
EXPERIMENTÁLNÍ
HALA XFEL


2012
CAT


2017


2018

Jak pokračuje stavba gigantu E-ELT?

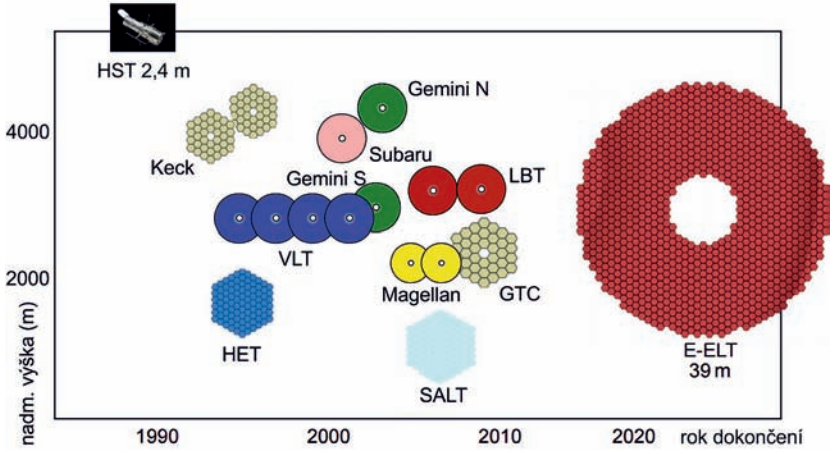
ESO – *European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, zkráceně European Southern Observatory, Evropská jižní observatoř. Organizace byla založena v roce 1962. Postavila řadu dalekohledů v Chile. Jde o lokality La Silla (2 400 m), kde je dalekohled NTT, dále Cerro Paranal (2 635 m) s čtveřicí dalekohledů VLT a planinu Llano Chajnantor (5 080 m), kde se nachází radioteleskopická síť ALMA.*

E-ELT – *European Extremely Large Telescope, Evropský extrémně velký dalekohled, pozemský dalekohled, který bude pozorovat vesmír v optickém a blízkém infračerveném oboru spektra. Staví se na chilské hoře Cerro Armazones. Do provozu má být uveden v roce 2024. Jeho primární zrcadlo bude segmentové, celkem o průměru 39,3 m.*

Od června 2014 se na vrcholku chilské hory Cerro Armazones staví nový velmi výkonný pozemní dalekohled se segmentovaným zrcadlem o průměru 39 metrů. Nový gigant získal pojmenování Evropský extrémně velký dalekohled (E-ELT) a provozovat ho bude Evropská jižní observatoř (ESO), mezinárodní organizace, jejímž členem je od roku 2007 i Česká republika. První světlo by mělo dalekohledem projít už v roce 2024. Souběžně s evropským dalekohledem se staví i mezinárodní dalekohled TMT (*Thirty Meter Telescope*) s dominantní účastí Spojených států. Tento „třicetimetr" je budován na Havajských ostrovech, ale protesty různých ekoteroristů proti jeho stavbě jsou tak veliké, že není jasné, zda budou započaté práce vůbec pokračovat. Uvažuje se o přemístění stavby na Kanárské ostrovy. V době psaní této knížky (červen 2018) není o osudu dalekohledu ještě rozhodnuto.

Trocha historie

Dalekohled E-ELT bude jeden ze členů nejvyšší třídy obřích pozemních dalekohledů, které slibují revoluci v našem pohledu na vesmír a v jeho chápání. Nový evropský dalekohled bude obrovským skokem vpřed ve výzkumu vesmíru. Výjimečný projekt si také žádá výjimečnou technickou připravenost ve všech oblastech realizace. Dosavadní zkušenosti Evropské jižní observatoře s podobnými projekty jasně dokazují, že budovat továrny na vědu, společně se svými partnery, skutečně ovládají. Přesto je stavba E-ELT něčím výjimečná. Někdo může namítnout, že je to jen otřepané klišé, které neodmyslitelně patří k prezentaci něčeho nového. Přece každý projekt byl ve své době něčím unikátní a každý měl svá specifika. Nikoliv. E-ELT výjimečný je a bude. Největším kompaktním dalekohledem současnosti



E-ELT soustředí více světla než všechny existující osmi až desetimetrové dalekohledy na světě dohromady. Zdroj: ESO.

je Velký Kanárský dalekohled (*Gran Telescopio Canarias*) o průměru 10,4 m, který provozují Španělsko (90 %), Mexiko (5 %) a USA (5 %) na ostrově La Palma. V devadesátých letech a na přelomu tisíciletí bylo postaveno celkem 13 velkých dalekohledů, přičemž průměry hlavních zrcadel se pohybovaly nejčastěji zhruba od 8 do 10 metrů. Zvykli jsme si také na stavby interferometrů, kdy dva a více dalekohledů dokáží pracovat společně. To je hlavní argument výjimečnosti projektu E-ELT. Žádné přidání metru či dvou k velikosti stávajících zrcadel. E-ELT soustředí více světla než všechny existující 8 až 10 metrové dalekohledy na světě dohromady! Ohromná sběrná plocha hlavního objektivu podpořená adaptivní optikou nabídne astronomům snímky patnáctkrát ostřejší než ty z Hubblova vesmírného dalekohledu.

Projekt E-ELT vzešel z původního plánu dokonce stometrového dalekohledu, který se ukázal v rozumné cenové relaci současnými technologiemi nerealizovatelný. Dalekohled bude mít nakonec průměr „jen“ 39,3 metrů. V původním návrhu sice stálo 42 metrů, ale v roce 2011 byl plán přepracován kvůli snížení nákladů a urychlení výstavby.

Do konečné fáze výběru místa, kde bude nový E-ELT postaven, postoupily lokality Armazones, Ventarrones, Tolonchar, Vizcachas v Chile a La Palma ve Španělsku. Rozhodnutí řídicího orgánu ESO vzešlo z rozsáhlého srovnávacího meteorologického průzkumu, který trval několik let. Většina výsledků, získaných při této kampani pro výběr vhodné lokality, byla zveřejněna v průběhu roku 2010. Podle této zprávy byla lokalita Cerro Armazones poblíž Paranalu jednoznačným favoritem na vítěze, neboť v rámci zadaných kritérií má nejvyváženější pozorovací podmínky. Nelze přitom opomenout, že při výběru lokality sehrála podstatnou roli možnost provozovat nový dalekohled v těsné blízkosti *ESO Paranal Observatory*, která je doslova na dohled od Cerro Armazones. Budou tedy spolu sdílet

Cerro Armazones – *hora v severní Chile, asi 130 km jihovýchodně od Antofagasty. Její vrchol leží 3 064 m nad mořem. 89 % nocí je v této oblasti bezoblačných. Sídlí zde Observatoř Cerro Armazones, která je společným pracovištěm německé Porúrské univerzity v Bochumi a Severochilské katolické univerzity. V současné době je největším přítomným dalekohledem (průměr 1,5 m) reflektor Hexapod, jehož jméno připomíná neobvyklou montáž na Stewartově plošině. Buduje se Evropský extrémně velký dalekohled. Poloha: 24° 35′ 21″ S, 70° 11′ 32″ W.*



Snímek ukazuje pohled na srovnaný vrcholek Cerro Armazones s dokončenou přístupovou komunikací k budoucímu dalekohledu. Zdroj: ESO/G. Hüdepoh.

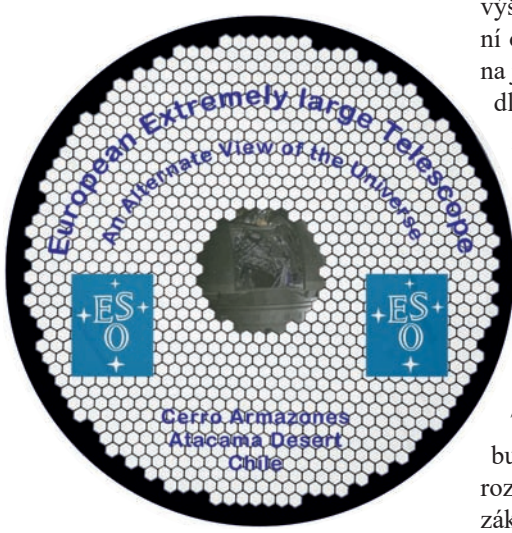
Adaptivní optika – *slouží ke korekci vysokofrekvenčních změn obrazu způsobených zejména turbulencí atmosféry (až 1000 korekcí za sekundu). Korekce se provádí počítačem řízenými posuny a deformacemi pomocných zrcátek. K vyhodnocení aktuálního tvaru vlnoplochy slouží referenční hvězda, která se musí nacházet v blízkosti pozorovaného objektu. Asi v 1% případů lze využít přirozenou hvězdu (NGS – Natural Guide Star). Většinou se používá umělá hvězda (LGS – Laser Guide Star), která se vytváří laserovým paprskem fokusovaným do výšky přibližně 90 km, kde zpětným rozptylem vzniká skvrna zářících sodíkových atomů. Druhou možností je využití Rayleighovy difúze ve výškách 10 až 20 km. Umělou hvězdu můžeme vytvořit jakkoli blízko sledovanému objektu, vyvstávají ale problémy spojené s její konečnou výškou a velikostí.*

téměř ideální podmínky pro astronomická pozorování, které nabízejí přes 320 jasných nocí do roka! Rozhodnutí dlouhodobě garantuje budoucnost Paranalu jako jedné z nejvyspělejších observatoří na světě a je vnímáno i jako logický krok v posílení samotné Evropské jižní observatoře – vůdčí organizace světové pozemní astronomie.

Stavba E-ELT započala dne 19. června 2014, kdy byl za přítomnosti médií odstřelen vrcholek hory Cerro Armazones. Odstranění zhruba 300 000 m^3 zeminy mělo za následek vznik přibližně 150×150 m velké platformy pro základ nového dalekohledu. K budoucímu dalekohledu byla postavena zcela nová silnice, která umožní vozit stavební materiál a později díly dalekohledu. Chilská vláda poskytla 189 km^2 pozemků kolem Cerro Armazones pro instalaci dalekohledu E-ELT a po dobu 50 let bude garantovat i koncesi vztahující se k oblastem okolo observatoře. Tato větší oblast o rozloze 362 km^2 bude chránit dalekohled E-ELT před světelným znečištěním a vlivy těžebních aktivit.

Jak bude dalekohled vypadat?

Hlavní nosná konstrukce nového dalekohledu bude dosahovat hmotnosti 3 350 tun oceli, přičemž do pohybu bude uváděna alt-azimutální část montáže dalekohledu o hmotnosti 755 tun kolem dvou kolmých os (azimut a výška). Na dvojici masivních kolébek se dalekohled otáčí ve výškové ose, zatímco tři azimutální dráhy s axiálním zatížením umožní otáčení dalekohledu kolem zenitu (nadhlavníku). Konstrukce musí na jednu stranu poskytnout dostatečně tuhé rozhraní pro primární zrcadlo se segmenty a na druhou stranu by její hmotnost a hmotnost podpory neměly být extrémně veliké. Obě osy podpírají hydrostatická ložiska. Montáž bude poháněna elektrickými motory s přímým pohonem a přesností 0,3 obloukové vteřiny, a to i za maximální síly větru. Azimutální patro se bude pohybovat na axiálních ložiscích o průměrech 51,5 m, 34 m a centrálním čtyřmetrovém prstenci. Axiální hydrostatická ložiska jsou umístěna na celkem 36 pozicích, které podpírají hlavní konstrukci dalekohledu.



Dalekohled bude instalován na centrální symetrické radiální konstrukci s kruhovou základnou s celkovým vnitřním průměrem 79 m a vnějším průměrem 92 m. Minimální výšku nad terénem bude mít 12,4 m. Po celou dobu pozorování bude zachován provozní rozsah dalekohledu do 30° nad horizontem. Jednou z klíčových úloh základů bude izolace přístroje od zemětřesení. Tomu by měl zabránit

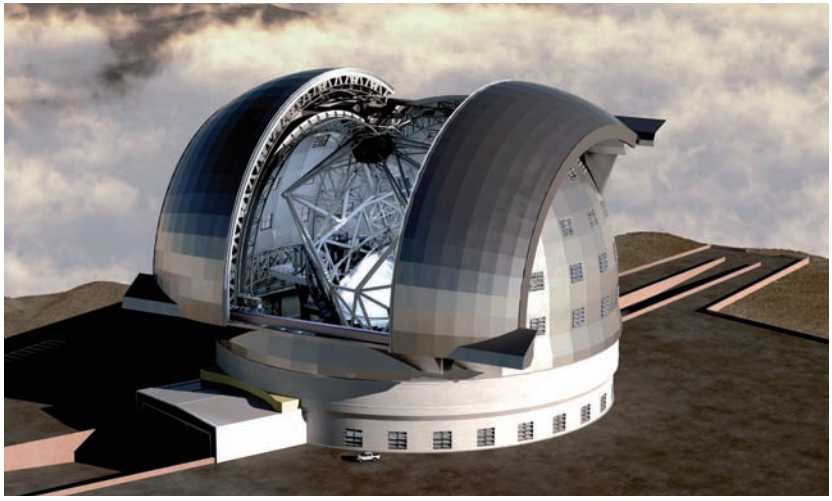
speciálně navržený systém složený ze čtyř různých tlumicích prvků, které by měly zajistit vysokou tuhost při běžném provozu dalekohledu a redukci zatížení v některých místech až o 30 %. Izolační prvky budou mít naopak nízkou tuhost při tlumení seismických změn s tlumicím faktorem 15 %.

Speciální částí azimutální jednotky jsou tzv. fokální stanice, jsou dvě a každá z nich váží 28 tun. Platforma v Nasmythově ohnisku dalekohledu unese až 98 tun přístrojů při plném využití výkonu přístroje. Pohyb dalekohledu ve svislém směru umožní obří kolébka, kterou podpírá deset identických hydrostatických ložisek, jedno z nich je radiální a dvě boční. Ložiska jsou instalována do společné sestavy v těsné blízkosti pohonu.

Aktivní optika – *způsob korekce nízkofrekvenčních (0,03 Hz a nižších) deformací primárního zrcadla. Poprvé byl systém aktivní optiky vyvinut a použit pro dalekohled NTT (New Technology Telescope) o průměru 3,5 metru, který patří ESO a je umístěn na hoře La Silla. Aktivní optika by měla eliminovat především tyto jevy: stálé výrobní vady, tepelné deformace způsobené teplotním gradientem, kompenzace vlastního průhybu zrcadla způsobeného gravitací, kompenzace nízkofrekvenční složky deformace zrcadla způsobené větrem a změny způsobené přechodem mezi Nasmythovým a Cassegrainovým ohniskem.*

Zrcadlo

Základem optické části dalekohledu je eliptické konkávní primární zrcadlo o průměru 39,3 m s poloměrem křivosti 69 m. Zrcadlo bude vyrobeno z jednotlivých optických prvků – primárních zrcadlových segmentů. Segmenty mají kvazi-hexagonální tvar, diagonální průměr 1,45 m a tloušťku 50 mm (měřeno ve středu). Segmenty bude od sebe navzájem dělit vzdálenost 4 mm. Samotné segmenty se vyrábějí z materiálů s nízkou roztažností (skla nebo keramiky), jako jsou například ULE (*Ultra Low Expansion glass*), Zerodur, Astrositall nebo Clearceram. Šestiúhelníkové segmenty jsou rozděleny do šesti sektorů po 133 segmentech. Plochu 978 m^2 primárního zrcadla bude tedy tvořit celkem 798 segmentů. Vyrobeno však bude dohromady 931 segmentů, aby bylo možné zajistit provozní režim dalekohledu vzhledem k životnosti reflexní vrstvy, kterou je každý segment opatřen. Reálně to znamená, že se bude muset každý den vyměnit jeden nebo dva segmenty, neboť reflexní vrstva má v prostředí Atacamské pouště, do níž Cerro Armazones patří, životnost pouhých 18 měsíců.



Počítačová podoba dalekohledu E-ELT o průměru 39,3 metru. Zdroj: Evropská jižní observatoř.

Astigmatismus – *optická vada, při které se dva mimoosé paprsky zobrazí do dvou různých ohnisek kolmo na osu. Astigmatické zrcadlo je konstruováno tak, že tuto vadu nemá.*
Koma – *optická vada, při které se bodový objekt zobrazí jako útvar připomínající hlavu komety. Jde o formu nepravidelného astigmatismu, která není korigovatelná běžnými prostředky.*
Trefoil – *optická vada, při které se bodový objekt zobrazí jako útvar připomínající znak známý z kapot automobilů značky Mercedes. Jde o formu nepravidelného astigmatismu, která není korigovatelná běžnými prostředky.*

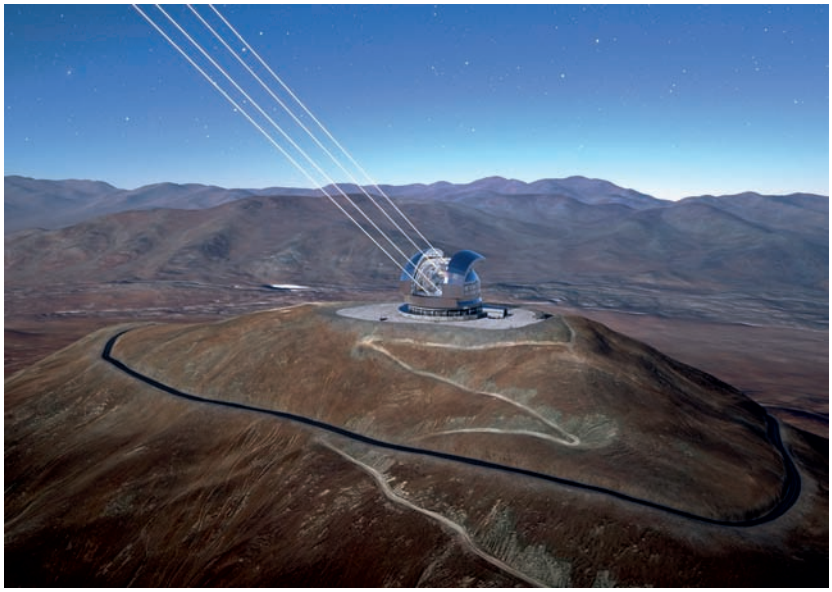


Každé segmentové zrcadlo je v axiálním směru podepřeno 27 opěrnými body. Tyto body jsou seskupeny do devíti stativů se třemi základními podporami. Celkový počet 27 opěrných bodů je ideální, protože umožňuje snížit gravitací vyvolané deformace zrcadla na minimum. Tři opěrné body umožňují reakční zatížení rovnoběžné s povrchem segmentu. Nutno však podotknout, že se nejedná pouze o pasivní korekci deformace při svislé změně polohy dalekohledu. Celá segmentová jednotka totiž navíc umožňuje korekci celkového tvaru primárního zrcadla (systém aktivní optiky). Pomocí torzní trubky v ose základní podpory může být docíleno změny optických parametrů. Torzní moment generuje dvojice krokových motorů umístněných na každé ze tří hlavních podpěr. Změnou přesně daného momentu je možné měnit normované módy – tedy zaostření, astigmatismus, komu nebo trefoil. Podpůrná jednotka zrcadlového segmentu má také za funkci korigovat tepelnou deformaci. Tepelná roztažnost působící mezi segmentem a nosnou konstrukcí způsobí, že 27 tečných ohybových momentů je vedeno do vzpěry segmentového spojení, která způsobuje deformaci ohniska zrcadlového segmentu. Vzhledem k rozdílu v tepelné roztažnosti mezi segmentovým zrcadlem a nosnou kovovou konstrukcí je obtížné kompenzovat tepelnou deformaci vyvolanou v radiálním směru. Proto je lepší, aby k němu byla kovová konstrukce necitlivá. Toho je dosaženo tak, že všechny podpůrné vzpěry segmentu jsou zeštíhlené. Tím se dosáhlo maximálního využití vysoké tahové pevnosti v porovnání s její tuhostí v ohybu. První funkční prototyp podpůrné jednotky byl vyroben už v roce 2010.

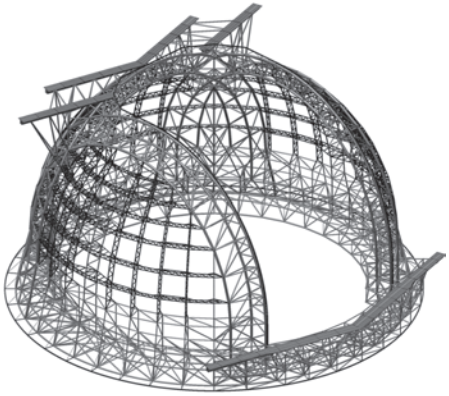
ESO v lednu 2015 podepsalo kontrakt s firmou CESA (Španělsko) a VDL (Nizozemsko) na dodávku pomocných zařízení pro primární zrcadlo E-ELT. To navazuje na dřívější návrh a vývoj prototypů, které byly v ESO předtím intenzivně testovány. Další kontrakty byly podepsány až v roce 2017. Kontrakt na dodávku 931 segmentů pro primární zrcadlo vyhrála německá společnost SCHOTT, leštění segmentů dostala na starost francouzská společnost Safran Reosc. Německá společnost SCHOTT získala současně kontrakt na výrobu sekundárního (4,2 m) a terciálního zrcadla (3,8 m). Podpůrné konstrukce pod tato dvě zrcadla vyrobí SENER Group (nadnárodní skupina s ředitelstvím ve Španělsku). Přípravu řídicího systému zrcadla vyhrálo konsorcium FAMES (společnosti Fogale a Micro-Epsilon). Času není nazbyt, podle plánu by celý gigant měl být v provozu od roku 2024.

Česká účast

ESO je nejvýznamnější mezivládní astronomická organizace Evropy, která v současnosti provozuje jedny z nejproduktivnějších pozemních astronomických observatoří světa. ESO podporuje celkem 16 zemí včetně České republiky, která se stala členem ESO v roce 2007. Roční příspěvek České republiky činí přibližně 1,4 milionů eur, což představuje 1,05 % příspěvku všech členských států. Na stavbu E-ELT přispěla jednorázově Česká republika v roce 2011 částkou 3 miliony eur. Pozorovací čas na zařízeních ESO je rozdělován na základě kvality soutěžících projektů. Míra úspěšnosti projektů podaných českými astronomy představuje přibližně 3,5 % pozorovacího času. České vědecké týmy a průmysl využívají celé řady zakázek na špičkové vědecké technologie. ESO doposud udělovalo zakázky bez ohledu na zpětnou distribuci ročních příspěvků od členských států. V souvislosti se stavbou E-ELT však bude preferován princip částečné návratnosti formou zakázek do příslušných států. Nicméně příležitosti pro české firmy zůstávají doposud jen v získávání menších zakázek. Stále zde totiž platí podmínka ze strany ESO, že velké zakázky získají výhradně firmy s minimálním ročním obratem 30 milionů eur. To většinou české firmy nemají šanci splnit. Proto v seznamu hlavních dodavatelů pro E-ELT nenalezneme jediného českého zástupce. Firmy z České republiky se tedy budou na stavbě E-ELT podílet na subdodavatelské úrovni – podobně, jako tomu bylo v minulých letech například na projektu radioteleskopické sítě ALMA.



Lasery systému adaptivní optiky ve vizualizaci ESO. Takový pohled by se měl naskytnout už v roce 2024.

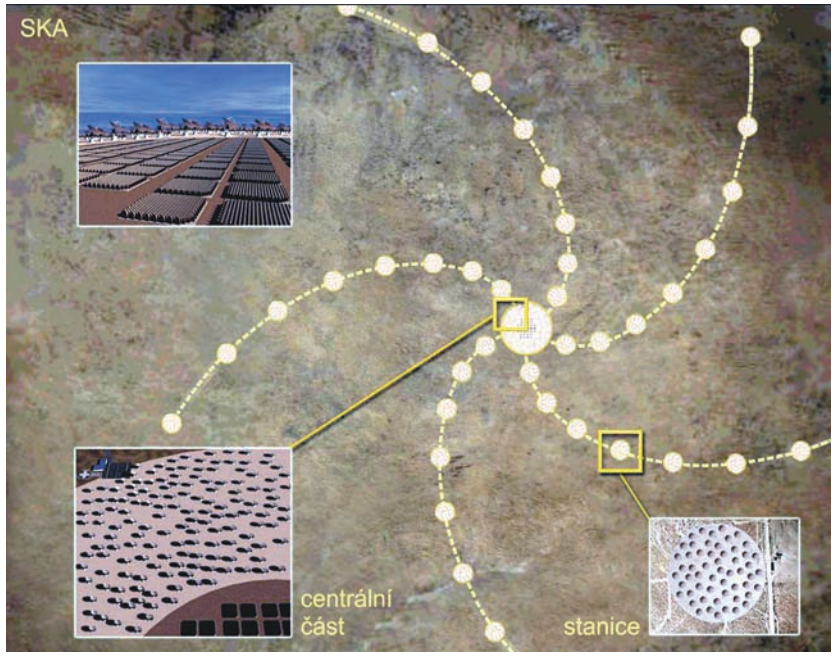


■ **Jaroslav Trnka, 30. 9. 2016, AB 36/2016, aktualizováno**

Kilometrové pole SKA – **největší vědecký projekt**

SKA – *Square Kilometer Array. Plánovaná síť radioteleskopů, která by měla fungovat jako jediný gigantický přístroj o ploše 1 km². K vybudování bude potřeba území o průměru 6 000 km, předpokládaná cena je dvě miliardy euro. Mělo by jít o tisíce antén třech typů (pro různé frekvence). Staví se v západní Austrálii a Jižní Africe.*

Evropské společenství se v posledních letech jako jediné na světě pouští do obřích vědeckých projektů, které nemají konkurenci. V provozu je největší urychlovač světa LHC v komplexu CERN, pod italskou horou Gran Sasso probíhají desítky experimentů v největší podzemní laboratoři světa, usilovně se staví největší dalekohled E-ELT o průměru 39 metrů a připravuje se stavba obřího vesmírného interferometru eLISA s rameny milion kilometrů. V letošním roce dostala zelenou stavba radioteleskopického pole SKA složeného z mnoha tisíc radioteleskopů umístěných na dvou kontinentech. Jde o mezinárodní projekt, v němž má Evropa významné postavení. Celková sběrná plocha by měla po dokončení dosáhnout jednoho kilometru čtverečního. Jedná se o stavbu zcela mimořádnou, stavbu natolik gigantických rozměrů, že v historii lidstva nenajdeme nic obdobného.



Obří radioteleskopická síť SKA se bude skládat z centrální části a stanic, které se od ní budou vinout v pěti spirálách. Mezi nejvzdálenější stanicí a centrem bude vzdálenost 3 000 kilometrů. Centrum pokryje 50 % sběrné plochy observatoře. Jednotlivé přijímače budou tří typů – od klasických mís až po plošné antény. Zdroj: SKA.

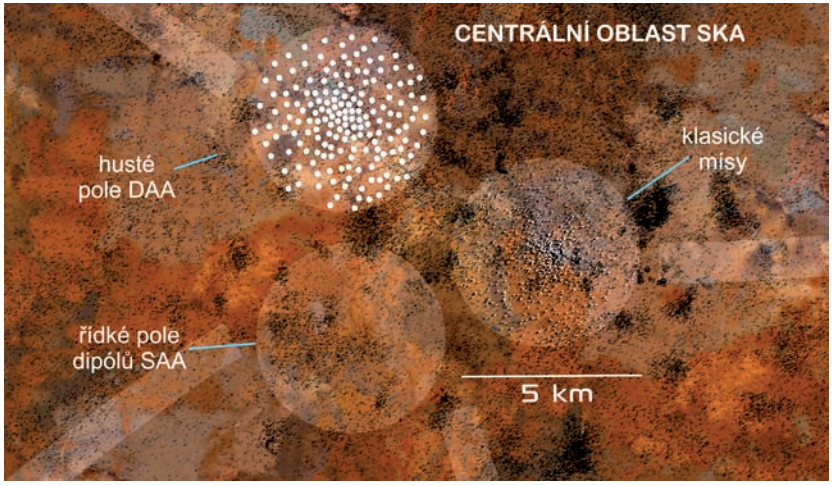
Radioastronomie

Zemská atmosféra plně propouští jen vizuální obor a část rádiových vln. Není proto divu, že se radioastronomie po vizuální astronomii stala v pořadí druhým způsobem pozorování vesmírných objektů. Vše začalo v roce 1933, když Karl Jansky, zaměstnanec Bellových telefonních laboratoří, nalezl při sledování poruch v telefonii rádiový signál z centra Mléčné dráhy. V následujících desetiletích nastal bouřlivý rozvoj radioastronomie a v současnosti si bez ní pozorování vesmíru nedokážeme představit. Největší pohyblivý radioteleskop světa má průměr mísy 100×105 metrů a nachází se v americkém Green Banku. Na druhém místě je

evropský Effelsberg, který má průměr mísy 100 metrů. V provozu jsou také obří nepohyblivé radioteleskopy, které vyplňují celá údolí. Změnu místa pozorování zajišťuje rotace Země a částečně pohyblivé ohnisko. Největší je čínský radioteleskop FAST (Oko nebes) s průměrem 500 metrů. Za zmínku stojí také radioteleskop Arecibo s průměrem 304 metrů, který vyplňuje terénní nerovnost na ostrově Portoriko.

Radioteleskopy se často sdružují do radioteleskopických polí, která jednak zvyšují sběrnou plochu a úhlové rozlišení, a jednak umožňují interferometrii s velkou pozorovací základnou. Interferometrická měření v obřích sítích radioteleskopů se zpracovávají technologií VLBI, která je dnes mimořádně propracovaná. K nejznámějším radioteleskopickým polím patří VLA v Novém Mexiku, 27 radioteleskopů se základnou 36 kilometrů. Mnohem větší základnu má radioteleskopické pole VLBA složené z pouhých deseti přístrojů – nejzápadnější z nich je postaven na Havajských ostrovech, nejvýchodnější na Panenských ostrovech, což vytváří základnu o vzdálenosti 8 600 kilometrů. Další rozlehlá radioteleskopická pole jsou provozována v Evropě a v Austrálii. Jednotlivá radioteleskopická pole se slučují do větších celků, a tak lze dnes hovořit o celosvětové radioteleskopické síti, která byla v letech 1997 až 2005 doplněna japonským osmimetrovým radioteleskopem umístěným na družici HALCA. Po její deaktivaci měla být HALCA v roce 2012 nahrazena další japonskou družicí Astro-G, projekt ale zkrachoval na nedostatku finančních prostředků. V současnosti je jediný radioteleskop ve vesmíru, o který lze rozšířit základnu interferometrie založené na technologii VLBI, umístěn na ruské družici Spektr-R. Má průměr 10 metrů a funguje od roku 2011. Největší evropské radioteleskopické pole (co do počtu radioteleskopů) je umístěno v Atacamské poušti v jižní Americe. Jde o 66 radioteleskopů ALMA provozovaných od roku 2012. Stavba pole SKA, která začíná v roce 2018, současnou radioastronomii změní k nepoznání.

ATA – *Allen Telescope Array, projekt radioteleskopické sítě složené z 350 šestimetrových antén, jejichž celková sběrná plocha by měla mít hektometr čtvereční. Pole je pojmenováno podle nadace Paula Allena, která uvolnila pro rozjetí projektu prostředky. Výstavba probíhá na půdě rádiové observatoře Hat Creek v blízkosti Oaklandu patřící Kalifornské univerzitě. Jde o společné úsilí SETI a Kalifornské univerzity. Jedním z cílů sítě by mělo být hledání mimozemských civilizací. V současnosti se stavba neskutečně vleče, potýká se s obrovskými finančními problémy a v provozu je pouhých 42 radioteleskopů. Vize, že se ATA stane technologickým předskokanem radioteleskopického pole SKA, odkrčela do říše snů.*



Centrální oblast SKA bude mít napříč zhruba deset kilometrů a budou v ní tři oblasti antén: 1) klasické mísy, 2) řídké aperturní pole SAA (řídce rozmístěné dipóly pro nízké frekvence) a mnoho bloků hustého aperturního pole DAA (kompaktní oblast radiometrů pro střední frekvence). Zdroj: SKA/SPDO/SAP.

ALMA – *Atacama Large Millimeter Array, pole radioteleskopů v Atacamě, viz strana 69.*
VLA – *Very Large Array, síť 27 radioteleskopů poskládaných do tvaru písmene Y umístěná v Socorru v Novém Mexiku. Průměr jedné antény je 25 metrů, hmotnost 230 tun. Elektronicky zpracovaná data poskytují rozlišení odpovídající základně 36 kilometrů a citlivost odpovídající jednomu dalekohledu o průměru 130 metrů. Síť provozuje National Radio Astronomy Observatory (NRAO) od roku 1980.*

Tři typy antén (shora dolů): 1) klasické radioteleskopické mísy; 2) řídké aperturní pole SAA pro nízké rádiové frekvence; 3) husté aperturní pole SAA pro střední rádiové frekvence. Zdroj: SKA/SPDO/SAP.



Kilometrové pole SKA

Obří radioteleskopické pole SKA je celosvětový projekt s dominantním postavením evropských zemí. Ředitelství je v Jodrell Banku, jižně od anglického Manchesteru, kde je provozován Lovellův radioteleskop o průměru 76 metrů. Z evropských zemí se na stavbě podílejí Velká Británie, Německo, Itálie, Švédsko a Holandsko. Z dalších zemí jde o Austrálii, Kanadu, Indii, Maltu, Nový Zéland, Jižní Afriku a snad i Čínu, jejíž zapojení je nejisté. Stavba probíhá na dvou místech na světě – v západní Austrálii a v Jižní Africe.

V SKA se počítá s několika druhy antén. Základem budou samozřejmě klasické paraboly o průměru 12 metrů a výšce 15 metrů, těch bude v radioteleskopickém poli nejvíce (řádově tisíce) a pokryjí frekvence od 350 MHz do 14 GHz. Tyto paraboly ale nebudou v projektu jediné, budou doplněny dalšími parabolami jiné konstrukce a jiných velikostí, které budou zajišťovat přehlídkové pozorovací kampaně. Pro nízké frekvence 50 MHz až 350 MHz se počítá s řídkými poli dipólových antén SAA (*Sparse Aperture Array*). Na středních frekvencích budou provozována tzv. hustá aperturní pole DAA (*Dense Aperture Array*) – větší množství radiometrů spojených do jediného celku.

V obou lokalitách bude dodržena stejná topologie rozmisťování antén. V centrální oblasti o průměru cca 10 kilometrů bude soustředěna celkem polovina sběrné plochy a budou zde zastoupeny oblasti se všemi druhy antén, tj. mísami, a hustými i řídkými aperturními poli. Hustota antén bude výrazně klesat až do vzdálenosti 180 kilometrů od centra, kde bude pokryto už 75 procent veškeré sběrné plochy. V ještě větších vzdálenostech budou antény rozmisťovány jen v oddělených stanicích, a ty se budou po pěti spirálách z centra vzdalovat až do poslední stanice umístěné ve vzdálenosti 3 000 kilometrů od centra. Na každé stanici bude minimálně 20 mís a jedno husté aperturní pole.

Nejvzdálenější stanice v australské části bude na Novém Zélandu. Nejvzdálenější stanice v jihoafrické části budou v Botswaně, Ghaně, Keni, Namibii, Zambii a na Madagaskaru a Mauritiu. V obou lokalitách se nestaví na zelené louce. Australská část vyrůstá v okolí radioastronomické observatoře Murchison, kde bylo jako předskokan postaveno radioteleskopické pole ASKAP (*Australian Square Array Pathfinder*) skládající se ze 36 stejných parabol o průměru 12 metrů a sběrné ploše 4 000 m^2. Toto pole bylo vybudováno v letech 2009 až 2012 a stane se součástí budovaného pole SKA. V africké části bude centrum v okolí

lokality Karoo, kde bylo v roce 2013 zprovozněno prvních 7 antén pod názvem KAT-7 (*Karoo Array Telescope*). Ty se staly základem nyní budovaného pole MeerKAT o 64 anténách s průměrem 13,5 metru. Na konci roku 2017 bylo 16 antén funkčních. Název MeerKAT je slovní hříčkou, KAT samozřejmě znamená „*Karoo Array Telescope*“. Slovo „meerkat“ je pojmenování pro malou šelmu, surikatu, žijící hojně v místech, kde se radioteleskopické pole staví. Pole MeerKAT se opět v budoucnu stane součástí budovaného pole SKA.

Stavba radioteleskopického pole SKA je plánována do tří etap. První proběhne v letech 2018 až 2023. Za první dva roky by mělo být postaveno 500 antén v australské části a 200 antén v jihoafrické části a v roce 2020 by měla být rozestavěná síť už provozována. Druhá fáze by měla končit v roce 2030 a pole SKA by mělo v té době mít kompletně hotovou části pro nízké a střední frekvence. Poslední etapa po roce 2030 by měla celé kolosální dílo dovést do zdárného konce. Finální radioteleskopické pole by mělo mít rozlišovací schopnost padesátkrát vyšší než Hubblův teleskop v optické oblasti a být neporovnatelně citlivější než stávající radioteleskopická pole. V takovém světle se dvě miliardy euro, které bude první fáze tohoto díla stát, jeví jako velmi lukrativní investice.



MeerKAT, radioteleskopické pole v Jižní Africe, které se stane součástí pole SKA. Zdroj: SKA/SPDO/SAP.

A na co se můžeme těšit?

Tak nákladná a obrovská radioteleskopická síť umožní vědecký výzkum v oblastech nedosažitelných současnými přístroji. Uveďme pět základních okruhů vědeckého výzkumu: Po velkém třesku následoval temný věk trvající od 400 tisíc roků do 550 milionů roků. Na jeho konci se rodily první hvězdy, jejichž vznik by mohl být přímo pozorován radioteleskopickým polem SKA. Druhým okruhem je hledání gravitačních vln na základě změn časového signálu pulzarů. Pulzary v naší Galaxii slouží jako téměř ideální zdroje časového signálu. Při průchodu tohoto signálu gravitační vlnou dochází k charakteristickým deformitám, které by měly být polem SKA pozorovány. Třetí oblastí je mapování výskytu vodíku v miliardách galaxií ve vesmíru. Výsledkem by měly být nejen informace o vývoji galaxií, ale i monitorování vzniku velkorozměrových struktur a přesnější popis zrychlené expanze vesmíru. Jako čtvrtý v pořadí bude v plánu výzkum temné hmoty a její mapování z gravitačního čočkování elektromagnetického signálu velmi vzdálených objektů. Posledním z hlavních cílů je pokusit se zjistit,

Surikata – *malá šelma žijící na místě stavby jihoafrické části SKA. Tato šelma dala název zdejšímu předchůdci radioteleskopického pole SKA, které dostalo název MeerKAT (meerkat je anglické slovo pro tuto šelmičku). Zdroj: ZOO Zlín.*



VLBA – *Very Large Baseline Array, síť deseti radioteleskopů rozmístěná od Havajských po Panenské ostrovy s délkou základny 8 600 km. Průměr každé antény je 25 m, provozovatelem je National Science Foundation se sídlem v Novém Mexiku. Síť je v provozu od roku 1993.*

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 sítí je evropská EVN, nejznámější je americká VLBA s 10 radioteleskopy o základně 8 600 km. Pomocí této metody je definován souřadnicový systém ICRS.*

EVN – *European VLBI Network, evropská radioteleskopická síť, která funguje od roku 1980, spojuje 12 velikých evropských radioteleskopů, lze ji navíc propojit s britskou sítí MERLIN. Od roku 2004 jsou radioteleskopy spojeny optickými vlákny a síť pracuje jako e-VLBI síť na vlnových délkách od 0,7 cm do 18 cm (1,7 až 43 GHz) a nejlepší dosažitelné úhlové rozlišení je lepší než tisícina obloukové vteřiny.*

Interferometr – *soustava dvou a nebo více antén či dalekohledů, ze kterých se signál z jediného zdroje přivádí do detektoru, kde interferuje (sčítají se amplitudy vln). Může jít také o jediný přístroj, v němž je paprsek rozdělen do více ramen. Jsou-li v detektoru vlny v protifázi, může dojít k vyrušení výsledné vlny. V detektoru se zaznamenává intenzita vlny, která je druhou mocninou amplitudy. Čím větší je základna interferometru, tím vyšší je jeho rozlišovací schopnost.*

za jakých podmínek ve vesmíru vznikají magnetická pole. To je zásadní otázkou, na niž v současnosti neznáme odpověď. Na přítomnost polí je citlivá polarizace signálu z různých zdrojů a tudy by mohla vést cesta k pochopení původu magnetického pole. Uvedených pět oblastí je sice pro výzkumné cíle SKA stěžejních, ale počítá se i s astrobiologií, astrochemií složitých molekul, se studiem exoplanet a s mnoha dalšími oblastmi astronomie. Radioteleskopické pole SKA bude mít takovou citlivost, že by zaznamenalo obyčejný letištní radar ze vzdálenosti několika desítek světelných roků. Další generace astronomů se tedy mají na co těšit.

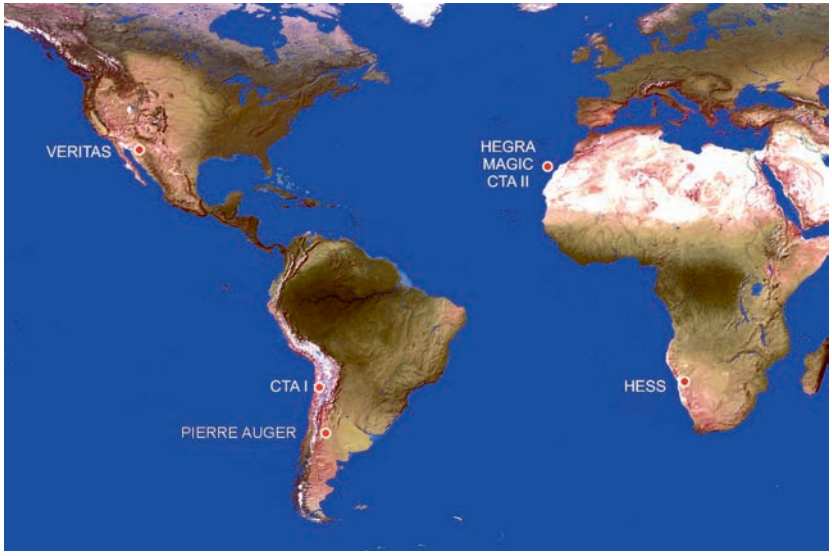
■ **Petr Kulhánek, 7. 4. 2018, AB 12/2018**



Observatoř CTA – nová éra
pozemské gama astronomie

Gama záření nese informace o nejenergetičtějších procesech ve vesmíru. Přichází z okolí černých děr a neutronových hvězd, z aktivních galaktických jader a samozřejmě je nedílnou součástí kosmického záření. Naše atmosféra je pro gama obor elektromagnetického záření neprůhledná, a tak by se mohlo zdát, že při jeho pozorování jsme odkázáni jen na kosmické sondy a družice. Jedna možnost ale přece jen existuje. Pokud interaguje vysoce energetický foton záření gama s horní vrstvou atmosféry, vznikne celá sprška sekundárních částic, které zasáhnou povrch Země na rozsáhlém území. Tyto sekundární spršky objevil francouzský fyzik Pierre Auger. Jeho jméno nese také největší observatoř sledující tyto částice. V Augerově sprše se nacházejí i nabité částice letící nadsvětelnou rychlostí, tedy rychleji, než se šíří světlo v zemské atmosféře. Nadsvětelná nabitá částice za sebou táhne modravý kužel elektromagnetického záření (tzv. Čerenkovova záření). A právě toto záření, které je nepřímým svědkem gama fotonu přiletivšího k Zemi, mohou zachytit některé specializované pozemské přístroje. Stavba observatoře CTA (*Cherenkov Telescope Array*), největší observatoře tohoto druhu, započne v roce 2019.

Čerenkovovo záření – *kužel elektromagnetického záření v podobě rázové vlny, který vzniká za nabitou částicí pohybující se nadsvětelnou rychlostí v daném prostředí. Záření je pojmenováno podle sovětského fyzika Pavla Čerenkova, který ho poprvé detekoval v roce 1934. Záření se používá k detekci rychlých nabitých částic, například elektronů a mionů. Čerenkovovy detektory založené na tomto záření jsou dnes součástí všech velkých detektorů elementárních částic, jmenujme alespoň detektor AMS na rameni Mezinárodní kosmické stanice.*



Polohy nejvýznamnějších observatoří pozemské gama astronomie. Zdroj: AGA.

Pozemská γ astronomie

Přímé informace o záření gama získáváme z družic a sond. K prvním patřila síť špionážních družic VELA (1969–1979), která objevila gama záblesky přicházející přibližně dvakrát denně z hlubin vesmíru. První vědeckou observatoří pro gama obor se stala družice COMPTON (1991–2000), ze současných přístrojů jmenujme alespoň družicovou observatoř FERMI (2008). Na povrch Země gama záření z vesmíru neproniká, a tak

Kosmické záření – *proud urychlených částic neznámého původu. Při interakci s atmosférou vzniká sprška milionů i miliard částic. Nejenergetičtější částice kosmického záření, které se dosud podařilo detekovat, mají energie až 10^{20} eV. Sprška z takové částice zasáhne na zemském povrchu mnoho desítek kilometrů čtverečních. Tak energetická částice se objeví přibližně jednou za sto let. 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 helia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření má naprosto nejširší spektrum energií ze všech dodnes 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 Viktorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 500 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal V. Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku.*

Observatoř HESS v Namibii tvoří čtyři radioteleskopy o průměru 12 metrů (na snímku) a jeden větší přístroj o průměru 28 metrů. Zdroj: Leicesterská univerzita.



můžeme sledovat fotony s extrémní energií jen nepřímo, prostřednictvím výše zmíněného Čerenkovova záření. Toto modrofialové éterické světlo je zprostředkovaným poslem informací o původní částici. V letech 1992 až 2002 sledoval toto záření experiment HEGRA (pětice dalekohledů o průměru 3,9 m na Kanárském ostrově La Palma). Od roku 2003 pracuje v Namibii soustava pozemních dalekohledů HESS. Dnes jde o pět dalekohledů, průměr čtyř zrcadel je 12 metrů, centrální přístroj má průměr zrcadla 28 metrů. Poslední přístroj byl postaven v roce 2012. Dalším systémem je MAGIC, jehož první dalekohled byl zprovozněn v roce 2003 na Kanárském ostrově La Palma, druhý byl postaven v roce 2009. Tyto dalekohledy mají zrcadla o průměru 17 metrů. Od roku 2005 je v americké Arizoně v provozu čtveřice Čerenkovových dalekohledů VERITAS (průměr každého přístroje je 12 metrů). Všechna tato zařízení jsou schopna zachytávat Čerenkovovo záření nabitých sprškek způsobených primárním fotonem o energii řádově v rozsahu 0,1 TeV až 10 TeV.

Poněkud jiného typu je observatoř Pierra Augera. Jejím primárním cílem je detekce sekundárních sprškek kosmického záření, tedy nikoli jen z fotonů. Observatoř tvoří celkem 24 fluorescenčních detektorů (speciálních dalekohledů, které snímají ultrafialovou fluorescenci vzduchu při průletu nabité částice) a 1 600 Čerenkovových detekčních stanic (vodních tanků s fotonásobiči, jež detekují Čerenkovovo záření ve vodě) pokrývajících území 3 000 km^2 v argentinské pampě Amarilla, což je polovyprahlá planina v blízkosti města Malargüe. Do projektu, jehož realizace započala v roce 2005, je zapojena i Česká republika. Observatoř je v plném provozu od roku 2007 a má za sebou řadu úspěchů. V původním návrhu se uvažovalo i o observatoři na severní polokouli, ta se ale z finančních důvodů nerealizovala.

CTA – Čerenkovovo pole dalekohledů

V současnosti je v plném proudu stavba obřího pole Čerenkovových dalekohledů CTA (*Cherenkov*

Telescope Array). Podle odborníků půjde o průlom v pozemské gama astronomii. Pole CTA by mělo v budoucnu nahradit zatím sice funkční, ale přesto již dosluhující observatoř Pierra Augera. Postupně vzniknou dvě observatoře: na jižní polokouli se staví v Chile (Mt. Paranal) a na severní polokouli na Kanárském ostrově La Palma. Observatoře budou tvořeny třemi typy dalekohledů o průměrech 24 metrů (LST, *Large Size Telescope*), 12 metrů (MST, *Medium Size Telescope*) a 6 metrů (SST, *Small Size Telescope*). Odrazné plochy jsou složené z menších segmentů. V jižní observatoři bude na území o rozloze 3 km^2 rozmístěno v první fázi 32 dalekohledů SST, 23 dalekohledů MST a 4 dalekohledy LST. Severní observatoř bude menší, pokryje území o rozloze 1 km^2 a bude v ní v první etapě 8 dalekohledů SST, 17 dalekohledů MST a 4 dalekohledy LST. Hlavním cílem CTA je detailní prozkoumání vysoce energetického okna, které „otevřely“ přístroje HESS, MAGIC a další. Pole CTA by mělo být zprovozněno po roce 2020, předpokládá se, že pokryje celý rozsah energií od 0,1 TeV do 10 TeV a po dalším rozšíření by observatoř měla umět zachytit i signál z částic s energií přesahující 100 TeV. K základním úlohám bude patřit výzkum kosmického záření (zde bude CTA v jistém smyslu navazovat na observatoř Pierra Augera), studium urychlování částic v okolí černých děr, testování teorie relativity a hledání projevů fyziky za hranicemi standardního modelu elementárních částic.

Na stavbě této nejvýznamnější gama observatoře světa se podílí přes 1 000 vědců z 27 zemí, Českou republiku nevyjímaje. Celkově bude mít observatoř v budoucnosti 120 dalekohledů a její cena by měla být přibližně 200 milionů euro (5,2 miliardy Kč). Jde zhruba o sedminu částky, kterou stála stavba pražského tunelu Blanka.

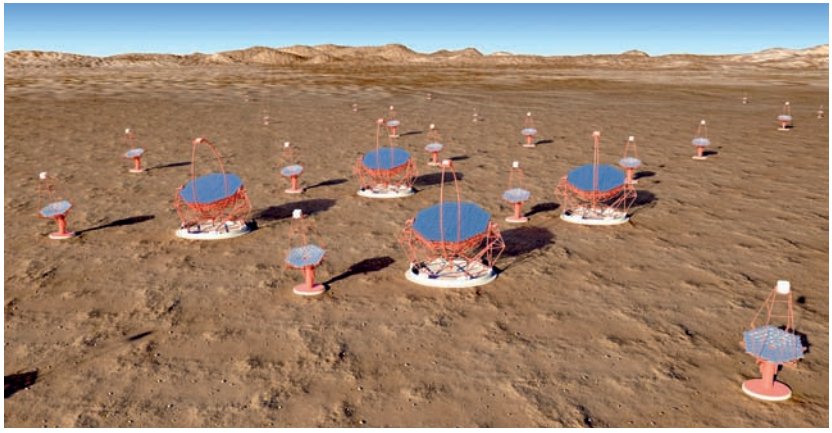
Česká účast na projektu

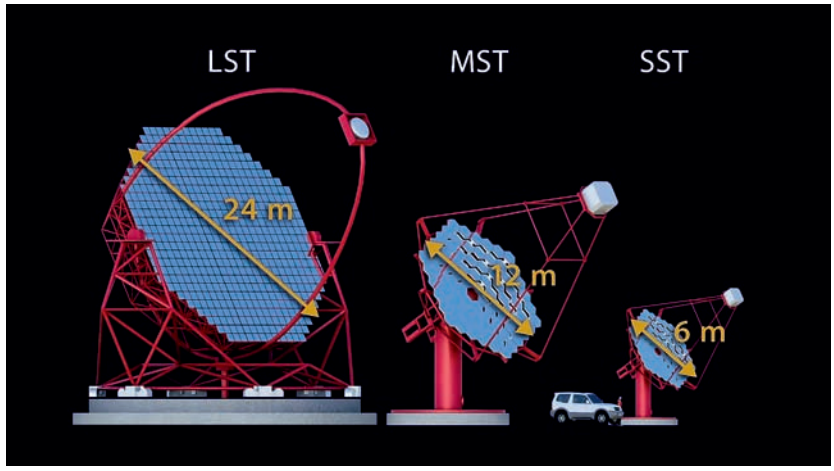
Naše Česká republika se na projektu CTA podílí už od samého počátku. Ve Společné laboratoři Optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu AV ČR v Olomouci se proměřují mechanické a optické

Gama záblesky – *GRB, Gamma Ray Bursts. Náhlá vzplanutí různé povahy v oboru gama. Dnes je jasné, že bude existovat více mechanizmů vzplanutí gama, která jsou pozorována jak v kosmologických vzdálenostech, tak přímo v naší Galaxii. K zábleskům gama dochází přibližně jednou denně a mají trvání od několika milisekund po několik stovek sekund. Může jít o vznik černé díry, splynutí dvou neutronových hvězd, procesy v aktivních jádrech galaxií nebo o další, dosud neznámé mechanizmy.*

Pierre Auger – *dosud největší projekt sledování kosmického záření, pojmenovaný podle objevitele sprškek kosmického záření. Přístroje: 24 fluorescenčních detektorů, 1 600 Čerenkovových detektorů. Rozloha: 3 000 km^2. Umístění: Argentina, oblast Pampa Amarilla, v blízkosti města Malargüe. Počátek stavby: 2005. Plný provoz: 2007. Česká republika je v projektu významně zastoupena. Plánovaná severní část se nerealizovala.*

Umělecká vize observatoře CTA. Uprostřed oblasti budou čtyři velké dalekohledy LST obklopené středními dalekohledy MST a malými dalekohledy SST. Zdroj: CTA.





Tři typy dalekohledů, které budou tvořit Čerenkovovo pole CTA. Zdroj: CTA.

vlastnosti odrazných vrstev zrcadel pro projekt CTA a budou se zde vyrábět některé segmenty odrazných ploch. Pracovníci z České republiky se také angažovali při výběru vhodného místa pro výstavbu severní a jižní části observatoře. Navrhli, vyrobili a rozmístili celooblohové kamery na místa vytipovaná pro stavbu a podíleli se na zpracování dat z meteorologických družic. Po mnoha peripetiích byla z devíti kandidátských míst vybrána dvě finální: ostrov La Palma pro severní část observatoře a chilský Mt. Paranal pro jižní část. Čeští vědci uvažují o instalaci upravené robotické kamery FRAM (10°×10°), která by využila mnohaleté zkušenosti s obdobným zařízením na Observatoři Pierra Augera. České aktivity v projektu CTA jsou velmi rozsáhlé a jejich koordinátorem je RNDr. Petr Trávníček z Fyzikálního ústavu AV ČR.

Nezbývá, než se těšit na období po roce 2020, kdy bude tato nebývalá observatoř dostavěna. Zmapovány by měly být tisíce zdrojů gama záření, což umožní pochopit původ vysoce energetických částic přicházejících z vesmíru. Zapojení České republiky do tohoto prestižního projektu znamená, že máme šanci být součástí výzkumu na hranici poznání lidské společnosti a být u zásadních objevů, které jistě tato observatoř přinese.

■ **Petr Kulhánek, 24. 7. 2015, AB 27/2015, aktualizováno**

Juno poodhaluje pravou tvář Jupiteru

Sonda Juno, která dostala jméno podle manželky římského boha Jupitera, schopné prohlédnout oblaka zahalující manželovy nepravosti, již od 5. července 2016 obíhá svůj cíl – největší planetu Sluneční soustavy. K Jupiteru přiletěla po téměř pětileté pouti a od té doby už o něm stihla zjistit řadu překvapivých věcí.

O misi a sondě

Juno je po výpravě k Plutu druhým bodem programu New Frontiers a po družici Galileo druhou sondou, která zkoumá Jupiter z oběžné dráhy. Rozpočet celé mise zahrnující přístroje, start, podporu po dobu výzkumu a zpracování dat činí 1,13 miliardy dolarů. Sondu vyrobila společnost Lockheed Martin. Při startu vážila 3 625 kg včetně 1 280 kg paliva a 752 kg okysličovadla. Na výšku i na šířku měří její šestiboké tělo 3,5 m. Její tři rozložené solární panely mají délku 9 m a šířku 2,65 m. U Jupiteru dodávají sondě 460 až 490 W elektrické energie (u Země to bylo 14 kW, s časem jejich výkon bude klesat až k 420 W). Až na asi 10 minut při průletu okolo Země by během své další mise sonda neměla vlétnout do žádného stínu, takže její solární panely by měly být neustále osvětlené Sluncem. Elektrickou energii sonda pro dobu své zvýšené spotřeby ukládá ve dvou 55Ah Li-ion akumulátorech.

Juno má hlavní motor Leros 1b o tahu 645 N a specifickém impulzu 3 120 N·s/kg. Jako palivo využívá hydrazin a jako okysličovadlo směs oxidů dusíku. Pro řízení orientace ve všech osách slouží 12 malých motorků seskupených do čtyř modulů, dvou na horní a dvou na dolní straně sondy. Dohromady tyto jednosložkové motorky katalyticky rozkládající hydrazin dokáží změnit rychlost sondy až o 75 m/s, což vystačí i na seslání sondy do atmosféry Jupiteru. Hlavní motor je prozatím nejdůležitější součástka na palubě, která už selhala (došlo k poruše na heliovém ventilu a není jasné, jak se při dalších zážezích motor zachová).

Sonda byla vypuštěna 5. srpna 2011 z mysu Canaveral pomocí rakety Atlas V551. Na rampě měla celá sestava výšku 60 m a hmotnost 573 910 kg. Po necelých 11 minutách dvoustupňová raketa sondu dopravila na parkovací dráhu okolo Země a po dalších asi 40 minutách ji

NASA – *National Aeronautics and Space Administration, americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, byl založen v roce 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, Deep Impakt a dlouhá řada dalších.*

New Frontiers – *Nové hranice, program americké NASA, jehož cílem je výzkum těles Sluneční soustavy. Program využívá středně drahé sondy. Navazuje na předchozí programy Discovery a Explorer. Zatím jde o tři sondy – New Horizons (2006) k trpasličí planetě Pluto, Juno (2011) k Jupiteru a OSIRIS-REx (2016) k planetce Bennu.*

Umělecká vize sondy Juno u Jupiteru. Zdroj: NASA/Jet Propulsion Laboratory.



Specifický impulz – *poměr tahu raketového motoru k množství spotřebovaného paliva za jednotku času. Tato veličina udává, jaký tah dokáže motor vyvinout po dobu jedné sekundy při spotřebování jednoho kilogramu paliva. Vyjadřuje efektivitu raketových a proudových motorů. Rozměr specifického impulzu je N·s/kg. Tah motoru se udává buď v newtonech, nebo ve starších jednotkách – kilopondech. Raketové motory mají menší specifický impulz než motory proudové, protože se do pracovní látky započítává i hmotnost okysličovadla, které vozí s sebou.*

druhý stupeň Centaur vyslal na heliocentrickou dráhu. Než se oddělil, stihl ještě sondu roztočit, a tím ji stabilizovat. Následně se rozvinuly solární panely. V afeliu došlo ke korekci dráhy, aby se mohla znovu setkat se Zemí. Okolo naší planety sonda prolétla 9. října 2013 ve výšce 559 km a pomocí gravitačního praku zrychlila o 3,9 km/s. Celá cesta sondy k Jupiteru byla dlouhá asi 19 au. Po příletu k cíli sonda zpomalila o 542 m/s a usadila se na protáhlé eliptické dráze s oběžnou dobou 53,5 dne s perijovem 4 200 km nad oblaky planety a apojovem 8,1 milionu kilometrů.

Původně mělo dojít k úpravě této dráhy na kratší, čtrnáctidenní. V únoru 2017 bylo ale rozhodnuto, že kvůli riziku selhání hlavního motoru se tak nestane. Sonda tedy během dvou let práce u Jupiteru uskuteční pouze 12 oběhů, během kterých bude měřit, namísto plánovaných 33 (první dva oběhy, číslované od nuly, nebyly určeny pro vědecká měření; poslední měl být záložní, ale počítal se mezi „vědecké“ oběhy). Nový plán přinesl i nečekané pozitivum. Sonda bude moci zkoumat i vzdálenější oblasti Jupiterovy magnetosféry včetně magnetického ohonu (je obrovský, sahá až k dráze Saturnu), jižní magnetosféry a magnetopauzy. Samozřejmě díky méně průletům perijovem budou i méně namáhány přístroje citlivé na radiaci.

Jeden ze solárních panelů pro sondu Juno při montáži. Zdroj: NASA/JPL/Caltech/KSC.



Oběžná dráha se pokud možno vyhýbá radiačním pásům, které by mohly zničit elektroniku sondy. Polární dráha umožní prolétnout pod a zase nad radiačními pásy co nejrychleji. Po zkušenosti se sondou Galileo dostala elektronika sondy Juno centimetr tlustou titanovou ochrannou schránku (*Electronics Vault)* o hmotnosti asi 157 kg, která by měla oslabit radiaci asi osmsetkrát, a zajistit tak přežití všech důležitých součástí sondy po dobu plánové životnosti sondy. Celá schránka i s obsahem má hmotnost asi 200 kg. Schovává se v ní přes dvacet různých elektronických systémů.

Hlavní palubní počítač RAD750 vyrobila firma BAE Systems ve Virginii. Jeho srdcem je procesor založený na architektuře PowerPC 750 s 10,4 miliony tranzistory a běžící na 200 MHz. K dispozici má 128 MB DRAM a 256 MB flash paměti. Zvládne zpracovat tok dat až 100 Mb/s. Je navržený, aby přežil i milionkrát silnější dávku záření, než je smrtelná dávka pro člověka. Za 15 let své činnosti by se měl zhroutit a vyžádat si zásah ze Země jen jednou.

Komunikaci mezi sondou a Zemí zajišťuje především vysokozisková anténa o průměru 2,5 m přijímající a vysílající data v pásmu X. Na těchto frekvencích pracují i čtyři další menší antény pro zvláštní případy, jako byl například průlet okolo Země. Hlavní anténa dokáže komunikovat i v pásmu Ka. Vysílání a příjem v obou pásmech se za pomoci Dopplerova jevu využije při některých průletech perijovem pro měření i velmi malého zrychlení sondy v rámci experimentu *Gravity Science*. Sonda umí velmi jednoduchým pípáním nízkoziskových antén komunikovat se Zemí i v případě, kdy vysokozisková anténa nesměřuje k Zemi. Inženýři na Zemi tak mohou sledovat postupné dokončování úkolů sondy, aniž by s ní měli přímé spojení.

Před oddělením sondy ji druhý stupeň nosné rakety roztočil na 1,4 otáčky za minutu. Následné rozvinutí solárních panelů rotaci snížilo o dvě třetiny. Během letu k Jupiteru sonda rotovala rychlostí asi jedné otáčky za minutu. Při měření v blízkém okolí Jupiteru se rotace zrychluje na dvě otáčky za minutu. Při zážezích hlavního motoru se otáčení zrychlilo až k pěti otáčkám za minutu. Rotace sondy je kromě stabilizace užitečná i při pozorování. Hned několik přístrojů využívá otáčení sondy k zvětšení prostorového úhlu, ve kterém pozoruje.

Protože sonda nevlétává do stínů, netrpí ani náhlými změnami teplot. Ochranná schránka je tepelně izolovaná a elektroniku udržuje ve stabilním prostředí pomocí ohřívačů a žaluzií. Pasivní i aktivní tepelnou ochranu má i pohonný systém. V prvních fázích letu se mohla sonda přehřívat od Slunce. Proto byla směrem ke Slunci natočena velká vysokozisková anténa, aby zastínila většinu důležitých součástí sondy. Součástky mimo ochrannou schránku mají vlastní tepelné požadavky, které jsou řešeny samostatně.

Zatím nezodpovězené otázky

Ačkoli sonda Galileo pracovala u Jupiteru téměř osm let a zjistila o něm mnoho nových poznatků, stále zůstalo mnoho otázek nezodpo-

Atlas V – *nosná raketa NASA, celková výška Atlasu s druhým stupněm Centaurem je 60 m. Vzletová hmotnost je až 333 000 kg. Atlas je poháněn dvěma motory o celkovém tahu 3,8 MN a Centaur je poháněn jedním motorem o tahu 100 kN nebo dvěma motory o tahu 200 kN.*

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

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

Gravitační manévr – *gravitační asistence, gravitační prak, gravitační brzda: změna vektoru rychlosti tělesa ve vesmíru při blízkém průletu kolem výrazně hmotnějšího tělesa. Nejčastěji je tento manévr využíván ke zrychlení, zbrzdění nebo odklonění kosmických sond pohybujících se po heliocentrických drahách pomocí průletu lokálním gravitačním polem planet nebo měsíců.*

Juno v době stavby. Dole je vidět hlavní motor. Stříbrné koule jsou nádrže na pohonné látky. Zdroj: NASA/JPL.



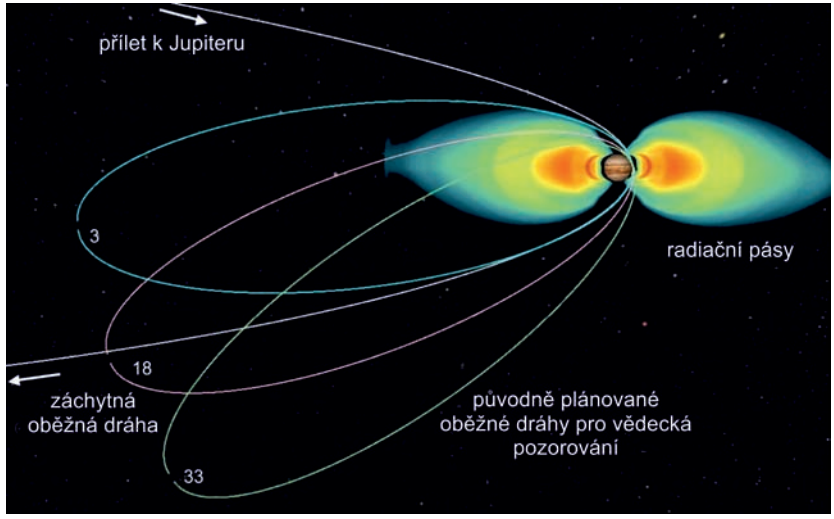


Sonda před testy vyvážení. Čtyři bílé čtverce jsou antény radiometru MWR. Pátá, trychtýřovitá anténa je vedle nejmenšího z nich na horní stěně. Poslední, největší anténa je na odvrácené stěně. Před solárním panelem vpravo je rameno magnetometru. Spodní stěně dominuje hlavní motor. Červené krabičky jsou moduly orientačních motorků. Zdroj: NASA/Kim Shiflett.

vězených: Jak Jupiter vznikl? Kolik vody, resp. kyslíku Jupiter obsahuje? Jaká je struktura planety hluboko pod příkrovem mračen? Otáčí se Jupiter jako pevné těleso, nebo uvnitř rotuje jinou rychlostí? Má Jupiter pevné jádro, případně jak je velké? Jak je generováno silné magnetické pole této planety? Jak struktury v horních vrstvách atmosféry, jako je Velká červená skvrna, souvisí s pohyby hluboko uvnitř Jupiteru? Odkud pochází energie Jupiterových polárních září? Jak vypadají Jupiterovy polární oblasti? Jaký je původ elektromagnetických pulzů s periodou 45 minut vycházejících z polárních oblastí? Na tyto otázky se Juno snaží odpovědět testováním různých hypotéz.

Přístroje na palubě

Než se pustíme do poněkud monotónního ale současně fascinujícího přehledu přístrojů na palubě, začněme tak trošku zbytečnostmi. Sonda sebou nese tři asi čtyřcentimetrové sošky inspirované LEGO postavičkami – Galilea Galileie, římského boha Jupitera a jeho ženu Juno. Postavičky mají podpořit zájem dětí o vědu, techniku, inženýrství a matematiku. Součástí sondy je také plaketa věnovaná Galileu Galileiovi od Italské kosmické agentury o rozměrech 71×51 milimetru a hmotnosti 6 g. Je na ní Galileiův autoportrét a kopie textu, který napsal při pozorování Jupiteru v roce 1610. A teď již k podstatnému vybavení.



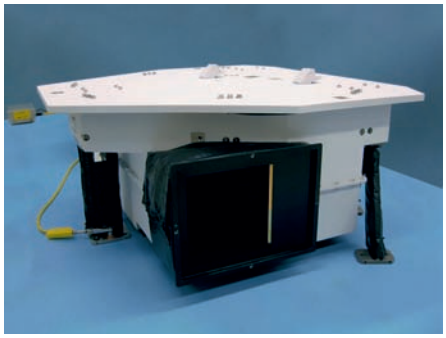
Záchytná dráha a plánované oběžné dráhy. Zdroj: NASA.

MWR (*Microwave radiometer*) je mikrovlnný radiometr pracující na šesti frekvencích: 600 MHz, 1,2 GHz, 2,4 GHz, 4,8 GHz, 9,6 GHz a 22 GHz. Největší anténa (pole flíčkových antén) pro pásmo 600 MHz zabírá celou jednu stěnu šestiboké sondy, další čtyři (opět pole flíčkových antén pro 1,2 GHz a vlnovodové štěrbinové řady pro 2,4 až 9,6 GHz) jsou umístěny na stěně druhé – vždy mezi stěnami se solárními panely. Poslední, malá trychtýřová anténa pro pásmo 22 GHz, je umístěna na horní stěně sondy a míří stejným směrem jako čtyři předchozí. Účelem tohoto za-

řízení je sledovat jevy hluboko v atmosféře Jupiteru. Každá z antén zachycuje tepelné mikrovlnné záření. Pečlivým vážením signálů z nich lze pozorovat teplotní a chemický profil atmosféry až do hloubky 550 kilometrů, kde působí tlak asi 1 000 barů. Půjde tak zjistit, jak hluboko do atmosféry Jupiteru zasahují struktury, které pozorujeme v jejích horních vrstvách. MWR by měl vydržet měřit 11 oběhů. Přístroj dodala americká Jet Propulsion Laboratory (NASA).

JIRAM (*Jovian InfraRed Auroral Mapper*) sestává z infračerveného dalekohledu a spektrometru a má za úkol proměřovat horní vrstvy atmosféry, zhruba v hloubce 50 až 70 km pod vrcholky oblaků. Je citlivý na infračervené záření v pásmu od 2 do 5 μm. Sleduje hlavně H_3^+ ionty, a dokáže tak zjistit pohyby vodních oblaků v atmosféře. Kromě vody umí zjistit i přítomnost metanu, čpavku nebo fosfanu. Na vlnové délce 3,4 μm dokáže pozorovat záření polárních září a na 5 μm i horké skvrny na Jupiteru. V optice přístroje je zakomponováno otáčivé zrcadlo, které umožňuje při rotaci sondy potřebnou dobu expozice. Světlo je přístroji rozděleno do dvou ohnisek. V jednom je infračervená kamera pracující v pásmech 3,3 až 3,6 μm a 4,55 až 5,05 μm. CMOS detektor má rozlišení 432 na 128 pixelů a jeho zorné pole je velké 3,66 na 6,24 stupňů. V druhém ohnisku je umístěn spektrometr. Jeho mřížka je velká 60×32 mm a má 30,2 vrypů na mm. Samotný detektor spektrometru má 256×336 pixelů, a umožňuje tak v pásmu 2,0 až 5,0 μm rozlišení 9 nm. Zorné pole spektrometru je 3,5×0,014 stupně. Díky tomu dokáže analyzovat objekty v horních vrstvách atmosféry až s přesností 1 km.

Magnetometr MAG vytváří podrobnou trojrozměrnou mapu magnetického pole Jupiteru. Jeho rameno dlouhé 3,6 metru je umístěno na konci jednoho ze solárních panelů. Sestává ze dvou magnetických indukčních senzorů, které měří směr magnetického pole, a tříosého skalárního heliového magnetometru, který měří velikost magnetického pole. Magnetické indukční senzory jsou umístěny 9,8 a 11,8 metrů a heliový magnetometr 8,8 metrů od těla sondy. Dva magnetické indukční senzory vzájemně otočené o 180 stupňů umožňují odečíst pole generované samotnou sondou. Magnetometr vzorkuje magnetické pole šedesátkrát za sekundu. Přesnou orientaci MAGu v prostoru zajišťuje dvojice hvězdných kompasů ASC (*Advanced Stellar Compass*). Díky MAGu bude Jupiterovo magnetické pole nejlépe proměřené ze všech planet kromě Země. Poprvé měřil MAG již při průletu sondy okolo



JIRAM na stole. Zdroj: Agenzia Spaziale ITA, Leonardo and Thales Alenia Space.

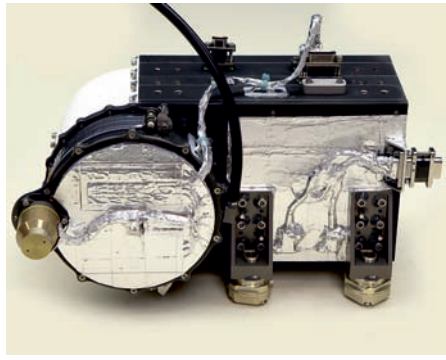
Rameno magneotmetru na konci solárního panelu. Čtyři trychtýře patří k ASC. Magnetické indukční senzory jsou čtverce nad horním (od sondy vzdálenějším) ASC a pod dolním ASC. Zdroj: NASA.





Postavičky letící na palubě sondy Juno k planetě Jupiter. Zdroj: NASA/JPL/Caltech/LEGO.

Jeden ze tří senzorů JEDI. Zdroj: NASA/JHU.



Země. Magnetometry se vždy umisťují na ramenech, aby měřily magnetické pole co možná nejdále od sondy. Tím určují rozměry celé sondy. Magnetometr vyrobilo Goddardovo kosmické středisko (NASA).

GS (*Gravity Science*) je radiotechnický experiment, při kterém se velmi přesně měří zrychlení sondy způsobené místními anomáliemi Jupiterova gravitačního pole. Experiment využívá hlavní komunikační anténu namířenou k Zemi. Při měření přijímá a vysílá na frekvencích v pásmech X (7153,065586, resp. 8 404,135 802 MHz) a Ka (34 365,5, resp. 32 083,3 MHz). Změny rychlosti sondy vůči Zemi se měří využitím Dopplerova jevu. Pozemská stanice dokáže také zjistit velmi přesně vzdálenost sondy od Země. Vyšle signál k sondě v pásmu Ka, sonda odpoví v pásmu X a při známých podmínkách lze měřit vzdálenost sondy s přesností až 1 m! Tato měření bohužel nelze provádět zároveň s radiometrickým, protože vyžaduje jinou orientaci sondy (při radiometrickém měření je rovina solárních panelů kolmá k „povrchu" planety, při proměřování gravitačního pole je kolmá ke směru k Zemi). Jediná stanice Deep Space Network schopná vysílat k sondě signál v pásmu Ka leží v kalifornském Goldstonu.

JEDI (*Jovian Energetic Particle Detector Instrument*) je doplňkovým přístrojem k JADE (*Jovian Auroral Distributions Experiment*), přístroje pro sledování polárních září. Detekuje elektrony, protony, ionty a neutrální atomy o vyšších energiích, elektrony od 25 do 1 000 keV a ionty od 10 keV do 10 MeV. Sestává ze tří detektorů se zorným polem 12×160 stupňů. Dva z nich jsou umístěny na sondě proti sobě, kolmo na osu rotace. Během jednoho otočení pokryjí celý prostor kolem sondy. Třetí, mírně odlišný senzor, je umístěn rovnoběžně s osou rotace sondy a sleduje prostor nad sondou. Detektory pracují ve třech módech, které se postupně vystřídají během 0,5 s – měření energií elektronů, měření energií iontů a zjišťování druhů iontů. Přístroj dokáže zaznamenat až 30 000 částic za sekundu. Veškerou elektroniku před pronikavým zářením musí detektory odstínit samy. Velmi podobné detektory jsou také na Van Allenových sondách pracujících na oběžné dráze okolo Země a na sondě New Horizons. Přístroj byl postaven v Laboratoři aplikované fyziky na Univerzitě Johnse Hopkinse.

Waves (*Radio and Plasma Wave Sensor*) měří složky elektrického a magnetického pole plazmových vln a volně se šířící radiové vlny. Dipólová anténa ve tvaru V měří elektrické pole v rozsahu frekvencí 50 Hz až 40 MHz. Ramena antény jsou dlouhá 2,8 m a jejich konce

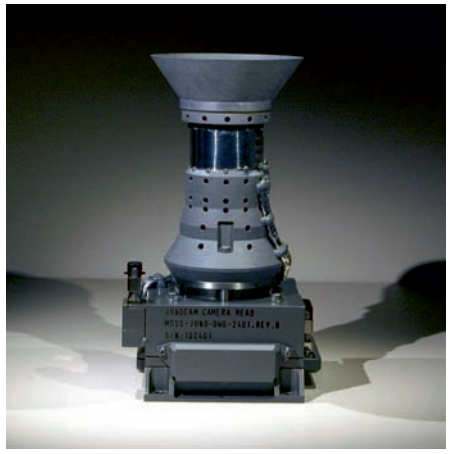
jsou od sebe vzdálené 4 m. Anténa trčí šikmo do prostoru na spodní straně sondy. Indukční magnetometr s 10 000 závity a jádrem o průměru 15 cm naopak měří magnetickou složku v pásmu od 50 Hz do 20 kHz. Umístěn je na spodní straně, paralelně s osou rotace sondy. Nízkofrekvenční (50 Hz až 20 kHz) přijímač tohoto přístroje v jednom svém kanálu monitoruje fluktuace napětí na sběrnici sondy, aby je bylo možno odečíst od signálu měřeného v druhém kanálu. Třetí kanál pokrývá pásmo 10 až 150 kHz a nevyužívá tedy signál z magnetometru. Dva vysokofrekvenční přijímače pak umí nejen analyzovat signál v pásmu od 100 kHz do 40 MHz, ale i zjistit spektrum vysokofrekvenčního signálu proměřením všech pásem o šířce 1 MHz v rozsahu od 3 do 40 MHz. Při příletu k Jupiteru přístroj Waves zaznamenal jak rázovou vlnu při vstupu do magnetosféry planety, tak následně i magnetopauzu. Přístroj vyvinula Iowská univerzita.

UVS (*Ultraviolet Spectrograph*) je dalekohled a spektrograf pracující v rozsahu od 68 do 210 nm, tedy tvrdého ultrafialového záření. Hlavním úkolem tohoto přístroje je pozorování polárních září a také vysvětlení záblesků záření vycházejících z polárních oblastí planety s periodou 45 minut. Rozsah byl zvolen tak, aby spektrograf mohl sledovat všechny důležité emisní čáry vodíku a absorpční čáry uhlovodíků, které vznikají v polárních zářích. Vstupní clona dalekohledu je čtvercová, o rozměrech 40×40 mm. Dalekohled má podobně jako JIRAM první zrcadlo hladké, ale pohyblivé v rozsahu ±30 stupňů od osy kolmé na osu rotace sondy, aby se přístroj mohl při nízkých průletech zaměřovat na jednotlivé detaily. Hlavní parabolické zrcadlo je vyosené s ohniskovou vzdáleností 120 mm. Obě zrcadla jsou pokryta vrstvičkami hliníku a fluoridu hořečnatého, aby co nejlépe odrážela záření o vlnové délce větší než 100 nm. Samotný spektrograf je Rowlandův kruh o průměru 150 mm. Na jeho vstupu se UV

Flíčková anténa – *Patch Antenna, anténa s několika plošnými vodivými prvky nanesenými na nevodivý substrát. Jednotlivé prvky jsou nejčastěji obdélníky, mohou mít ale i tvar obecnějších plošek (flíčků). Jednotlivé plošky jsou vodivě propojeny. Této anténě se také (zejména při pravoúhlém tvaru plošek) říká mikropásková anténa.*



Instalace vysokoziskové antény, která zajišťuje spojení sondy se Zemí. NASA/Jack Pfaller.



Téměř obyčejný fotoaparát JunoCam. Zdroj: MSSS.

Detail turbulencí na Jupiteru vyfotografovaný 27. 3. 2017 ve výšce 4 400 km nad oblaky. Zdroj: ASA/JPL/SwRI/ MSSS/Gerald Eichstädt/Alexis Tranchandon/Solaris.



záření rozdělí do tří polí. Dohromady je pak zorné pole, respektive zorná úsečka dlouhá 2 stupně a široká pouhých 0,05 stupně. CsI fotokatody tvoří pole 2048×256 pixelů. Spektrální rozlišení tak dosahuje 0,4 až 0,6 nm a prostorové 0,1 stupně, což ze vzdálenosti jednoho poloměru Jupiteru odpovídá 125 km. UVS využívá při pozorování otáčení sondy, takže obsáhne velkou část okolí sondy, 360×60 stupňů. Stejně jako JADE, pochází i UVS z texaského Southwest Research Institute s přispěním belgického CSL/BELSPO.

JCM (*JunoCam*) je asi divácky nejvděčnější přístroj, ale k vědeckému poznání nejspíše přispívá nejméně. Při pořizování snímků se musí kamera vypořádat s rotací sondy. Dokáže to pomocí metody časového zpoždění a integrace (TDI), která se používá pro fotografování slabých pohybujících se objektů. CMOS čip má rozměry 11,84×8,88 mm s rozlišením 1 600×1 200 pixelů. V kameře se přepíná mezi třemi standardními filtry pro viditelné světlo – modrým (420 až 520 nm), zeleným (500 až 600 nm) a červeným/infračerveným (600 až 800 nm) a speciálním filtrem pro 890nm záření, v němž svítí metan. Standardní filtry mají zorné pole široké 4,64×58 stupňů, speciální filtr pak 10,2×58 stupňů. Typické expoziční doby jsou pro standardní filtry 12,5 μs a speciální filtr 0,5 s. Ohnisková vzdálenost kamery je 11,7 mm. Při průletu perijovem zvládne fotoaparát pořídit snímky až s rozlišením 15 km na pixel. Při letu nad póly se do zorného pole zhruba vejde celý Jupiter. Pro pozorování z apojova nebo snímkování měsíců Jupiteru je tato kamera nevhodná. Sonda posílá obrázky ve formátu JPEG a poradí si jak se ztrátovou, tak bezeztrátovou verzí. NASA nemá tým pro zpracování dat z tohoto přístroje. Místo toho data dává k dispozici veřejnosti. Od toho si slibuje nové, neotřelé postupy při zpracování obrázků a samozřejmě širokou popularizaci její práce. JunoCam by neměla

selhat alespoň do oběhu 8, přestože její elektronika je umístěna mimo ochrannou schránku. Kamera je podobná té, která pořizovala snímky Marsu při sestupu vozítka Curiosity na Mars (MARDI) a také byla objednána od kalifornské firmy Malin Space Science Systems.

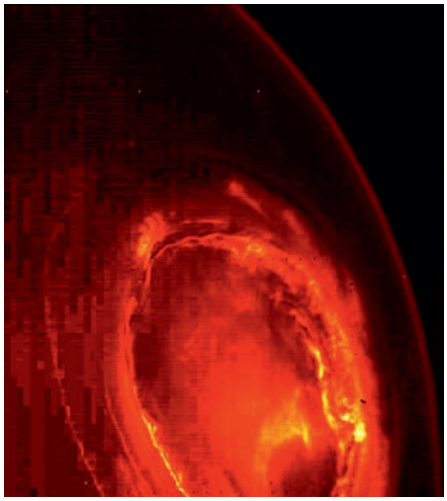
Počátky mise

Nejprve k číslování průletů perijovem. Poprvé perijovem sonda proletěla při přiblížení se k Jupiteru. Po úspěšném manévru se usadila na oběžné dráze. Až do průletu apojovem se tento oběh označuje číslem 0, a tedy i první průlet perijovem má číslo 0. Za „vědecké průlety", to znamená určené k měření, se označují perijova číslo 2 a větší. Dne 27. srpna 2016 se při druhém průletu perijovem (perijovum číslo 1) zkoušely přístroje. Oproti předpokladům se zjistilo, že Jupiterova magnetosféra je silnější a polární záře rozsáhlejší. Pomocí mikrovlnného radiometru MWR sonda nahlédla až do hloubky 400 km pod oblaka. Zjistila, že Jupiterovy pásy tam zasahují, ale jejich povaha se s hloubkou mění. JunoCam také pořídila obrázky oblaků, které následně NASA poskytla veřejnosti ke zpracování.

Během následujícího oběhu se inženýři pokusili natlakovat hlavní pohonný systém, aby ho připravili k zážehu, po kterém měla být zkrácena oběžná doba na asi 14 dní. Častější průlety perijovem by znamenaly častější měření. Bohužel se zjistilo, že heliové ventily se otevíraly příliš pomalu. Měly se otevřít během několika sekund, ale celá procedura trvala dlouhé minuty. Bylo proto rozhodnuto o odložení zážehu. Asi 13 hodin před třetím průletem perijovem (perijovum číslo 2, 18. října 2016) došlo k nečekanému restartu elektroniky sondy, který sám proběhl úspěšně. Sonda nadále zůstala v dobré kondici, ale přístroje při tomto průletu zůstaly vypnuté. O šest dní později se sonda bez problémů přepnula z bezpečného módu do běžného a o další dva týdny později byly opět zapnuty všechny přístroje. Tento průlet byl prvním „vědeckým", bohužel se během něj nic nenaměřilo, sonda začala fungovat na plné obrátky až při dalším obletu Jupiteru.

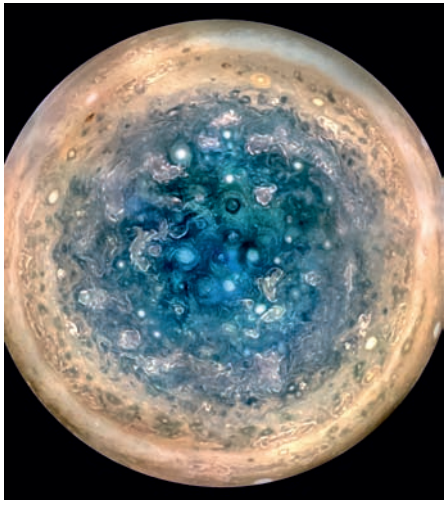
Novinky z Jupiteru

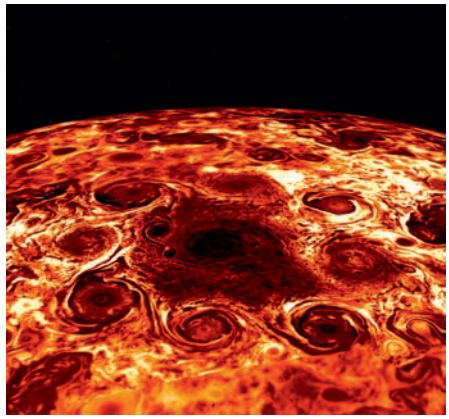
Velká skupina novinek přišla z polárních oblastí, které jako první detailně snímkovala až sonda Juno. U pólů pozorovala obrovské bouře, nikoli však rozdělené do šířkových pásů, které známe z dřívějších pozorování Jupiteru. Oblačnost je u pólů planety také výrazně modřejší.



Jižní polární záře na Jupiteru v infračerveném oboru. Tuto mozaiku složenou ze tří snímků pořídil přístroj JIRAM dne 27. srpna 2016 na vlnových délkách 3,3 až 3,6 μm. Zdroj: NASA/JPL/Caltech/SwRI/ASI/INAF/JIRAM.

Snímek jižní polokoule Jupiteru (2017). Zdroj: ASA/SwRI/MSSS/Crystal McConnell.



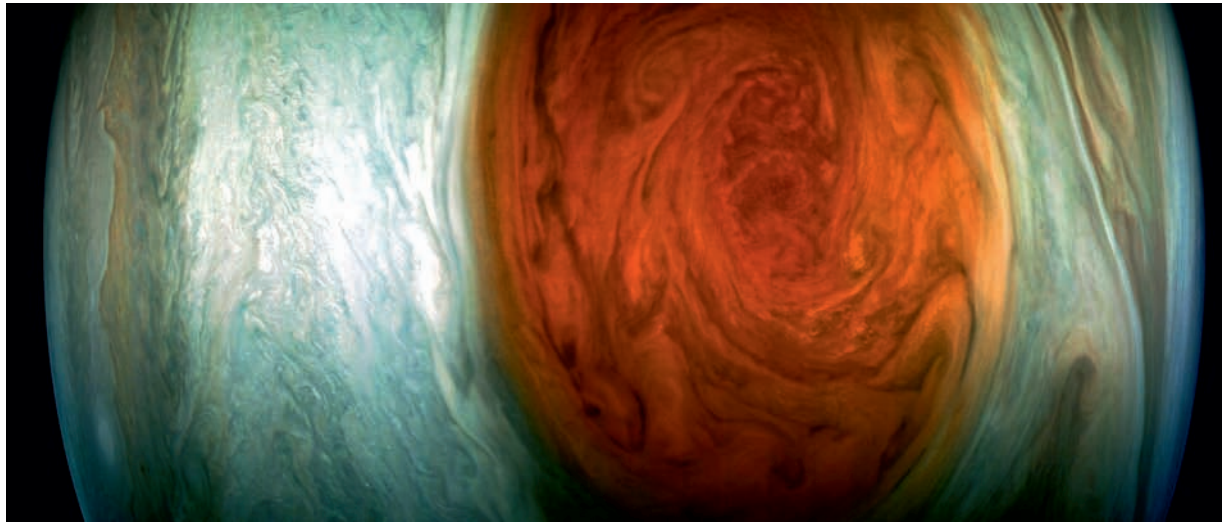


Osm výrazných cyklón obíhajících Jupiterův severní pól. Zdroj: NASA/JPL-Caltech/SwRI/ASI/INAF/JIRAM.

Dne 11. července 2017 sonda Juno klesla až do výšky 3 500 km nad oblaka. Při této příležitosti nafotografovala z výšky asi 5 000 km nafotografovala Velkou červenou skvrnu. Obrázky v nízkém rozlišení přišly záhy, ale na vysoké rozlišení si pozemšťané museli den počkat. Stálo to za to. Zdroj: NASA/JPL/SwRI/MSSS/Gerald Eichstädt.

Na rozdíl od Saturnu, Jupiter nemá v okolí pólů šestiúhelník. Zatím nevysvětlené je i to, proč jsou okolí severního a jižního pólu rozdílná. Samozřejmě se pozorovala i oblačnost mimo polární oblasti. Kromě fotogenické Velké červené skvrny upoutaly pozornost i další bouře. Jižně od rovníku se táhne pás menších bílých cyklón. Z infračervené analýzy plyne, že obsahují čpavek a hydrazin – tedy látku, kterou Juno používá pro svůj pohon.

I polární záře, byť již byly pozorovány dříve například Hubblovým kosmickým dalekohledem, nám ukázaly něco nového. Jsou totiž mohutnější, než se dosud myslelo. Stejně tak dnes už díky sondě Juno víme, že je vyvolávají jiné částice než na Zemi. Infračervený dalekohled a spektrometr JIRAM také odhalil v jejich struktuře horké skvrny o teplotě 500 až 950 K, o kterých se dosud nevědělo. Tyto oblasti jsou složeny hlavně z metanu a iontů H_3^+. Pozorování JIRAMu koresponduje s pozorováním ultrafialového spektrografu UVS. Senzory radiových a plazmových vln Waves nahrály tajemně znějící hvizdy vycházející z Jupiteru. O těch sice víme již od padesátých let, ale teď je můžeme analyzovat z nebývale kvalitních nahrávek pořízených v blízkosti jejich zdrojů. Částice, které se jimi projevují, způsobují polární záře. Můžeme teď zkoumat, odkud tyto elektrony pocházejí, a tím vysvětlit, proč jsou Jupiterovy polární záře tak mohutné.



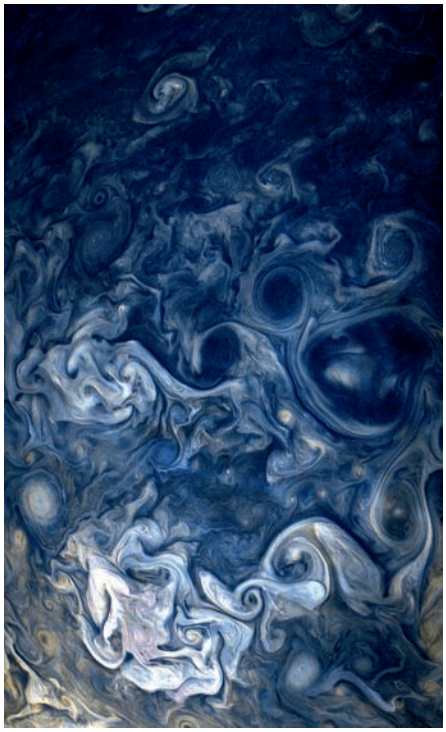
Ani měření magnetického pole nezůstalo pozadu. Že je obrovské, se vědělo. Ale že místo očekávaných 0,5 mT sonda naměří 0,8 až 0,9 mT, to bylo překvapení. Ještě větší údiv ale vyvolalo zjištění, že existují lokální fluktuace pole a v některých oblastech je magnetické pole Jupiteru až o 0,2 mT nižší než v okolí. To totiž znamená, že jeho generátor neleží ve středu planety jako u Země, ale blíže k povrchu.

Výzkum nitra planety přinesl také zajímavé výsledky. Nitro Jupiteru není překvapivě tvořeno dobře promíchanou homogenní směsí, jak se dosud většinou předpokládalo. Koncentrace čpavku se místně velmi liší. Podle měření mikrovlnného radiometru MWR s hloubkou čpavku přibývá. Pás poblíž rovníku zasahuje velmi hluboko do atmosféry. Zdá se také, že ostatní pásy se s hloubkou postupně mění v jiné struktury.

Avšak jako úplná vědecká bomba přišlo první měření gravitačního pole planety. Podle dosavadních úvah by jádro planety mělo být malé a tuhé, a nebo by nemělo být vůbec. Jupiter má ale podle měření sondy Juno jádro velké, neostré a zřejmě částečně tekuté.

Již po několika průletech perijovem nám sonda Juno naservírovala nejen některé odpovědi, ale i mnoho nových otázek. Jupiter je ještě záhadnější než před rokem. Data ze sondy se stále zpracovávají a o objevech se k publikaci připravují nové články. Existuje například i plán na hledání gravitačních vln z dopplerovského měření rychlosti sondy (v experimentu *Gravity Science*), která by mohla posloužit jako testovací těleso pohupující se na gravitačních vlnách. Máme se na co těšit.

■ **Jiří Hofman, 4. 8. 2017, AB 24–26/2017**



Jupiterovy atmosférické turbulence vyfotografované americkou sondou Juno. Zdroj: NASA/JPL-Caltech/ SwRI/MSSS/Gerald Eichstädt/ Seán Doran.

Stirling přece poletí

Stirlingův motor – *tepelný motor s vnějším spalováním. Pracovní médium je střídavě ohříváno a ochlazováno díky jeho přemisťování mezi teplou a studenou částí pracovního prostoru.*

Na protilehlé straně → Různé konfigurace Stirlingova motoru. Konfigurace se dvěma pracovními prostory se označují alfa (A, C, E), s jedním pracovním prostorem beta (B, D). Zdroj: J. Egas, D. M. Clucas; Energies.

Reverend Dr. Robert Stirling (1790–1878)



Když v roce 1816 podával reverend Stirling patent na teplovzdušný motor, asi by se nemálo podivil, kdyby mu někdo prozradil, že by jeho stroje mohly jednou pracovat i na okraji Sluneční soustavy.

Motivace Roberta Stirlinga zkonstruovat horkovzdušný motor byla dvojí. Tehdejší nastupující parní stroje byly málo účinné a především nebezpečné. Technologie počátku devatenáctého století neposkytovala materiály a spoje dostatečně odolné vůči tlakům, do té doby nevyužívaným. Nebezpečí výbuchu parního kotle bylo každodenním strašákem, případné následky byly většinou tragické.

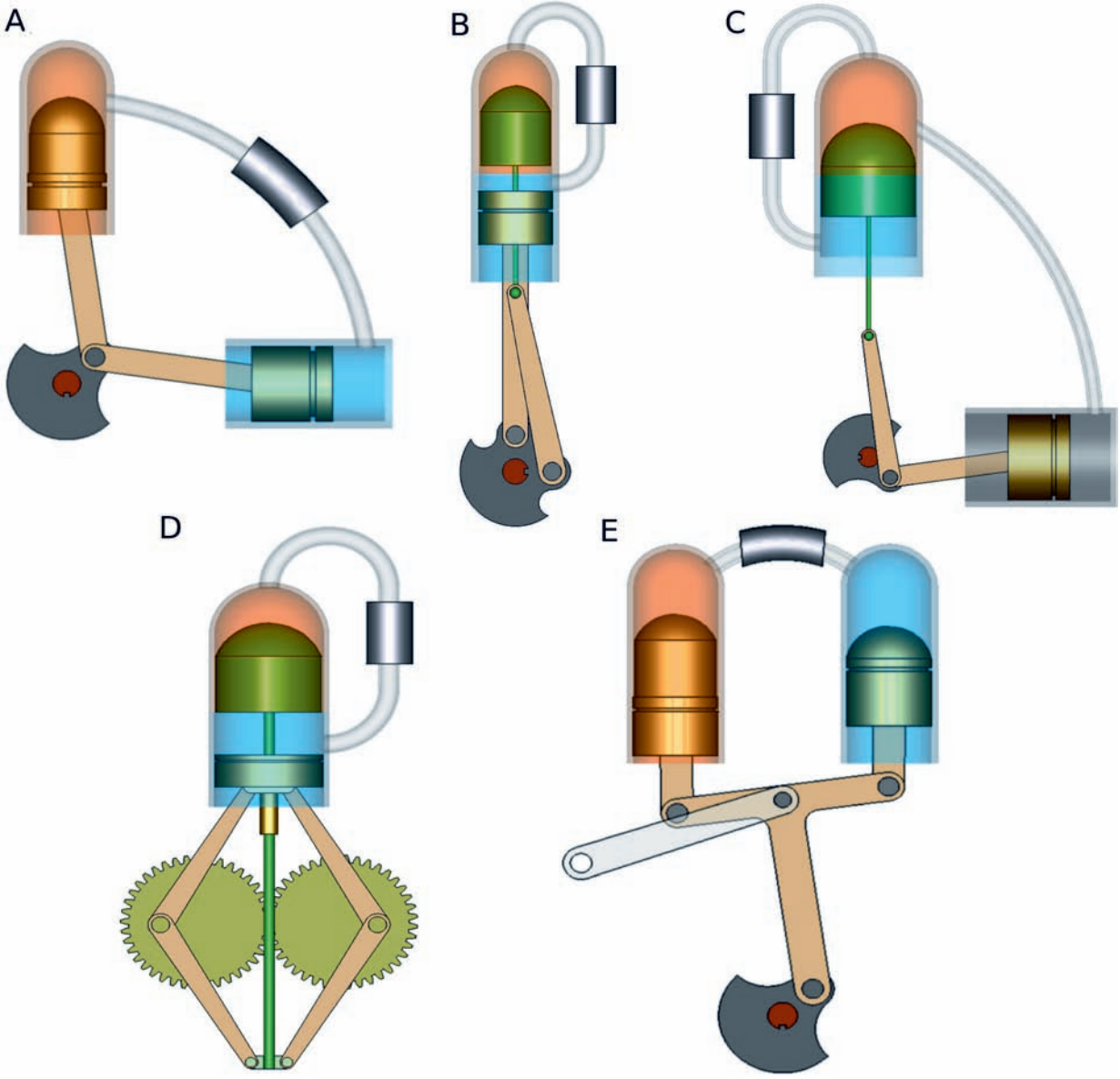
Princip motoru

V tepelných strojích, které máme v běžném povědomí, nevydrží pracovní médium v systému déle než jeden pracovní cyklus. V parním stroji je plyn vypouštěn ve formě vodní páry, ve vznětových a zážehových motorech odcházejí spaliny poté, co odevzdají část své energie pístu, výfukem ven. Stirlingův motor s vnějším spalováním drží médium po celou dobu v systému a k práci ho nutí důmyslným systémem opakovaného ohřívání a ochlazování.

Od dob prvního stroje Roberta Stirlinga uvidělo světla světa mnoho různých modifikací. Když opomeneme verze s rotačním pístem, mají všechny jedno společné: dva písty. Jeden píst pracovní a jeden určený k přemisťování pracovního média. Název druhého pístu (tzv. *displacer*) zatím nemá ustálený český překlad, v literatuře se můžeme setkat s výrazy přemísťovač, ale i přehaněč.

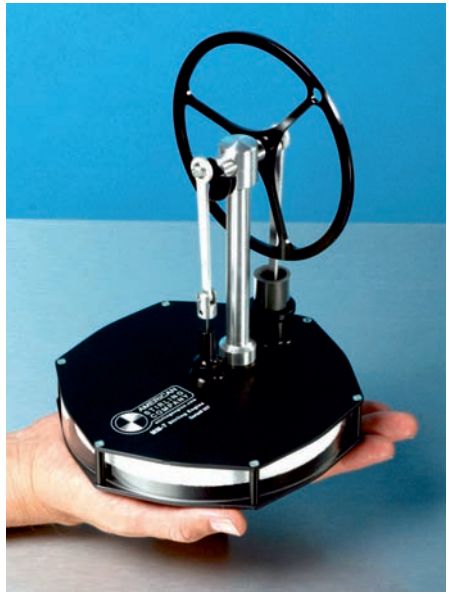
Stirlingův motor je charakteristický vnějším spalováním. Válec je ohříván z vnějšku, teplo přenáší na médium, to se rozpíná a tlačí na pracovní píst. Pohyb je současně přenášen na přemísťovač, který se postará o přesun horkého plynu do chlazené části válce. Plyn zchladne, jeho objem se zmenší, pracovní píst zaujme výchozí postavení a cyklus tohoto tepelného stroje se uzavírá.

Výhody motoru jsou zřejmé. Kontinuální hoření nemá problém s dokonalostí spalování, nepotřebuje ventily a jejich ovládání, významný bonus je tichý chod stroje. Vnější ohřev není závislý na typu tepelného zdroje. Jsou-li třecí plochy navrženy jen v chladné části, nedochází k degradaci maziv a jejich spotřeba je pak zanedbatelná. Klasické konfigurace nepotřebují startér.


A
B
C
D
E

RTG – *radioizotopový termoelektrický generátor, zdroj energie využívaný pro mise sond do nejvzdálenějších částí Sluneční soustavy, kde jsou klasické solární panely neúčinné. Základem RTG generátoru je kapsle z radioaktivního materiálu, zpravidla plutonia. Při rozpadu se uvolňuje velké množství tepla, které se v termočláncích konvertuje na elektřinu. Odpadní teplo je vyzařováno do okolního prostoru. RTG články mohou dodávat energii přístrojům několik desítek let.*

Stirlingův motor dokáže pracovat i při malých teplotních rozdílech. Model na obrázku prodává společnost American Stirling Company. Motor může pohánět teplo lidské ruky nebo odpadní teplo z elektrospotřebičů. K jeho trvalému chodu postačí, aby byl rozdíl mezi teplotou v dolní a v horní části pouze 4 °C. Zdroj: ASC.



Nevýhod je sice méně, ale jsou natolik podstatné, že Stirlingův motor odsunují na druhé místo za běžné spalovací motory. Jsou to především materiálové nároky na výměník ohřívače, které podstatně zvyšují cenu motoru. Potřeba mohutného chladiče zvyšuje velikost motoru. Menší účinnost stroje může být sice kompenzována levnějším palivem, ale z principu je to jev nevítaný.

Druhá míza

Z výše uvedených důvodů zapadl Stirlingův motor v zapomnění. Přesto se dočkal začátkem minulého století obrození, když firma Philips hledala možnosti napájení svých rádií v místech, kde není zaveden elektrický proud. Jedna ze zkoumaných možností padla i na Stirlingův motor. Cenili si ho zejména pro absenci elektrického rušení, tichý chod, minimální nároky na údržbu, ale především pro nezávislost na konkrétní realizaci ohřevu.

Poslední bod se postaral o vzkříšení zájmu i v našem století. Situace je podobná. Není to Philips, ale NASA, kdo hledá zdroj proudu pro odlehlé oblasti. V blízkosti naší Země je situace dobře řešitelná pomocí panelů slunečních baterií. Mise vesmírných sond do vzdálenějších koutů Sluneční soustavy však vyžadují zdroje nezávislé na intenzitě a spolehlivosti dodávky slunečních paprsků. Vzpomeňme na problémy sondy Rosetta a modulu Philae, který usedl do stínu balvanu a neměl jak napájet své přístroje. Z dalších jmenujme třeba marsovská vozítka, která by si také ušetřila nejeden problém, kdyby nebyla závislá na přísunu energie ze Slunce.

Tam, kde je třeba dlouhodobé napájení a je problematické použít sluneční baterie, dnes používáme radioizotopové zdroje označované RTG. Principiálně jde pouze o radioaktivní zdroj tepla a termočlánek. Řešení jednoduché, odolné proti poruchám, ale málo výkonné. Limitující je účinnost termočlánku. Zdroje tepla vycházejí zbytečně těžké, což nejen omezuje hmotnost užitečného zatížení, ale je tu i citlivá otázka manipulace se strategicky významným radioaktivním materiálem. Stirlingův motor slibuje přibližně čtyřikrát vyšší účinnost než běžně používaný termočlánek.

Nové plány

Glennovo výzkumné středisko NASA se chopilo úkolu vyvinout zdroj elektrické energie ASC (*Advanced Stirling Convertor*). Slibuje si od

PARAMETRY KONVERTORU UVÁDĚNÉ NASA	
výkon	130 W (na začátku mise)
účinnost	26 %
hmotnost	32 kg
zdroj energie	1,2 kg PuO_2 ve dvou kapslích
rozměry	76×46×40 cm
předpokládaná životnost	17 roků

ASRG – *Advanced Stirling Radioisotope Generator, generátor elektrické energie využívající jako zdroj tepla radioizotopový materiál. Stirlingův motor mění teplo uvolněné rozpadem na pohybovou energii, která je již snadno přeměnitelná na elektrickou. Předpokládaná účinnost je čtyřikrát vyšší než u přeměny energie prostřednictvím termočlánku.*

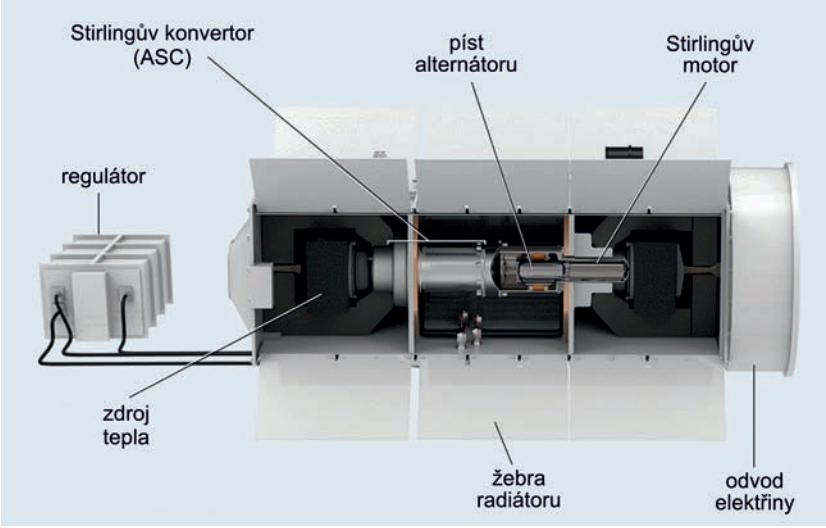
GRC – *Glenn Research Center, Glennovo výzkumné středisko. Má za úkol hledat a vyvíjet nové technologie a materiály pro letectví a kosmonautiku. Založeno bylo v roce 1942, nynější název nese po prvním americkém astronautu Johnu Glennovi.*

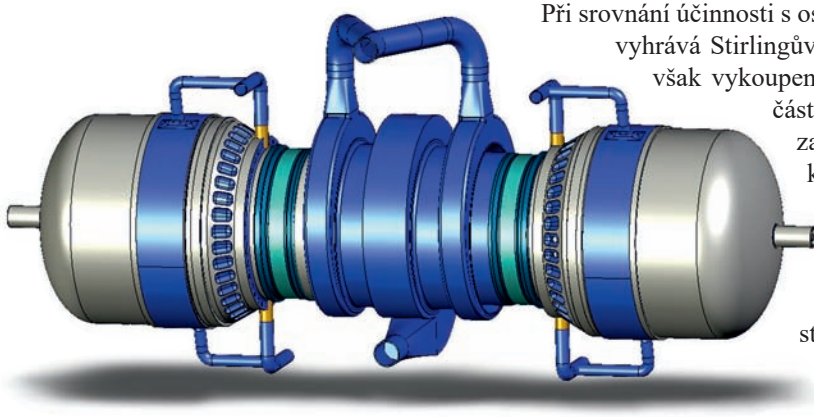
něj energetické pokrytí případných misí k Marsu, měsícům Titan a Europa, a k vnějším planetám Uran a Neptun. Pro sondy pohybující se v blízkosti Slunce je Stirlingův konvertor také zajímavý. Sluneční baterie degradující přílišným ostřelováním částicemi slunečního větru by mohly být nahrazeny Stirlingovým motorem ohřívaným přímo slunečním zářením.

Koncepčně motor připomíná beta konfiguraci klasického Stirlingova motoru, ale chybí klikový mechanizmus převádějící přímočarý pohyb pístu na otáčení setrvačníku. Energie pístu je odčerpávána lineárním alternátorem. Jako pracovní médium bylo pro svou inertnost a dobré dynamické i tepelné vlastnosti vybráno helium. O zdroj tepla se postará radioizotopový generátor postavený na bázi oxidu plutonia PuO_2.

Historie zařízení sahá k počátkům sedmdesátých let, kdy započal vývoj generátoru SRG (*Stirling Radioisotope Generator*). V devadesátých letech byl program ukončen a znovu byl vzkříšen až počátkem nového tisíciletí, tentokrát pod názvem ASRG (*Advanced Stirling Radioisotope Generator*). Principiálně se projekty příliš nelišily, víceméně stouply jen požadavky na dodávaný výkon.

Nový konvertor energie ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator). Zdroj: NASA/GRC.





Další odvážný projekt Glennova výzkumného střediska NASA – konvertor tepelné energie na elektrickou založený na dvou Stirlingových motorech. Zatím se připravuje model s výkonem 12 kW. V budoucnu by zdrojem tepla měla být štěpná reakce, tedy malý jaderný reaktor. O takovém zdroji energie se uvažuje pro cestu na Mars. Zdroj: NASA/GRC.

Při srovnání účinnosti s osvědčeným termoelektrickým článkem vyhrává Stirlingův motor na plné čáře. Toto vítězství je však vykoupeno životností. Jakékoli pohyblivé součásti budou vždy slabým místem každého zařízení. V právě vyvíjeném energetickém převodníku je takovýchto součástek minimum, přesto však představují potenciální riziko. Zkouškám proto věnuje NASA velký prostor a pokračují i v dobách, kdy pro nedostatek financí ostatní vývoj spí. Ostatně, takové zkoušky nejsou finančně náročné. Spočívají v nepřetržitém chodu zařízení.

Výsledky zkoušek jsou povzbuzující, stroje testované od roku 2000 nevykázaly žádné větší opotřebení. Exempláře č. 13 a 14 byly v provozu 11,7 let (přesně 103 000 hodin). V roce 2016 bylo dokončeno vyhodnocení jejich práce a nebylo shledáno žádné zhoršení výkonu. Jeden z exemplářů bude pokračovat ve své činnosti dále a druhý bude rozebrán a jeho součásti podrobeny hloubkové analýze.

■ **Rudolf Mentzl, 4. 12. 2015, AB 43/2015, aktualizováno**

Stephen Hawking: Breakthrough Starshot

Kryton: „Ten projekt byl v plenkách, když jsem opustil Sluneční soustavu. Lodi nulové hmotnosti i objemu, schopné proletět nadsvětelnou rychlostí jako tachyony, třeba červími děrami, řízené velmi inteligentními hologramy.“ Lister: „A unesli Rimmera? Ten mezi ně zapadne perfektně!“ Kryton: „Teď už chápu, proč se s námi nechtějí spojit. Holoposádky jsou pověstné arogancí. Opovrhují hloupostí, kdekoli ji vidí, a vidí ji úplně všude.“

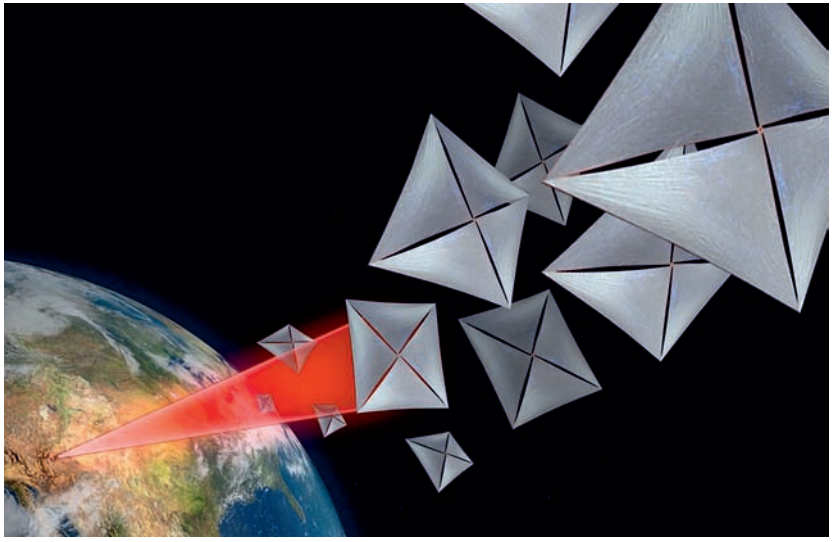
Čtenáři jistě nemají problém s rozpoznáním citátu z britského komediálního seriálu Červený trpaslík. Ačkoliv byla zmíněná hololoď vymyšlena pro čistě humoristické účely, dnešnímu serióznímu tématu se v některých aspektech velmi podobá. Jeden z nejpopulárnějších světových fyziků, anglický teoretik Stephen Hawking, spolu s ruským miliardářem Jurijem Milnerem totiž při 55. výročí prvního letu Jurije Gagarina oznámili v New Yorku průlomový projekt v oblasti vesmírného cestování.

Sluneční plachetnice – *kosmická loď, která ke svému pohonu využívá tlaku elektromagnetického záření Slunce, případně tlaku laserového svazku. Po řadě nezdarů bylo první takové plavidlo (plachetnice IKAROS) otestováno japonskou kosmickou agenturou JAXA v polovině roku 2010.*

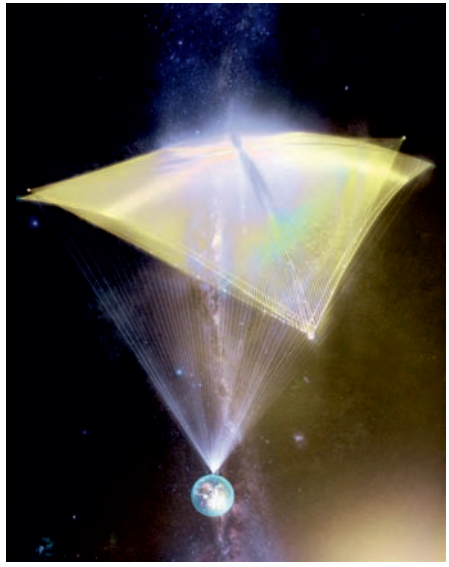
Projekt Breakthrough Starshot

Zemi nejvzdálenějším objektem, na který „sáhla lidská ruka“, je bezesporu americká vesmírná sonda Voyager 1, která byla vypuštěna dne 5. 9. 1977. Dodnes je stále ještě (tedy přes 40 let) částečně funkční a v současné době (1. července 2018) je vzdálena od Země 142 astronomických jednotek (21,3 miliard kilometrů). Nyní se zdá, že všechny rekordy sondy Voyager 1 mohou být poměrně rychle přepsány.

Hawkingův a Milnerův projekt *Breakthrough Starshot* představuje velmi malou solární plachetnici,

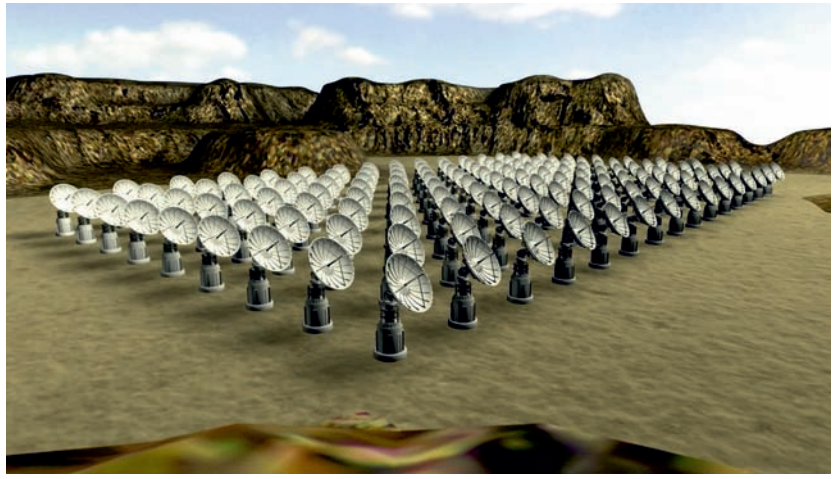


Solární plachetnice Starshot urychlované laserovými paprsky. Zdroj: Wired UK.



Detail jedné z plachetnic. Zdroj: Breakthrough Initiatives.

Futuristické vyobrazení laserového pole pro urychlování solárních plachetnic. Zdroj: PopSci.



která by byla po konvenčním vypuštění na oběžné dráze urychlena během několika minut pomocí skupiny velmi výkonných laserů přibližně na rychlost pětiny rychlosti světla. Uprostřed plachetnice by se měla nacházet nanoloď – jen několik milimetrů veliká a několik gramů vážící kapsle, která by měla obsahovat palubní počítač, dokumentační zařízení (fotoaparát/kameru), komunikátor a plutoniový zdroj napájení. Jako cíl své cesty si otcové této myšlenky vybrali naší Sluneční soustavě nejbližší solární systém – hvězdu Alfa Centauri, která je od Země vzdálena 4,37 světelných roků (tedy 4 134 miliard kilometrů). Primárním cílem projektu je průzkum vzdáleného vesmíru a hledání života v něm. Nejdříve je však potřeba ověřit celkovou správnost tohoto zatím teoretického konceptu.

Sluneční plachetnice nejsou na poli vesmírného cestování nic neobvyklého. Stephen Hawking a Jurij Milner však přišli s konceptem malé plachetničky, kterou lze v budoucnu vyrábět sériově, dle jejich slov za cenu několika stovek dolarů, a po vypuštění tisíce těchto nanolodí na oběžnou dráhu je vyslat na cesty do hlubokého vesmíru.

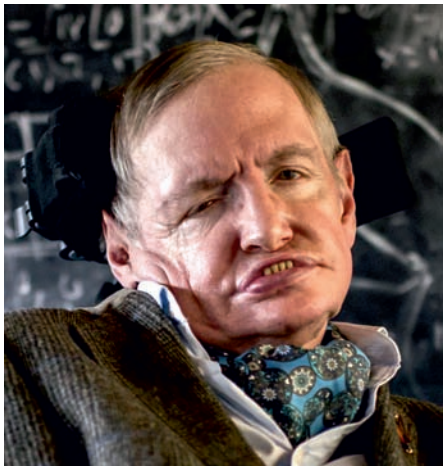
Plachetnice by přitom měla být pomocí laserů urychlena na rychlosti 15 až 20 procent rychlosti světla (162 až 216 milionů kilometrů za hodinu), což jsou rychlosti, se kterými má lidstvo zkušenosti pouze v částicové fyzice, a to pouze s jednotlivými ionty. Pomocí současné raketové techniky je urychlování na takovou rychlost nemožné, byť by šlo o velmi málo hmotné objekty. Z Ciolkovského rovnice totiž jasně vyplývá, že taková raketa s klasickým chemickým motorem by musela mít hmotnost mnohonásobně větší, než je hmotnost viditelného vesmíru. K urychlení by se podle projektu mělo používat několika stogigawattových laserů fokusovaných na plachetnici. Při dosažené rychlosti pětiny rychlosti světla by tak plachetnici trvalo doletět ke hvězdě Alfa Centauri přibližně 22 let. Jenom pro srovnání – při použití současné raketové techniky by tento let trval asi 30 000 let.

Krásná teorie, která přináší spoustu problémů

Jak již bylo zmíněno výše, projekt *Breakthrough Starshot* má za cíl především ověřit možnost tohoto druhu mezihvězdného cestování. Problémů a technických výzev je však více než dost. Mezi nejvýznamnější problémy patří především samotná konstrukce nanolodě a dále její urychlování laserem.

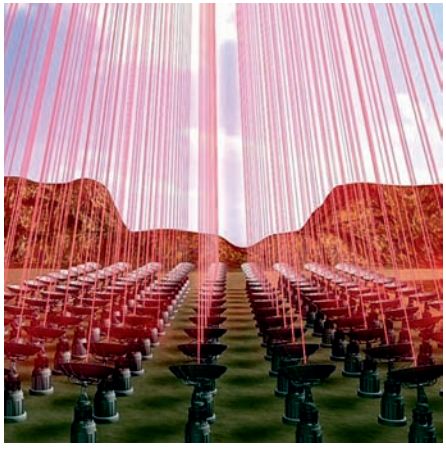
Stavba nanolodě. Celá nanoloď včetně solární plachty musí být schopna odolat extrémnímu urychlování a musí přežít v hlubokém vesmíru – tedy ve velmi nízkých teplotách, ve vakuu a pod vlivem velmi vysokých dávek kosmického záření. I když je samotný vesmír vně naší Sluneční soustavy velmi řídký, nanoloď musí být imunní i vůči vesmírnému prachu.

Laserové urychlování. Zde se projekt pohybuje zatím pouze v teoretické rovině. K urychlování plachetnic je potřeba postavit gigantické pole laserů, z nichž každý bude mít výkon přibližně sto gigawattů (jen pro srovnání – současné atomové elektrárny mají výkon v jednotkách gigawattů). Nezapomeňme ale, že bude tento výkon potřeba jen po velmi krátkou dobu. Problémem tak bude nejenom samotná konstrukce několika takových zařízení a přesná fokusace laserového paprsku, ale především nashromáždění a uchování energie, aby mohly lasery urychlovat plachetnici ve stejném časovém intervalu. S tím souvisí i samotná konstrukce plachty, jež musí přežít extrémní přísun energie ve formě enormního tlaku fotonů.



Stephen Hawking, autor projektu (1942–2018).

Pole laserů pohánějící nanoplachetnice v první fázi letu. Zdroj: Breakthrough Initiatives.

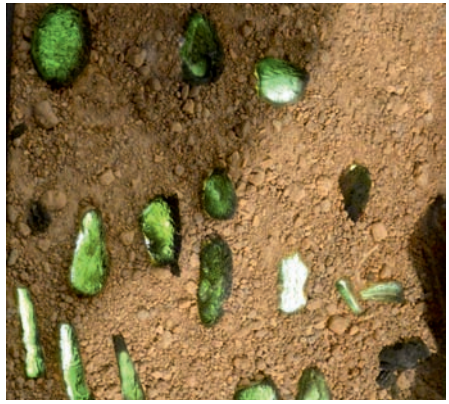


Závěrem

Počáteční investice projektu činí 100 milionů amerických dolarů, které věnoval sám Milner, přičemž jeho odhady na celkovou cenu vývoje a následné cesty se pohybují v rozmezí 5 až 10 miliard dolarů. Zajímavostí může být, že dalším členem správní rady se stal Mark Zuckerberg, zakladatel a generální ředitel sociální sítě Facebook, a ve vrcholném managementu projektu najdeme taková jména, jako například Pete Worden (bývalý ředitel výzkumného centra NASA – současný ředitel projektu) nebo Avi Loeb (teoretický fyzik, vedoucí katedry astronomie na Harvardově univerzitě). Dočkáme se tedy za dvacet let slíbených mezihvězdných letů?

■ Radek Beňo, 22. 4. 2016, AB 16/2016, aktualizováno

Eurolabs



Různé vltavíny nacházené v Čechách a na Moravě by měly mít původ v dopadu tělesa, které v sousedním Německu vytvořilo kráter Ries.

Muzeum v Nordlingenu, kde je ve dvou patrech vše, co chcete vědět o kráteru Ries.



Čas od času vyrážíme s partou přátel na expedice, jejichž cílem je návštěva špičkových vědeckých zařízení a okolních přírodních krás. Nejinak tomu bylo i na podzim 2015. Dvacítka Aldebaraňáků projela v automobilech zhruba 4 000 kilometrů, aby nakoukla pod pokličku velkých evropských experimentů. Expedice začala dne 4. září 2015 ráno, kdy jsme naložili něco málo potravin pro první den jízdy (některým jedincům vydržely až do konce expedice a ožívaly vlastním životem) a skončila 19. září ve večerních hodinách v jedné čínské restauraci, kde jsme se snažili na poslední chvíli vylepšit naši stravovací bilanci. Měli jsme neuvěřitelné štěstí na počasí a co víc: podařilo se nám beze zbytku splnit všechny body programu a ještě některé navíc. Viděli jsme obří spektrograf a filtr KATRIN, rozestavěný tokamak ITER, nejkvalitnější neutronový zdroj na světě v ILL v Grenoblu, projeli jsme křížem krážem kráterem Ries, nakoukli do slavného kasina v Monte Carlu, které dalo jméno jedné skupině numerických metod, obdivovali úžasnou kapli Notre Dame du Haut, vyšplhali na milánskou katedrálu, slezli do strmého kaňonu Verdon, zopakovali si biologii u skály s amonity v Digne les Bains, ochutnali francouzské sýry, popíjeli vynikající víno a alespoň na chvíli zapomněli na každodenní starosti v naší nedaleké domovině.

Kráter Ries

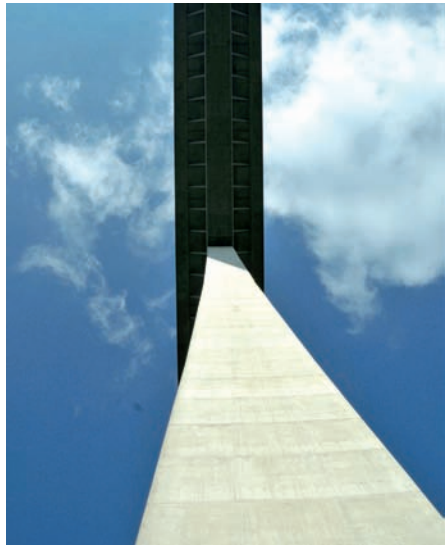
Prvním naším cílem byl německý kráter Ries. Vznikl dopadem přibližně kilometrového tělesa někdy před 14 miliony lety. Těleso vyhloubilo kráter o průměru 24 kilometrů a na jeho okraji zdvihlo horniny o 150 metrů. Tento kráterový val je dodnes velmi dobře patrný. Vyvržené přetavené horniny dopadaly do vzdálenosti mnoha set kilometrů a právě z nich by měly pocházet české vltavíny a tektity.


Koblenz
Frankfurt am Main
Prague
(Praha)
Luxembourg
Mannheim
Nuremberg
(Nürnberg)
Plzen
Reims
Metz
Sinsheim
Kocher
Karlsruhe
Regensburg
Jouarre
Paris
Nancy
KATRIN
Stuttgart
Ries
Troyes
Ulm
Munich
(München)
Linz
Ventron
Freiburg im Breisgau
Salzburg
Ronchamp
Basel
Zurich
(Zürich)
Dijon
Besançon
Innsbruck
Bern
Bolzano
(Bozen)
Klagenfurt
Geneva
(Genève)
Trento
Udine
Ljubljana
Lyon
Aosta
Milan
Lago
di Garda
Venice
(Venezia)
Verona
Turin
(Torino)
Milano
Rijeka
ILL
Grenoble
Piacenza
Parma
Ferrara
Pula
Genoa
(Genova)
Bologna
Digne
Hobitin
Lac d'Allos
Varazze
La Spezia
Rimini
Avignon
Valberg
Florence
(Firenze)
Monaco
Pisa
Montpellier
ITER
Verdon
Monte Carlo
Ancona
Arezzo
Agay
Marseille
Perugia
Perpignan
Terni
L'Aquila
Rome
0 km
180
360
540



Most přes údolí Kocher.

Pohled podél pilíře mostu Kocher vzhůru na mostovku zespoda. Výška mostu je 185 metrů.



Uvnitř kráteru dnes leží malebné městečko Nordlingen s muzeem věnovaným historii kráteru. Městečko je obehnané hradbami, po kterých ho lze snadno obejít. Kráter samotný je dobře patrný na satelitních snímcích, nicméně kráterový val je vidět i z mnoha míst rozlehlé krajiny.

Znaveni cestováním po kráteru končíme první den v hotelu v městečku Westhausen, kousek za okrajem kráteru. Recepční svou povahou připomíná typickou naivní blondýnu z mnoha vtipů. Vydává nám klíče, aniž by chtěla jakýkoli doklad. Je si totiž vědoma, že by musela kamsi zapisovat naše nacionále, což je zjevně nad její možnosti. Z téhož důvodu nechce ani platbu za hotel a ve své naivitě doufá, že to za ni vyřeší někdo jiný později, snad ráno. Když jsem jí vnutil peníze (dobré účty dělají dobré přátele) obrátila oči v sloup a začala shánět někoho, kdo by dokázal částku naťukat do počítače. Nakonec se ubytováváme a scházíme se na přízemní terase téměř prázdného hotelu. Asi po půl hodině se objevil jiný zaměstnanec, který suše oznamuje, že v Německu je zakázané seděti na hotelových terasách, pojídati vlastní jídlo a popíjeti vlastní nápoje. Nedá se nic dělat, odcházíme tedy šířit svinčík do hotelových pokojů. Zákony a nařízení je třeba respektovat, zejména v sousedním pořádkumilovném Německu.

Most Kocher a muzeum letectví v Sinsheimu

Je sobota a první návštěva velkého vědeckého zařízení je plánována na pondělí. Proto se cestou do Karlsruhe zastavujeme na dvou místech. Prvním je zastávka pod dálničním mostem Kocher, který byl zprovozněn v roce 1979. Jde o nejvyšší most v Německu (nad údolím ční do výše 185 metrů) a do roku 2004 byly jeho pilíře nejvyššími mostními pilíři na světě. Pohled zdola na spodní část mostovky, jež se zdánlivě dotýká plujících oblaků, je fascinující. Nikdy jsem nic podobného neviděl. Jakoby most symbolizoval touhu dotknout se nebe.

Odpoledne trávíme v Automobilovém a technickém muzeu v Sinsheimu. Kdykoli tudy projíždíme, jsou z dálnice patrné dva letouny umístěné na střeše muzea. Mnohokrát jsme plánovali, že se do muzea jednou podíváme. A to jednou je právě nyní. Jeden z letounů je slavný Concorde, druhý neméně slavné tůčko Tu-144. Oba stroje si můžeme prohlédnout zevnitř. V muzeu je ale obrovské množství dalších zajímavých exponátů: nejrychlejší automobil světa Blue Flame, který se kdysi prohánět po solných pláních v Boneville rychlostí přes 1 000 km/h, Fantomasovo vozidlo ze známých filmů, historické automobily, lokomotivy, vojenská expozice a mnoho hejblátek, která se po vhození eura hýbají, hrají, škubají a zkrátka projevují tak, aby euro vhodil i další příchozí.

Několikahodinový pobyt v muzeu je vyčerpávající, a tak míříme do hotelu v centru Karlsruhe. Tedy spíše hostelu s palandami a malou kuchyňkou pro přípravu jídla. Recepce funguje jen přes den, a tak Tchaj-wanec, který se s potvrzenou rezervací zjevil zvečera, má jen tři možnosti: celou noc volat na číslo uvedené v rezervaci, které nikdo nebere; přespat s bezdomovci na ulici před hotelem, nebo se spolehnout na naše vytříbené sociálně-charitativní cítění a doufat, že ho necháme přespat v jednom z našich pokojů.

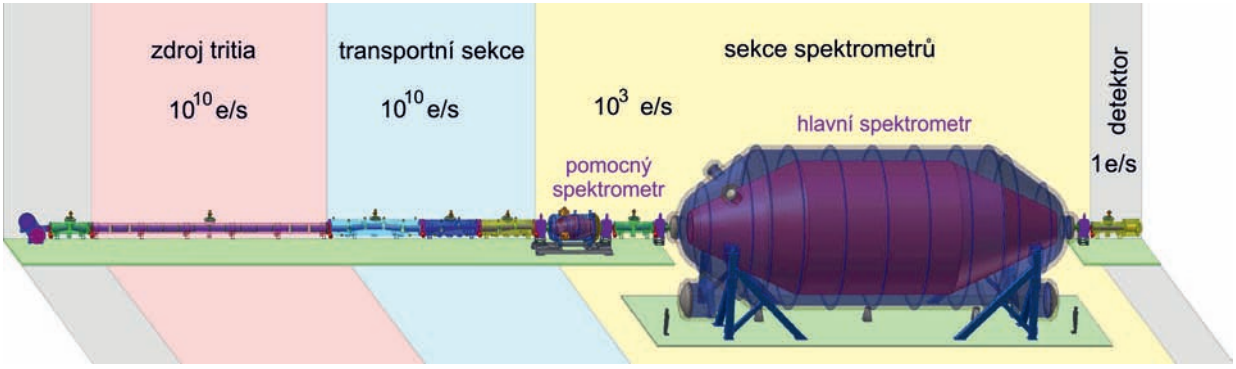


V Muzeu letectví v Sinsheimu si každý přijde na své. Blue Flame – nejrychlejší automobil světa.

KATRIN

Experiment KATRIN je umístěný v německém univerzitním komplexu KIT (*Karlsruher Institut für Technologie*). Rozpadající se molekulární tritium produkuje elektrony a antineutrina. Nejenergetičtější elektrony nesou cenné informace o nejméně energetických neutrinech, zejména

Schéma experimentu KATRIN.





Doprava KATRIN přes Karlsruhe. Zdroj: KIT.

Manipulace s KATRIN při usazování v KIT. Zdroj: KIT.



o jejich klidové hmotnosti. Srdcem experimentu je proto spektrograf a filtr KATRIN, který má za úkol odfiltrovat elektrony s podprahovou energií a do následujícího detektoru vpustit jen elektrony s energií nejvyšší.

KATRIN je zkratkou z anglického *Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment*. Hlavním cílem experimentu je změřit hmotnost elektronového antineutrina ze spektra elektronů vylétajících při rozpadu tritia. Jde o nestabilní izotop vodíku s jedním protonem a dvěma neutrony v jádře, který za normální teploty a tlaku vytváří molekuly T_2. Tritium se rozpadá na ^{3}He, elektron a elektronové antineutrino s poločasem rozpadu 12,32 roku. Při rozpadu si elektron s antineutrinem odnášejí energii 18,6 keV, což je nejnižší energie ze všech běžných beta zářičů. Většinou je tato energie rozdělena mezi elektronem a antineutrinem v přibližném poměru 1:1, ale statisticky se občas stane (v jednom z bilionu, tj. 10^{12} rozpadů), že si téměř veškerou energii odnáší elektron a antineutrino má zhruba klidovou energii. Právě s pomocí těchto vzácných rozpadů je možné změřit hmotnost vylétajícího antineutrina.

Kolaborace KATRIN byla založena v prosinci roku 2002. Příprava experimentu neprobíhala na „zelené louce“. Byly využity zkušenosti z obdobných, ale výrazně menších experimentů v německé Mohuči a ruském Troicku. Pro srovnání: hlavní spektrometr v Troicku má průměr 1,3 metru. Spektrometr experimentu KATRIN má průměr 10 metrů, hmotnost 200 tun a celý experiment má délku 70 metrů. Experiment je vybudován v severním kampusu německého KIT. V době naší návštěvy ještě nefungoval, testovací režim započal v roce 2016 a první experimenty v roce 2017. Na experimentu se podílí 150 vědců z Německa, Velké Británie, Ruska, České republiky a Spojených států amerických. Českou účast v experimentu koordinuje Dr. Drahoslav Vénos z Ústavu jaderné fyziky Akademie věd.

První částí experimentu je zdroj tritia. Jde o 10 metrů dlouhou sekci, do jejíhož středu je vháněno plynné tritium o teplotě 27 kelvinů přes 250 otvorů o průměru 2 milimetry. Tritium difunduje k oběma koncům sekce. Odsáváno je řadou turbomolekulárních pump. Ve zdrojové části experimentu dochází k rozpadu tritia na elektrony, antineutrina a helium ^{3}He. Antineutrina oblast okamžitě opouštějí, zatímco elektrony, tritium a helium vstupují do další sekce experimentu. Tok elektronů ze zdrojové části je 10^{10} částic za sekundu. Druhou částí experimentu je transportní sekce, ve které jsou elektrony vedeny magnetickým po-

lem do další části experimentu. Tritium a helium jsou odsávány pryč, ve vlastním experimentu jsou nežádoucí. Neutrina odletí samozřejmě zcela nepozorována. Transportní sekce je přibližně stejně dlouhá jako zdroj tritia a opouští ji 10^{10} elektronů za sekundu.

Z transportní sekce pokračují elektrony ke spektrometru, srdci celé aparatury. Spektrometr má dvě části, nejprve je zařazen malý pomocný spektrometr („Katrinka“), po něm teprve následuje hlavní spektrometr KATRIN. Ten funguje jako řiditelný energetický filtr, který podle aktuálního nastavení elektrických a magnetických polí propustí dále jen elektrony s energií vyšší, než je právě nastavená mez. Poslední částí je detektor, který určuje počet elektronů prošlých filtrací v hlavním spektrometru a pořizuje tzv. integrální spektrum elektronů.

Obří spektrometr, který je srdcem experimentu KATRIN, byl vyroben v německém Deggensdorfu (město na Dunaji, 60 km vzdušnou čarou jihozápadně od našeho města Sušice). Z tohoto místa bylo třeba dvousettunový kolos o průměru 10 metrů dopravit do 400 kilometrů vzdáleného Karlsruhe. Po silnici to bylo nemožné, v mnoha místech by nebyla dostatečně široká. Proto byl spektrometr naložen na loď a vyrazil po Dunaji zdánlivě opačným směrem – přes Rakousko, Maďarsko, Jugoslávii a Rumunsko až do Černého moře. Zde se nezvyklý transport vydal přes úžiny Bospor a Dardanely do Středozemního moře. Po proplutí Gibraltarem jeho cesta pokračovala Atlantikem podél portugalských hranic směrem k Anglii. Za průlivem La Manche dospěla loď k ústí Rýnu, po kterém se konečně dostala do Karlsruhe. Celá pouť byla dlouhá 8 500 kilometrů a při závěrečném přesouvání městem Karlsruhe místy způsobila srocení lidí, za něž by se nemusela stydět žádná politická demonstrace.

Základní úlohou experimentu KATRIN je změření hmotnosti elektronového neutrina resp. antineutrina. Na tomto spektru se ale mohou podepsat i jevy nacházející



Montáž KATRIN v experimentální hale. Zdroj: KIT.

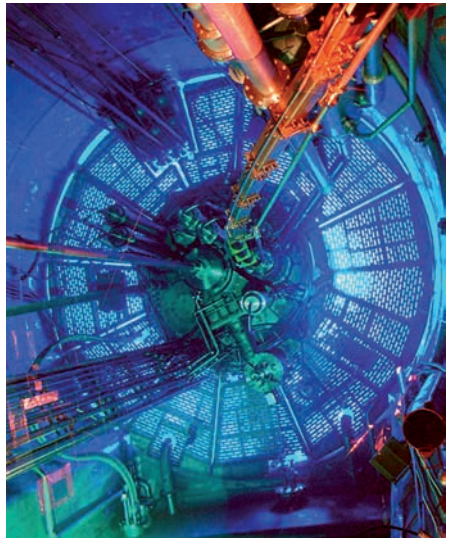
Část expedice před spektrometrem KATRIN.





Institut Laueho a Langevina. V obřím „hrnci“ je jaderný reaktor a desítky experimentů s neutrony.

Centrální reaktor je zdrojem neutronů pro všechny experimenty. Modrá barva je způsobena Čerenkovovým zářením. Zdroj: J. L. Baudet, ILL.



se na pomyslné hranici našich současných znalostí. Jeden z nich předpověděl v roce 1962 americký teoretik Steven Weinberg. Uvažoval, že by se radioaktivní tritium dalo využít k záchytům reliktních neutrin, která se oddělila od horké a husté vesmírné pralátky na konci první sekundy Velkého třesku. Weinberga napadlo, že by beta rozpad tritia mohlo jít obrátit. Pokud je namísto emise antineutrina absorbováno reliktní neutrino, dojde k témuž výsledku – tritium se přemění na ^{3}He a elektron. Jde o kanál rozpadu tritia, při kterém nevzniká antineutrino a který by měl ovlivnit energetické spektrum vylétajících elektronů. Experiment KATRIN je dostatečně citlivý, aby mohl vydat svědectví o reliktních neutrinech, poslech dávné minulosti našeho vesmíru. To by byl nepochybně velký průlom pro naše poznání počátku vesmíru.

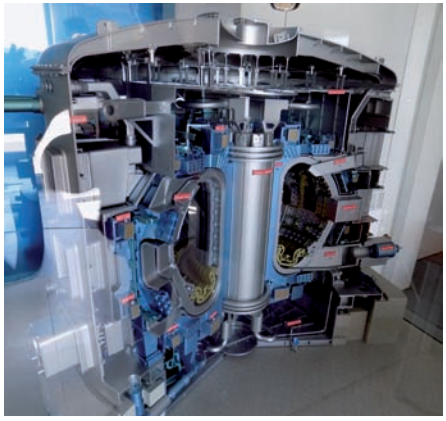
Neutronový zdroj v ILL

Naše další cesta vedla do Grenoblu, kde je sice mnoho pamětihodností, ale nás zajímal Institut Laueho a Langevina, kde je nejkvalitnější zdroj neutronů na světě. Pokud se někde dočtete, jakou hmotnost má neutron, jaký je jeho poločas rozpadu, magnetický moment a další vlastnosti, můžete si být jisti, že ty nejpřesnější hodnoty pocházejí právě odsud. Srdcem obří haly je jaderný reaktor, z něhož vyletují neutrony, a ty pak jsou vedeny neutronovody k jednotlivým experimentům. Jen namátkou zmiňme experiment, v němž vědci z Vídeňské univerzity poprvé měřili kvantové stavy neutronů v tíhovém poli (2011) – neutrony posloužily jako pingpongový míček, nebo přípravu nové fáze ledu XVI z hydroklatrátu neonu (2014), kterou zde provedla skupina vědců z Gottingenské univerzity.

Uvnitř haly platí zákaz fotografování, což je vzhledem k jaderné bezpečnosti pochopitelné. V hale je udržován podtlak, proto se do ní vchází přetlakovým tunelem a při odchodu jsou všechny osoby skenovány detektorem radioaktivity. Dozvěděli jsme se, že detektor zapípá zcela výjimečně, tak maximálně jednou do roka. My jsme zapípali hned čtyři, z čehož je vidět, že podobné návštěvy bereme vážně a vše si prohlížíme s plným nasazením. V hale jsou stovky experimentů nejrůznějšího druhu. Společným jmenovatelem je buď základní výzkum vlastností neutronů, nebo zobrazovací metody využívající neutrony, například neutronová difraktometrie, která pomocí rozptylu neutronů na periodických strukturách získává informace o krystalech, molekulách i větších objektech.

Cestou necestou k tokamaku ITER

Dalším vědeckým cílem byla stavba největšího tokamaku na světě, jehož název ITER znamená v latině cestu, v přeneseném smyslu cestu k ideálnímu zdroji energie založenému na termojaderné fúzi. ITER je také zkratkou z anglického *International Thermonuclear Experimental Reactor*. Předpokládaný výkon reaktoru bude 500 MW, stavba probíhá v jižní Francii, v blízkosti hradu Cadarache. Plazmová komora reaktoru bude mít průměr 6 metrů. V době naší návštěvy se tvrdilo, že bude tokamak uveden do provozu kolem roku 2020, nynější údaj (2018) říká, že tomu nebude dříve než v roce 2025. Předpokládá se, že půjde o poslední pokusný reaktor před stavbou první skutečné termojaderné fúzní elektrárny.



Model budoucího tokamaku ITER je ozdobou návštěvnického centra.

Dohodnutá exkurze byla pojata poněkud „mastňácky“. Nejprve jsme dojeli autobusem od brány do návštěvnického centra, kde byla zařízena přednáška odborníka na problematiku (přednášejícím tohoto typu studenti příznačně říkají uspávači hadů). Po ní jsme objeli autobusem celé staveniště. Na první pohled byla všude viditelná velkolepost tohoto smělého díla, které předčí snad jen Mezinárodní kosmická stanice na oběžné dráze. Z plánovaných budov byla ale tehdy postavena jen malá část a z reaktorové haly jen základy. Kompletní hala bude vyšší než Petřínská rozhledna a reaktor v ní umístěný bude mít výšku 29 metrů a průměr 28 metrů. Monstrózní stavba je v plném proudu, ale do zdárného dokončení bude třeba ještě mnoho úsilí.

Stavba reaktorové haly tokamaku ITER v době naší návštěvy. Dnes už je budova dostavěna.



Zajímavé je, že staveniště ITER-Ru je považováno za mezinárodní území, nikoli za území Francie. Vedle stavby byl vysázen les, který má kompenzovat dopad stavby na ekologii. Prý jde o nejdůležitější les v celé Francii. Již při letmém pohledu z autobusu bylo patrné, že les je v kritickém stavu a jeho udržování v blízkosti stavby je aktem čirého zoufalství. Naštěstí má Francie lesy krásnější, které nijak nesouvisejí s nesmyslnými ekologickými a stavebními předpisy.



Zrcadlo v Monte Carlu, v němž se odráží slavné kasino, které dalo název jedné z nejznámějších numerických metod v přírodních vědách.

Metody Monte Carlo

Fyzikou se živí čtyři skupiny lidí: experimentátoři, teoretici, simulanti a parazité. Odhlédnu-li od parazitů, kteří se nabalují na veškeré lidské aktivity současnosti, zůstávají tři výkonné skupiny, které jsou na sobě navzájem závislé. „Simulanti“ simulují, tedy vzletněji řečeno provádějí numerické simulace, kterými v počítači napodobují skutečné děje v přírodě. Numerická simulace je levnější než experiment a často je jedinou možností, jak ověřit, zda jsou naše předpoklady správné a zda má vůbec smysl experiment stavět. Numerické simulace také umožňují interpretaci naměřených dějů a jejich hlubokou analýzu. Existuje mnoho numerických metod, jedna skupina simulací je založena na náhodných procesech. Takto simulujeme růst krystalů, průraz při jiskrovém výboji, srážky částic, které mohou vést na několik finálních stavů i mnohé další procesy. Souhrnně se tyto algoritmy nazývají Monte Carlo metody. Pojmenovány byly podle známé čtvrti v městském státě Monako, kde je věhlasné kasino, v němž se hrají hazardní hry založené na náhodě. Monte Carlo metody se nevyužívají jen ve fyzice, ale našly si své místo ve všech přírodních vědách, v sociálních i ekonomických simulacích a při hledání optimálního řešení nějaké situace (tzv. optimalizační procesy). A když už jsme byli na jihu Francie, byla volba další cesty jasná. Musíme vidět Monte Carlo a jeho slavné kasino, které dalo název jedné z nejúspěšnějších numerických metod všech dob.

* * *

Na naší cestě jsme si všímali i jiných krás, než jsou vědecká zařízení. Navštívili jsme Mariánskou kapli Notre-Dame du Haut, milánskou katedrálu, skálu s amonity v Digne les Bains, národní park Ballons, ledovcové jezero d'Allos, kaňon Verdon i další zajímavosti. Projížděli jsme horskými serpentinami v nadmořské výšce přes dva kilometry, kde nám dech braly nejen úchvatné výhledy, ale i strach o holý život. To už je ale vyprávění pro jiný formát, než je tato knížka.

■ Petr Kulhánek, 5. 5. 2018, AB 33/2015


BEAUVEZER 12-9-2015



V. FYZIKA

Je theorie šedá, samý brak
a zelený je žití zlatý strom.

Akustický výzkum blesků a hromů

Krokový kanál – *prostředí, kterým jsou vedeny elektrony při bleskovém výboji z mraku k Zemi. Krokový kanál vzniká postupně jako série jasných úseků, každý z nich je dlouhý přibližně 30 metrů a trvá méně než mikrosekundu. Další úsek se objeví přibližně po 50 mikrosekundách. Celý krokový kanál existuje kolem jedné setiny sekundy a k zemi se pohybuje rychlostí 300 kilometrů za hodinu. Jakmile se krokový kanál přiblíží k zemi, objeví se proti němu kladný kanál vystupující ze země.*

S bouřkami se v běžném životě setkáváme pravidelně, a snad právě proto většina z nás nabyla dojmu, že jde o dobře prozkoumaný komplex jevů. Opak je ale pravdou. Nejasnosti jsou nejen kolem detailů nabíjení bouřkových oblaků, není ale ani známé, proč dojde k samotnému průrazu a vzniku blesku. Napětí za bouřky totiž není dostatečně veliké. Snad průrazné napětí sníží přítomnost sekundárních částic kosmického záření, jak navrhl Alexandr Gurevič v roce 1992, snad mohou pomoci hydrometeority (kapky nebo krystaly polarizované vody).

Víme, že za bouřky vzniká rentgenové záření, ale detailní mechanizmy jeho vzniku jsou opět obestřeny tajemstvím. Urychlené protony se nejspíše integrují do atomových jader a vytvářejí krátkodobé radioaktivní izotopy. Při bouřkové aktivitě jsou pozorovány gama záblesky (z družic i z pozemských stanic). Jejich původ pravděpodobně souvisí se zářením extrémně energetických elektronů, které jsou urychlovány elektromagnetickými vlnami generovanými při bouřce (samozřejmě vše za přítomnosti zemského magnetického pole). Nevíme, jak vznikají atypické blesky – modré výtrysky, červené přízraky a těžko se smiřujeme s tím, že o kulových blescích toho dnes nevíme o moc více než před půl stoletím. K poznání jevů při bouřkové aktivitě mohou napomoci aktivní experimenty, při kterých je blesk vyvolán uměle a zkoumán za pomoci různých zařízení. O jedné sérii takových experimentů si nyní povíme.

Krajina za bouřky. Zdroj: Glen McClure, Itali, Trevi, 2015.



Experimenty na Floridě

Velmi zajímavé experimenty provádí skupina vědců pod vedením Dr. Mahera Dayeha z amerického SwRI (*Southwest Research Institute*) ve spolupráci s Mezinárodním

střediskem pro výzkum blesků a jejich testování, které je součástí Floridské univerzity v Gainesville, kde je bouřková aktivita nejčastější z celého území Spojených států. Výskyt hromů a blesků lze jen obtížně předpovídat, proto se tyto jevy nejlépe studují při vyprovokovaných událostech. Vědecký tým vytváří blesky aktivně. Do bouřkového oblaku vypustí malou raketku (cca 1 metr dlouhou), která za sebou táhne tenký uzemněný měděný drát zpevněný kevlarem (typický průměr je 0,2 mm). Měď poslouží jako vodivý kanál a vytvoří předpověditelnou dráhu blesku. Vědci proto mohou kolem předpokládané dráhy blesku (v okolí rampy) rozmístit přístroje. Experimenty tohoto druhu jsou opakovatelné a probíhají v těsné blízkosti kanálu blesku. Nevýhodou je, že není možné zkoumat počáteční fáze průrazu, při kterých se u skutečného blesku musí vytvořit vodivý kanál jiným způsobem. Velké nejasnosti jsou ale i u mechanizmu vzniku hromu – zvukové rázové vlny doprovázející blesk. Není totiž jasné, ve které fázi bleskového výboje hrom vzniká a jaké fyzikální procesy se při jeho vzniku uplatňují. A právě na tuto problematiku jsou nové výzkumy v SwRI zaměřeny.

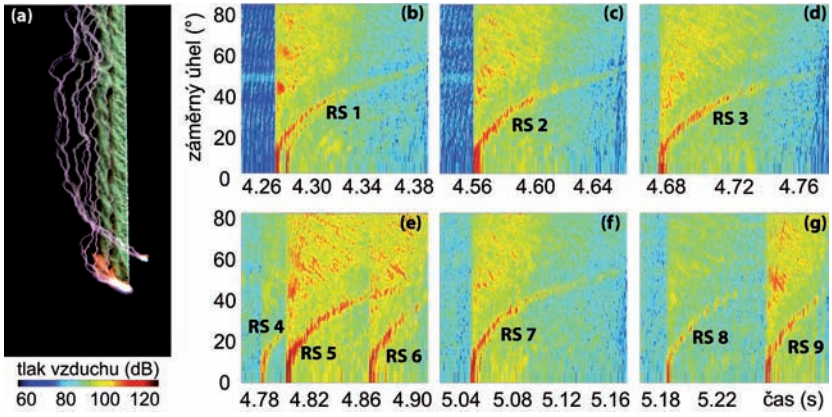
Vědci se rozhodli zkoumat akustický podpis vzniku blesku, a proto rozmístili ve vzdálenosti 95 metrů od odpalovací rampy pole patnácti mikrofonů. Mikrofony měřily výškový profil akustických projevů blesku a byly umístěny ve vzájemné vzdálenosti 1 metr. Ukázalo se, že na nízkých frekvencích je „podpis“ blesku nečitelný, ale na vyšších frekvencích dává charakteristické a dobře interpretovatelné obrazce, které je samozřejmě třeba dále počítačově zpracovat do výsledného „snímku“ akustického pole v okolí blesku. Zdá se, že touto metodou bude možné zkoumat jednotlivé fáze bleskového výboje, včetně větvení kanálu a formování krokového kanálu. Vědci totiž doufají, že by se větvení kanálu a přechody mezi jednotlivými „kroky“ výboje mohly projevit akusticky.

Akustické „snímky“

Skupina vědců vedená Dr. Maherem Dayehem představila svou novou metodu výzkumu blesků na

Kladný kanál – *kanál, který se v úvodní fázi blesku vytvoří ze země proti krokovému kanálu přicházejícímu z oblaku. Kladný kanál je dlouhý maximálně 50 metrů. Po jejich spojení vznikne vodivá cesta pro hlavní výboj, který nejprve přichází z oblaku k zemi a je následován zpětným výbojem ze země k oblaku.*

Zpětný výboj – *poslední fáze bleskového výboje, při níž postupuje výboj od země k oblaku rychlostí 0,1 až 0,5 rychlosti světla. Tato fáze je nejjasnější, lidské oko ji vnímá jako blesk. Zpětný výboj se několikrát opakuje, proto oko vidí jakési nevýrazné mihotání.*



Záznam události ze 14. července 2014. Nalevo (a) je fotografie vzniklého blesku s dlouhou expoziční dobou. Měděný drát měnící se v plazma svítí zeleně, devět následujících zpětných výbojů svítí fialově. V pravé části je časový vývoj akustického záznamu. Záznamy (b) až (g) odpovídají postupně rostoucím časovým úsekům. Je na nich zachyceno všech devět zpětných výbojů. Jejich zakřivení na záznamu je způsobeno efektem konečné rychlosti zvuku. Zdroj: SwRI/Floridská univerzita.

SwRI – *Southwest Research Institute, komplex vědeckých ústavů ve Spojených státech, který byl založen v roce 1947. Jde o jeden z nejstarších nevýdělečných ústavů v USA. Téměř 2 800 zaměstnanců provádí výzkum v řadě oblastí (od aplikované fyziky, přes chemii, inženýrství, až po kosmické lety). Ředitelství se nachází v texaském San Antoniu, roční obrat byl v roce 2014 přes půl miliardy dolarů.*

společném setkání Americké geofyzikální společnosti a Kanadské geofyzikální společnosti v kanadském Montrealu, které proběhlo ve dnech 3. až 7. května 2015. Příspěvek sklidil zasloužený ohlas a ukázal zcela novou cestu výzkumu bleskových výbojů. Akustické „snímky“ bleskových výbojů mají vynikající rozlišení, a to skupina předvedla jen jakési prvotiny pořízené polem patnácti mikrofonů. Do budoucna se uvažuje o podstatně kvalitnější síti akustických detektorů. Akustický výzkum blesků má vysokou šanci přispět k pochopení dosud nepoznaných procesů probíhajících při bouřkách, zejména pokud budou akustická čidla doplněna i dalšími senzory, například magnetického pole.

■ Petr Kulhánek, 19. 6. 2015, AB 22/2015

Zvířata a fyzika

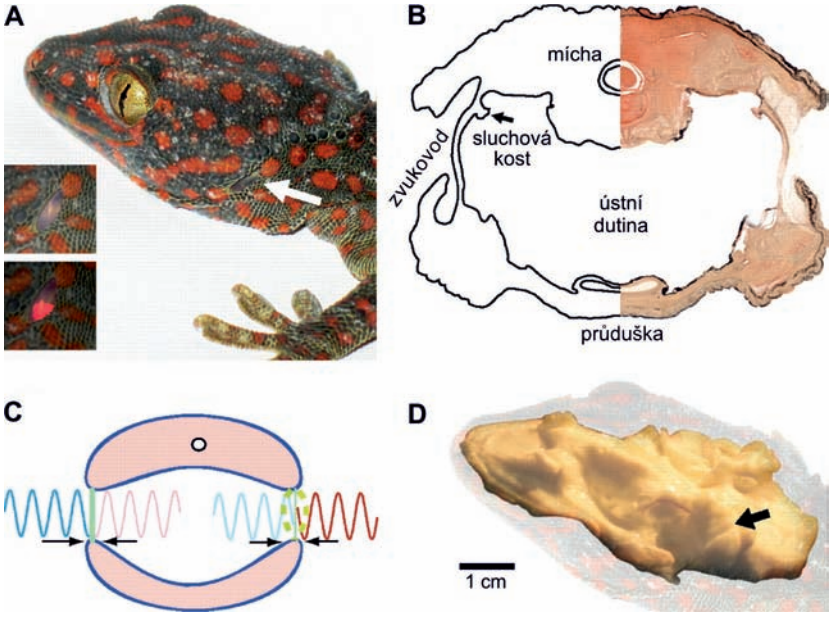
Zvířata, podobně jako lidé, mají receptory, které jim zprostředkovávají kontakt s okolním světem. Mnohdy mají ale tato čidla svá odlišná specifika. A některé živočišné druhy mají dokonce smysly, které nám lidem chybí, například vnímají elektrické či magnetické pole. V tomto textu se z této široké problematiky zaměříme na dvě zajímavé oblasti: receptory sluchu zvířat s malou hlavou a receptory elektrického pole vodních obratlovců a některých druhů hmyzu.

Zvuk – *mechanické vlnění, které je schopné vyvolat sluchový vjem. V plynech a kapalinách jde dominantně o podélné vlnění. Zvukové vlny v jiných prostředích, například v zemské kůře či obecně pevných látkách mají i příčnou složku. Člověk má receptory pro zvukové vlny od přibližně 16 hertzů do 20 kilohertzů.*

Sluch u malých zvířat

Určit směr, odkud přichází zvuk, patří k základním schopnostem přežití. U člověka je této schopnosti dosaženo použitím dvou uší, které umožňují několik mechanizmů lokalizace směru přicházejícího zvuku. Základní mechanizmy lokalizace zdroje ve vodorovné rovině jsou dva: interaurální časový rozdíl (časový rozdíl příchodu zvuku do uší) a interaurální rozdíl intenzit signálu (rozdíl intenzit signálu v uších).

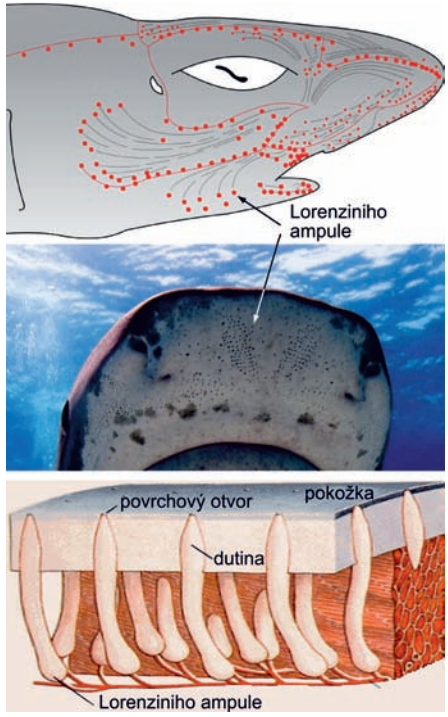
Interaurální časový rozdíl se týká časového rozdílu příchozího signálu mezi levým a pravým uchem. Buď se analyzuje fázový rozdíl obou signálů po celou dobu trvání signálu, nebo se jen vyhodnotí časový rozdíl mezi nástupem jednotlivých signálů. Analýza fázového posunutí je účinná, pokud je polovina vlnové délky zvuku větší než vzájemná vzdálenost uší, pro kratší vlnové délky již interpretace není jednoznačná. Pro příliš velké vlnové délky je zase vzájemný fázový posun signálů tak malý, že metoda přestává fungovat. Pro vyšší frekvence je možné použít analýzu časového rozdílu začátků signálů nebo rozdílu v intenzitě signálu. S rostoucí frekvencí totiž začíná být zvuk účinně tlumen samotnou hlavou, a proto je intenzita signálu



Anatomie uší gekona Gekko gecko. A – hlava gekona, šipka ukazuje ušní bubínek, na výřezu je detailní pohled na levý ušní bubínek a na tentýž bubínek osvětlený laserovým ukazovátkem přes pravý bubínek. B – příčný řez hlavou gekona v místě ušního bubínku. C – model ušních bubínků jako rezonanční dutiny. D – odlitek ústní dutiny s naznačenou polohou ušních bubínků.

Frekvence – *značíme f, počet opakování sledovaného děje za časovou jednotku. V soustavě SI měříme frekvenci v hertzích (Hz, počet dějů za sekundu). Lze ji vypočítat jako převrácenou hodnotu periody děje: f = 1/T. Často se používá také úhlová frekvence, kterou značíme ω. Jde o časovou změnu fáze vlnění. Pro obě frekvence platí převodní vztah ω = 2πf.*

Lorenziniho ampule – na obrázku je rozložení ampulí na přední části žraloka, fotografie žraloka s viditelnými otvory Lorenziniho ampulí a detailní obraz Lorenziniho ampulí. Zdroje: Wikipedia, Shark Attacs.



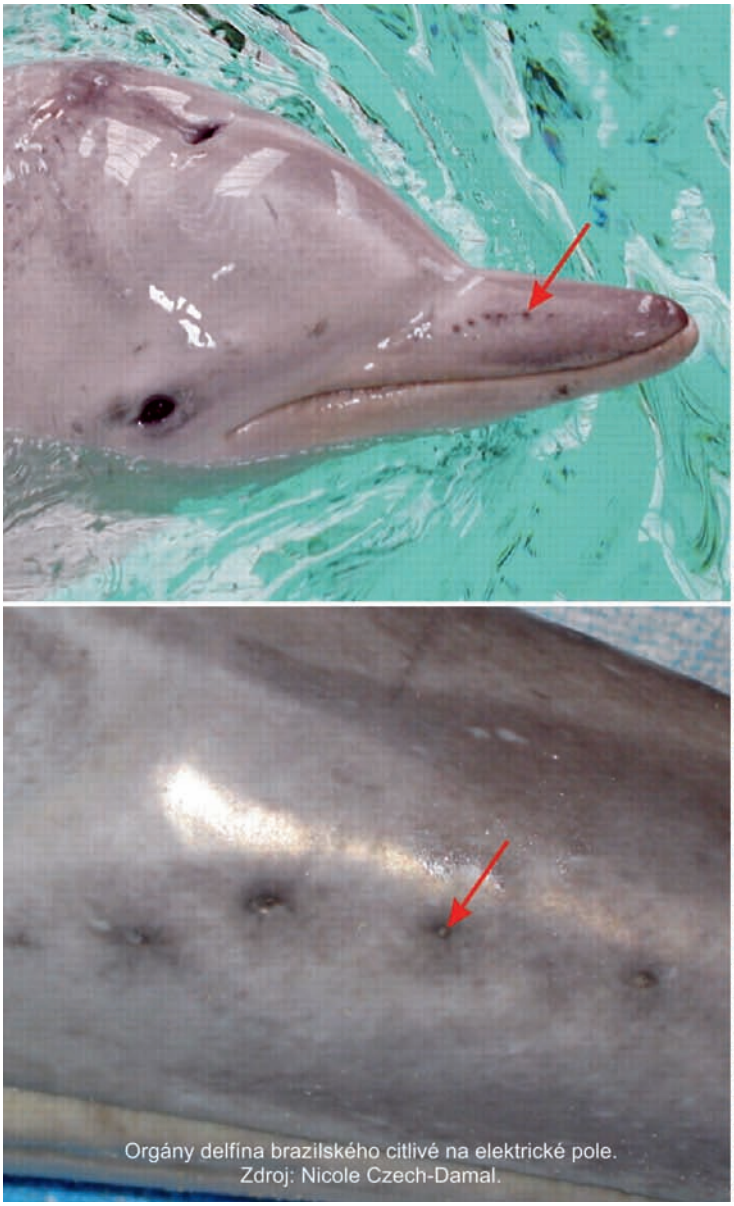
ve vzdálenějším uchu dostatečně nižší, aby byl tento rozdíl použitelný pro analýzu směru, ze kterého zvuk přichází.

U člověka není pro nejnižší slyšitelné frekvence analýza možná, nad 80 Hz začíná fungovat fázové posunutí, které je nejúčinnější mezi 200 až 800 Hz a postupně zaniká až do 1 600 Hz, když už je hlava větší než polovina vlnové délky. Pro vyšší frekvence již funguje pouze analýza začátku signálu a rozdílu v jeho intenzitě.

Uvedené frekvence ale vyplývají z rozměrů lidské hlavy. Její rozměr vyhovuje pro analýzu nejběžnějších zvuků v přírodě, které potřebujeme lokalizovat pro přežití – blíží-li se predátor, padá-li kámen a podobně. Analýzu zvuků s obdobnými frekvencemi musí ale zvládat i ostatní živočichové, například žáby, ještěři nebo ptáci, jejichž rozměry hlavy jsou obyčejně řádově menší a na směrovou analýzu vhodných frekvencí jsou příliš malé. Musí proto používat jiné metody. Zmíněné druhy živočichů (celkem asi 15 000) si na to vytvořily velmi účinný systém vzduchem vyplněné dutiny, která propojuje oba ušní bubínky (tzv. vnitřně propojené uši). Na rozdíl od savců, nemají ušní bubínky odděleny kostmi od ústní dutiny. Nejnovější studie skupiny vědců z Mnichovské technické univerzity, vedené Leo van Hemmenem, ukazuje model fungování směrové analýzy u gekonů a varanů jakožto zástupců živočichů s vnitřně propojenýma ušima.

V dutině spojující oba ušní bubínky totiž dochází ke vzniku stojatého vlnění, které je schopné v některých případech jemné rozdíly ve fázovém posunu i v intenzitě signálu zesílit natolik, aby byly živočichem analyzovatelné. Rezonance spolu se stojatým vlněním v dutině mezi ušními bubínky gekona i varana několikanásobně zesílí časový rozdíl mezi signály pro frekvence nižší, než je rezonanční frekvence dutiny. Nad touto frekvencí se citlivost prudce snižuje, začíná se ale projevovat rozdíl v intenzitě signálů mezi bubínky. Bez rezonance by měl být tento rozdíl prakticky nulový, pokud ale vezmeme v úvahu rezonanční trubici, může být rozdíl intenzit až několik decibelů.

Z měření vyplynulo, že rezonanční frekvence gekona je kolem 1 kHz a do této frekvence dojde ke čtyřnásobnému zvětšení rozdílu časového signálu. U varana je rezonanční frekvence 440 Hz a dochází k desetinásobnému zvětšení rozdílu časových signálů. Rozdíl intenzit mezi oběma bubínky závisí jak na frekvenci, tak na směru dopadajícího signálu a je nejvýraznější pro rezonanční frekvenci dutiny a frekvence vyšší. Maximálně dosáhne až deseti decibelů.



Orgány delfína brazilského citlivé na elektrické pole.
Zdroj: Nicole Czech-Damal.

Laserová vibrometrie – *metoda pro bezkontaktní měření výchylek nebo vibrací těles. Laserový paprsek je rozdělen na referenční a měřicí svazek. Měřicí svazek se odráží od zkoumaného povrchu a při zpětném složení interferuje s referenčním svazkem. Z průběhu interference je možno usuzovat na změny polohy zkoumaného povrchu.*

Včelí orientační tanec – pohled na včelu při dorozumívacím tanci (uprostřed) obklopenou ostatními včelami. Zdroj: Waren Photografic.



Elektrické pole ve vodě

Vnímavost k elektrickému poli je u vodních živočichů zcela běžná a prozkoumaná skutečnost. Jako první ji pravděpodobně popsali George Howard Parker a Anne Van Heusen v roce 1917, kdy sledovali vnímavost sumců ke kovovým tyčkám ponořeným do vody. V průběhu času byla vnímavost k elektrickému poli ve vodním prostředí, pomocí které predátoři vyhledávají kořist (v kalných vodách, v bahně nebo zahrabané do dna), pozorována i u žraloků, rejnoků, některých obojživelníků a kostnatých ryb (zde se vyvinula nezávisle několikrát), delfínů, ptakopysků nebo ježur.

První specializovaný elektrosenzor, dnes nazývaný Lorenziniho ampule, objevil u žraloků italský lékař a námořní badatel Stefano Lorenzini v roce 1678 – samozřejmě v té době nerozpoznal schopnost tohoto orgánu vnímat elektrické pole, to s jistotou ukázal až neurofyziolog Richard Wycliffe Murray z Birminghamské univerzity v roce 1960. Původně se předpokládalo, že Lorenziniho ampule je citlivá na teplotu, tlak nebo slanost vody – což je pravděpodobně i pravda. Lorenziniho ampule je malá trubičková dutina vyplněná elektrolytickým rosolem, který má elektrický potenciál okolní vody, a epiteliální buňky uvnitř dutiny reagují na rozdíl potenciálů těla a okolní vody. Podobný orgán mají i delfíni a další vodní živočichové.

Z pohledu fyziky je detekce elektrického pole živými organizmy ve vodě relativně jednoduchá analogie ampérmetru. Elektrická vodivost těl organizmů je podobná jako elektrická vodivost vody. Přítomnost těl elektrické pole příliš neovlivňuje, a proto je snadno měřitelné. Vodivost měkkých tkání živočichů je 0,1 až 1 S/m, vodivost povrchové vody je 0,05 až 0,1 S/m a mořské vody až 5 S/m.

Elektrické pole ve vzduchu

Odlišná situace ale nastává ve vzduchu, jehož elektrická vodivost je pouze 10^{-15} S/m. V takto málo vodivém prostředí způsobí přítomnost živočišného těla „zkrat“ a v jeho nitru nebude vnější elektrické pole měřitelné. Například elektrické pole v atmosféře dosahuje až 100 V/m, ale jakmile do něj vstoupíme, řádový rozdíl vodivosti ho v našem těle „vyzkratuje“, a elektrické pole naše tělo obtéká a od vzduchu nedostaneme elektrickou ránu. Nicméně, i přesto se ukazuje, že některé druhy hmyzu jsou schopny elektrické pole ve vzduchu detekovat. Navíc, na rozdíl od vodního prostředí, mohou živočichové ve vzduchu elektrický

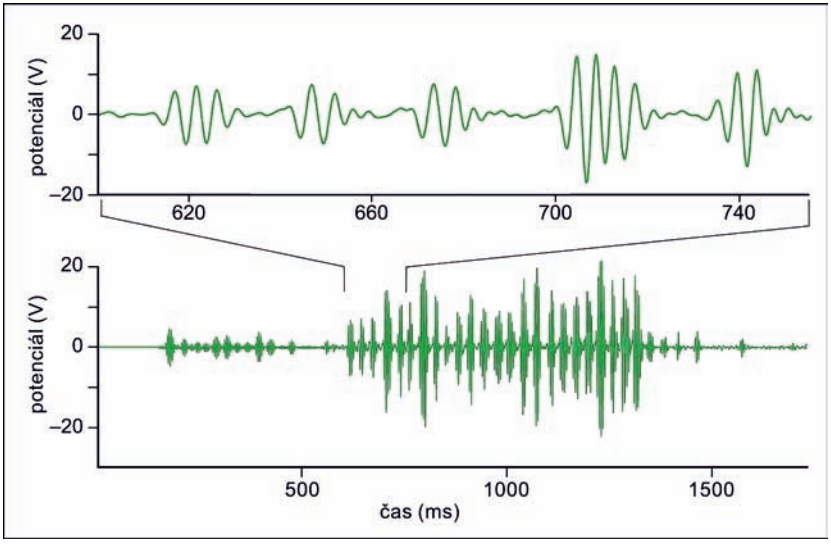
náboj cíleně přesouvat. Mohou ho například kumulovat na povrchu těla během letu při obtékání vzduchem a tento náboj si při vzájemném kontaktu mezi sebou nebo při kontaktu s květem vyměňovat a používat ho jako další nástroj komunikace. Na rozdíl například od barvy květu, se může elektrické pole měnit prakticky okamžitě a může umožnit velmi dynamickou komunikaci mezi květem a opylovačem. Podle práce skupiny Daniela Roberta z Bristolské univerzity z roku 2013 jsou čmeláci schopni vnímat statické elektrické pole květů, které, podobně jako barva, láká opylovače. Ve stejném roce popsala skupina vědců z Berlínské univerzity vedená Uwe Gregersem vnímavost včely medonosné k elektrickému poli, které včely samy vytvářejí v průběhu letu, přistávání, lezení nebo při včelích tancích.

Jak jsme již uvedli, princip vnímání elektrického pole ve vzduchu nemůže být založen na měření elektrického proudu jako ve vodě, ale na měření elektrostatické síly. Podobně, jako když nám nabité předměty přitahují kousky papíru, nebo když nám při česání vstávají vlasy. Včely i čmeláci by mohli být schopni detekovat statické i proměnné elektrické pole do frekvence několika kilohertzů pomocí elektrostatických sil působících na jejich tykadla a tělové chloupky. To potvrdily práce vědců z Berlínské univerzity (2013, Německo) a z Austinské univerzity (2016, USA) při studiu chování tykadel a chloupků včel a čmeláků v elektrickém poli pomocí laserové vibrometrie. Tykadla jsou citlivá na elektrické pole s frekvencemi do 1 kHz, zatímco chlupy vykazují maximum v oblasti 1 až 5 kHz.

Signál se musí přeměnit na nervové impulzy. Čmeláci převádějí stimulaci elektrickým polem na nervové impulzy chlupy a stimulace tykadel u nich nevede k nervové odezvě, u včel byla pozorována odezva při stimulaci tykadel. Včely i čmeláci tedy mají prostředky k vnímání elektrického pole.



Čmelák je schopen elektrické pole vnímat jak chlupy, tak tykadly. Zdroj: Fruitworld Media.



Záznam elektrického pole vyvolaného včelím tancem. Elektrické pole je zobrazeno pro 1 500 ms a detailně pro malý výřez z tohoto průběhu. Zdroj: Waren Photografic.

■ **Vladimír Scholtz, 10. 2. 2017, AB 8/2016, AB 6/2017**

Je Faradayova klec vždy účinná?



Michael Faraday byl vynikající anglický experimentátor, který se zabýval elektrickými a magnetickými ději a také chemií. Mezi jeho objevy a vynálezy patří elektrolýza, elektromagnetická indukce nebo právě Faradayova klec. Zdroj: Sualci Quotes.

Klec pro stínění elektrického pole vynalezl v roce 1836 jeden z nejvýznamnějších experimentátorů všech dob, anglický fyzik Michael Faraday (1791–1867). V dnešní době se Faradayova klec používá v mnoha obměnách ke stínění statického elektrického pole i elektromagnetických vln. Setkat se s ní můžeme například v mikrovlnné troubě, ve starších mobilních telefonech nebo ve vědeckých laboratořích. Efekt Faradayovy klece také chrání pasažéry automobilu nebo letadla před účinky zásahu bleskem. Speciální Faradayovy obleky umožňují technikům provádět opravy na vysokonapěťovém vedení pod napětím. Jen z tohoto krátkého výčtu je vidět, jak důležitou úlohu tento téměř 200 let starý vynález hraje v našem životě. Zatímco základní princip fungování Faradayovy klece je relativně snadno pochopitelný, pokud budeme zkoumat detaily týkající se závislosti účinnosti stínění na geometrii klece, je třeba vytvořit vhodný model a použít patřičný matematický aparát k vyřešení daného problému. Je překvapivé, že neexistuje mnoho seriózních prací zabývajících se touto problematikou.

Faradayova klec

Elektricky vodivé materiály (vodiče) obsahují volné nosiče nábojů, které jsou schopny se pohybovat v materiálu pod vlivem vnějšího elektrického pole. Umístíme-li kousek vodivého materiálu do elektrického pole, dojde uvnitř tohoto vodiče k přeuspořádání nábojů. Záporný náboj se shromáždí na povrchu vodiče, blíže ke kladně nabité elektrodě, a kladný náboj blíže k záporné elektrodě. Tomuto jevu se říká elektrická indukce. Uvnitř vodiče tak vznikne indukované elektrické pole, které přesně vykompenzuje vnější elektrické pole tak, že uvnitř vodiče je v ideálním případě pole nulové. Tento indukovaný náboj je koncentrován pouze na povrchu vodiče a vnitřní objem vodiče se stínícího efektu neúčastní. Vytvoříme-li ve vodiči dutinu, pak v ní bude rovněž nulové elektrické pole. Stínící efekt funguje i tehdy, když vodič nemá souvislou plochu a může obsahovat otvory, případně může být složený pouze z drátů, čímž se dostáváme k Faradayově kleci.

Faradayova klec funguje i opačně – stíní elektrický náboj umístěný uvnitř a jeho elektrické pole nezasahuje ven. Klec ovšem v tomto

případě musí být uzemněná (což vyplývá z Gaussova zákona pro elektrostatiku). V této konfiguraci se používá jako stínění v elektronických zařízeních nebo v elektrických stanicích. Uzemněná Faradayova klec do značné míry stíní také elektromagnetické vlny. Zde je důležité, aby vlnová délka záření byla mnohem větší než otvory v kleci (typickým příkladem jsou dvířka mikrovlnné trouby, kde mikrovlny s vlnovou délkou 12,5 cm zůstanou uvězněny v troubě, zatímco viditelné světlo s vlnovou délkou ve stovkách nanometrů bez problému projde otvory v mřížce dvířek trouby). U elektromagnetických vln ale vstupují do hry i jiné faktory, než je vodivost klece – například permeabilita použitého materiálu.

Je jasné, že účinnost Faradayovy klece má své hranice. Jeden drát elektrické pole neodstíní, zatímco vodivá krabice s plnými stěnami ano. Jak tedy namodelovat přechod mezi těmito extrémními případy? Klesne intenzita elektrického pole ve Faradayově kleci skutečně na nulu? Jak závisí účinnost stínění na hustotě drátů klece?

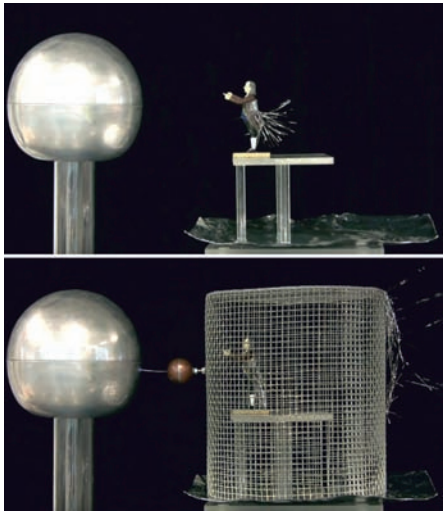
Matematický model

Výsledky výpočtů stínících schopností Faradayovy klece závisí na její geometrii a přesnost závisí na zjednodušeních, která se při analýze provádějí. Například analýza uváděná ve Feynmanových přednáškách uvažuje model mřížky s nekonečně tenkými a nekonečně dlouhými dráty s konstantním nábojem a předpovídá exponenciální pokles elektrického pole k nule s rostoucí vzdáleností od mřížky. Analýzou stínících schopností Faradayovy klece se nedávno také zabývala skupina matematiků na Oxfordské univerzitě. Cílem jejich studií bylo vypočítat rozložení elektrického potenciálu v okolí Faradayovy klece vyřešením Laplaceovy rovnice podobně jako ve Feynmanově případě, avšak s tím rozdílem, že vodiče mají konečný průměr a konstantní potenciál (nikoliv konstantní náboj). Zdrojem elektrického pole je elektrický náboj umístěný vně klece. Dráty klece ve dvou dimenzích reprezentuje n vodivých disků o poloměru r rozmístěných po obvodu kruhu o jednotkovém poloměru.

Elektrické pole vždy částečně proniká do klece a nikdy neklesne zcela na nulu, ale na konečnou hodnotu. Pole uvnitř klece má pouze logaritmickou závislost na poloměru drátů oproti očekávané exponenciální (což je Feynmanův případ s mřížkou s konstantním nábojem) a hyperbolickou závislost na počtu drátů. Intenzita elektrického pole

Van de Graaffův generátor – *zdroj vysokého napětí. Na duté kovové kouli se akumuluje náboj nanášený pohybujícím se třecím pásem. Zařízení vynalezl americký fyzik Robert Jemison Van de Graaff (1901–1967) v roce 1929. V roce 1933 se svým strojem vytvořil napětí 7 milionů voltů.*

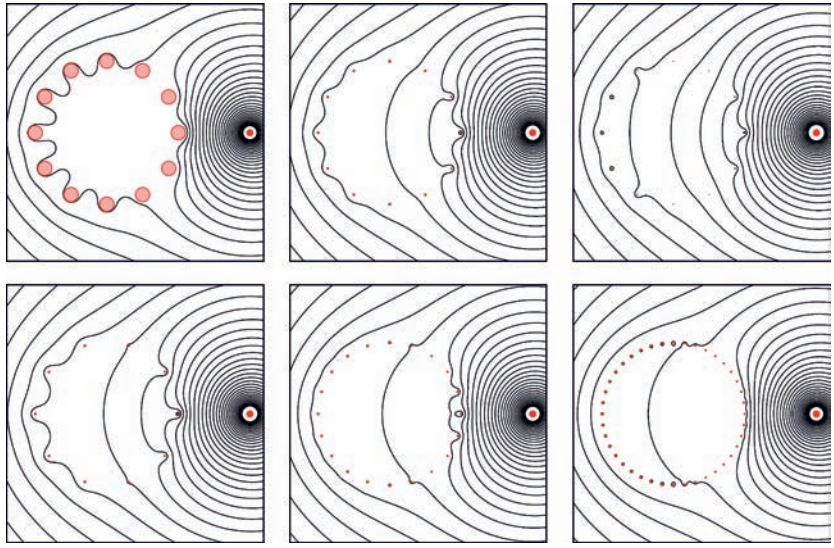
Van de Graaffův generátor vytváří statické elektrické pole, které elektrickou indukcí nabíjí tenké vodivé třásně připevněné k testovací figurce. Tyto třásně se vlivem souhlasného náboje odpuzují. Pokud figurku umístíme do Faradayovy klece, tak je figurka umístěna v nulovém elektrickém poli (v ideálním případě) a k žádné indukci nedochází. Ovšem na povrchu Faradayovy klece existuje indukovaný náboj, jehož přítomnost signalizují vlající vodivé třásně připevněné na pravé straně klece. Zdroj: MIT.





Obří Faradayova klec stínící elektromagnetické vyzařování z transformátorů v elektrické převáděcí stanici v kalifornském Sylmaru (USA). Ve stanici se převádí stejnosměrné napětí 500 kV ze severozápadu USA na střídavých 230 kV při výkonu 3,1 GW. Stanice napájí velkou část Los Angeles. Povrch klece má plochu přibližně 37 000 m^2. Zdroj: Galvanizeit.

Ekvipotenciály elektrického pole získané numerickým řešením jsou znázorněny na obrázcích pro několik různých poloměrů vodičů tvořících klec (nahoře) a pro jejich různé počty (dole). Efektivita stínění dramaticky klesá jak se zmenšujícím se poloměrem, tak se snižujícím se počtem vodičů. Zdroj: SIAM Review 57.



uvnitř klece klesá nikoli k nule, ale ke konečně malé hodnotě pole. Tato nedokonalost stínění souvisí s indukcí náboje v drátech klece a s energií, kterou má pole kolem klece. Pro nabití tenkého drátu je potřeba více energie než pro nabití tlustého drátu na stejný náboj, protože v tenčím drátě jsou souhlasné náboje blíže sobě. Tento energetický rozdíl je zodpovědný za nedokonalou kompenzaci elektrického pole uvnitř Faradayovy klece. Výsledky simulací byly reprodukovány také pomocí jiných schémat výpočtu – například řešením Laplaceovy rovnice s nábojem spojitě rozloženým na kružnici reprezentující obvod klece nebo hledáním rozložení potenciálu pomocí minimalizace energie elektrického pole.

A jaké jsou výsledky?

Výpočty účinnosti Faradayovy klece ukazují nižší stínící schopnosti, než se doposud myslelo, což je poměrně překvapivé zjištění, i když se jedná pouze o simulaci a matematický popis. Experimentální ověření těchto výsledků není nikterak složitý úkol. Problematika stínění je seriózní inženýrská disciplína a řeší se buď pomocí příslušného CAD softwaru, nebo jsou data o účinnosti stínící klece získána měřením pro dané geometrické uspořádání. Z aplikačního hlediska to mohou být dostatečné údaje, ale na seriózní vědeckou publikaci pokrývající jak teoretický popis, tak experimentální data, si budeme muset asi ještě nějakou dobu počkat.

■ Miroslav Havránek,
9. 10. 2015, AB 35/2015

Od Fresnela k metačočkám

Zásadní mechanickou nevýhodou klasických skleněných čoček je jejich objem a z toho vyplývající velká hmotnost. Čočky využívají k optickému zobrazování lom světla a jejich povrch musí s optickou osou svírat vhodný úhel. Tenké čočky mají tento povrch tvarovaný jako kulový vrchlík. Se zvyšováním optické mohutnosti se poloměry křivosti optických ploch zmenšují, čímž ale narůstá tloušťka čočky (a s tím mimo jiné i optické vady) a z toho vyplývající její objem a hmotnost.

Fresnelova čočka

Problém objemu a hmotnosti čoček se do jisté míry podařilo odstranit francouzskému fyzikovi Augustin Jeanu Fresnelovi (1788–1827), který v první polovině 19. století navrhl jednoduchý způsob snížení hmotnosti čočky. Fresnel navrhl odstranit ty části čočky, které se nepodílejí na lomu světla. Výsledná čočka se poskládá z několika soustředných mezikružných čoček, přičemž každé z mezikruží má menší tloušťku, než by měla původní čočka. Snížení hmotnosti je velkou mechanickou výhodou, která je ale vyvážena nárůstem optických vad čočky, zejména na ostrých hranách mezi drážkami mezikruží. Přesnost zobrazování se sice zvyšuje s hustotou mezikruží, ale ani tak nejsou současné Fresnelovy čočky vhodné pro přesné optické zobrazování a používají

Optická mohutnost – *vyjadřuje zakřivení čočky, jde o převrácenou hodnotu obrazové optické vzdálenosti a měří se v dioptriích (m^{-1}).*

Fresnelova čočka – *speciálně tvarovaná čočka, která má při podobných parametrech a stejném použitém materiálu nižší objem a hmotnost než klasická čočka. Jsou z ní vyňaty části materiálu, které se nepodílejí na lomu světla a ostatní části jsou vhodně posunuté. Výsledná čočka má velké optické vady a není vhodná pro optické zobrazování. Využívá se v optických přístrojích a zařízeních pro směrování světelných paprsků, například v semaforech nebo v majácích.*



Nalevo je porovnání profilu Fresnelovy a klasické čočky. Uprostřed je Fresnelova čočka z reflektoru a napravo pohled na krajinu přes Fresnelovu čočku ze zpětného projektoru. Zdroje: Wikipedia, Kayelites a Greensboroday.

Metačočka – *rovinná nanostruktura, která vhodně mění fázi procházejícího světla tak, aby se výsledná vlnoplocha procházejícího světla jevila lomená jako po průchodu klasickou čočkou.*

Numerická apertura (NA) – *účinná světelnost objektivu, NA = n sin α, kde n je index lomu prostředí před objektivem a α je polovina vrcholového úhlu kužele paprsků vstupujících do objektivu. Numerická apertura je klíčová pro rozlišovací schopnost optických přístrojů, která je podle Rayleighova kritéria x = 0,61 λ/NA, kde x je minimální rozlišitelná vzdálenost dvou bodů a λ je vlnová délka použitého světla.*

Plazmonická anténa – *plošná kovová nanostruktura, která umožňuje lokalizaci elektromagnetického pole na škálách menších, než je jeho vlnová délka. Vzniklé oscilace elektrického náboje vytvářejí kvazičástice, které nazýváme plazmony. V případě povrchových plazmonů hovoříme o polaritonech.*

se zejména v optických přístrojích a zařízeních pro směrování světelných paprsků, kde není přesné zobrazení nutné. Typicky se Fresnelova čočka samotná nebo v různých modifikacích používá v semaforech, reflektorech nebo majácích, kde bývá její poloměr až 2,5 m.

Metačočky

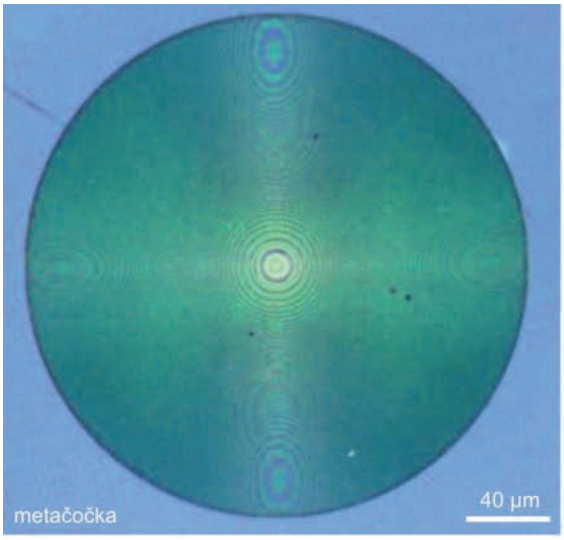
V současnosti jsou předmětem výzkumu optické prvky podobné Fresnelovým čočkám, ale na úrovni nanostruktur, tzv. *metačočky*. Vhodnou změnu fáze procházejícího světla lze docílit vytvořením vhodné plošné nanostruktury na úrovni vlnových délek viditelného světla nebo delší. Vědci z Harvardovy univerzity použili zlaté nanostruktury tvořící plazmonické antény nanesené na křemíkové podložce, jejichž struktura se s polohou jemně mění tak, aby se fázový posun procházejícího světla v závislosti na místě dopadu na podložku vhodně měnil. Výsledkem je lom světla jako ve vlnové optice na rozhraní dvou optických prostředí.

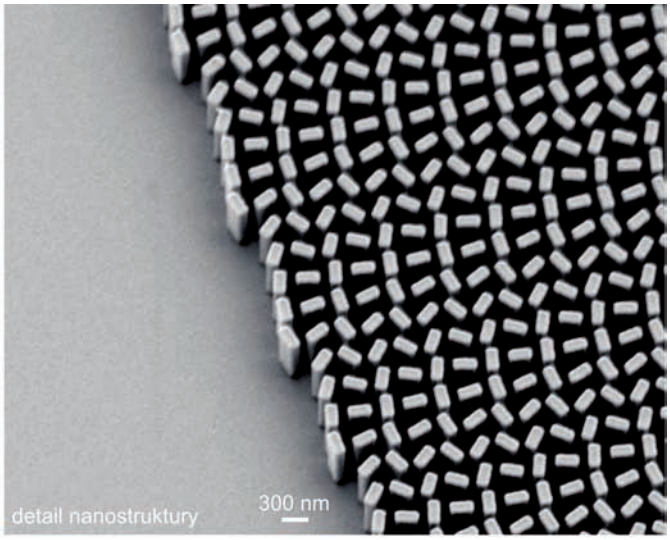
Pokud by se fázový posun lomeného světla neměnil lineárně, ale podle vhodné závislosti, mohlo by se světlo lámat podobně jako na čočce. Uvedený model má ale problém s vysokou absorpcí a odrazem. Problém by mohla vyřešit nová technologie využívající nanostruktury oxidu titaničitého TiO_2 naneseného na skleněné podložce, kterou představil tým z Harvardovy univerzity vedený Federicem Capassem. Ukázali, že zobrazení bodu jimi připravenou metačočkou není o moc horší než zobrazení klasickým objektivem kvalitního fotoaparátu Nikon CFI 60. I když výsledky vypadají velmi slibně, je nutné podotknout, že uvedená metačočka pracuje optimálně jen při určitých vlnových délkách a vhodné polarizaci dopadajícího světla. K odstranění těchto problémů je zapotřebí ještě další výzkum, pravděpodobně už ale není daleko doba, kdy se začnou první metačočky pro svou plochost používat například v miniaturních fotoaparátech. Velmi velkou výhodou je i numerická apertura, která je vzhledem k minimální tloušťce metačočky poměrně vysoká.

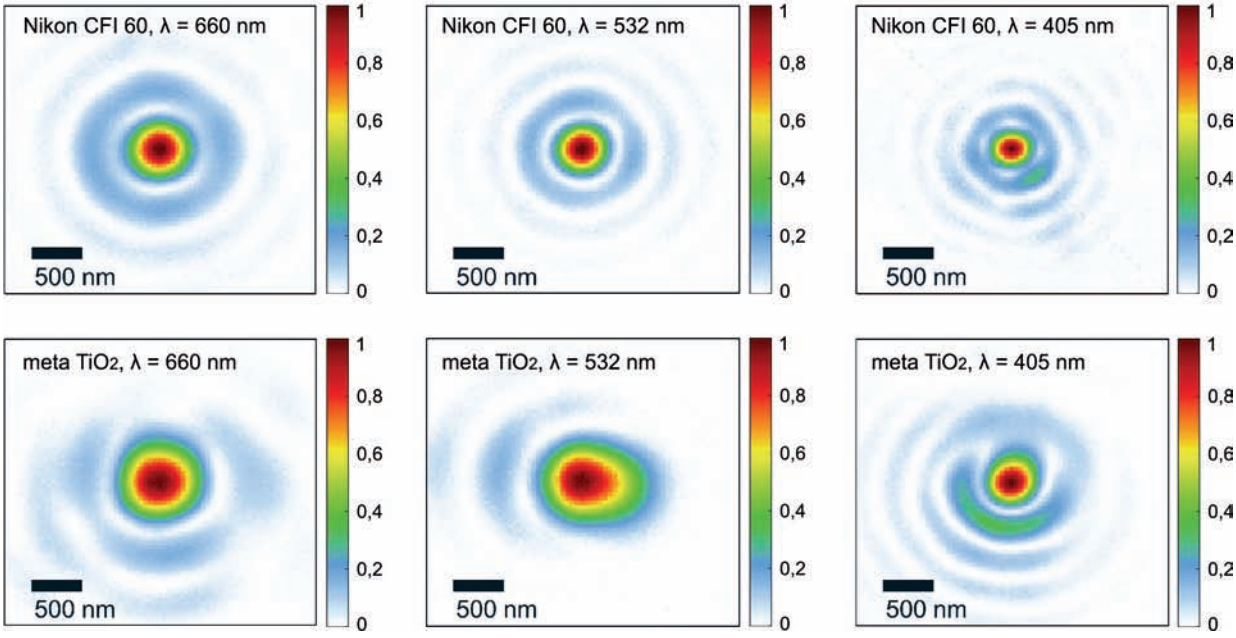


Lom světla na soustavě zlatých plazmonických antén. Rezonátory vlevo zadrží světlo na delší dobu než ty vpravo, takže se procházející světlo šíří pod jiným úhlem než dopadající. Zdroj: Harvardova univerzita.

■ Vladimír Scholtz,
1. 7. 2015, AB 24/2016


metačočka
40 μm

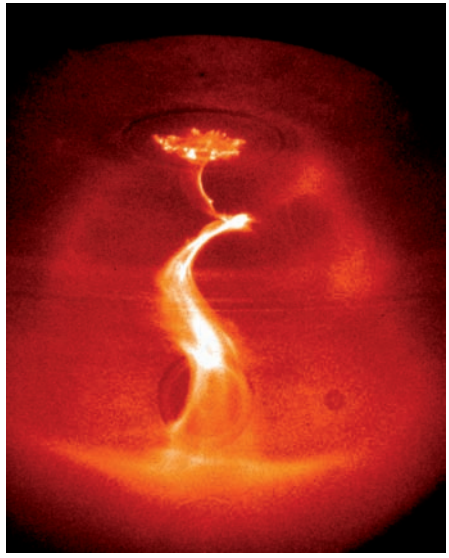

detail nanostruktury
300 nm


Nikon CFI 60, λ = 660 nm
Nikon CFI 60, λ = 532 nm
Nikon CFI 60, λ = 405 nm
meta TiO2, λ = 660 nm
meta TiO2, λ = 532 nm
meta TiO2, λ = 405 nm
500 nm
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0

Astrofyzikální plazma v laboratoři

Plazma – *ionizovaná látka, viz str. 81.*
Plazmová frekvence – *charakteristická frekvence oscilací a vln v plazmatu, která souvisí s pohyby elektronů na pozadí iontů. Vratnou silou je Coulombova elektrická síla vznikající vychýlením souboru elektronů oproti souboru iontů. Tato frekvence závisí především na koncentraci elektronů. Pod touto frekvencí se nemohou šířit řádné elektromagnetické vlny. Při nižších frekvencích totiž energii vlny přebírají oscilace elektronů. Měřením plazmové frekvence lze určit koncentraci plazmatu.*

Smyčková nestabilita sloupce plazmatu pozorovaná v laboratoři skupinou profesora Bellana. Stejné útvary se pozorují ve výtryscích plazmatu v okolí kompaktních astrofyzikálních objektů. Zdroj: Paul Bellan, KTTP & Caltech.



Před pár lety, když jsem začínal studovat fyziku plazmatu, mi jeden experimentátor ironicky sdělil, že je výhodné zabývat se teorií astrofyzikálního plazmatu, neboť takové výpočty nikdo neověří experimentem, a tak v této oblasti fyziky lze publikovat de facto cokoliv. Již tenkrát jsem věděl, že je velmi daleko od pravdy a že existují laboratorní experimenty, na kterých se studuje astrofyzikální plazma. Pojďme se tedy podívat, na jakém principu lze takové experimenty provádět a jaké problémy se aktuálně studují.

Škálovatelnost

Pokud chceme studovat nějaký fyzikální jev, musíme ho umět (alespoň v určitém přiblížení) popsat matematicky. Získané rovnice nám poté popisují chování zkoumaného fyzikálního děje a je jasné, že obsahují veličiny, které charakterizují studovaný systém. Ve fyzice plazmatu se nám proto v rovnicích objevují charakteristické frekvence (cyklotronní, plazmová), délky (Debyeova) atd. Snad každému je hned jasné, že hodnoty těchto charakteristických veličin jsou různé například v případě mezigalaktického plazmatu a bleskového výboje (mezigalaktické plazma je výrazně řidší a má mnohonásobně větší rozměry). Mezi nejzákladnější parametry plazmatu patří teplota elektronů, koncentrace elektronů a magnetické pole.

Jak tedy na Zemi můžeme nastavit experiment tak, abychom mohli studovat astrofyzikální plazma? Princip je jednoduchý, stačí si rovnice vhodně převést do bezrozměrných proměnných a můžeme je aplikovat na široké spektrum fyzikálních problémů a nastavit podle nich laboratorní experimenty v pozemských podmínkách. Jde o tzv. škálovatelnost, kterou lze využít i u numerických simulací, kde potřebujeme průběh simulace navíc urychlit. Zde je důležité upozornit, že tento krok nelze provést vždy. V případě, že se v rovnicích vyskytuje například současně elektromagnetické i gravitační působení na jednotlivé komponenty plazmatu, tak přechod k bezrozměrným proměnným a následné přeškálování lze provést jen obtížně a někdy vůbec. Podobná škálovatelnost se využívá například v leteckých tunelech, kde se na malém modelu simulují podmínky panující za letu skutečného letadla.

Experimenty

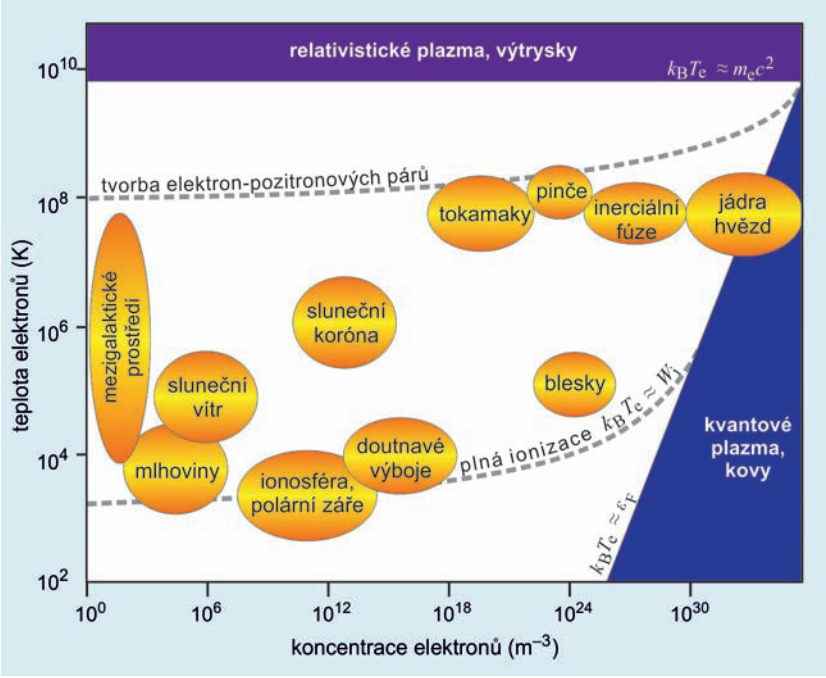
Úplně prvním experimentem vztaženým k astrofyzice byla terrela (zmenšenina Země), kterou postavil norský fyzik Kristian Birkeland v roce 1906 a byla určená ke zkoumání původu polárních září. Jednalo se o kouli s dipólovým magnetickým polem umístěnou do vakuované komory. Ta byla vyrobená z mosazi, potažená platiničitanem barnatým, který fluoreskoval po dopadu elektronů. Elektromagnet uvnitř koule byl mírně nakloněn od svislého směru, aby napodoboval magnetické pole Země. Na zařízení byl poté nasměrován proud elektronů, který excitoval řídkou atmosféru a vytvořil světelný úkaz obdobný auroránímu oválu.

Nicméně při sestavování experimentů sloužících ke studiu exotičtějších astrofyzikálních dějů je nutné generovat velmi husté a horké plazma (kvůli přeškálování nám nic jiného nezbývá). To byl dlouho problém, ovšem velmi výkonné lasery daly před zhruba dvaceti lety vzniknout oboru, který experimentálně doplňuje teorii a počítačové simulace astrofyzikálního plazmatu. Je zajímavé, že od vzniku laseru v roce 1960 se vědci pokoušejí přimět laserem generované plazma k termojaderné fúzi, tedy by se dalo říct, že experimentují s dalším astrofyzikálním procesem. Bohužel, na exotičtější experimenty, týkající se například rázových vln po výbuších supernov, jsme museli čekat až do 90. let minulého století.

Právě studium rázových vln po výbuších supernov bylo jedním z prvních témat laserových aplikací v astrofyzice. Po výbuchu supernovy se kolem ní vytvoří rázová vlna, která je dle teorie rodnou půdou pro všemožné druhy nestabilit. U supernov jsou nejčastější nestability Rayleighova-Taylorova a Richtmeyerova-Meškovova. Obě nestability tvoří velmi podobné

Cyklotronní frekvence – *frekvence šroubovicového (Larmorova, gyračního) pohybu elektronů kolem magnetických siločar. Důležitá je tzv. cyklotronní rezonance, při které je vlna absorbována na této frekvenci. Z cyklotronní rezonance lze určit magnetické pole plazmatu. Cyklotronní rezonance se v laboratořích využívá k ohřevu plazmatu.*

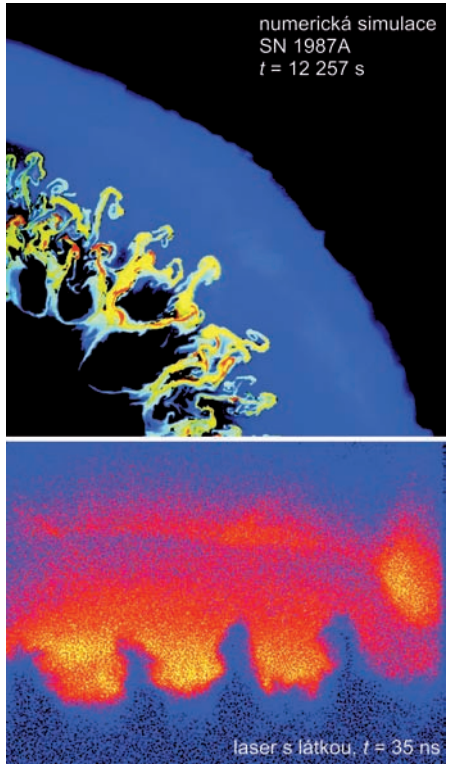
Debyeova délka – *typická vzdálenost v plazmatu, ve které je potenciál bodového náboje odstíněn natolik, že ho částice přestanou vnímat jako bod. Nad Debyeovou vzdáleností se plazma chová zpravidla jako spojité prostředí (kontinuum).*



Rozdělení různých druhů plazmatu v závislosti na koncentraci a teplotě při konstantním magnetickém poli. Zdroj: AGA.

RAL – *Rutherford Appleton Laboratory, jedna z národních laboratoří ve Velké Británii. Slavná laboratoř vznikla postupným spojení Rutherfordovy laboratoře (1957) s počítačovou laboratoří ATLAS (1975) a poté s Appletonovou laboratoří (1979). Dnes má 1200 zaměstnanců, kteří pracují pro 10 000 vědců z různých univerzit. Laboratoř sídlí v Chiltonu (Oxfordshire). Součástí této významné laboratoře je neutronový a mionový zdroj ISIS a laserový komplex CLF.*

Rozvoj nestability při simulaci exploze supernovy ve Velkém Magellanově oblaku SN 1987A v numerické simulaci a v experimentu. Zdroj: B. Remington/Science.



prostorové struktury, ale liší se ve spouštěcím a řídicím mechanizmu. Na obrázku vlevo dole je vidět rozvoj nestability při počítačové simulaci rázové vlny supernovy SN1987A a rozvoj té samé nestability v laserem generovaném plazmatu.

Turbulentní dynamo a kupy

Jako turbulentní dynamo je označován fyzikální jev, který stojí pravděpodobně za genezí mezigalaktického magnetického pole. Na počátku je potřeba, aby gradienty teploty a koncentrace plazmatu mířily různými směry. To vede k vytvoření elektrického proudu, který následně generuje slabé magnetické pole. Tento proces je znám pod označením Biermannův mechanizmus.

Pokud se v takovém plazmatu rozvine turbulence, dochází u magnetických siločar vlivem jejich zamrznutí do plazmatu k jejich kroucení, natahování a podobně, což může vést ke zvýšení jejich hustoty, a tím ke zvýšení intenzity magnetického pole. Tyto turbulence může vyvolat například srážka dvou galaxií nebo v laboratoři interakce dvou vstřícných plazmatických svazků.

Galaktické kupy jsou jedněmi z největších gravitačně vázaných objektů našeho vesmíru. Mezigalaktické prostředí uvnitř kupy je vyplněno velmi řídkým plazmatem s koncentrací v desítkách částic na metr krychlový. I přes tuto velmi nízkou koncentraci je však stále mnohonásobně hustší než prostředí mimo galaktickou kupu. Prolínání (srážku) dvou galaktických kup lze tedy díky přeškálování snadno studovat na interakci dvou plazmoidů v laboratorních podmínkách.

Takový experiment se před nedávnem podařil výzkumnému týmu z Oxfordské univerzity pod vedením Gianluca Gregoriho. Perličkou na jejich úspěchu je, že původně neměli v plánu tento jev zkoumat. Gregoriho tým započal experimenty v Rutherfordově-Appletonově laboratoři (RAL) s cílem zjistit, jak rázová vlna po výbuchu supernovy rozpoutá turbulentní proudění v plazmatu a jak se tím zesílí magnetické pole. Součástí jejich experimentů byla i situace s dvěma rázovými vlnami šířícími se proti sobě.

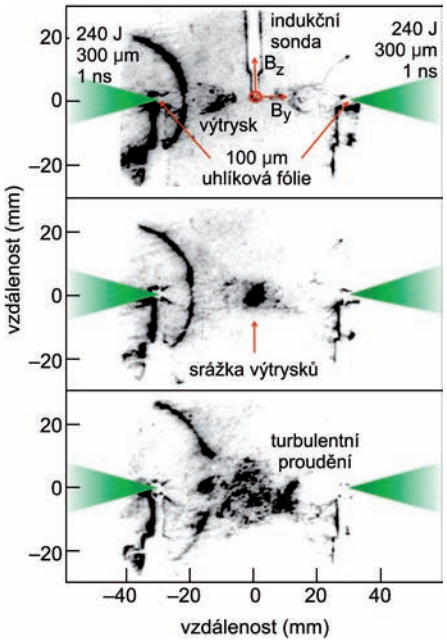
Nicméně místo dvou rázových vln vygenerovali dva výtrysky, které spolu začaly interagovat a vedly ke vzniku turbulence. Až po provedení experimentu a vyhodnocení výsledků si vědci uvědomili (za pomoci oxfordských teoretiků), že vlastně experimentálně simulovali srážku dvou galaktických kup.

Pár slov závěrem

Výsledky přesto skrývaly jednu záludnost. Při analýze generovaného magnetického pole vědci zjistili, že turbulencí došlo pouze k dvojnásobnému až trojnásobnému zesílení, což je na turbulentní dynamo velmi málo, nicméně magnetické pole po přeškálování do astrofyzikální situace řádově odpovídalo poli generovanému Biermannovým mechanizmem. A proč bylo turbulentní zesílení pole tak slabé? Odpověď by se mohla skrývat v málo vodivém plazmatu. Rovnice pro magnetické pole v plazmatu má dva členy – člen odpovídající zamrzání siločar do plazmatu a člen odpovídající difúzi siločar v plazmatu. Zamrzání siločar, které je důležité pro zesílení magnetického pole, dominuje ve vysoce vodivém plazmatu. Gregoriho tým vědců proto chystá opakování experimentu na zařízení *Lawrence-Livermore National Ignition Facility*, kde by měli být schopni vygenerovat „dokonale“ vodivé plazma, a tak prozkoumat efekt turbulencí na zesílení magnetického pole.

K pochopení dějů probíhajících ve vesmíru můžeme přispět jak numerickými simulacemi, tak laboratorními experimenty za jiných podmínek, které jsou ale škálovatelné na podmínky v astrofyzikálním plazmatu.

■ **Miroslav Horký, 16. 10. 2015, AB 36/2015**

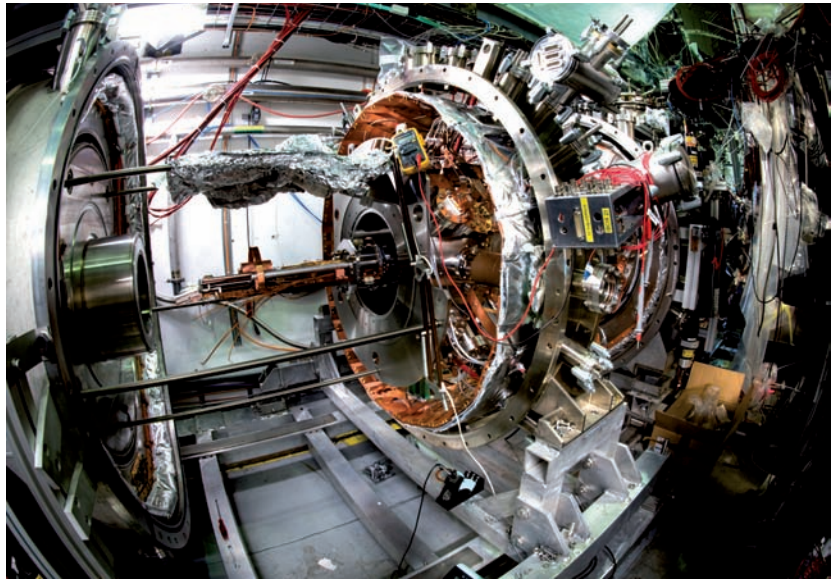


Na obrázku je vidět časový vývoj interakce dvou generovaných plazmatických svazků s jasně patrnými turbulencemi v závěru. Zdroj: J. Meinecke/NAS USA.

Zakřivení časoprostoru a kvantové jevy

De Broglieova vlna – *vlna, kterou se projevují hmotná tělesa (částice) v mikrosvětě. Každý objekt mikrosvěta se v některých experimentech chová jako vlna a v některých jako částice. Tento dualizmus vln a částic je jedním ze základních projevů kvantového světa. Vlnová délka de Broglieovy vlny je nepřímo úměrná součinu hmotnosti a rychlosti částice. Vlna přidružená objektu má v kvantové mechanice význam amplitudy pravděpodobnosti výskytu částice.*

Projevy gravitace v makrosvětě jsou patrné na první pohled: oběh planet kolem Slunce, pohyby hvězd v galaxiích a nebo jen tvrdý dopad na chodník při cestě opilce z restaurace. Ale působí gravitace stejným způsobem i na velmi malé objekty, například na elementární částice? Kladná odpověď není úplně samozřejmá. Pro elementární částice je gravitace nejslabší silou a na malých škálách převládají ostatní interakce. Po staletí vypadalo měření gravitačních projevů na úrovni elementárních částic jako neuskutečnitelný sen. Máme tedy vůbec právo předpokládat, že bude gravitační zákon platit i v oblasti, kde platí kvantové zákony? Objekty se v mikrosvětě někdy chovají jako vlnění, jindy jako částice, mohou být v superpozici více stavů naráz, jejich parametry mohou nabývat jen určitých hodnot atd. Svět malých rozměrů je natolik odlišný od světa vnímaného našimi smysly, že není vůbec jasné, proč by gravitační zákon měl mít stejnou podobu v mikrosvětě i v makrosvětě.



Širokoúhlý pohled na laserovou část gravitačního experimentu AEgIS v CERN. Zdroj: CERN Document Server.

Gravitace v mikrosvětě

Teprve v 21. století byly objeveny první metody měření gravitačních projevů na elementárních částicích. V roce 2011 bylo publikováno první měření kvantových stavů neutronu v tíhovém poli (spolupráce Vídeňské univerzity a Laueho-Langevinova institutu v Grenoblu). Tento fascinující experiment prokázal, že gravitace působí i na neutron. Jiným zajímavým experimentem je AEgIS (*Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy*) v částicovém komplexu CERN, který testuje, zda gravitace působí stejně na hmotu i na antihmotu. V experi-

mentu je sledován pád antivodíkových atomů v tíhovém poli (přesněji jde o vodorovný vrh mnoha antiatomů tvořících celý svazek).

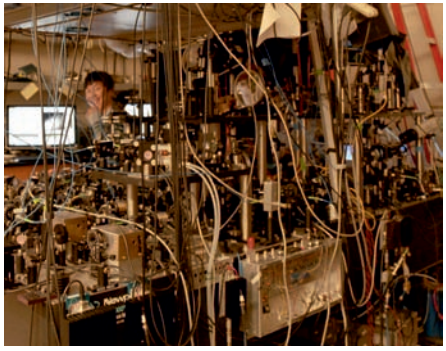
Paralelně s pozorováním působení gravitace na jednotlivé částice a atomy se objevila i další možnost, v jistém smyslu opačná: za pomoci chladných atomů lze na základě kvantového chování detekovat gravitační pole, a tím zakřivení času a prostoru. Každý atom se chová také jako vlnění, a lze mu proto přiřadit tzv. de Broglieovy (hmotové) vlny. Takový atom může být také v superpozici více (například dvou) kvantových stavů. Lze ho připravit tak, že je „současně" na dvou místech gravitačního pole naráz, třeba ve dvou různých výškách nad laboratorním stolem. Je to podobné jako ve známém experimentu s elektrony pronikajícími dvěma štěrbinami. Každý z nich je také ve dvou stavech naráz: prochází první i druhou štěrbinou. Může se nám to zdát podivné, ale to je tak jediné, co s tím můžeme dělat. Ve světě malých rozměrů prostě platí jiná pravidla než ve světě lidí. Čtenář může být smutný, že není objektem mikrosvěta, protože by současně mohl v obýváku sledovat televizi a v blízké hospůdce s místními štamgasty budovat základy nové, lepší společnosti.

V roce 2010 se podařilo nově interpretovat experimenty z let 1997 až 2001 (Achim Peters, Keng Yeow Chung, Steven Chu), při kterých byl na Kalifornské univerzitě v Berkeley shluk ultrachladných cesiových atomů přiveden za pomoci laserového impulzu do superpozice dvou stavů. Atomy jako by byly ve dvou výškách naráz. Oběma stavům ale přísluší de Broglieovy vlny s různou frekvencí. V obou stavech mají atomy počáteční rychlost směrem vzhůru a pohybují se nejprve nahoru, a poté padají volným pádem. Každému ze stavů odpovídá jiná dosažená výška. Po určité době se ale fáze jim příslušících hmotových vln (3×10^{25} Hz) rozejdou a dojde ke kvantové interferenci těchto vln. Každý atom interferuje jakoby sám se sebou, respektive interferují jeho dva kvantové stavy. Totéž známe z dvouštěrbinového experimentu, výsledkem je interferenční obrazec elektronů dopadajících na stínítko; v našem případě je výsledkem dobře měřitelný interferenční obrazec výskytu padajících atomů v jednom z výchozích stavů. Měření se provádějí za pomoci laseru s vhodnou rezonanční frekvencí. Touto metodou (sledováním interference de Broglieových vln) bylo v experimentu změřeno zakřivení času na výškovém rozdílu pouhých 0,1 mm. Vysoká frekvence hmotových vln částic umožňuje dosáhnout lepší přesnosti než při experimentech s elektromagnetickými vlnami.

Ramanův jev – *také Ramanův rozptyl (kombinační rozptyl, Mandelstamův rozptyl, Smekalův-Ramanův rozptyl). Jde o změnu směru i velikosti vlnového vektoru a polarizace fotonů při průchodu prostředím v důsledku interakce s dvěma stavy atomu či molekuly. Rozptýlené fotony mají jinou frekvenci, fázi i polarizaci a nesou informace o energetickém spektru rozptylového centra a u molekul dokonce i o prostorové orientaci konkrétní chemické vazby, tedy jakési molekulární „vizitky". Pokud má rozptýlený foton nižší energii než původní, hovoříme o tzv. Stokesově fotonu. Bez speciálních opatření je však tímto způsobem rozptylován pouze jediný foton ze stovek miliónů až stovek miliard dopadajících fotonů. Účinný průřez Ramanova rozptylu je zhruba 10^{-30} 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.*

Gravimetrie – *měření síly gravitačního pole. V důsledku nehomogenit nebývají gravitační pole těles jednoduchá, čehož se dá využít právě ke zjišťování nehomogenit skrytých pod povrchem.*

Optická lavice s jednou z verzí atomového interferometru na Kalifornské univerzitě v Berkeley. Zdroj: UCB.

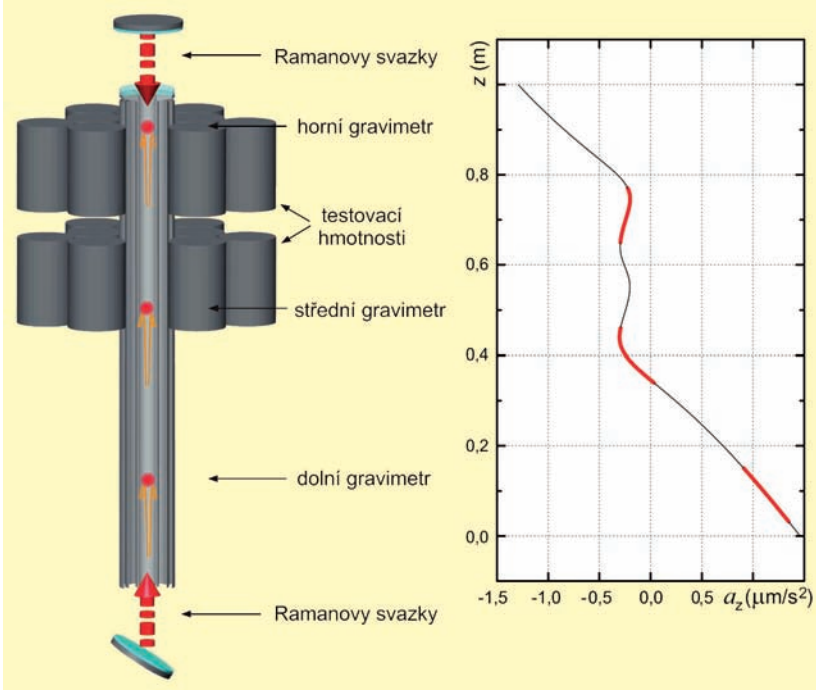


Petersovým experimentem započala nová éra mapování gravitačního pole za pomoci kvantové interference atomů nacházejících se v superpozici dvou kvantových stavů.

Italsko-holandské experimenty

V současnosti Petersův experiment výrazně zdokonalila skupina vědců z Florentské univerzity, Boloňské univerzity a Výzkumného a technologického střediska Evropské kosmické agentury v holandském Noordwijku. Pod vedením Guglielma Tina vytvořili trojitý gravimetr, kterým je možné měřit zrychlení tří shluků chladných rubidiových atomů a rekonstruovat zakřivení časoprostoru na metrové vzdálenosti. Zařízení postavená na tomto principu mohou sloužit k měření gradientu gravitačního pole a k přesnému určení gravitační konstanty.

Atomy rubidia ^{87}Rb byly zachyceny v magnetooptické pasti a ochlazeny na teplotu 4 μK. Tři shluky atomů experimentátoři umístili do svislého vakuovaného válce. Shluky, připravené v superpozici dvou podhladin základního stavu, se pohybují směrem vzhůru. Při pohybu dochází k interferenci hmotových vln příslušících těmto stavům. Interferenční obrazec je rekonstruován za pomoci stimulovaného Ramanova rozptylu na frekvenci 6,8 GHz a z něho je dopočítávána svislá složka zrychlení atomů. Kolem válce jsou rozmístěny testovací hmotnosti. Jde o wolframové válečky ve dvou vrstvách s celkovou hmotností 516 kg, které ovlivňují měřené zrychlení shluků atomů. Výhodou metody je měření ve třech místech, což umožňuje detekovat prostorové změny zrychlení. Z měřeného profilu zrychlení je možné rekonstruovat zakřivení časoprostoru způsobené testovacími hmotnostmi a Zemí.

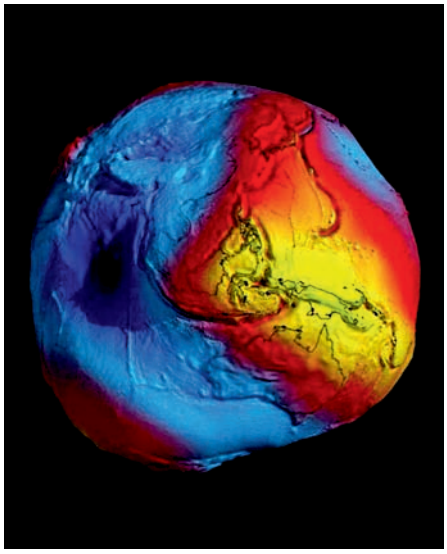


Rubidiové atomy ^{87}Rb jsou nejprve zachyceny a ochlazeny v magnetooptické pasti technikou laserového ochlazování. Tři shluky atomů v superpozici dvou stavů se pohybují vzhůru, a tvoří tak tři samostatné gravimetry. V blízkosti horní úvrati je měřen interferenční obrazec za pomoci Ramanova rozptylu. Dopočítané zrychlení je v pravé části obrázku. Na zrychlení mají vliv testovací hmotnosti rozmístěné kolem experimentu a gradient tíhového zrychlení. Konstantní hodnota tíhového zrychlení je odečtena. Červeně jsou vyznačeny polohy gravimetrů. Na křivce jsou dobře patrná dvě zvlnění způsobená testovacími hmotnostmi. Zdroj: Physical Review Letters.

Příslib do budoucna

Původní Petersův experiment měřil na prostorové škále desetin milimetrů. Nové italsko-holandské experimenty ukázaly, že je možné zrekonstruovat časoprostorové zakřivení na metrové škále. Pokud by v experimentu byla použita řada shluků chladných atomů rozmístěných ve vzdálenostech 5 až 10 centimetrů, bylo by možné rekonstruovat zrychlení (časoprostorové zakřivení) s nebývalou přesností. Doufejme, že experimenty s atomovou interferometrií konečně změří gravitační konstantu s výrazně vyšší přesností, než je známa dosud. Obdobné experimenty by měly být také citlivé ke gravitačním vlnám a otevírají tak nové možnosti jejich detekce. Uvažuje se i o vyslání atomového interferometru na oběžnou dráhu, kde by se zatím bezprecedentní přesností proměřoval gravitační pole Země. Taková měření by byla mnohem přesnější než dosavadní měření družic GOCE a GRACE. V poddolovaných oblastech je možné podobným zařízením mapovat podzemní štoly, nad nimiž je gravitační pole slabší (někdy hovoříme o tzv. kvantovém dalekohledu). Atomová interferometrie je zásadním průlomem v metodách měření gravitačního pole a umožní nám detailní zkoumání gravitační interakce včetně mapování různých gravitačních anomálií.

■ **Petr Kulhánek, 30. 1. 2015, AB 5/2015**



Mapa gravitačního pole pořízená evropskou družicí GOCE. Nové gravimetry by mohly zmapovat zemský geoid ještě přesněji. Zdroj: ESA/GOCE.

Molekuly v subatomárních částicích

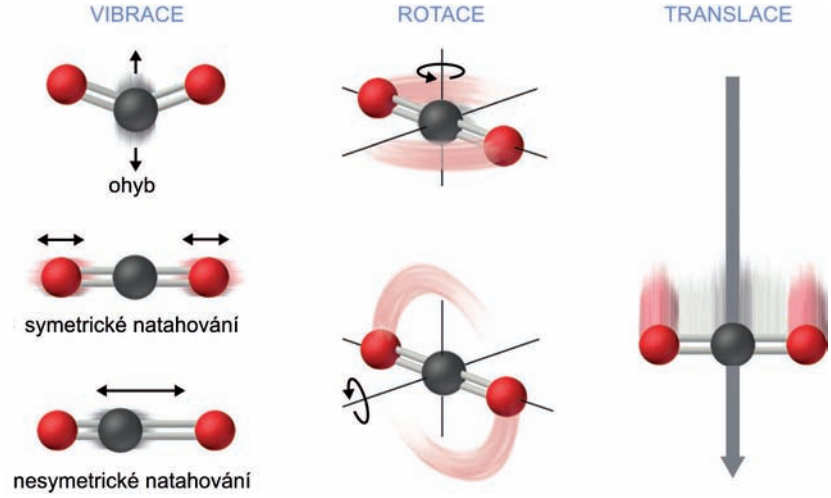
Lambda hyperon – *jedna z částic objevených v kosmickém záření. Její kvarková struktura je uds, tedy jde o baryon obsahující podivný kvark. Částice nemá elektrický náboj, proto za sebou nezanechává v mlžné komoře žádnou stopu, dokud se nerozpadne pomocí slabé interakce, většinou na proton a záporný pion. Proton a pion za sebou zanechávají stopu ve tvaru písmene Λ, která dala částici její jméno.*

Skupina vědců ze dvou australských univerzit (Adelaidské univerzity a Australské národní univerzity) publikovala v polovině roku 2015 v prestižním časopise *Physical Review Letters* článek popisující excitovaný stav Λ hyperonu jako subatomární molekulu. Je vůbec možné se na shluk kvarků dívat jako na molekulu?

Molekula

Co je molekula? Při blízkém přiblížení atomů dochází ke změnám elektronové hustoty. Změna elektronové hustoty má následně vliv na přeuspořádání atomárních jader, a pokud má výsledné uspořádání jader a elektronů nižší energii, než měla původní konfigurace, vzniká tzv. chemická vazba. Chemická vazba má tedy stabilnější konfiguraci elektronů a jader než samotné atomy před vznikem vazby.

Celková energie molekuly se může měnit například absorpcí fotonu. Kromě přechodu elektronu na vyšší energetickou hladinu v molekule, můžeme ještě u molekul rozlišovat tzv. vibrační a rotační spektra. Molekula může mít různé (velmi nepatrně se lišící) energie různých energetických stavů, i když jsou samotné elektrony na stále stejné energetické hladině.



Vibrační, rotační a translační stavy jedné molekuly oxidu uhličitého. Zdroj: Andy Schmitz: Principles of General Chemistry.

Excitovaný stav tedy nutně nemusí souviset pouze s přeskokem elektronu mezi hladinami v atomárním obalu. Co se týče stabilních a méně stabilních konfigurací elektronů, je totiž svět velice pestrý i na úrovni tak „jednoduchých" struktur jako jsou samotné atomy v základním stavu. V případě, že má atom v základním stavu v neobsazené slupce více elektronů, mohou se různé konfigurace elektronů lišit celkovou energií. Nejprve slupky zaplňují elektrony se stejným spinem a teprve poté se

spinem opačným. Pokud by tedy byly v nezaplněné slupce elektrony s opačným spinem, měl by systém vyšší energii než systém se stejnými spiny, a můžeme ho v určitém smyslu považovat za excitovaný.

Lambda hyperon

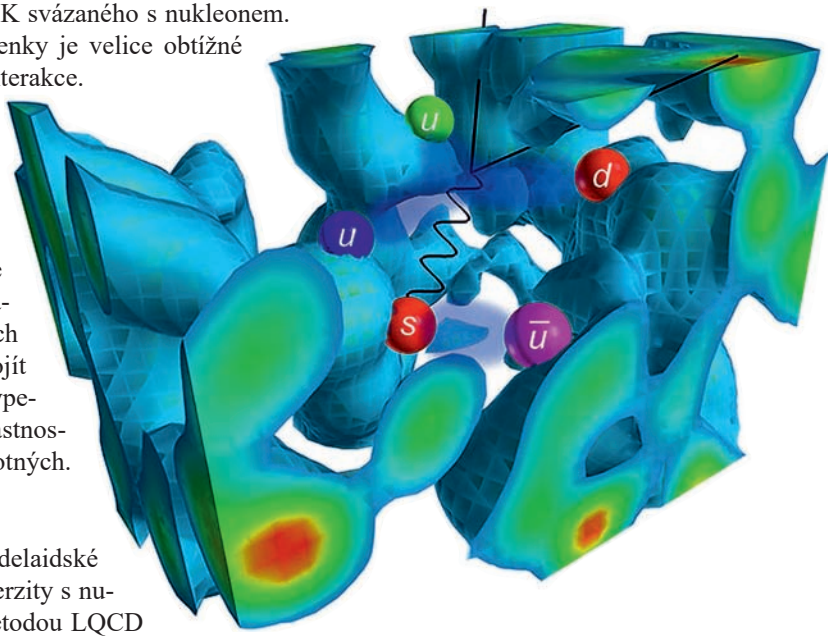
Λ^0 hyperon byl objeven roku 1950 jako elektricky neutrální částice s velmi krátkou dobou života rozpadající se nejčastěji na nukleon a mezon π. Patří tedy mezi baryony (částice složené ze tří kvarků). Jeho skutečná doba života (10^{-10} s) je delší, než se předpovídalo, a tato podivná vlastnost vedla k pozdějšímu objevu podivného (*strange*) kvarku s. Částice Λ^0 je kombinací stavů kvarků u, d a s. Protože je složena z více kvarků, může podobně jako molekula nebo atom existovat ve více energetických stavech. Λ je označení pro tuto částici v základním stavu a pro nejnižší excitovaný stav této částice se ujalo označení $\Lambda(1405)$. Struktura této rezonance byla tajemstvím od jejího objevu v roce 1961. Pokud by $\Lambda(1405)$ byla částice sestávající pouze ze tří kvarků, měla by mnohem vyšší energii, než ve skutečnosti má. Již v šedesátých letech minulého století byly navrženy modely, které popisují $\Lambda(1405)$ jako směs mezonu K svázaného s nukleonem. Potvrzení nebo vyvrácení této myšlenky je velice obtížné díky nelineárnímu charakteru silné interakce.

Λ hyperony pozorujeme všude tam, kde probíhají procesy za vysokých energií. Nacházíme je v sekundárních sprškách kosmického záření, jsou přirozenou součástí neutronových hvězd a umíme je uměle vytvářet při srážkách na urychlovačích částic. Ostřelováním atomových jader urychlenými elektrony může dojít k přeměně některých protonů na Λ hyperony, což umožní detailní studium vlastností atomového jádra i Λ hyperonů samotných.

Současný výzkum

Nedávno přišli australští vědci z Adelaidské univerzity a Australské národní univerzity s numerickými výpočty provedenými metodou LQCD

Vibrační spektrum molekuly – *atomy v molekule nemají konstantní vzdálenosti, ale kmitají kolem rovnovážných poloh podobně jako kuličky na pružinách. Na molekulu se tedy můžeme v určitém přiblížení dívat jako na soustavu lineárních harmonických oscilátorů (LHO). V kvantové mechanice může energie LHO nabývat pouze diskrétních hodnot. Molekula pak může přecházet z nižší energetické vibrační hladiny na vyšší a naopak. Při těchto přechodech dochází k absorpci nebo emisi fotonu. Rozdíl energií nejbližších hladin je asi o dva řády menší než energie elektronových přechodů v atomu nebo v molekule.*



Numerická simulace struktury Λ hyperonu metodou LQCD. Zdroj: Derek B. Leinweber/University of Adelaide.

Rotační spektrum molekuly – *molekula může mít vlastní rotaci, a tudíž nenulový celkový moment hybnosti. Ten může v kvantové mechanice nabývat pouze diskrétních hodnot a spektrum, které vzniká při přechodech z jedné hodnoty na druhou, nazýváme rotačním spektrem molekuly. Rozdíl energií nejbližších hladin rotačního spektra je asi o dva řády menší než energie přechodů vibračního spektra.*

Rezonance – *částice s krátkou dobou života. Je to pík (lokální maximum) v grafu účinného průřezu u srážkových experimentů. Nachází se v okolí definované energetické hladiny u složených částic nebo v okolí invariantní hmotnosti v případě elementárních částic. Každý z hadronů má řadu rezonancí, které odpovídají vnitřním energetickým hladinám v jeho struktuře. Šířka rezonance je rovna reciproční hodnotě její doby života. V experimentální fyzice pojmy částice a rezonance splývají.*

(*Lattice Quantum Chromo-Dynamics*, kvantová chromodynamika na mříži). Z teorie silné interakce je velmi obtížné získávat předpovědi přímým výpočtem. Energie vazby kvarků v částici je podstatně větší než hmotnosti jednotlivých kvarků. Standardní poruchová teorie (rozvoj řešení do řad) u silné interakce selhává. S rostoucí vzdáleností kvarků jejich vzájemné silové působení neubývá, ale naopak roste. Jednou z možností, jak získávat současnými výpočetními prostředky předpovědi z kvantové chromodynamiky, je řešení problému neporuchovým přístupem, například na mříži. Kvarky a gluony jsou lokalizovány ve vrcholech prostorové mříže a mohou se přemisťovat jen podél spojnic. Tím, že vzdálenost dvou částic má dolní mez danou vzdáleností vrcholů mříže, jsou v modelu automaticky oříznuty hybnosti s hodnotou vyšší, než odpovídá rovnosti v Heisenbergových relacích neurčitosti. Metoda LQCD tak automaticky odstraňuje nekonečné hodnoty vycházející v kvantové chromodynamice. Přímými předchůdci metody LQCD jsou Hubbardův model a t-J model v teorii feromegnetik, kde jsou také jednotlivé elementární magnety lokalizovány na mříži. Výpočty „silně naznačují“, že rezonance $\Lambda(1405)$ je vytvořená vazbou antikaonu a nukleonu, tedy jakousi antikaonovou – nukleonovou „molekulou“ a že pravděpodobně nejde o pouhou kombinaci stavů tří kvarků u, d, s. Zdá se tedy, že svět „pod námi“ má mnohem zajímavější strukturu, než jsme si dříve představovali.

■ **David Břeň, 10. 5. 2015, AB 17/2015**

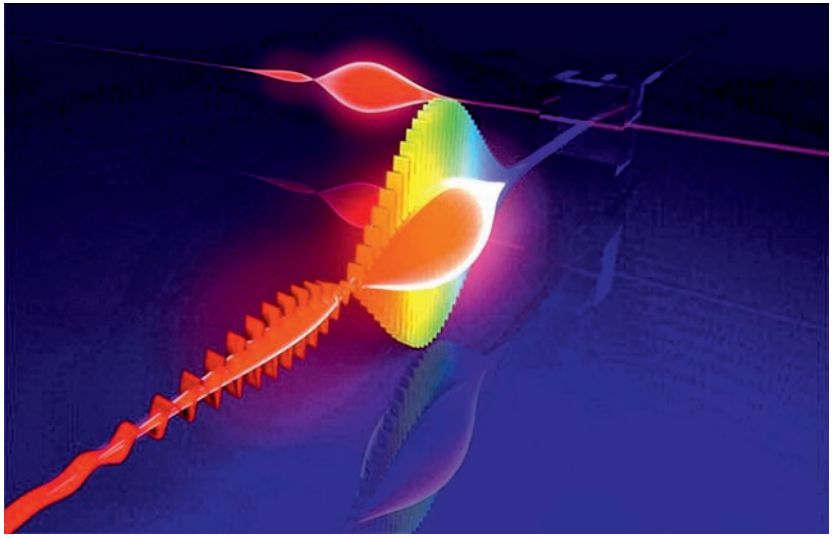
Naučíme se využívat spin fotonů?

Když v roce 1897 Joseph Thomson objevil elektron, určitě netušil, že se tato částice stane základem většiny moderních technologií. Elektrony jsou nosiči elektrického proudu, jehož jemné impulzy pohání veškerá elektronická zařízení. Elektronická revoluce zcela pozměnila lidstvo a jeho chování. Jen budoucnost ukáže, zda šlo o správnou cestu, nebo o počátek degenerace lidského pokolení. Veškerá elektronická zařízení do 80. let dvacátého století využívala jen náboj elektronu. Elektron má ale i další charakteristiku – spin. Jde o vnitřní moment hybnosti, jakousi elementární a nezničitelnou točivost danou elektronu do vínku už při jeho zrodu. Právě spin je zodpovědný za to, že se elektron nechová jen jako mikroskopický nabitý objekt, ale také jako malý elementární magnet. Spin elektronu byl v 80. letech poprvé technologicky využit při zápisu informace na magnetická média. První zapisovací a čtecí hlava harddisku založená na jevu tzv. *obří magnetorezistence* byla zkonstruována v roce 1997. Kapacita harddisků skokem vzrostla o několik řádů a elektronická revoluce zažila druhé dějství. Za objev obří magnetorezistence získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2007 Albert Fert a Peter Grünberg. Novým technologiím založeným na spinu elektronu se začalo říkat spinová elektronika, později spinelektronika, a dnes se nejvíce ujal zkrácený název spintronika.

Naše skvělá civilizace však není prošpikována jen elektronickými zařízeními s pilně pracujícími elektrony, ale hojně využívá i elektromagnetické vlny, jejichž základním kvantem jsou fotony. Fotony se od elektronů velmi liší. Mají nulový náboj, tedy nereagují přímo na elektrické pole, a mají nulovou klidovou hmotnost, což je předurčuje k vrozenému neklidu – foton

Spin – *vlastní (vnitřní) rotační moment částice souvisící 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.*

Spintronika – *spinová elektronika neboli magnetoelektronika. Jde o technologii využívající kvantové vlastnosti spinu elektronu, případně celého atomu. Zatímco v klasické elektronice je nositelem informace elektrický proud, respektive tok elektronů, ve spintronice se kromě náboje elektronu uvažuje i orientace jeho spinu.*



Umělecká představa světla. Zdroj: Labo des Savoirs.

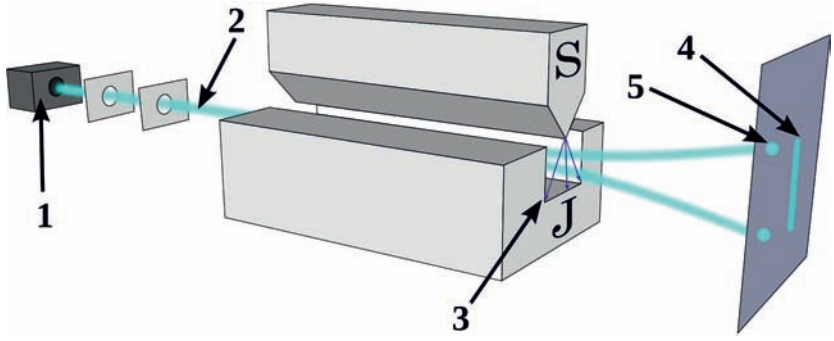
Obří magnetorezistence – *ovlivnění elektrického odporu látky interakcí spinu elektronu s magnetizací materiálu. Je-li materiál nanesen v několika nanovrstvách, může měnící se magnetizace některé z vrstev podstatnou měrou ovlivnit elektrický proud protékaný obvodem. Toho lze využít například ke čtení informace zapsané na harddisku. První čtecí hlava založená na tomto principu byla vyrobena v roce 1997.*

se nikdy nemůže zastavit a ve vakuu se řítí rychlostí světla. I fotony se staly součástí elektronické revoluce, vždyť mobil bez elektromagnetických vln by byl jen estetickým doplňkem a solární panely bez fotonů by byly jen novou podivnou „rostlinou“ bující na našich kdysi orných polích. Foton má, stejně jako elektron, také nenulový spin. Nešlo by ho využívat v nových technologiích obdobně jako spin elektronu?

Spin

Pohyby těles tradičně dělíme na translační a rotační. Translační pohyb vykonává automobil jedoucí po rovné dálnici (nesmí tedy jít o dálnici D1). Při tomto pohybu může objekt měnit rychlost, a mít tak nenulové zrychlení. Rotační pohyb bude automobil vykonávat v zatáčce, kde vektor rychlosti automobilu mění nejenom svou velikost (brzdění a zrychlování), ale i směr (pohyb v zatáčce). Translační pohyb popisujeme za pomoci hybnosti (součinu hmoty a rychlosti objektu), rotační pohyb za pomoci momentu hybnosti. V mikrosvětě je moment hybnosti kvantován, jeho projekce do libovolné osy může nabývat jen některých hodnot. Ty jsou dány násobky redukované Planckovy konstanty, která je přirozenou jednotkou kvanta momentu hybnosti. U běžných rotačních pohybů žádné skoky nevidíme, ty jsou natolik jemné, že je naše přístroje nezaregistrují. Ve světě malých rozměrů se ale těleso nemůže pohybovat s libovolným momentem hybnosti. To vede k tomu, že elektron „obíhající“ kolem jádra nemůže být na libovolné trajektorii, ale jen na takových drahách, kde má moment hybnosti tu správnou „povolenou“ hodnotu.

Objekty mikrosvěta mají kromě momentu hybnosti ještě další podobnou vlastnost, které říkáme spin (spinový moment, vnitřní točivost, vnitřní moment hybnosti). Spin má velmi podobné vlastnosti jako moment hybnosti, lze si ho však jen velmi těžko představit. Značně nepřesná, ale přesto ilustrativní, je vidina částice obíhající kolem nějakého středu a současně rotující kolem vlastní osy. V této klasické analogii odpovídá pohyb kolem středu orbitálnímu momentu hybnosti a rotace kolem vlastní osy



Spin byl objeven v roce 1925 ve Sternově-Gerlachově experimentu. V pícce (1) byly připraveny atomy stříbra s nulovým orbitálním momentem hybnosti. Tyto atomy procházely kolimátorem (2) a následně nehomogenním magnetickým polem (3). Pokud by byl jejich moment hybnosti nulový, neměly by magnetický moment a na magnetické pole by nereagovaly. Na stínítku (4) by se tedy měla objevit jedna jediná skvrna od dopadajících atomů. Ve skutečnosti se objevily skvrny dvě, svazek atomů byl rozštěpen díky interakci spinu (se dvěma možnými projekcemi) s magnetickým polem. Zdroj: Wikimedia.

spinovému momentu hybnosti. Skutečné částice ani neobíhají kolem centra, ani nerotují kolem vlastní osy. Jejich celkový rotační stav je dán oběma veličinami – momentem hybnosti (orbitálním momentem) a spinem (vnitřním momentem).

Obě veličiny (orbitální a spinový moment hybnosti) se skládají přesně definovaným matematickým způsobem. Hovoříme o tzv. spin-orbitální interakci neboli LS vazbě (písmenko L představuje orbitální moment hybnosti a S spinový moment hybnosti). Jistou formu LS vazby můžeme snadno pozorovat i v makrosvětě. Odkopne-li fotbalista točící se míč, získá míč „faleš“, tj. nebude se pohybovat po přímce, jak by se slušelo a patřilo, ale po zakřivené dráze s nenulovým momentem hybnosti. Jde o tzv. *Magnusův jev*, který je v tomto případě způsoben interakcí rotujícího míče s okolním prostředím. I v mikrosvětě vede interakce (lépe řečeno skládání) orbitálního a spinového momentu na odchylku dráhy objektu (tam, kde je dráha vůbec nějak definována) oproti dráze, kterou by mělo těleso s nulovým spinem.

Orbitální i spinové momenty jsou kvantovány. Projekce orbitálního momentu do libovolné osy může nabývat jen celistvých násobků redukované Planckovy konstanty. U spinového momentu jsou možné i poloviční hodnoty. Elektron má spin rovný 1/2 (v jednotkách redukované Planckovy konstanty) a jeho projekce může mít buď hodnotu +1/2, nebo −1/2. V klasické analogii by elektron za letu rotoval kolem vybrané osy v jednom směru, nebo v druhém směru. Foton má spin rovný 1 a jak už víme, neustále se pohybuje rychlostí světla. Projekci spinu je možné dělat do směru pohybu. Nezávisí na volbě souřadnic a může nabývat hodnot +1, −1 a 0. Tomu odpovídají vnitřní momenty hybnosti $+\hbar$, $-\hbar$, 0. Tedy v klasické analogii jako by se letící foton otáčel na jednu stranu, na druhou stranu, nebo se neotáčel.

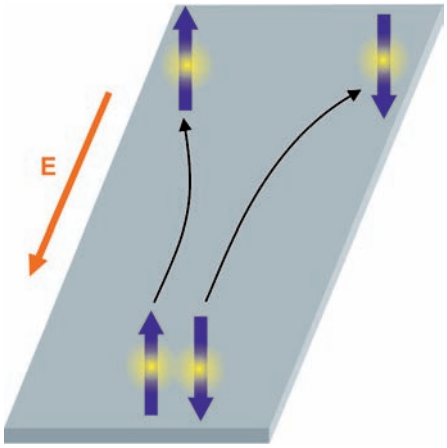
Hallův jev

Představme si, že vodičem nebo polovodičem protéká v nějaké rovině elektrický proud. Pokud bude na vzorek působit magnetické pole se složkou kolmou na rychlost nosičů náboje, začne na ně působit Lorentzova síla, která je vytlačí na boční stěny vzorku. Díky tomu se na bočních stěnách (kolmých na původní směr proudu) objeví tzv. Hallovo napětí. Je pojmenované po americkém fyzikovi Edwinu Hallovi (1855–1938), který jev popsal už v roce 1879, tedy ještě před objevem elektronu. Jevu říkáme klasický Hallův jev.

Moment hybnosti – *veličina popisující rotační pohyby těles. Jde o vektorový součin hybnosti tělesa se spojnicí počátku souřadnicové soustavy a tělesa (radiusvektorem). Velikost momentu hybnosti je rovna součinu hmotnosti tělesa, rychlosti tělesa, vzdálenosti tělesa od počátku souřadnic a sinu úhlu mezi radiusvektorem a směrem rychlosti. Při dané rychlosti a hmotnosti je moment hybnosti maximální pro kruhový pohyb a minimální (nulový) pro radiální pohyb od nebo ke středu soustavy (úhel v definičním vztahu je nulový).*

Úplný odraz – *jev, který nastává při průchodu světla z prostředí opticky hustšího (např. skla) do prostředí opticky řidšího (např. vzduchu). Světlo se láme od kolmice a s rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu. Při tzv. mezním úhlu dopadu dosáhne úhel lomu největší možné hodnoty 90° a lomený paprsek splývá s rozhraním. Při větších úhlech dopadu již světlo do druhého prostředí nepronikne a jen se od rozhraní s opticky řidším prostředím odráží. Tento jev pozoroval v Praze na počátku 17. století Johannes Kepler.*

Spinový Hallův jev je obdobou klasického Hallova jevu. Základem je transport opačně orientovaných spinů na protilehlé boční stěny vzorku. Jev funguje i bez přítomnosti magnetického pole. Zdroj: Chicagská univerzita.

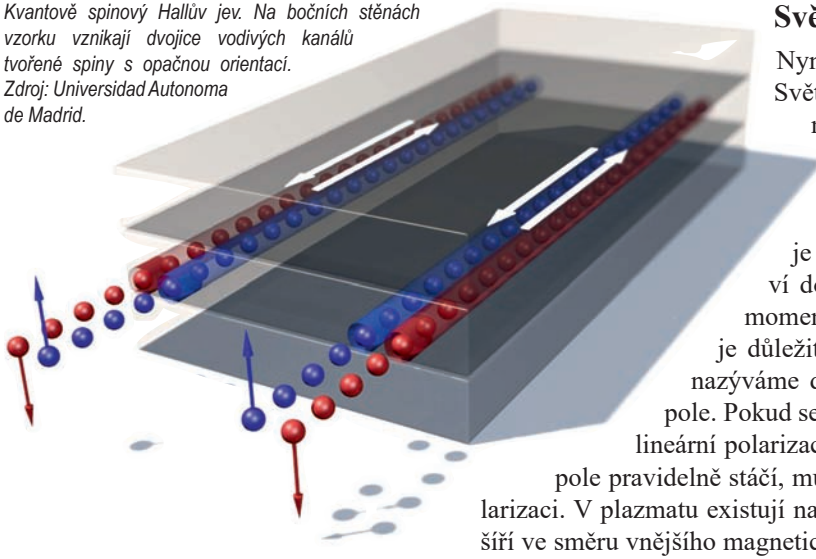


Elektron – *první objevená elementární částice. Je stabilní. Hmotnost má $9{,}1\times10^{-31}$ kg a elektrický náboj $1{,}6\times10^{-19}$ C. Elektron objevil sir Joseph John Thomson v roce 1897. Existenci antičástice k elektronu (pozitron) teoreticky předpověděl Paul Adrien Maurice Dirac v roce 1928 a v roce 1932 ji Carl David Anderson objevil v sekundárních sprškách kosmického záření.*

Foton – *polní částice elektromagnetické interakce, kvantum energie elektromagnetického záření. Má nulovou klidovou hmotnost a nemá elektrický náboj. Jeho energie a hybnost jsou přímo úměrné frekvenci záření ($E = \hbar\omega$, $p = E/c$). Stav fotonu zahrnuje také polarizaci, protože jde o příčné vlnění.*

V některých materiálech je pohyb elektronů řízen jejich spinem. Dojde ke spinorbitální interakci (LS vazbě) a v elektrickém poli budou elektrony se spinem +1/2 odchýleny na opačnou stranu než elektrony se spinem −1/2. Efekt sice zdánlivě připomíná Magnusův jev, ale jde o něco jiného – vzájemnou interakci spinového momentu, orbitálního momentu a vnějšího elektrického pole. Výsledkem není tok náboje, jak jsme zvyklí, ale tok spinu na boční stěny vzorku. Jev se nazývá spinový Hallův jev a je dobře experimentálně zdokumentován například u vzorků z galium-arsenidu.

Za určitých podmínek se situace v uspořádání spinů dále změní v důsledku vlnových vlastností elektronů. Na každé boční stěně vzorku vniknou dva výrazně ohraničené vodivé kanály, jeden z nich bude obsahovat elektrony s jednou orientací spinů a druhý s opačnou orientací spinů. Uvnitř vzorku bude objemová hustota spinu nulová. Takové uspořádání vodivých kanálů má velmi zajímavé vlastnosti. Dvojitá hradba elektronů s přesně uspořádanými spiny je velmi málo citlivá na různé poruchy a nečistoty, které za normálních okolností snižují vodivost materiálu a způsobují energetické ztráty. Vzorek se uvnitř mezi oběma dvojicemi vodivých kanálů chová jako izolant (někdy se hovoří o topologickém izolantu). Celý jev nazýváme kvantově spinový Hallův jev.



Kvantově spinový Hallův jev. Na bočních stěnách vzorku vznikají dvojice vodivých kanálů tvořené spiny s opačnou orientací. Zdroj: Universidad Autonoma de Madrid.

Světlo a spin

Nyní se konečně dostáváme ke světlu. Světlo je součástí elektromagnetického vlnění. Samotné elektromagnetické pole je nositelem energie, hybnosti a momentu hybnosti. Tyto entity dokáže přenášet prázdným prostorem a předat je nabitým částicím, které se mu postaví do cesty. Jak ale může světlo přenášet moment hybnosti? Pro pochopení tohoto jevu je důležitý pojem polarizace světla. Polarizací nazýváme dle dohody rovinu kmitů elektrického pole. Pokud se rovina kmitů nemění, hovoříme o tzv. lineární polarizaci. Pokud se rovina kmitů elektrického pole pravidelně stáčí, může jít o kruhovou nebo eliptickou polarizaci. V plazmatu existují například tzv. pravotočivé vlny, které se šíří ve směru vnějšího magnetického pole a rovina kmitů elektrického

pole se při pohledu ve směru šíření vln stáčí ve směru pohybu hodinových ručiček. U levotočivých vln je tomu právě naopak. Tyto kruhově polarizované vlny mohou předávat elektronům nenulový moment hybnosti nesený polem (rotující elektrické pole nutně předá nabité částici moment hybnosti). Jak ale vypadá přenos momentu hybnosti na úrovni částic pole, tedy fotonů? Právě zde přichází na scénu spin fotonů. Pro pravotočivou vlnu je projekce spinu fotonů do směru šíření rovna +1, pro levotočivou –1. Moment hybnosti pole je tedy nesen spinem fotonů! U lineárně polarizované vlny je projekce spinu do směru pohybu vlny nulová, taková vlna moment hybnosti nepřenáší.

Situace se poněkud změní, pokud se světlo šíří podél rozhraní dvou prostředí. K tomu může dojít například při tzv. úplném odrazu, kdy se lámaný paprsek nedostane do druhého prostředí, ale vydá se podél rozhraní obou prostředí. Na hranici prostředí vznikne tzv. *evanescentní vlna*. Její základní vlastností je, že jde o povrchovou vlnu, jejíž amplituda exponenciálně ubývá ve směru kolmém na rozhraní. Vlna má výrazně odlišné vlastnosti od běžných vln, které známe z neomezeného prostředí. Elektrické pole může mít i složku kmitající podél rozhraní. S tím souvisí i další zajímavost týkající se spinu. Evanescentní vlna na rozhraní má totiž nenulovou projekci spinu do směru kolmého na šíření vlny (u běžné vlny je nenulová projekce spinu do směru pohybu, transverzální spin je nulový). A právě tento transverzální spin a jeho vliv na šíření vlny zkoumali v japonském vědeckém centru RIKEN. Skupina vědců pod vedením Konstantina Bliokha experimentálně zjistila, že se vlny s opačnou hodnotou transverzálního spinu šíří opačným směrem. Na spinu tedy závisí nejen pohyb elektronů ve spinovém Hallově jevu, ale i pohyb fotonů na rozhraní dvou prostředí. Spinový Hallův jev má, zdá se, mnohem širší platnost, než se předpokládalo. Funguje stejně dobře na elektrony i na fotony. Pohyb fotonu závisí na hodnotě jeho spinu a spinový Hallův jev patří k základním vlastnostem světla. Pokud dokážeme v nových technologiích využívat i spin světla, můžeme se dočkat velmi zajímavých aplikací a s tím spojené nové vlny stále probíhající elektronické revoluce.

■ **Petr Kulhánek, 5. 8. 2016, AB 29/2016**

RIKEN – *japonská vědecká organizace zaměřená na výzkum v nejrůznějších oblastech přírodních věd. Založena byla v roce 1917. Označení RIKEN je zkratkou z původního názvu „Rikagaku Kenkyūjyo“. Jako součást vědeckých aktivit byl v roce 2000 založen vysokoškolský kampus RIKEN v Yokohamě. Národním výzkumným institutem se RIKEN stal v roce 2015. Jako poslední součást přibylo v roce 2018 Centrum pro výzkum dynamiky biosystémů. V současnosti má RIKEN 3 000 vědců v sedmi kampusech napříč Japonskem. Roční rozpočet je necelých 17 miliard korun českých.*

Vědecké centrum RIKEN v Yokohamě je jen částí obřího komplexu. Zdroj: Yokohama Economic Affairs Bureau.

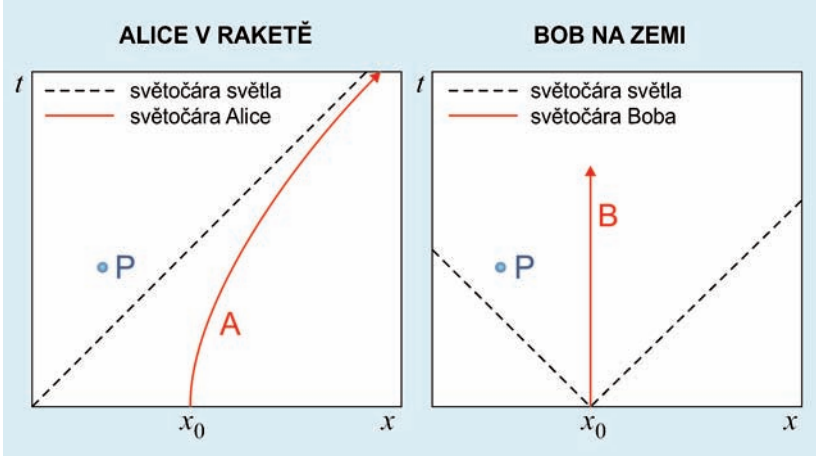


Unruhův jev – tepelné záření vakua

Casimirův jev – *působení kvantového vakua na dvě blízké kovové rovnoběžné desky. Mezi deskami se mohou rozvinout fluktuace jen některých vlnových délek, mimo desky fluktuace libovolné vlnové délky. Výsledkem je přitažlivá síla působící na obě desky. Jev teoreticky popsali Hendrik Casimir a Dirk Polder. Experimentálně jev ověřili v roce 1948.*

Princip ekvivalence – *gravitační zrychlení těles nezávisí na jejich chemickém složení, gravitační a setrvačná hmotnost těles je vzájemně úměrná, ve vhodné soustavě jednotek shodná. Tento princip se někdy nazývá slabý princip ekvivalence. Podle silného principu ekvivalence by měly platit i předpoklady speciální relativity, tj. princip konstantní rychlosti světla a neodlišitelnost inerciálních soustav pro mechanické i elektromagnetické děje. Silný princip ekvivalence má za důsledek to, že by gravitační účinky měla mít i hmotnost odpovídající energii elektromagnetického pole. Důsledkem principu ekvivalence je nerozlišitelnost mezi setrvačnými a gravitačními jevy.*

Při cestování prostorem konstantní rychlostí blížící se rychlosti světla se cestovatel může stát svědkem nezvyklých jevů, kdy například čas na okolních hodinách plyne pomaleji než na jeho hodinkách, okolní předměty jsou zkrácené ve směru jeho pohybu, světlo které k němu přichází ze směru pohybu je posunuto k modrému okraji spektra, a když se ohlédne za sebe, tak pro změnu pozoruje světlo posunuté směrem do červena. Tyto efekty vycházejí z provázanosti prostoru a času popisované speciální teorií relativity a byly experimentálně ověřeny s vysokou přesností. Prostor samotný není nikdy zcela prázdný, ale obsahuje fluktuující kvantová pole a jejich projevy byly mnohokrát experimentálně pozorovány například prostřednictvím Casimirova jevu. Přítomnost těchto kvantových polí vede k pozoruhodným efektům, které uvidí pozorovatel urychlovaný s konstantním zrychlením. Aplikací základních principů kvantové teorie pole v urychlované soustavě bude urychlovaný pozorovatel detekovat tepelné záření přicházející z vakua, jehož teplota je přímo úměrná zrychlení. Tento jev teoreticky předpověděli Stephen Fulling, Paul Davies a William George Unruh v letech 1973 až 1976 a zkráceně se nazývá Unruhův jev.



Urychlovaný pozorovatel

Efekty pozorovatelné v urychlované soustavě si můžeme vysvětlit pomocí myšlenkového experimentu s osvědčenou experimentátorskou dvojicí Alicí a Bobem. Na začátku experimentu (v čase nula) se Alice i Bob nacházejí na stejném místě (v bodě x_0), přičemž Alice sedí v raketě připravené odstartovat ke vzdálené exoplanetě. Jakmile Alice zažehne motory, raketa se pohybuje s konstantním zrychlením, zatímco Bob na ni čeká na Zemi. V počátečních fázích letu

bude rychlost Alice narůstat lineárně s časem. Relativistické efekty ale brzy začnou narůstání její rychlosti omezovat takovým způsobem, že se její rychlost asymptoticky blíží rychlosti světla. Alice se pohybuje v takzvaném *Rindlerově prostoru*. Světočára (časoprostorový diagram pohybu objektu) Alice má tvar hyperboly, zatímco světočára Boba má tvar přímky.

Oba pozorovatelé nemají přístup ke stejným událostem v časoprostoru. Bob může v principu ovlivnit událost označenou bodem P na obrázku, zatímco pro Alici je tato událost kauzálně nedostupná. Pro Alici se událost P nachází za takzvaným Rindlerovým horizontem. Z pohledu Alice časem zmizí za Rindlerovým horizontem i sám Bob.

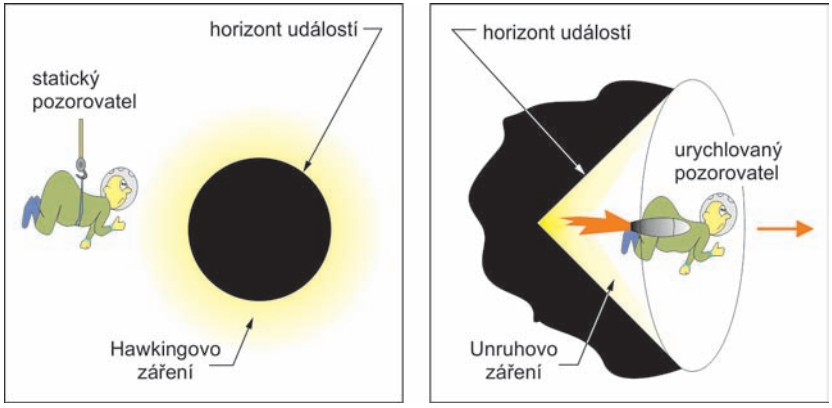
Toto ale není jediná zvláštnost, které si Alice všimne. Prostor, ve kterém existují oba pozorovatelé, je plný fluktuujících kvantových polí, kde na velmi krátké okamžiky vznikají páry částic a antičástic, které vzápětí anihilují. V blízkosti Rindlerova horizontu se ale jeden člen páru částice-antičástice může dostat za horizont a druhý člen páru se pak stane skutečnou částicí, kterou Alice pozoruje jako Unruhovo záření. Spektrum tohoto záření odpovídá tepelnému záření absolutně černého tělesa a teplota tohoto záření je přímo úměrná zrychlení soustavy. Jakkoliv se Unruhův jev může zdát neobvyklým fyzikálním jevem, nejedná se o novou fyziku. Unruhovo záření je v souladu se zákony teorie relativity a kvantové teorie pole. Nicméně zatím se nepodařilo Unruhovo záření experimentálně detekovat. Při zrychleních, která zažíváme v každodenním životě, je teplota Unruhova záření velmi blízká absolutní nule a intenzita záření prakticky neměřitelná. Pro ilustraci: ve sportovním autě lze bez problému dosáhnout zrychlení 1 G, čemuž odpovídá teplota Unruhova záření 4×10^{-20} K.



*William George „Bill"" Unruh (*1945), kanadský fyzik, který v roce 1976 popsal Unruhův jev.*

Unruhův jev a Hawkingovo záření

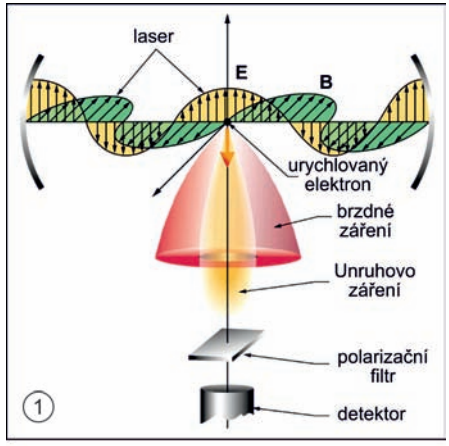
Unruhovo záření má velice podobnou podstatu i charakter jako vyzařování černé díry, které teoreticky předpověděl anglický fyzik Stephen Hawking v roce 1974. Spektrum záření černé díry odpovídá,

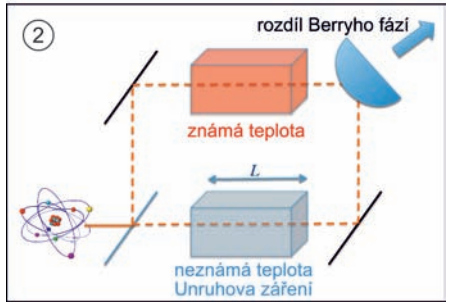


Statický pozorovatel v blízkosti horizontu událostí černé díry vidí tepelné záření (Hawkingovo záření) vycházející z černé díry, podobně jako urychlovaný pozorovatel vidí tepelné záření vycházející z vakua (Unruhovo záření). Zdroj: SLAC/Pisin Chen.

SLAC – *Stanford Linear Accelerator Center, v roce 2008 přejmenován na SLAC National Accelerator Laboratory, 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.*

1) experiment pro detekci Unruhova záření založený na urychlování elektronu intenzivním laserovým pulzem; 2) experiment pro detekci Unruhova záření využívající rozdíl kvantové Berryho fáze. Zdroje: SLAC, ArXiv, Eduardo Martín-Martínez.





podobně jako v případě Unruhova záření, vyzařování černého tělesa. Podstata Hawkingova záření rovněž souvisí s kvantovou povahou vakua a rozdělení páru částice a anitičástice horizontem události černé díry. Oba jevy jsou příbuzné.

V tomto smyslu se tedy Rindlerův horizont chová podobně jako horizont událostí černé díry. V analogiích můžeme zajít ještě dále. Jedním ze základních postulátů obecné teorie relativity (současné teorie gravitace) je princip ekvivalence – nerozlišitelnost síly způsobené zrychlením od síly způsobené gravitací. Pokud Hawkingův vztah pro teplotu záření černé díry upravíme tak, aby v něm vystupovalo gravitační zrychlení pozorovatele v blízkosti horizontu události černé díry, dospějeme ke stejnému vztahu, jaký platí pro teplotu Unruhova záření, které bude detekovat pozorovatel vystavený stejnému zrychlení ve vakuu. Princip ekvivalence zde tedy platí bezezbytku.

Experimentální testy

Experimentální měření Hawkingova záření černých děr je zatím mimo technologické možnosti. Cestovat k hvězdné černé díře nedokážeme a i kdyby se to povedlo, tak teplota vyzařování hvězdné černé díry se pohybuje v řádu mikrokelvinů (teplota okolního vesmíru je 2,73 K). Vytváření miniaturních černých děr v laboratoři je také podle současných teorií téměř vyloučeno. Cestu ke zkoumání tepelného záření pocházejícího z kvantové povahy vakua a přítomnosti horizontu otevírá právě Unruhův jev. Urychlovat makroskopické měřicí přístroje extrémním zrychlením sice možné není, ale ukazuje se, že se současnými laserovými technologiemi je možné urychlovat elektrony takovým způsobem, že Unruhův jev bude pozorovatelný. Současné experimentální lasery umožňují dosáhnout pulzního výkonu v řádu petawattů po dobu zlomku pikosekundy. Takovýto laserový pulz dokáže udělit elektronu zrychlení 10^{28} m/s^2. Tento způsob měření Unruhova jevu navrhl v roce 2000 fyzik Pisin Chen z amerického střediska *SLAC National Accelerator Laboratory*.

Elektron při urychlování vyzařuje velice dobře známé brzdné záření, které obvykle tvoří výrazné pozadí signálu. Teoretické výpočty ukazují, že v důsledku Unruhova jevu se pozmění úhlové rozdělení tohoto brzdného záření takovým způsobem, že projevy Unruhova jevu bude možné měřit v ose procházející elektronem a současně kolmé na laserový svazek, kde klasické brzdné záření dosahuje svého minima.

Dalším perspektivním návrhem pro měření Unruhova jevu je použití „kvantového teploměru“ nízkých teplot, který využívá tzv. Berryho fáze k měření teploty Unruhova záření. Kvantový systém s diskrétním energetickým spektrem (například atom), který interaguje s kvantovým polem (Unruhovo záření) je popsán fází, která závisí na stavu tohoto kvantového pole (například na teplotě). Měřením této Berryho fáze lze tedy zjistit stav kvantového pole, ve kterém se atom nachází.

Jedná se o interferenční experiment, kde se svazek atomů v přesně definovaném stavu rozdělí do dvou směrů (ramen interferometru). V horním rameni interferometru atomy projdou polem o známé teplotě a ve druhém směru budou atomy urychleny extrémním zrychlením. Nakonec se svazky atomů sloučí a dojde k interferenci Berryho fází v závislosti na rozdílu teplot v obou ramenech interferometru. Tato metoda je velice citlivá a teoreticky umožňuje pozorovat Unruhův jev už při zrychlení atomů „pouze“ 10^{14} m/s^2. Metoda se hodí nejen pro studium Unruhova jevu, ale také pro obecné měření velmi nízkých teplot v řádu nanokelvinů. Zajímavostí je, že při měření teploty není tento „kvantový teploměr“ v termodynamické rovnováze s prostředím, jehož teplota je měřena (na rozdíl od teploměru klasického).



Umělecké ztvárnění Hawkingova vyzařování v blízkosti horizontu černé díry, procesu, který je v jistém smyslu příbuzný Unruhovu jevu. Kresba: Ivan Havlíček.

Naděje do budoucna

Přestože Unruhovo i Hawkingovo záření stojí na pevných základech kvantové teorie pole, teorie relativity a termodynamiky, zatím žádné z těchto záření nebylo experimentálně potvrzeno. Nicméně, podle vědeckých publikací se zdá, že potřebné technologie pro měření Unruhova jevu jsou dostupné a že je jen otázkou času, kdy nějaká výzkumná skupina publikuje článek o pozorování Unruhova záření. Takový objev by pomohl ověřit nejen platnost kvantové teorie pole v urychlovaných soustavách, ale navíc by umožnil studovat obdobu Hawkingova záření černých děr přímo v laboratoři, a zpřesnit tak dosud pouze hypotetické poznatky o vypařování černých děr.

■ **Miroslav Havránek, 31. 10. 2014, AB 35/2014**

Nobelovy ceny



Medaile získávaná při udělení Nobelovy ceny. Zdroj: Nobelovský výbor.

*Isamu Akasaki (*1929) se narodil v japonské Kagošimě. V roce 1952 vystudoval univerzitu v Kjóto, doktorát z elektroniky získal na Nagojské univerzitě. V roce 1964 začal s prací na modré LED diodě na bázi nitridu galia, úspěch se dostavil až v 90. letech. Jeho výzkum ovlivnil celou řadu moderních technologií.*



Stalo se již tradicí, že v této sérii knih vždy v sekci Fyzika uvádíme přehled Nobelových cen za fyziku udělených za několik posledních let. V tomto vydání nás čekají ceny za období 2014 až 2017 (pro rok 2018 ještě nejsou ceny známy). Tentokrát ale uděláme jednu výjimku. K Nobelovým cenám za fyziku přidáme i cenu za chemii pro rok 2017, neboť byla udělena za kryogenní elektronovou mikroskopii, která s fyzikou úzce souvisí. Navíc už v roce 1968 byla za elektronovou mikroskopii jednou Nobelova cena udělena, tenkrát ji za fyziku získal Ernst Ruska.

Alfred Nobel (1833–1896) byl švédský vynálezce, který pracoval na výrobě nitroglycerinu. Shodou nešťastných náhod se stalo, že jeho továrna vylétla do vzduchu a švédská vláda zakázala znovu obnovit výrobu. Zanedlouho Nobel zjistil, že nitroglycerin přestane být výbušný, pokud se jím nasákne křemelina (rozsivková zemina) a k explozi ho přivede až rozbuška. Dynamit spolu s rozbuškou si nechal patentovat v roce 1867. Věřil, že se vynález stane lidstvu užitečným a vůbec netušil, že již v první světové válce bude těžce zneužit. Před svou smrtí vlastnil 355 patentů a nashromáždil obrovský majetek. Alfred Nobel založil v roce 1895 nadaci, do které majetek uložil (32 milionů švédských korun) a ve své závěti rozhodl, že z úroků bude každoročně udělována cena za významné vědecké objevy, literární tvorbu a zásluhy o mír ve světě.

Nobelova cena je udílena švédskou Královskou akademií věd jednou ročně v pěti kategoriích: za fyziku, chemii, fyziologii a medicínu, literaturu a za úsilí o mír. První cena za fyziku byla udělena v roce 1901 Wilhelmu Roentgenovi za objev rentgenového záření. Nobelova cena činí 8 milionů švédských korun, tj. 23 milionů korun českých a uděluje se vždy 10. prosince při výročí smrti Alfreda Nobela.

2014 – modré diody

Nositelem Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2014 se stala trojice japonských vědců, jmenovitě Isamu Akasaki, Hiroši Amano a Šúdži Nakamura. Cena jim byla udělena „za vynález účinných modrých světelných diod, které umožnily jasné a energeticky úsporné bílé světelné zdroje“. Isamu Akasaki a Hiroši Amano stále působí na japonských univerzitách v Nagoji (na Mejdžské a Nagojské univerzitě), Šúdži Na-

kamura odešel na přelomu tisíciletí do Spojených států na Kalifornskou univerzitu v Santa Barbaře.

Světelné diody (LED – *Light Emitting Diod*) jsou úzkopásmové světelné zdroje na bázi polovodičových součástek, s vlnovými délkami v rozsahu od infračerveného po ultrafialové záření. První LED zdroje světla byly zkoumány a sestaveny v rozmezí let 1950–1960 v několika laboratořích, přičemž tyto diody dokázaly emitovat světlo různých vlnových délek, od infračervené vlnové délky až po zelenou. Sestavit diody emitující modré světlo byl však daleko obtížnější úkol, který se podařilo vyřešit až o tři desetiletí později. Hlavním důvodem bylo to, že používané sloučeniny galia, arzénu a fosforu nešly upravit do struktury, která by emitovala modré světlo.

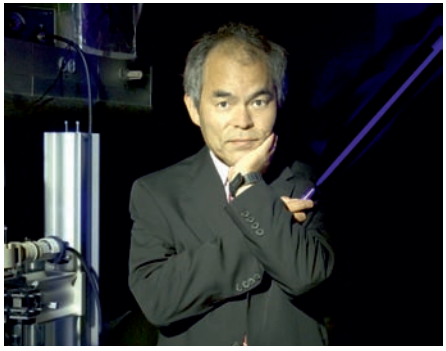
K tomuto úkolu bylo třeba vyvinout metody růstu vysoce kvalitních krystalů spolu se schopností řídit dopování polovodičů typu P s velkou šířkou zakázaného pásu. Nakonec se to podařilo u nitridu galia až koncem osmdesátých let dvacátého století. Vývoj účinných modrých LED zdrojů vyžadoval výrobu GaN na bázi slitin s různým složením a jejich integraci do vícevrstvých struktur, jako jsou heterogenní struktury a kvantové jámy.

Vynález modrých LED vedl ke konstrukci bílých světelných zdrojů pro běžné osvětlení. Princip funkce světelné diody neumožňuje získat bílé světlo přímým způsobem. Ke vzniku bílého světla se používá klasického míchání barev (červená, zelená a modrá LED), které je však náročné na hardware a software. Získaná intenzita světla je nižší než součet intenzit zdrojů a běžně dochází k nerovnoměrné degradaci jednotlivých komponent této kombinované diody, což vede k posunu výsledného vyzařovaného spektra. Druhý způsob využívá fosforescenci luminoforů. Vhodným luminoforem je například ytrito-hlinitý granát aktivovaný cerem ($Y_3Al_5O_{12}$:Ce), který je buzen světlem modré diody InGaN. Tento způsob je velmi podobný principu vzniku světla v klasických zářivkách. Obě technologie jsou používány v dnešních vysoce účinných bílých elektroluminiscenčních světelných zdrojích. Tyto světelné zdroje s velmi dlouhou životností (kolem 100 000 hodin) začaly v současnosti nahrazovat žárovky a zářivky pro běžné osvětlení, které představuje přibližně 20 až 30 % naší spotřeby elektrické energie. Nové bílé světelné zdroje založené na vysoce účinných modrých diodách spotřebují desetkrát méně energie než běžné žárovky, což vede ke značným úsporám elektrické energie.



*Hiroši Amano (*1960) se narodil v japonském Hamamatsu. Vystudoval Nagojskou univerzitu. Po studiu působil na Mejdžské univerzitě, poté se vrátil na Nagojskou univerzitu. Od studentských let působil v týmu profesora Akasaki. Vyvinul uložení nízkoteplotních přechodových vrstev na safírovém substrátu. Jako první na světě zhotovil PN přechod na bázi GaN pro LED v oblasti UV a modrého světla.*

*Šúdži Nakamura (*1954) vystudoval Univerzitu v Tokušimě. Poté se stal zaměstnancem Nichia Corporation. Nyní je profesorem na Kalifornské univerzitě (USA). Nakamurův výzkum zahrnuje nanášení metaloorganických vrstev, sterilizaci povrchů a vody ultrafialovým zářením a vývoj LED na základě nitridu galia. Vynalezl modrý laser, který umožnil zápis technologií Blu-Ray a vznik DVD s vysokou hustotou zápisu.*



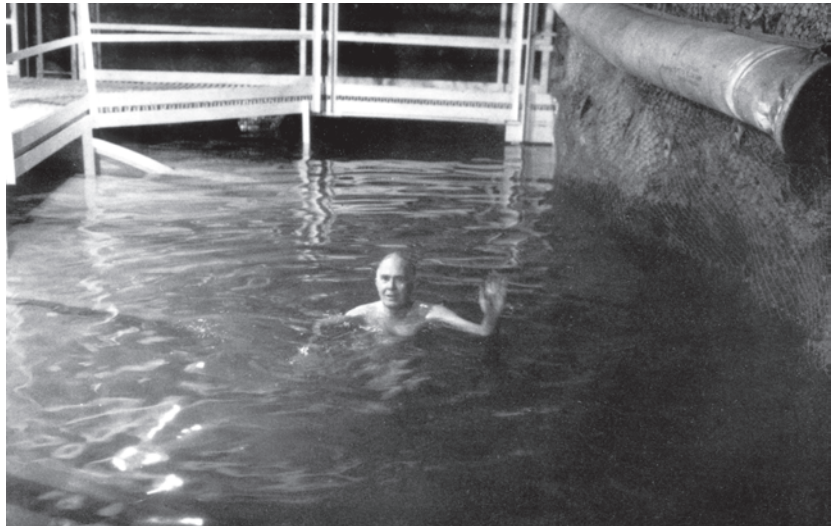
Homestake – *první detektor neutrin byl postaven v opuštěném zlatém dole v Jižní Dakotě. Šlo o vodorovně uloženou válcovou nádobu naplněnou 615 tunami tetrachloretylenu. Detektor byl uveden do provozu v roce 1967 za vydatného přispění R. Davise. Administrativně spadá pod Brookhavenské laboratoře. Jde o chlorový detektor slunečních neutrin. Jeho činnost byla ukončena v roce 1993.*

Výzkum v oblasti modrých LED zdrojů vedl později k dalším objevům a technologiím, z nichž jmenujme alespoň: intenzivní LED zdroje (superLED), ultrafialové LED zdroje pro sterilizaci, výkonné modrofialové polovodičové lasery, plně barevné polovodičové displeje, DVD s vysokou hustotou zápisu a Blue-Ray přehrávače.

2015 – oscilace neutrin

Nositeli Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2015 se stali vedoucí obou týmů, které objevily oscilace neutrin, Takaaki Kadžita (Super-Kamiokande) a Arthur Bruce McDonald (SNO). Neutrino je druhou nejdéle hledanou částicí po Higgsově bosonu. Jeho objev trval – od předpovědi v roce 1930 – dlouhých 26 let. Nakonec bylo polapeno v americké jaderné elektrárně v Savannah River. A od té doby nás mnohokrát překvapilo svými nezvyklými vlastnostmi. V šedesátých letech 20. století chytal neutrina Raymond Davis v opuštěném zlatém dole Homestake v Jižní Dakotě. Neutrin ze Slunce přicházela oproti teoretickým výpočtům zhruba třetina. Tento „neutrinový skandál“, jak situaci nazvali tehdejší fyzikové, bylo třeba neodkladně řešit. Uvažovalo se, že naše představy o průběhu termojaderné syntézy v nitru Slunce jsou buď zcela mylné, nebo ve Slunci probíhají momentálně se sníženým výkonem (v elektromagnetickém spektru bychom se výpadek slunečních reakcí v nitru dozvěděli až po mnoha stech tisících letech, neboť se uvolněná energie prodírá slunečním plazmatem k povrchu jen pomalu). Stále však sílil názor, že se Sluncem je vše v pořádku, ale neutrina mají malou nenulovou hmotnost. V tom případě by podle kvantové teorie byly neutrinové stavy superpozicí tzv. hmotových stavů a neutrina by měla podléhat oscilacím. Jde o oscilace pravděpodobnosti, že neutrino zachytíme jako elektronové, mionové nebo taunové. Na cestě od Slunce k nám jsou neutrina natolik promixována, že Davisův detektor, který byl cit-

Nositel Nobelovy ceny Raymond Davis se koupe v nádrži obklopující slavný detektor v dole Homestake, kde byl objeven tok neutrin ze Slunce neodpovídající teorii. Objev odstartoval velmi dlouhý hon na oscilace neutrin. Zdroj: Brookhaven National Laboratory.



livý jen na elektronová neutrina, zachytával právě třetinu skutečného toku neutrin z nitra Slunce. Tomuto názoru daly za pravdu na samém konci 20. století měření na detektorech Super-Kamiokande v Japonsku a v Sudburské neutrinové observatoři v Kanadě.

Neutrina k nám přicházejí z mnoha zdrojů. Velké množství se jich uvolňuje při termojaderné syntéze v nitrech hvězd včetně našeho Slunce. Vznikají ale také při závěrečných explozích hvězd, v supernovách, kde odnášejí z nitra umírající hvězdy podstatnou část její energie. Na naší Zemi vznikají přírodní neutrina dvojím způsobem: v horních vrstvách atmosféry při srážkách jejích atomů a molekul s kosmickým zářením a v nitru Země při radioaktivním rozpadu látek. Umělá neutrina vytváříme ve všech jaderných elektrárnách a vznikají přirozenou cestou v urychlovačích – buď při srážkách, nebo při navedení urychlených částic do útlumového členu.

Neutrina jsou příbuzensky spjata s elektrony. Elektrony a neutrina se při slabé interakci dokonce chovají jako jedna jediná částice. Zcela odlišné chování ale pozorujeme při elektromagnetické interakci, které nenabitá neutrina nepodléhají, zatímco nabité elektrony ano. Obdobně jako existuje elektron lehký, těžký (mion) a supertěžký (tauon), existují i neutrina tří druhů: elektronové, mionové a tauonové. Dnes víme, že alespoň některá z nich mají nenulovou hmotnost.

Po dlouholetém hledání byly nakonec neutrinové oscilace objeveny na detektoru Super-Kamiokande, který je citlivý jak na elektronová, tak na mionová neutrina. Na Zemi neustále dopadá intenzivní tok kosmického záření – velkého množství energetických protonů a dalších částic. Při interakci s atomy a molekulami v horní vrstvě atmosféry vznikají tzv. sekundární spršky částic, které obsahují mionová a elektronová neutrina v poměru 2:1. Z oblasti nad detektorem uletí neutrina jen několik desítek kilometrů a nestačí oscilovat, tj. změnit svou podobu, a tím poměr detekovaných neutrin. Atmosférická neutrina ale vznikají i na druhé straně Zeměkoule, projdou Zemí a vletí do detektoru z jeho spodní části. Taková neutrina ulétla několik tisíc kilometrů, některá stihla oscilací změnit svou podobu, a poměr počtu mionových a elektronových neutrin je proto směrově závislý. Právě tuto závislost naměřili v roce 1998 na detektoru Super-Kamiokande, a definitivně tak potvrdili existenci oscilací neutrin a jejich nenulovou hmotnost.

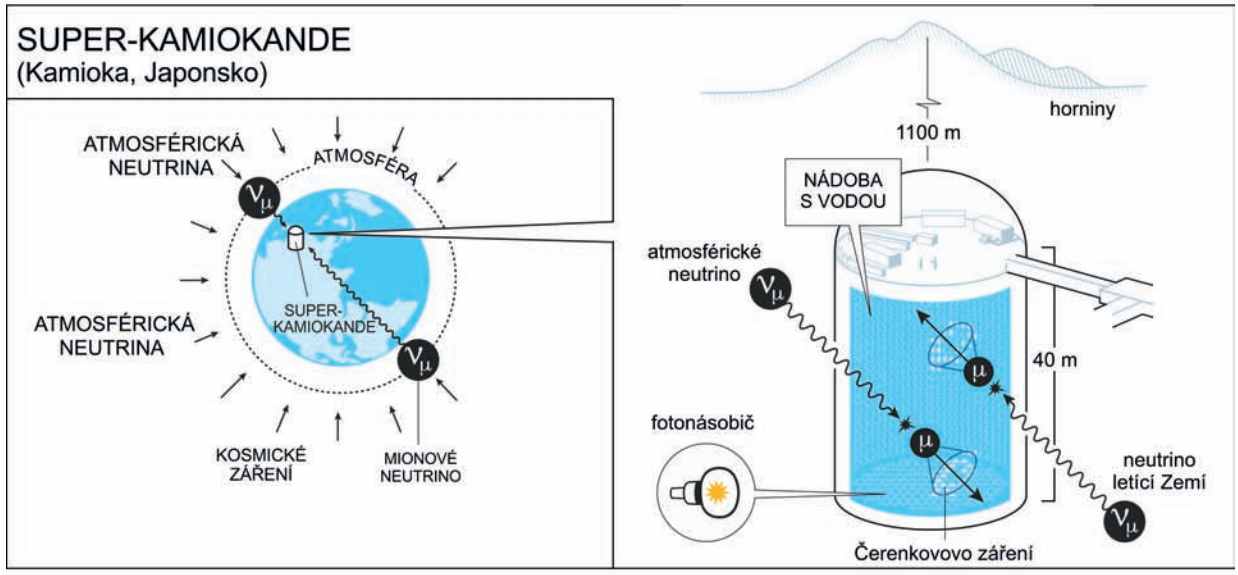
Obdobné experimenty prováděli vědci i v Sudburské neutrinové observatoři. Zde ale neměřili směrovou závislost (v experimentu šlo

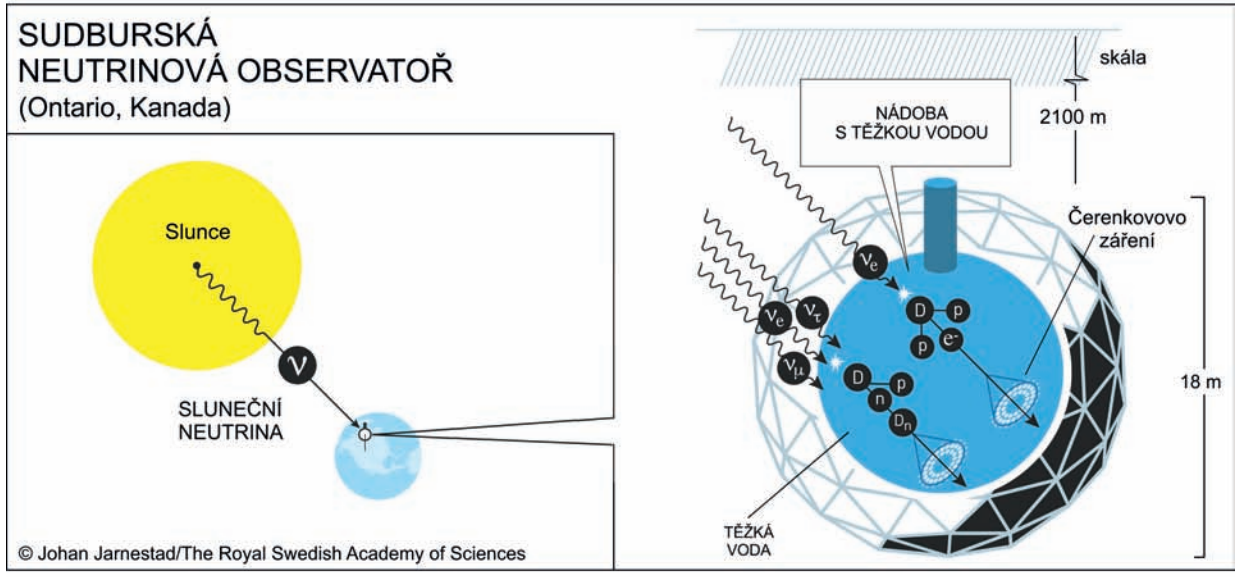


*Takaaki Kadžita (*1959) je japonský fyzik. V roce 1981 dokončil studia na Saitamské univerzitě, doktorát získal na Tokijské univerzitě, kde dnes pracuje. Většinu života zasvětil výzkumu neutrin na detektoru Kamiokande a jeho následovníku Super-Kamiokande. K nejvýznamnějším úspěchům patří objev oscilací neutrin z roku 1998.*

*Arthur Bruce McDonald (*1943) je kanadský fyzik. V roce 1965 dokončil studia na Dalhousijské univerzitě v Halifaxu. Doktorát získal na Caltechu. Poté působil v laboratoři CRNL, v Princetonu a na Queen's University v Ontariu, kde pracuje dodnes. Většinu života zasvětil výzkumu neutrin. Na Sudburské neutrinové observatoři vedl tým, který v roce 2001 objevil oscilace slunečních neutrin.*

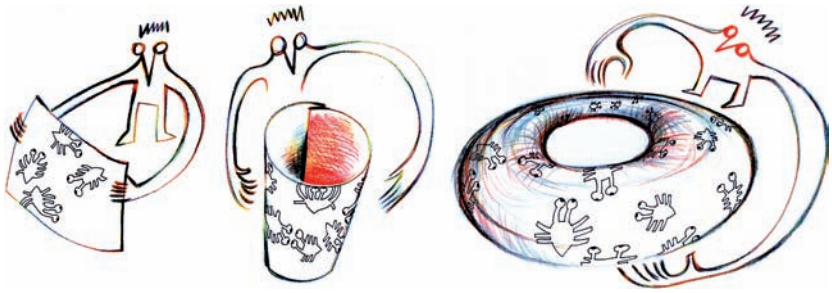



SUPER-KAMIOKANDE
(Kamioka, Japonsko)
ATMOSFÉRICKÁ NEUTRINA
ATMOSFÉRA
ATMOSFÉRICKÁ NEUTRINA
SUPER-KAMIOKANDE
KOSMICKÉ ZÁŘENÍ
MIONOVÉ NEUTRINO
horniny
1100 m
NÁDOBA S VODOU
atmosférické neutrino
40 m
fotonásobič
neutrino letící Zemí
Čerenkovovo záření


SUDBURSKÁ NEUTRINOVÁ OBSERVATOŘ
(Ontario, Kanada)
Slunce
SLUNEČNÍ NEUTRINA
© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences
skála
2100 m
NÁDOBA S TĚŽKOU VODOU
Čerenkovovo záření
18 m
TĚŽKÁ VODA

o sluneční neutrina), ale poměr signálu elektronových neutrin ku signálu všech tří typů. V roce 2001 definitivně vyřešili „sluneční neutrinový skandál“ a prokázali, že třetinový tok neutrin ze Slunce v Davisově experimentu souvisel s oscilacemi neutrin.

Dnes se pozorují i oscilace neutrin z umělých zdrojů. Za všechny experimenty jmenujme CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) v CERN. Protony urychlené v urychlovači SPS jsou namířeny do útlumového členu, kde vznikají nabité piony a kaony, jejichž směr je možné ovlivnit magnetickým polem. Tyto částice se posléze rozpadají (především na mionová neutrina) a vzniklý svazek je směrován skrze Zemi do italské laboratoře pod horou Gran Sasso, kde jsou neutrina chytána například v detektoru OPERA. Jako jeden z mála detektorů je toto zařízení citlivé i na tauonová neutrina. V roce 2010 zde byla prokázána poslední hledaná oscilace – mionového neutrina na tauonové. Sběr dat probíhal v letech 2008 až 2012. Podle závěrečné zprávy z 22. května 2018 bylo vyhodnocením experimentu potvrzeno celkem 10 událostí, které jsou kandidáty na zachycení tauonového neutrina.



Topologicky neekvivalentní operace s obyčejným listem papíru. Kresba: Ivan Havlíček/Astropis.

2016 – topologické fáze látky

Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2016 získali David James Thouless, Duncan Haldane a Michael Kosterlitz za teoretický objev topologických fázových přechodů a topologických fází látky. David Thouless získal první polovinu ceny, Duncan Haldane a Michael Kosterlitz obdrželi polovinu druhou. Všichni ocenění pocházejí z Velké Británie a v současnosti pracují ve Spojených státech.

Fyzikální zákony jsou většinou lokální, tj. usuzují na změny systému z vlastností jeho bezprostředního okolí. Opačně postupuje topologie, tu zajímá chování množin jako celku. Dvě množiny považujeme za topologicky ekvivalentní, pokud lze spojitou deformací změnit jednu na druhou. Jako byste měli modelínu a směli ji libovolně stlačovat či natahovat. Například člověk je topologicky ekvivalentní s válcem, v jehož ose je válcová díra. Ta odpovídá trávicímu ústrojí (jeden konec průduchu koresponduje s ústy, druhý s konečníkem). Obyčejný

*David Thouless (*1934) se narodil v Anglii a vystudoval Cambridžskou univerzitu. Doktorské studium absolvoval na Cornellově univerzitě pod vedením Hanse Betheho. Působil v Anglii i v USA. Profesně se zabývá statistickými vlastnostmi dvourozměrných systémů, mřížovými modely, feromagnetiky, supravodivostí a fázovými přechody.*



Fázový přechod – *změna chování systému v závislosti na nějakém vnějším parametru, například teplotě nebo magnetickém poli. Rozlišujeme fázové přechody prvního druhu, při nichž se skokem mění vnitřní energie, hustota a další parametry (například tání ledu), a fázové přechody druhého druhu, u nichž se energie mění spojitě, ale skokem se mění až první derivace energie, například měrné teplo, susceptibilita atd. Typickým příkladem fázového přechodu druhého druhu je změna nemagnetického materiálu na feromagnetikum při Curieově teplotě, kdy se chaotická fáze mění na fázi s orientovanými Weissovými doménami.*

*John Michael Kosterlitz (*1942) se narodil ve skotském Aberdeenu. Vystudoval Cambridžskou univerzitu, doktorát získal na Oxfordu. Po studiích vystřídal několik míst v různých částech světa. Zabývá se fyzikou kondenzovaných stavů, jednorozměrnými a dvojrozměrnými spinovými systémy, mřížovými modely, spinovými skly a fázovými přechody v těchto systémech.*



hrneček z keramiky je ekvivalentní pneumatice, americké koblize nebo české bábovce (otvoru v oušku se spojitou deformací nezbavíte).

Zkusme experimentovat s obdélníkem z papíru, nebo raději z gumy či jiného snadno deformovatelného materiálu. Pokud v našem archu bydlí nějaké placaté bytosti, zjistí snadno, že jejich svět není neomezený, ale v každém směru má určitou hranici. Arch můžeme zdeformovat například na úzký pásek a z hlediska topologie jde stále o tutéž množinu, jejíž vlastnosti se nezměnily. Zcela jiný svět ale dostaneme, pokud do papíru vystřihneme kruhový otvor. Tady již nejde o spojitou deformaci, ale o brutální penetraci, která změní topologii naší množiny. Stejně tak, stočíme-li papír a slepíme jeho okraje, dostaneme útvar, který už není topologicky ekvivalentní s původním. Naše bytosti bydlící v takovém slepenci v jednom směru na žádnou hranici nenarazí a po určité době cestování se vrátí do původního místa. Dokonce můžeme papír nejprve zdeformovat na úzký pásek a při lepení jeho okraje otočit. Vznikne tak Möbiův pásek se zajímavými vlastnostmi. Zkrátka stříhání a lepení nepatří mezi spojité deformace a pomocí těchto operací vyrobíte nové objekty (množiny), které se od původních z hlediska topologie liší. Bytostem bydlícím v archu papíru pěkně zamotáte hlavu, pokud arch stočíte a protilehlé okraje slepíte. Budete-li pokračovat a arch zdeformujete dále tak, že slepíte i zbývající dvě hrany, dostanete útvar podobný povrchu pneumatiky (tzv. toroid). Od původního archu se liší jednak tím, že nemá žádné hrany, a jednak tím, že lepením vznikl uvnitř „pneumatiky“ otvor, který případným inteligentním obyvatelům přináší zcela nové a nebývalé možnosti.

Při fázových přechodech dochází ke změně chování látky. S tím jsou často spojeny změny symetrie a někdy i topologické změny. Představme si obyčejnou vodu. Ta má všesměrovou symetrii, žádný směr není preferovaný. Pokud budeme vodu ochlazovat, dojde při teplotě tuhnutí k jejímu fázovému přechodu na led. Krystalky ledu mají určitou preferovanou orientaci – při ochlazování došlo při fázovém přechodu k náhlé změně symetrie systému. Dobře patrné je to i u feromagnetik. Za vysoké teploty jsou jednotlivé spiny (elementární magnety) orientovány náhodně a systém má vysoký stupeň symetrie. Při ochlazení pod Curieovu teplotu dojde k vytvoření tzv. Weissových domén. V každé z nich jsou spiny orientovány stejně, ale sousední domény mají orientaci spinů odlišnou. V tomto případě došlo nejenom k degradaci symetrie původního systému, ale i ke vzniku domén oddělených tzv.

doménovými stěnami. Z hlediska topologie jsou tyto doménové stěny topologické defekty, které vznikly při fázovém přechodu.

James Thouless a Michael Kosterlitz v roce 1972 zjistili, že u některých typů 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. Přechod z vysokoteplotní fáze do této tzv. „soft " fáze se dnes nazývá Kosterlitzův-Thoulessův přechod. Michael Kosterlitz spolu s Duncanem Haldanem nalezli mj. metody popisu fázových přechodů, při nichž není narušení symetrie určující charakteristikou.

V periodicky uspořádaných látkách se mohou vyskytovat stavy, které nejsou topologicky převeditelné na jiné stavy (nazýváme je topologické stavy). Takové uspořádání může být velmi stabilní. V sedmdesátých letech 20. století za pomoci topologických stavů Kosterlitz a Thouless předpověděli existenci povrchové supravodivosti, při níž se po povrchu téměř beze ztrát přemisťuje elektrický náboj a spin.

Někteří vědci uvažují o tom, že při prudkém ochlazování raného vesmíru docházelo k řadě fázových přechodů, při nichž byla jednak narušována původní symetrie a jednak vznikaly topologické defekty. K nejznámějším defektům by měly patřit magnetické monopóly a kosmické struny. To, že nepozorujeme magnetické monopóly se zpravidla zdůvodňuje inflační fází expanze, při které měly být monopóly natolik od sebe vzdáleny, že v námi pozorovatelném vesmíru jich mohlo zůstat jen několik. Kosmické struny (nezaměňujte se strunami v teorii elementárních částic) by měly být lineární gravitační útvary, jakési hmotné nitě (cca deset kilometrů kosmické struny by mělo mít hmotnost jako Země), které se postupně rozpadají a přitom vznikají gravitační vlny. V dnešním pozorovatelném vesmíru by podle odhadů mohlo ještě přetrvávat asi 40 kosmických strun. Doposud ale nebyly nalezeny – buď jsou představy o jejich vzniku mylné, nebo je pozorovací technika zatím nedostačující.

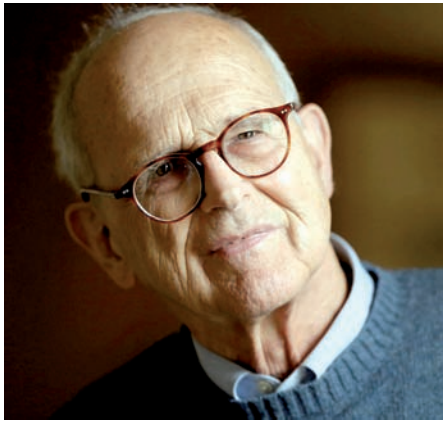
2017 – gravitační vlny

Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2017 získali Reiner Weiss (1/2), Barry Barish (1/4) a Kip Thorne (1/4). Cena jim byla udělena za rozhodující přínos pro konstrukci detektoru LIGO a pro zachycení gravitačních vln. Detekce gravitačních vln téměř přesně sto let od zveřejnění Einsteinovy obecné relativity bylo pro fyziky mimořádným svátkem, a tak



*Duncan Haldane (*1951) se narodil v Anglii a vystudoval Cambridžskou univerzitu. Pracoval v Institutu Laueho a Langevina (Francie), poté na Jihokalifornské univerzitě v USA. Zabývá se jednodimenzionálními a dvojdimenzionálními spinovými systémy a narušením symetrie při fázovém přechodu. Haldane vyvinul zcela nový popis zlomkového Hallova jevu za pomoci topologických metod.*

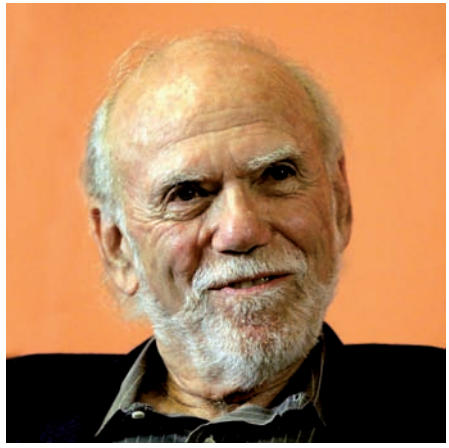
*Reiner Weiss (*1932) se narodil v Německu, odkud jeho židovská rodina uprchla do Prahy a poté do Spojených států, kde Weiss vystudoval a prožil většinu profesního života. Podílel se na vývoji družice COBE a jako první změřil spektrum reliktního záření. Podílel se na přípravě a provozu detektoru gravitačních vln LIGO. U obou projektů se stal klíčovou postavou. Je vynálezcem laserové interferometrie, na níž je experiment LIGO založen.*





*Kip Stephen Thorne (*1940) je americký teoretický fyzik, zabývá se teorií gravitace, astrofyzikou a kosmologií. Je expertem na aplikace obecné relativity v astrofyzikálních problémech. Studoval na Caltechu a v Princetonu. Thorne je pedagogem, který vychoval generace fyziků. Je duchovním otcem interferometrických detektorů gravitačních vln, stál u zrodu detektorů MARK a LIGO.*

*Barry Clark Barish (*1936) je americký fyzik narozený v Nebrasce. Fyziku vystudoval na Kalifornské univerzitě v Berkeley. Po studiích připravoval na Caltechu částicové experimenty pro Fermilab. Byl ředitelem experimentu MACRO v italské podzemní laboratoři Gran Sasso a později ředitelem projektu mezinárodního lineárního urychlovače ILC. Od roku 1994 se věnoval i projektu LIGO, kde byl jmenován ředitelem v roce 1997.*



byla Nobelova cena za tento počin očekávána. Objev gravitačních vln byl ale oznámen v únoru 2016 a pravidla udělování Nobelových cen požadují, aby byly nominace podány do konce ledna daného roku, což nebylo v tomto případě možné splnit. Proto byla Nobelova cena za objev gravitačních vln udělena až v roce 2017.

Problematice gravitačních vln je věnován celý „bonus“ v závěru druhé kapitoly, proto se o jejich detekci, která se stala symbolem technologických možností naší doby, zmíníme jen velmi stručně. Pozorování relativní změny vzdálenosti o hodnotě 10^{-21} a měření polohy koncových zrcadel detektorů LIGO a VIRGO s přesností tisíckrát vyšší, než je rozměr protonu, je mistrovským kouskem dnešní generace fyziků a inženýrů. Otevřel se nám zcela nový pohled do vesmíru, nový svět, který nikdo před námi ještě nespatřil. První detekce sloučení dvou černých děr byla něčím neuvěřitelným. Poprvé jsme detekovali gravitační vlny, poprvé jsme viděli splynout dvě černé díry, poprvé jsme pozorovali černé díry středních hmotností. Pak přišla v létě 2017 detekce kilonovy, exploze, která byla důsledkem sloučení dvou neutronových hvězd, a obličeje fyziků opět ovládl údiv nad soudobými možnostmi. Kilonova byla prvním skutečně „mnohobarevným“ pozorováním. Jev bylo možné spatřit v gravitačních vlnách a současně ve většině oborů elektromagnetického spektra. Lze se jen těšit, že časem budeme pozorovat i jiné jevy doprovázené emisí gravitačních vln. K tomu bude ale třeba precizního seřízení stávajících detektorů (jejich kvalita se neustále zlepšuje) a bude také nutné postavit detektory větších rozměrů, které budou schopny zachytit i gravitační vlny s delší vlnovou délkou.

Otevření gravitačního okna je počátkem nové gravitační fyziky. Detektory typu LIGO mají maximální citlivost v oblasti stovek hertzů a nemají chlazená zrcadla. V současnosti se v Japonsku staví detektor KAGRA (*KAmioka GRAvitational Wave Detector*). Jde o detektor stejného typu jako je LIGO či VIRGO se dvěma kolmými rameny, která budou dlouhá tři kilometry. Detektor se buduje v podzemním tunelu a jako první detektor tohoto druhu bude mít kryogenní (chladicí) systém. Existují ale i další způsoby detekce gravitačních vln. Sledují se signály z vybraných pulzarů, v nichž by se gravitační vlny mohly projevit, připravuje se obří vesmírný interferometr eLISA a hledá se podpis reliktních gravitačních vln v reliktním záření. Gravitační vlny jsou dalším nástrojem k pozorování jevů ve vesmíru a před našima očima se stávají součástí observační astronomie.

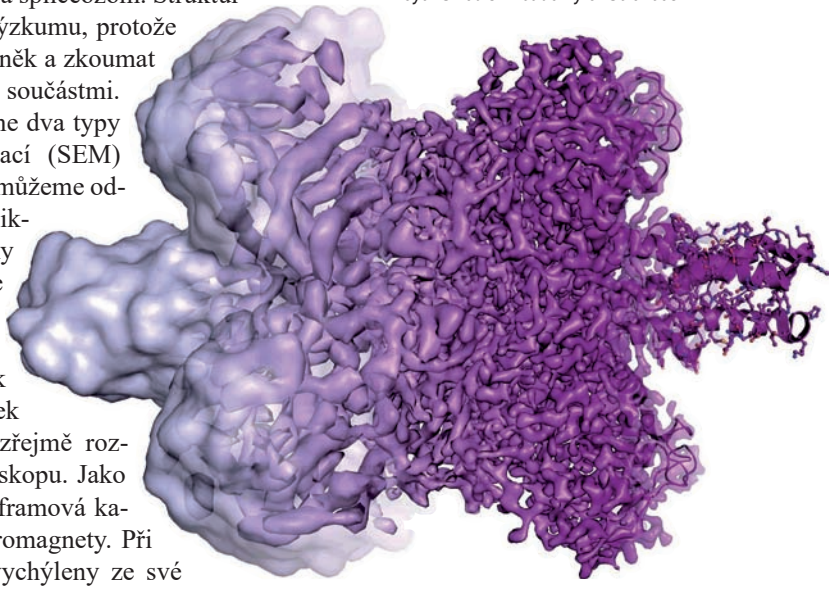
2017 – kryo-elektronová mikroskopie

Pokud nadšeně sledujete udílení Nobelových cen, možná víte, že jedna cena za elektronovou mikroskopii již udělena byla. V roce 1968 ji za fyziku získal Ernst Ruska za vynález elektronového mikroskopu. V roce 2017 byla udělena Nobelova cena za chemii třem vědcům, kteří se podíleli na rozvoji této technologie a jejího „podoboru" kryo-elektronové mikroskopie. To, že za tento typ zobrazování molekul byly uděleny již dvě Nobelovy ceny, naznačuje, o jak významný objev se jedná. A pokud jste stále na pochybách, stačí se podívat na statistiku databáze struktur PDB (*Protein Data Bank*). Běžným světelným mikroskopem můžeme dosáhnout rozlišovací schopnosti do řádu mikrometrů. Lze tak pozorovat jednotlivé organely či buňky. Pro větší rozlišení je nutné použít kratší vlnové délky – například elektrony. Ty nám pak umožňují zobrazovat objekty s rozlišením až v řádu nanometrů. V těchto rozměrech se již pohybují třeba délky vazeb mezi jednotlivými atomy. Schopnost vidět molekuly a jejich struktury prostřednictvím elektronového mikroskopu posunulo biology a chemiky blíže k porozumění, proč a jak proteiny a molekuly fungují. Od počátků elektronové mikroskopie jsme již rozluštili struktury proteinů, DNA, RNA i všelijakých komplexů, jako je například ribozom a spliceozom. Strukturní informace se stala zásadní částí výzkumu, protože nám dovoluje nahlédnout do nitra buněk a zkoumat vazby a dynamiku mezi jednotlivými součástmi.

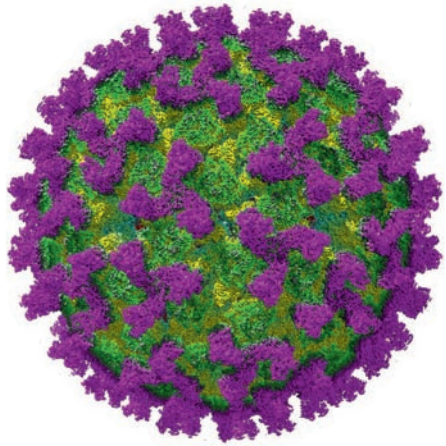


*Jacques Dubochet (*1942) je švýcarský biofyzik, který vystudoval Polytechnologickou univerzitu v Lausanne. Pracoval na Ženevské univerzitě a poté v Evropské laboratoři molekulární biologie (EMBL) v Heidelbergu. Nakonec se vrátil do Lausanne, kde působil až do odchodu do důchodu. Jeho hlavním přínosem byla nová metoda přípravy vzorků – vitrifikace.*

Vývoj rozlišení elektronové mikroskopie od roku 2013 (nalevo) do roku 2017 (napravo). Zdroj: Martin Högbom, Royal Swedish Academy of Sciences.

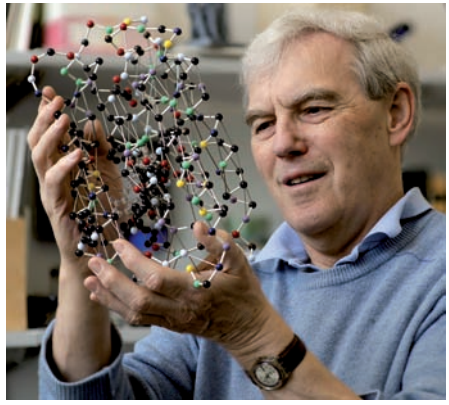


V základním rozdělení rozlišujeme dva typy elektronových mikroskopů: skenovací (SEM) a transmisní (TEM). Již podle názvu můžeme odhadnout jejich funkci. Skenovací mikroskop používá zpravidla větší vzorky potažené kovovou vrstvou a skenuje jejich povrch. Transmisní mikroskop funguje obdobně jako světelný mikroskop a vzorek musí být natolik tenký, aby jím elektronový paprsek prošel (maximálně 100 nm). Samozřejmě rozdíl najdeme v samotné stavbě mikroskopu. Jako zdroj elektronů slouží nejčastěji wolframová katoda a místo čoček zde budou elektromagnety. Při průchodu vzorkem jsou elektrony vychýleny ze své



Obrázek viru katarální horečky ovcí pořízený kryo-elektronovou mikroskopií. Zdroj: UCLA.

*Richard Henderson (*1945) je skotský fyzik a molekulární biolog. Fyziku studoval na Edinburghské Univerzitě. Už jako student pracoval v Laboratoři molekulární biologie v Cambridgi. V postgraduálním studiu na Yaleově univerzitě se začal věnovat membránovým proteinům. Po návratu do Cambridge začal využívat elektronový mikroskop pro zobrazování proteinů a poté se věnoval elektronové mikroskopii jediné molekuly.*



dráhy atomy vzorku. Takto odchýlené elektrony zachytí clona. Zbytek paprsku pak putuje na detektor, kde je zachycen. Následně lze pomocí výsledného obrazu zrekonstruovat původní objekt. V případě skenovacího mikroskopu naopak detekujeme takto odražené elektrony (sekundární a zpětně odražené).

Před příchodem kryo-elektronové mikroskopie se molekuly zobrazovaly (a stále nejčastěji zobrazují) pomocí rentgenové krystalografie, kdy se vzorky připravují krystalizací sledovaných molekul. Právě krystalizace biologických materiálů je často velmi obtížná. Neexistuje žádný postup či příručka, která by pomohla objasnit podmínky, při kterých daná molekula či komplex bude krystalizovat. Často se tedy zkouší různorodé podmínky, dokud se krystalizace nepodaří. To je obzvláště problematické u komplexů nebo proteinů, které jsou méně uspořádané a jejich krystalizace je tak obecně složitá. I pokud získáme krystal, každý si asi dovede představit, že přirozené prostředí v nitru buňky není nikterak podobné krystalové mřížce. Pro pozorování molekul blíže přirozenému stavu se stále více využívá kryo-elektronové mikroskopie nebo nukleární magnetické rezonance. Využití rychlého zmražení pro přípravu preparátů se přímo nabízí. Vzorek se zamrazí při extrémně nízké teplotě, a nemá čas se poškodit nebo degradovat.

Samozřejmě se ani tomuto typu zobrazení nevyhnou různé nešvary. Při bombardování vzorku svazkem elektronů dochází k jeho rychlému znehodnocení. V počátcích proto bylo nutné používat slabší elektronový svazek. V roce 1990 skotský fyzik a biolog Richard Henderson prolomil nanometrovou škálu. Dokázal tak, že kryo-elektronová mikroskopie může konkurovat rentgenové krystalografii. Henderson byl schopen takto zobrazit bakteriorhodopsin s využitím podobných matematických postupů jako při rentgenové krystalografii. To bylo možné proto, že bacteriorhodopsin je membránový protein, a tak má většina molekul stejnou či podobnou orientaci.

Dalším úkolem kryo-elektronové mikroskopie proto bylo zobrazení molekul v roztoku. Jak získat obraz molekuly, která se vyskytuje ve vzorku v mnoha kopiích v rozličných orientacích? Na tuto otázku odpověděl německý biochemik Joachim Frank. Frank využil různých úhlů, ve kterých se daná molekula vyskytuje při detekci. Vyvinul matematickou metodu, která oddělí jednotlivá proteinová zobrazení od pozadí, seskupí je podle podobnosti a jejich průměrný obraz zkombinuje do trojrozměrného obrazu původního objektu.

Třetí zásadní oblastí pro rozvoj kryo-elektronové mikroskopie je samotná příprava vzorků, což není jednoduchý úkol. Díky tomu, že celý vnitřek mikroskopu je ve vakuu, dochází k odpařování vody. Henderson při svých pokusech používal roztok sacharózy, aby zabránil vyschnutí vzorků. Tento postup lze však použít pouze pro membránové proteiny. Švýcarský biofyzik Jacques Dubochet přišel s použitím procesu vitrifikace (prudké ochlazení, při němž nedojde ke krystalizaci, ale zesklovatění). Toho lze dosáhnout rychlým zmražením v tekutém dusíku, který má teplotu –196 °C. Vitrifikací se příprava vzorků enormně zrychlila a zefektivnila.

Díky kryo-elektronové mikroskopii dnes můžeme pozorovat molekuly v různých stádiích jejich dynamiky. Při rychlém zmražení můžeme zobrazit naše vzorky „v akci" a podívat se na několik stádií různých reakcí a poodkrýt tak dynamiku mezi jednotlivými buněčnými komponentami. Můžeme zobrazit struktury celých virů či malých proteinů v rozlišení detailnějším než 10^{-10} m. Každým rokem se tyto metody posouvají k vyššímu a lepšímu rozlišení a do budoucnosti snad můžeme doufat v až rutinní sledování tvorby molekulárních struktur.

■ **Radek Beňo, Petr Kulhánek, Lucie Kulhánková, 2014–2018**



*Joachim Frank (*1940) je německý biochemik a molekulární biofyzik. Studoval na univerzitě ve Freiburgu, na Mnichovské univerzitě a doktorát získal v Institutu Maxe Plancka. Pracoval na Caltechu, Kalifornské univerzitě, Berkelejské univerzitě, v Cambridgi, ve Wadsworthově centru v New Yorku a na Kolumbijské univerzitě. Je autorem metody pro 3D analýzu molekulárních struktur.*



VI. TECHNOLOGIE

Plastové úložiště dat

bit – *základní jednotka informace, která nabývá dvou hodnot (ano/ne), (0/1), (pravda/nepravda) atd. Násobnou jednotkou je kilobit označující 2^{10} = 1024 možností.*

byte – *bajt, jednotka informace, která označuje osm bitů, tj. osmiciferné binární číslo. Takové množství informace může reprezentovat například celé číslo od 0 do 255 nebo jeden znak abecedy. Jeden byte je obvykle nejmenší objem dat, se kterým dokáže procesor přímo pracovat. Větší jednotky: kilobajt (kB, 2^{10} = 1024 bytů), megabajt (MB, 1024*1024 bytů), gigabajt (GB, 1024^3 bytů), terabajt (TB, 1024^4 bytů).*

Růžový shluk ve spodní části testovací trubice je DNA, do níž společnost Microsoft zakódovala 200 megabajtů dat. Foto: Tara Brown/Washington University.



Každý, kdo používá internet, si jistě všímá, že doba, kdy převládaly zprávy, novinky a odborné články, je dávno pryč a možná se i zamýšlí nad tím, že dnes, kdy je na Všesvětové Síti kdekým umisťován i sebevětší nesmysl, pomalu nastává a v budoucnu nastane problém, kam všechna ta data umístit. Reza Zadegan ze Státní univerzity v Idahu se zabývá novými možnostmi uchovávání datových souborů a tvrdí, že vzhledem k tomu, že všechna světová data rostou rychleji než velikost úložišť, by kolem roku 2040 byl potřebný prostor křemíkových čipů plošně srovnatelný s velikostí menšího státu – například s Maltou.

Od DNA k plastům

Reza Zadegan je jedním z mnoha, kteří hledají nové cesty uchovávání dat. Jednou z možností je uložení informací v DNA. Již v roce 2010 se týmu pod vedením George Churche z Wyssova institutu Harvardovy univerzity podařilo zakódovat knihu obsahující 53 400 slov, 11 obrázků a program v JavaScriptu (dohromady zhruba 5 milionů bitů dat) právě do sekvencí DNA. DNA tak ukázala, že je možné v malém objemu uchovat miliony bitů informací. Jenže DNA je křehká a není úplně jednoduché na ni zapisovat a následně z ní číst. Technologii uchovávání dat v molekulách DNA v současnosti intenzivně zkoumají na Washingtonské univerzitě a ve výzkumu vidí velkou budoucnost společnost Microsoft, která s univerzitou úzce spolupracuje. V roce 2016 se jim podařilo do DNA vláken uložit videoklip o velikosti 200 MB.

Jinou cestou se vydal Jean-François Lutz z Institutu Charlese Sadrona ve francouzském Štrasburku. Začal experimentovat s řetězci tvořenými molekulami plastů. Do nich lze zakódovat informace obdobně jako do vláken DNA. Výzkumníci zakódovali text do krátkých řetězců molekul polymeru. Mohl by to být způsob, jak prostorově úsporně uložit množství údajů nebo například odhalit padělané zboží.

Řetězce polymerů mohou sloužit jako 0 nebo 1 digitálního počítačového kódu. Při předchozích výzkumech byla data ukládána v jednotlivých dlouhých řetězcích, které však bylo s jejich rostoucí délkou stále obtížnější číst. Lutzův tým zvolil jiný přístup. Namísto ukládání informací do dlouhých řetězců začali vytvářet knihovnu z velmi krátkých řetězců. Jako příklad zapsali akronym CNRS, zkratky francouzského Národního centra pro vědecký výzkum, s použitím šesti poly-

merů, tedy 32bitovou zprávu při kódovaní pomocí standardních ASCII znaků. Zprávu ukládali řazením řetězců postupně narůstajících délek a četli ji tak, že nejprve roztřídili řetězce od nejkratšího po nejdelší s pomocí hmotového spektrometru a poté je sekvenovali, tj. zjišťovali pořadí jejich jednotlivých molekul. Více řetězců kratších než nanometr lze snadněji kontrolovat než jeden dlouhý. Informace je pak uchovávána v různém pořadí řetězců různých délek.

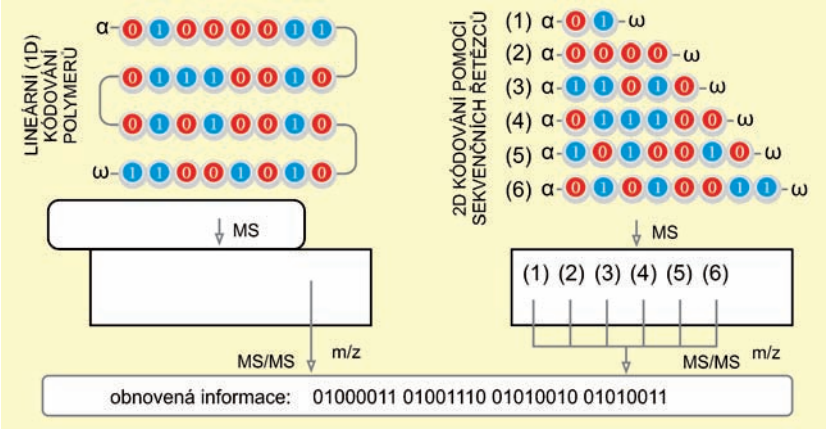
Pro ukládání velkých množství informací a rozsáhlých knihoven řetězců bude nutné zlepšit současné technologie. Zápis dat by šel urychlit tak, že by řetězce byly syntetizovány paralelně a ne jeden po druhém. Přestože zapisování a čtení těchto polymerů je v současné době nákladné, máme pro tyto technologie smysluplné využití. Vložení kódovaných polymerů do drahých elektronických zařízení nebo uměleckých děl může sloužit jako identifikační štítek tvůrce nebo majitele. Přečtení vzorku řetězců molekul poslouží vyšetřovatelům k odhalení původu výrobků nebo uměleckých děl a pomůže jim najít padělky a kradené zboží.

Binární násobky – *ve výpočetní technice se z technických důvodů používají paměti o velikostech rovných násobkům dvou. Při označování velikostí se vžily předpony používané v SI (kilo, mega, giga, tera). Ty však v tomto kontextu nejsou dekadické. Pro rozlišení v textu by se názvy měly správně doplňovat o malé písmeno i a psát jako kibi (KiB, 2^{10}), mebi (MiB, 2^{20}), gibi (GiB, 2^{30}) a tebi (TiB, 2^{40}). V praxi to ale dělá málokdo.*

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.*

Co dál?

Reza Zadegan, který se uchováváním dat do polymerových řetězců zabývá, tvrdí, že oba způsoby – jak pomocí DNA, tak pomocí syntetických molekul umožní v budoucnosti snížit objem datových úložišť. U vznikajících technologií je podstatné to, že není nutné pro syntetizaci polymerů používat pouze řetězce dvou různých délek, tedy chemickou náhradu digitální 0 a 1, ale polymery lze syntetizovat z více druhů molekul, tj. kód by již nemusel být „digitální“, ale skládat se z více „písmen“. Může se stát, že se plasty stanou základem pro novou plastovou molekulovou abecedu a jednoho dne náš pevný disk bude jen hromádkou plastu a špioni budou informace převážet zapsány přímo v karoserii svých trabantů.



Srovnání zápisů do jednoho dlouhého řetězce a do sekvencí řetězců různých délek, který použil Lutzův tým. Zdroj: CNRS.

■ David Břeň, 20. 1. 2017, AB 3/2017

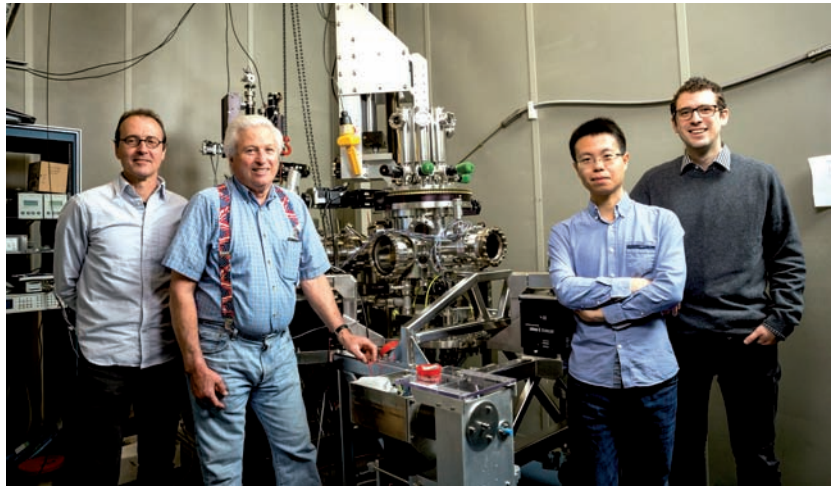
Jeden bit, jeden atom

Rastrovací tunelový mikroskop – *STM (Scanning Tunneling Microscope), zařízení založené na tunelovém jevu, které umožňuje zobrazit povrch pevné látky v rozlišení jednotlivých atomů. Povrch je doslova osahán piezoelektricky vychylovaným wolframovým hrotem, z něhož tunelují elektrony k povrchu, a přitom se měří vzniklý tunelový proud. Ve směru povrchu je rozlišení řádově 10^{-10} m, v kolmém směru k povrchu je 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. Je to nejostřejší hrot, jaký dokážeme vyrobit. Rastrovací tunelový mikroskop umožňuje nejenom zviditelnit polohu atomů na povrchu krystalové mříže, ale také je přenášet z místa na místo, když se pomocí přiloženého napětí překoná chemická vazba s povrchem a atom se hrotem mikroskopu přenese.*

V dnešní digitální době, kdy je nutné ukládat stále více a více dat, je také potřeba rozšiřovat naše úložiště. Již dávno nežijeme v době, kdy nám stačila 3,5-palcová disketa, na kterou jsme mohli nahrát 1,44 MB dat (to by mimochodem nestačilo ani na fotografii pořízenou dnešními chytrými telefony). Dnes se dostáváme do situace, kdy je potřeba vyrábět co nejmenší paměťová média s co největší úložnou kapacitou. Vědcům z IBM se v tomto oboru podařil skutečně revoluční kousek: zvládli uložit 1 bit do jednoho jediného atomu. Pro srovnání uveďme, že dnešní pevné disky používají na zápis jednoho bitu přibližně 100 000 atomů.

Jak se ukládají data na pevný disk?

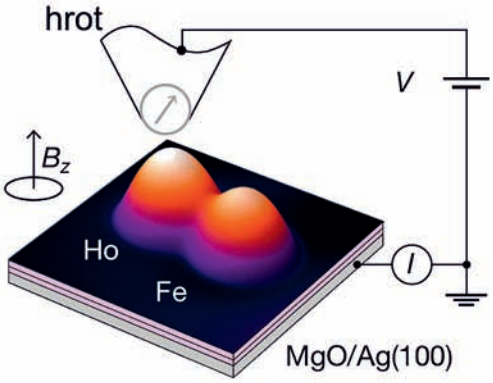
Abychom se mohli podívat, jakým způsobem „zápis na atom“ funguje, pojďme nejdříve prozkoumat, jak fungují tzv. magnetická datová média, například pevné disky. Princip ukládání dat pomocí magnetizace je stále stejný. Pro ukládání do datových médií se používají bity. Bit je nejmenší datová jednotka, pod kterou si můžeme představit hodnotu 1 nebo 0. Dále pak existuje bajt (B), což je označení pro 8 bitů, například 10100101. Následně se používají standardní fyzikální předpony kilo, mega, giga atd. Pro příklad si uveďme, že standardní fotografie má velikost okolo 5 MB, což je přibližně 40 milionů bitů. Pro ukládání takových dat se běžně používají pevné disky. V dnešní době se rozmáhají SSD disky, ty však nemají s technologií, která nás zajímá, příliš společného, proto se podíváme na princip stále používaných rotujících pevných disků (HDD).

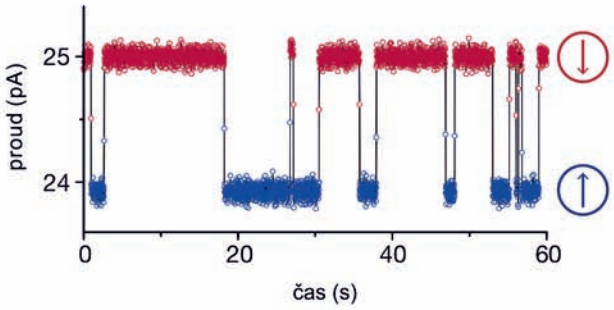


Vědecký tým z IBM, kterému se podařilo zapsat informaci na jeden jediný atom. Zleva doprava: Chris Lutz, Bruce Melior, Kai Yang, Philip Willke. Zdroj: IBM.

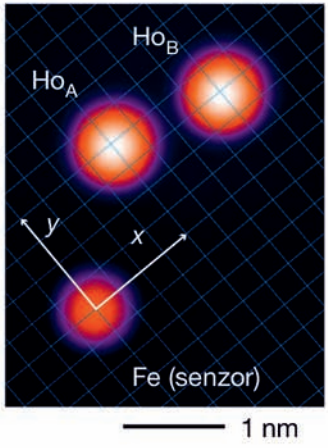
Každé magnetické datové médium se skládá ze dvou hlavních částí: čtecí/zapisovací hlavy (v dnešních HDD jich bývá víc) a magnetizačního média. U pevného disku se jedná o tenkovrstvý feromagnetický materiál, který je

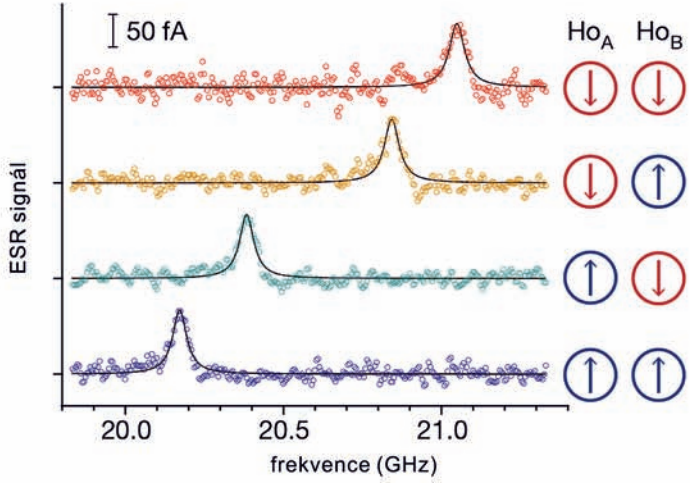
EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ A MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO STAVU ATOMU HOLMIA





EXPERIMENT S DVĚMA ATOMY HOLMIA A JEDNÍM KONTROLNÍM ATOMEM ŽELEZA





Zeemanův jev – *štěpení energetických hladin atomů vlivem přítomnosti magnetického pole. Jde o skupinu hladin, které bez přítomnosti magnetického pole mají stejnou energii (tzv. degenerovaná energetická hladina). V přítomnosti magnetického pole mají jednotlivé hladiny již nepatrně odlišnou energii, která vede k rozštěpení jedné spektrální čáry na více čar.*

SSD – *Solid State Drive, datové médium, které neobsahuje pohyblivé součástky. Existuje několik technologií přípravy takových médií, k nejznámějším patří tzv. flash paměti.*

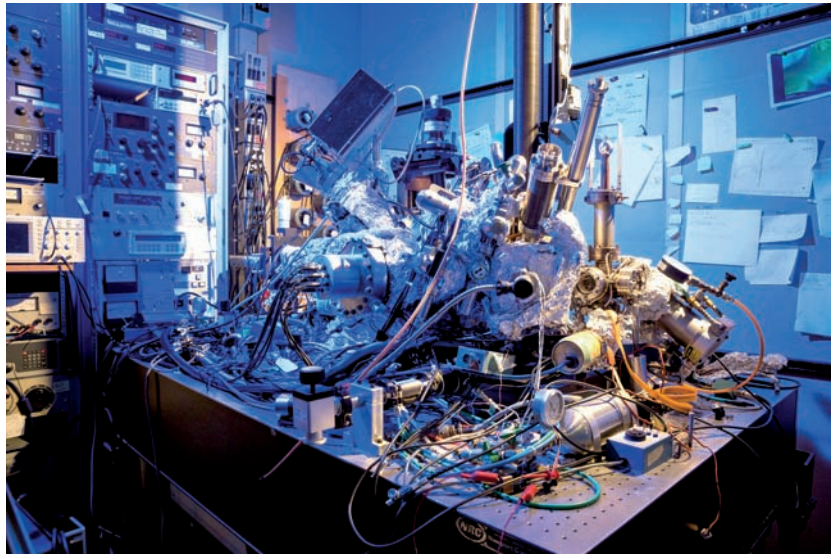
HDD – *Hard Disk Drive, pevný disk. Zařízení k uchování většího množství dat formou magnetického zápisu. Zápis i čtení probíhá pomocí hlav pohybujících se nad magnetickým médiem. První pevný disk se objevil v roce 1956. Dnešní komerčně prodávané disky pojmou mnoho terabajtů dat.*

nanesen na diskovém kotouči v několika nanovrtsvách. Tento materiál lze pomocí zapisovací hlavy zmagnetizovat tak, že se vytvoří takové magnetické domény, které jsou natočeny v jednom, nebo v druhém směru. Pomocí čtecí hlavy je možné měřit magnetické pole, které tyto domény vytvářejí, a následně určit orientaci těchto domén. Ke čtení i k zápisu se v současnosti využívá jevu obří magnetorezistence (viz heslo na str. 270). Využití této technologie vedlo po roce 1997 ke zmnohonásobení kapacity harddisků.

Jak se ukládají data na jeden atom?

Experiment vědců z IBM lze rozdělit do tří fází: příprava úložného prostoru, zápis a čtení dat a nezávislé ověření, že se atom skutečně zmagnetizoval v jednom, nebo ve druhém směru. Jako úložné médium byl zvolen vzácný atom holmia (Ho), který byl nanesen na destičku oxidu hořečnatého (MgO). Pro ověření, zda se skutečně jednalo o jediný atom holmia, byla použita speciální mapovací technika – rastrovací tunelový mikroskop (STM, Scanning Tunneling Microscope). Pomocí této metody byl zmapován povrch a bylo ověřeno, že je nanesen jediný atom holmia. Atom holmia je velice těžké udržet zmagnetovaný. Je nutné ochladit ho na teplotu 40 kelvinů (–233,15 °C), a tím zajistit stabilitu jeho magnetizace. Proto je celý experiment prováděn ve speciální komoře, která je na tuto teplotu vychlazena.

Fotografie rastrovacího tunelového mikroskopu, která byla pořízena dne 28. 2. 2017 ve výzkumném kampusu IBM v San Jose. Foto: Stan Olszewski pro IBM.



V druhé fázi experimentu použili vědci jako čtecí/zapisovací hlavu hrot z rastrovacího tunelového mikroskopu. Při obou operacích byla využívána obří magnetorezistence – závislost elektrického odporu na intenzitě magnetického pole. Princip čtení je tedy následující: čtecí hlavou, která je umístěna v blízkosti zmagnetovaného atomu, teče elektrický proud, který se mění v závislosti na orientaci spinu (magnetického momentu) zmagnetovaného atomu. Změna protékají-

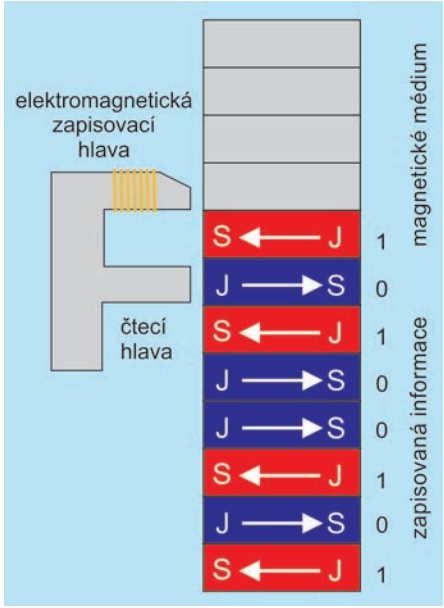
cího proudu je v řádu 2 až 4 %, což odpovídá změně velikosti proudu přibližně o jeden miliampér. Tuto změnu velikosti proudu je možné spolehlivě změřit. Pro zápis se používají krátké napěťové pulzy, které jsou větší než 150 mV. Pakliže se změní orientace magnetizace, dojde ke změně protékajícího proudu. Tím je prokázána změna magnetizace atomu a dosažení požadovaného stavu.

Poslední fází experimentu bylo nezávislé ověření, že se magnetické pole v okolí atomu holmia skutečně mění v závislosti na orientaci jeho spinu. K tomu slouží atom železa, který je umístěn v blízkosti atomu holmia. Při nenulovém externím magnetickém poli dochází u atomů železa k Zeemanově jevu – rozštěpení energetických hladin. K jeho vyvolání využili vědci externí pole o velikosti 100 mT, při kterém ke štěpení hladin již zřetelně dochází. Pokud přiblížíme hrot z rastrovacího tunelového mikroskopu a použijeme střídavý signál, jsme schopni odhalit rezonanční frekvence, které odpovídají jednotlivým energetickým hladinám. Tato fyzikální metoda se nazývá elektronová spinová resonance rastrovacího tunelového mikroskopu (ESR-STM). Je-li velikost magnetického pole změněna vlivem působení pole zmagnetizovaného atomu holmia, dochází k posunu resonanční frekvence, kterou jsme schopni metodou ESR-STM detekovat. Vědci touto metodou změřili, že velikost změny magnetického pole způsobená zmagnetovaným holmiem je (10,1 ± 0,1) násobek elementárního magnetického kvanta (Bohrova magnetonu). To odpovídá změně rezonanční frekvence o 947 MHz.

Týmu z IBM se povedl i další experiment, při němž použili dva atomy holmia. Na obrázku (str. 295) můžeme vidět, že se podařilo detekovat posun rezonanční frekvence pro všechny čtyři možné kombinace magnetizace. Technicky jsme tedy schopni uložit i dva bity informace.

Vědci z IBM prokázali, že je možné magnetizovat jednotlivé atomy. Tím se otevírají zcela nové možnosti pro paměťová média. Pro představu můžeme uvést, že na pevný disk o velikosti kreditní karty by se vešla celá knihovna iTunes, která má více než 30 miliónů písniček. Kdy se budou paměťová média na principu „*1 bit – 1 atom*“ konstruovat komerčně, nejsme zatím schopni říct, ale určitě se máme na co těšit.

■ Jakub Jirsa, 7. 4. 2017, AB 10/2017



Princip zápisu a čtení elektromagnetickou hlavnou na magnetické médium. Zdroj: Computer Hope.

Měření tvaru letící střely

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. Analogií v radiovém oboru jsou radary. Vzdálenost objektu se určí z časové prodlevy odraženého signálu. Lidary se využívají hojně v geologii, seismologii a při sledování vlastností atmosféry.*

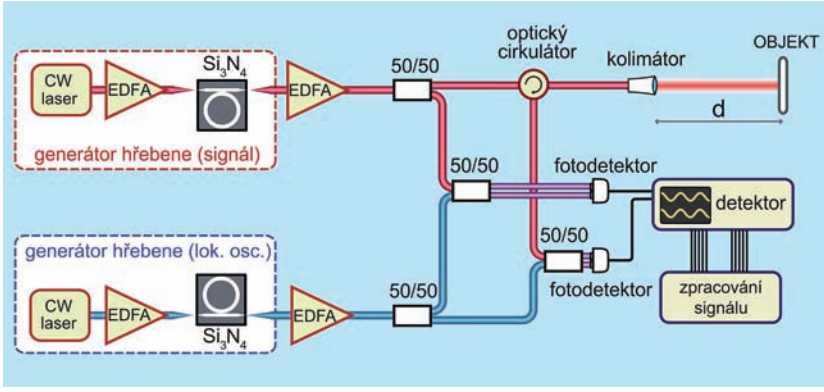
KIT – *Karlsruhe Institute of Technology, jedna z největších výzkumných univerzit v Německu. Vznikla v roce 2009 sloučením Karlsruhské univerzity (1825) a Karlsruhského výzkumného centra (1956). Z KIT a jejích předchůdců vzešlo šest nositelů Nobelových cen. Podle citačního indexu jde o šestou nejvýznamnější evropskou univerzitu. Příkladem aktivit může být spektrometr KATRIN, který se pokouší změřit hmotnost neutrin.*

Heterodynní detektor – *detekce intenzity i fáze elektromagnetického signálu založená na jeho smísení se signálem lokálního oscilátoru (heterodynu), jehož záření má stejný směr jako signál a pevně danou známou frekvenci.*

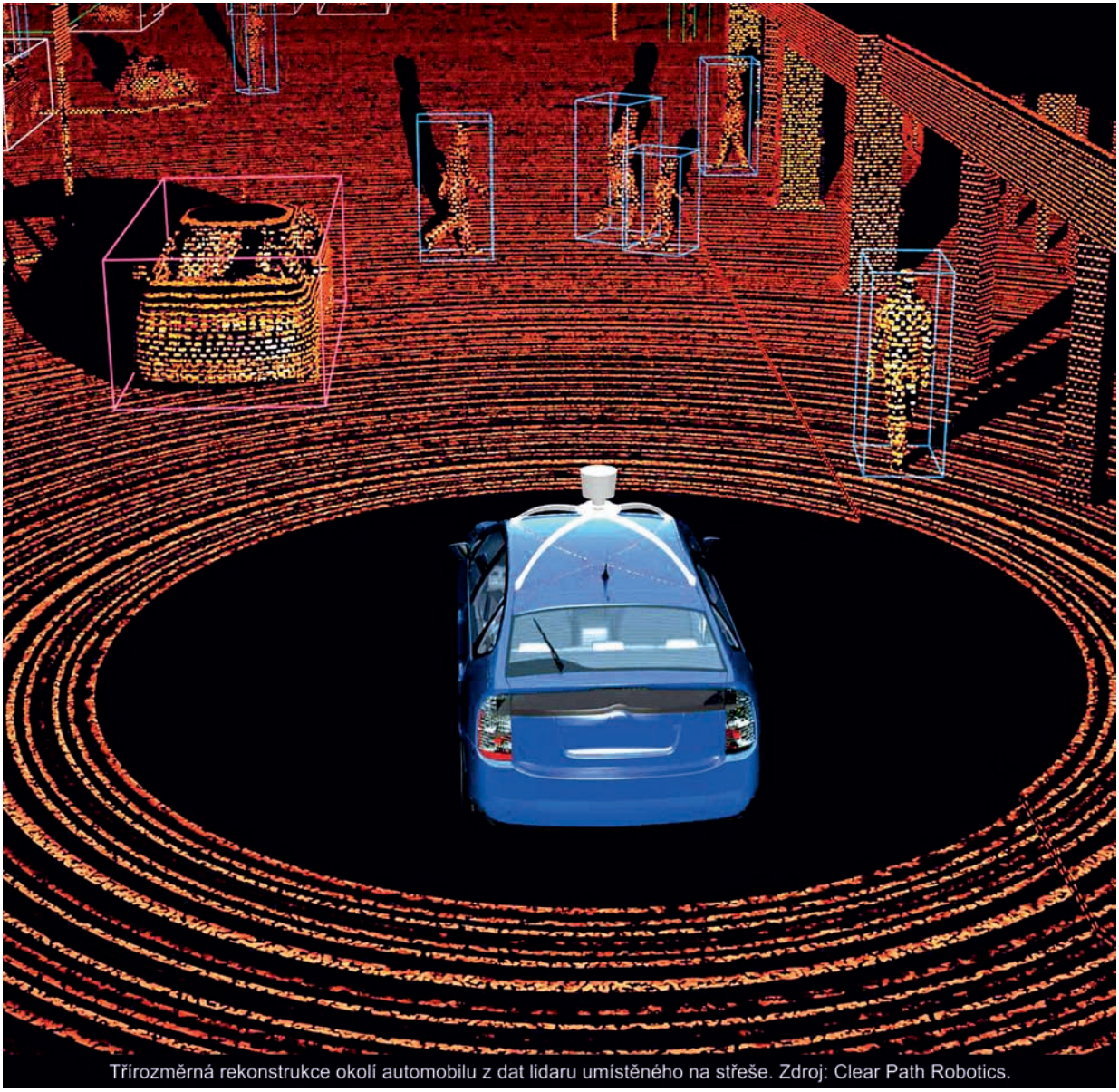
Měření vzdálenosti je nedílnou součástí našeho všedního života. Každý den měříme různé vzdálenosti – o kolik centimetrů vyrostly naše ratolesti, jaké rozměry má nábytek, nebo velikosti místností, chceme-li je pronajmout. Pro tato měření nám stačí běžné měřicí přístroje (nejčastěji metr). Co když chceme měřit vzdálenosti s malou nejistotou, a to při vysokých rychlostech? Zde se situace značně komplikuje díky času, který máme na samotné měření k dispozici. Proto se často využívá technologie LIDAR, která umožňuje provádět rychlá a přesná měření. Za pomocí laseru se osvítí objekt, jehož vzdálenost chceme znát. Následně je možné detekovat paprsek odražený od objektu. Výslednou vzdálenost objektu zjistíme následovně: rychlost světla v daném prostředí vydělíme časem, který uplynul mezi vysláním a detekcí fotonů. Dráha je díky tomu dvojnásobná, musíme ji tedy vydělit dvěma. Systémy LIDAR se hojně využívají jak pro vědecké účely (mapování atmosféry, geologie atd.), tak v komerční sféře (řízení autonomních aut, průmyslová měření atd.). Zde je kladen důraz na přesná a rychlá měření. Husarský kousek provedli vědci z Karlsruhského institutu technologií (KIT), kterým se povedlo sestavit systém umožňující změřit polohu objektů pohybujících se rychlostí 150 m/s s rozlišením 2 μm.

Dvojitý frekvenční hřeben

Optický frekvenční hřeben je systém, který má ve svém spektru miliony ekvidistantních čar. V časové oblasti tomu odpovídá interference mnoha signálů s různou frekvencí. Optický frekvenční hřeben lze realizovat několika způsoby. Jednou z hojně využívaných metod je použití laseru, který generuje ultra krátké pulzy (femtosekundy až desítky pikosekund). Jestliže takový laser generuje pulzy s určitou frekvencí a různou intenzitou, lze vygenerovat takový signál, který má ve frekvenční oblasti hřebenové spektrum. V mnoha aplikacích (spektroskopie, měření vzdáleností



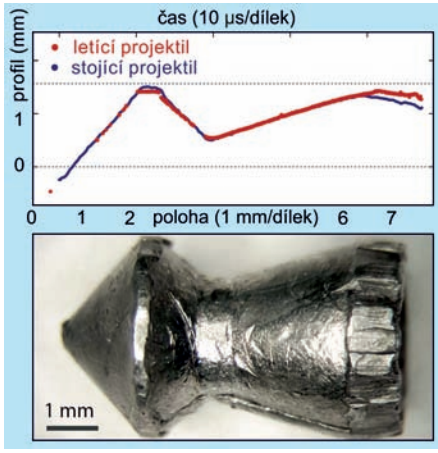
Měřicí systém. Optický cirkulátor je zařízení, které vstupující svazek vyšle ven na nejbližším dalším výstupu. Erbiový zesilovač je označen EDFA, kontinuální laser písmeny CW (Continual Wave). Zdroj KIT.



Třírozměrná rekonstrukce okolí automobilu z dat lidaru umístěného na střeše. Zdroj: Clear Path Robotics.

Erbiový zesilovač – *EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier, vláknový zesilovač elektromagnetického signálu dopovaný erbiem. Zeslabený signál z optického vlákna je smísen se silným signálem jiné frekvence, který excituje erbiové atomy v zesilovači. Tyto excitované atomy předají energii zeslabenému signálu a poté se vrátí na původní energetickou hladinu. Jde o přímé zesílení signálu bez nutnosti ho převádět na elektrický signál.*

Měření profilu střely za letu (dvojitý hřeben) a v klidu (optická tomografie). Souhlas profilu změřeného za letu s profilem měřeným staticky je vynikající. Liší se jen v zadní části u vroubkování. Zdroj: KIT.



atd.) se používá zapojení se dvěma frekvenčními hřebeny. Jeden signál je použit jako referenční a druhý jako měřicí. Po interferenci obou signálů je možné dopočítat hledaný parametr (například vzdálenost).

Ultra přesné měření v KIT

Vědci z Karlsruhského institutu technologií (KIT) použili dva generátory hřebenového signálu – lokální oscilátor a generátor signálu. Signály z obou generátorů jsou zesíleny v erbiovém zesilovači a následně rozděleny pomocí vláknové rozbočnice do dvou větví v poměru 1:1 (viz obrázek na str. 298). Takto vzniknou celkem čtyři signály. Dva z nich (jeden z lokálního oscilátoru a druhý z generátoru signálů) jsou sloučeny ve směšovači a přivedeny do heterodynního detektoru, tento signál je použit jako referenční. Zbylé dva signály z obou generátorů jsou také sloučeny ve směšovači a detekovány v heterodynním detektoru, rozdíl je ovšem v tom, že signál z generátoru signálu je vyveden ven, kde se odrazí od měřeného objektu, a teprve potom dojde ke sloučení obou signálů – tak vznikne měřicí signál, který je ovlivněn vzdáleností objektu. Porovnáním obou signálů (referenčního a měřicího) je možné zjistit výslednou vzdálenost objektu. Podrobné schéma experimentu si prohlédněte na obrázku na straně 298.

Vědci v Karlsruhském institutu technologií dokázali zaznamenat vzdálenost letícího objektu, a tím jeho profil, s vysokou přesností za pomocí technologie dvojitého frekvenčního hřebenu. Měření proběhlo v rekordním čase. Odborníci z této špičkové evropské univerzity slibují, že brzy vyvinou systém v kapesní velikosti. Je tedy dobře možné, že autonomní auta budou ke skenování okolí používat právě jejich nově vyvinutou technologii.

■ **Jakub Jirsa, 23. 3. 2018, AB 10/2018**

Fraktální elektrody
pro optoelektroniku

K nejdůležitějším parametrům pro materiály povrchových elektrod optoelektronických zařízení (jako jsou solární články, světelné diody, displeje nebo senzory) patří vysoká elektrická vodivost a optická průhlednost (transmitance). Tyto materiály totiž musí splňovat dva do jisté míry protichůdné požadavky, aby ze součástky rovnoměrně odváděly nebo na ni přiváděly elektrický proud a zároveň zůstávaly vysoce propustné pro světlo dopadající na substrát nebo emitované substrátem.

Inspirace v přírodě

V minulosti byly objeveny různé vhodné materiály, jako jsou například různé oxidy kovů nebo dopované polovodiče s dostatečně širokým zakázaným pásem, které byly na substrát naneseny jako tenké homogenní vrstvy. Nejpoužívanějším materiálem se v dnešní době stal oxid cíničitý dopovaný indiem (ITO), jehož hlavními nevýhodami jsou relativně vysoká cena, nedostatek india, křehkost a také poměrně nízká vodivost a neprůhlednost. Navíc, tento a podobné materiály tvoří souvislou, rovnoměrnou vrstvu, což nepředstavuje pro sběr nerovnoměrně se vyvíjejícího proudu nejvhodnější řešení.

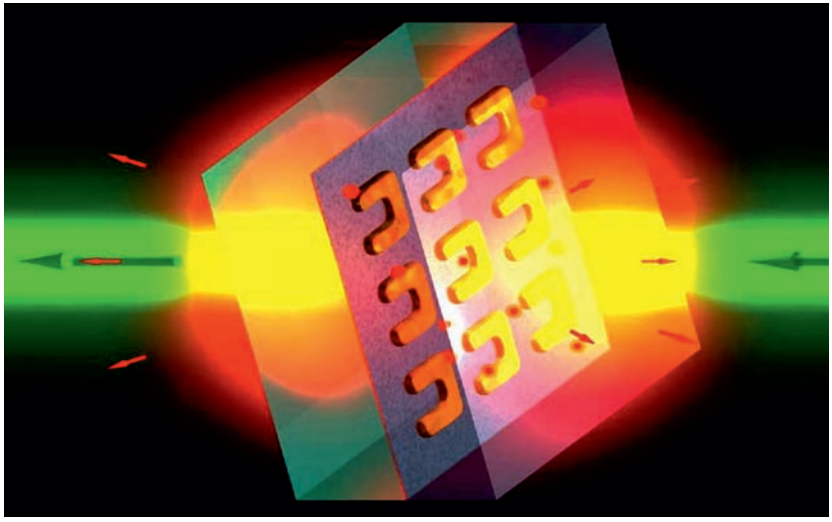
Některé nedostatky se podařilo vyřešit novým přístupem k návrhu elektrody, která již není tvořena souvislou vrstvou, ale kovovou mikro až nanomřížkou, sítí nebo jinou porézní rovinnou strukturou. Tato konstrukce výrazně zlepšila mechanické vlastnosti elektrody, ostatní optoelektronické vlastnosti však stále nebyly dostatečné.

Možným řešením, které by vylepšilo vlastnosti elektrod, se mohou stát fraktálům podobné struktury (QF, z anglického *Quasi-Fractal*) inspirované přírodou. Elektroda by

Zakázaný pás – *interval energie, ve kterém se nemůže v krystalové mřiži nacházet žádný ze stavů elektronů. Podle šířky zakázaného pásu rozdělujeme látky na vodiče (mají nulovou šířku zakázaného pásu), polovodiče (zakázaný pás nenulový avšak menší než 3 eV) a izolanty (zakázaný pás je větší než 3 eV).*

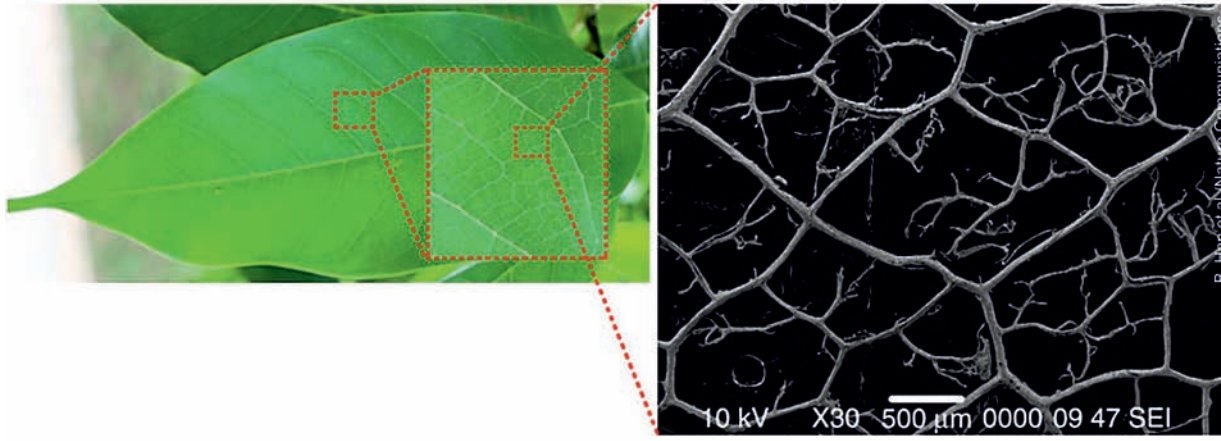
Fraktál – *donekonečna se opakující struktura na různých prostorových úrovních. Dimenze fraktální struktury je vždy větší než topologická dimenze a může být neceločíselná.*

Optoelektronika – *bouřlivě se rozvíjející odvětví, které se zabývá interakcí světla a elektronických součástek. Na straně jedné mohou součástky světlo emitovat (například LED, OLED), na straně druhé ho mohou zpracovávat (různé senzory, například fotodiody, fototranzistory, CCD).*

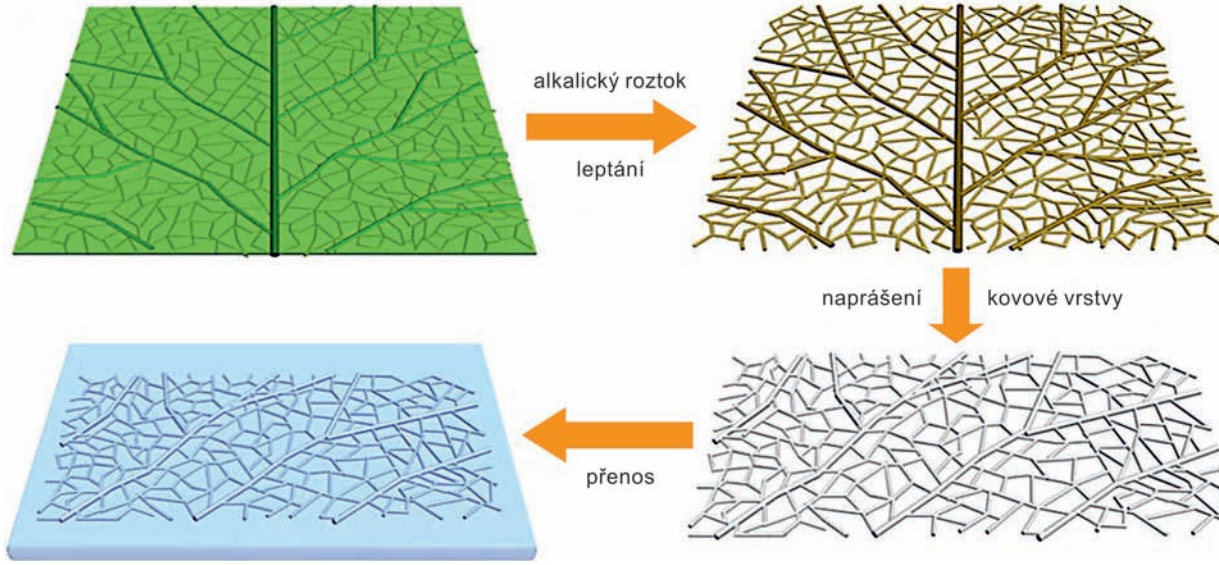


Optoelektronické prvky jsou součástí mnoha soudobých technologií. Zdroj: Australská národní univerzita.

OBRÁZEK LISTU *MAGNOLIA ALBA* Z ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU



POSTUP KOPÍROVÁNÍ STRUKTURY PLETIVA NA SUBSTRÁT



totiž nemusela být nanesena ve vrstvě na celé ploše substrátu jako homogenní mřížka či síť, ale ve formě dostatečně hustých a tenkých lineárních fraktálních struktur, pokrývajících povrch substrátu, jejichž průměr by se s postupným fraktálním větvením stále zmenšoval. Tím by bylo možné substrát dostatečně zkontaktovat a zároveň ho minimálně zastínit. Pokud bychom hledali inspiraci v přírodě, tak u kvetoucích rostlin je podobná QF struktura s výhodou použita pro cévní pletivo v listech, které dostatečně zásobuje rostlinu potřebnými látkami a zároveň ji pouze minimálně zastiňuje. Podobnou strukturu představuje například i rozvodí řek, které odvádí vodu ze zemského povrchu a mnohé další struktury.

Právě tuto fraktální strukturu cévního pletiva listů jednoho druhu magnólie (*Magnolia alba*) použila skupina čínských vědců z Institutu předních technologii a z Laboratoře kvantového inženýrství a kvantových materiálů z Jihočínské univerzity pro vytvoření povrchové elektrody. Na obrázku na protější straně je možné vidět list této rostliny a jeho snímek z elektronového mikroskopu, na kterém je podrobně vidět fraktální štěpení cév a jejich postupně se zmenšující průměr. Jejím okopírováním byla vytvořena popisovaná elektroda. Z listu magnólie byl alkalickým leptáním odstraněn mezofyl (hmota listu mezi cévami) a na zbývající torzo cévní struktury byla naprášená vrstva stříbra. Ta byla následně přenesena na vhodnou podložku ze skla, polymerního materiálu nebo polovodiče.

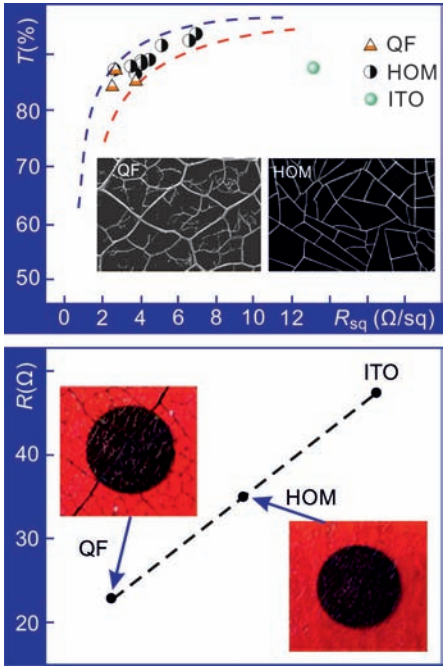
Vlastnosti nové elektrody

Takto připravená elektroda mé lepší optoelektronické vlastnosti než jak souvislá elektroda, tak elektroda tvořena homogenní mřížkou. Ukázalo se, že při podobné průhlednosti (transmitanci) má klasická vrstvená elektroda tvořená oxidem cínatým dopovaným indiem (ITO) odpor vrstvy několikanásobně vyšší, zatímco elektrody tvořené homogenní mřížkou i fraktální strukturou mají hodnoty odporu vrstvy srovnatelné. To znamená, že vodivosti obou rovinných morfologií jsou podobné. Výhoda fraktální morfologie vynikne až při vytvoření a nakontaktování celé optoelektronické součástky, kde se do celkového odporu započítá i vhodné rozložení materiálu elektrody po povrchu substrátu.

Celkový odpor kontaktu součástky je pro fraktální morfologii elektrody výrazně nižší než pro morfologii homogenní sítě. Fraktální struktura totiž díky postupně se snižujícímu průměru lineárních struktur

LED – *Light Emitting Diode, světlo emitující dioda. LED je polovodičová optoelektronická součástka, která emituje nekoherentní monochromatické světlo při průchodu proudu v propustném směru. Emise světla vzniká na základě elektroluminiscence.*

Nahoře: Závislost optické propustnosti na odporu vztaženém na jednu vrstvu – souvislá vrstva ITO, homogenní mřížka HOM a fraktální struktura QF. Dole: Celkový odpor optoelektronické součástky pro různé morfologie kontaktující elektrody. Černý kruh je tvořený vrstvou stříbra na spodní části součástky. Slouží jako zpětná odrazná plocha pro světlo. Zdroj: B. Han/Nature Communications.



OLED – *Organic Light-Emitting Diode, svítivá dioda LED, v níž je jako svítící elektroluminiscenční látka použita tenká vrstva organické sloučeniny, která při průchodu elektrického proudu emituje světlo. Tato polovodičová vrstva je umístěna mezi dvě elektrody, z nichž je alespoň jedna průhledná. Technologie pochází z roku 1987, kdy ji vyvinula firma Eastman Kodak. Na snímku je ohebný OLED displej jihokorejské společnosti LG Electronics.*



vytváří s kontaktovaným substrátem výrazně užší (nebo hustší) kontakt. Zatímco homogenní mřížka kontaktuje substrát ve všech částech lineárním vodičem s konstantním průměrem, fraktální struktura tento průměr postupně snižuje, protože se při tom ale stále větví a přibližuje ke konkrétnímu místu přenosu náboje, zůstává (v ideálním případě) proudová hustota v každé části elektrody stejná. Jinak řečeno, materiál elektrody, který se ušetřil v nejtenčích místech elektrody je přesunut do silnějších částí, kde je nutný k vedení elektrického proudu. Při homogenní mřížce tento materiál zůstává v místech, kde není nutný a pouze tam překáží.

* * *

Dobře si pamatujte, že čtyři miliardy let vývoje v sobě skrývají mnoho užitečných a výhodných řešení, na které musí biologie neznalí inženýři leckdy obtížně přicházet a utrácet grantové prostředky. Přitom by stačilo vystrčit hlavu z okna nebo si podrobně prohlédnout obyčejný lístek salátu.

■ **Vladimír Scholtz, 16. 12. 2016, AB 42/2016**

Vodivé inkousty **a chytré textilie**

Elektronická revoluce, kterou odstartovali dne 23. prosince 1947 Bardeen, Shockley a Brattain objevem tranzistoru, pokračuje i v dnešní době. Objevují se aplikace, o nichž se našim předchůdcům ani nesnilo. Objev grafenu v roce 2004 umožnil vznik levných elektronických zařízení nové generace. Elektronické součástky je možné tisknout na pružné podklady, lze je ohýbat a do jisté míry i deformovat. V roce 2015 byl představen grafenový inkoust, kterým lze tisknout vodivé obrazce a elektronické součástky na různé podklady. Jednou z prvních aplikací bylo natištění radioantény. O měsíc později se v červnu 2015 objevila další novinka. Vodivý inkoust na bázi stříbra, který lze po zaschnutí roztáhnout, aniž by se nějak dramaticky snížila vodivost. Tisknout elektroniku už nemusíme jen na ohebné plasty, ale je to možné i na roztažitelné tkaniny. Inteligentní textilie, které měly dosud jen omezenou funkčnost, získávají netušené možnosti.

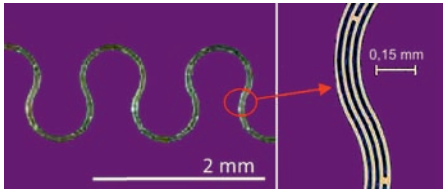
Grafen – *jedna z mnoha forem uhlíku. Jde o atomární monovrstvu či dvojvrstvu složenou z pravidelných šestiúhelníků, která má mimořádnou pevnost a vysokou elektrickou i tepelnou vodivost. Předpokládá se revoluční využití v elektrotechnice a jiných oborech. Grafen poprvé připravili v roce 2004 Andrej Geim a Konstantin Novoselov. Za svůj objev získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2010.*

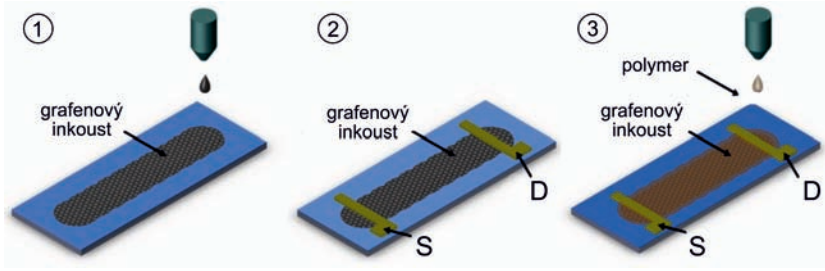
Stříbro – *argentum, ušlechtilý kov bílé barvy, používaný člověkem již od starověku. Vyznačuje se nejlepší elektrickou a tepelnou vodivostí ze všech běžných kovů. Slouží jako součást různých slitin pro použití v elektronickém průmyslu, výrobě CD i DVD nosičů a šperkařství, jeho sloučeniny jsou nezbytné pro fotografický průmysl.*

Grafenový inkoust

Vodivý grafenový inkoust byl jednou z prvních aplikací nově objeveného grafenu. Nicméně inkoust vhodný do upravené inkoustové tiskárny vyvinuli až na Cambridžské univerzitě v roce 2011. V rozpouštědle NMP (*N-metylpyrolidon*) byly přítomny vločky grafenu. Roztok byl pečlivě filtrován, aby se odstranily vločky větší než 1 μm, které by neprošly tryskami tiskové hlavy tiskárny. Tisk prováděli na podkladu Si/SiO_2 nebo na průhledném borokřemíkovém sklu. Posledním krokem procesu bylo žíhání při vysoké teplotě, které odstranilo rozpouštědlo. Už při prvních experimentech se touto novou technologií podařilo nanést nejenom různé vodivé obrazce, ale i plošné tranzistory. První vrstva byla z grafenového inkoustu, následovaly kontakty ze slitiny chrómu a zlata a jako vrchní vrstva byl natištěn organický polymer. Při těchto průkopnických pokusech dosáhli v Cambridži srovnatelných výsledků jako s klasickými vodivými inkousty na bázi polymerů. Natištěné vrstvy byly průhledné a šlo je tisknout i na ohebné materiály. Elektrické vlastnosti lze vylepšit přidáním pojiva, například etylcelulózy. Samotné pojivo je nevodivé, ale vločky grafenu lépe přilnou k sobě. Pojivo je nakonec třeba odstranit, což se opět provádí žíháním.

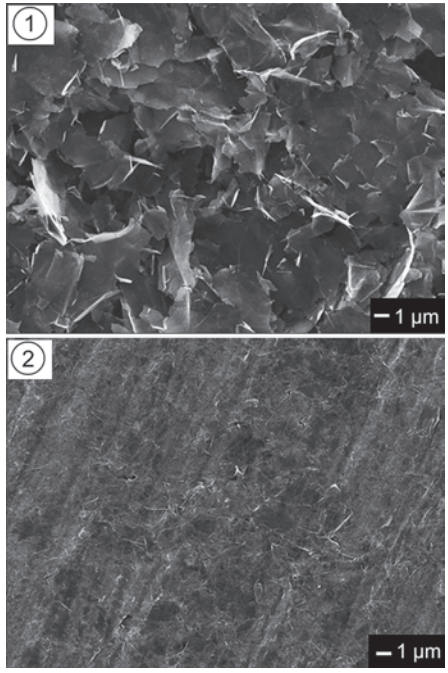
Inteligentní textilie staré generace. Do textilie je vpleteno vodivé vlákno. Jeho zvlnění umožňuje textilii stlačit i natáhnout bez přerušení vlákna. Zdroj: D. Brosteaux/IEEE Electronic Device Letters.





Základní fáze výroby tranzistoru za pomoci grafenového inkoustu. S a D jsou dvě z elektrod. Třetí tvoří grafenový potisk. Zdroj: Cambridžská univerzita.

Snímek grafenové vrstvy ze skenovacího elektronového mikroskopu. Nalevo je vysušený inkoust, napravo je inkoust po válcování. Vodivost se zvýší zhruba padesátkrát. Zdroj: Manchesterská univerzita.



Největším problémem nové technologie bylo žíhání, které neumožnilo nanášet vodivé obrazce na hořlavé materiály a na podklady, které nesnesou vysokou teplotu. V roce 2015 byla tato technologie zdokonalena vědci na Manchesterské univerzitě ve spolupráci se společností *BGT Materials Limited*. Po nanesení inkoust vysušili a nakonec natištěný obrazec uválcovali. Je to podobné jako válcování asfaltu na vozovce. Stlačený grafen zvýšil vodivost až padesátkrát oproti původnímu stavu. Postup je tedy následovný: grafen se nanese inkoustovou tiskárnou, poté suší za maximální teploty do 100 °C a nakonec válcuje. To umožňuje nanášet grafen na různé plasty a tkaniny. Při testech dosáhli v Manchesteru vodivosti 430 S/cm. Stlačený grafenový laminát vyzkoušeli i při výrobě dipólové radioantény, kterou natiskli na obyčejný kus papíru. Anténa byla 14 cm dlouhá, 3,5 mm široká a byla schopna účinně vyzařovat radiový signál. Pořizovací cena takové antény je mimořádně nízká.

Inkoust z Japonska

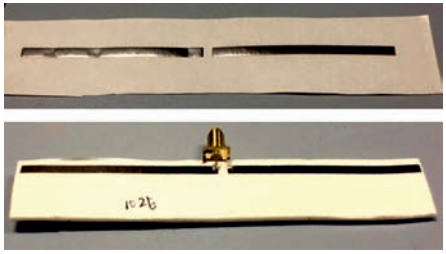
Textilie, které v sobě obsahují elektroniku, ať už vetkanou, vyšitou nebo natištěnou, se nazývají chytré textilie. Zpravidla obsahují různá čidla, která monitorují vnější prostředí (teplotu, vlhkost, přítomnost různých chemikálií atd.) nebo vnitřní podmínky (teplotu těla, pohyb, srdeční a mozkovou činnost atd.). Pasivní tkaniny monitorované hodnoty pouze předávají dál, například do počítače. Tak funguje třeba rukavice snímající detailně pohyby lidské ruky. Nahrávky pohybu se pak používají pro počítačové animace nebo v robotice při napodobení člověka. Pasivní tkanina může také upozornit na zdravotní problémy osob oblečených do chytré textilie. Mnohem sofistikovanější jsou ale aktivní tkaniny, které upravují své vlastnosti podle naměřených hodnot. Při nebezpečí mohou svítit, vydávat radiový či akustický signál, nebo vibrace. Chytrá textilie ale může reagovat i na změnu teploty, vlhkosti či jiného parametru změnou tvaru, velikosti průduchů apod. Chytrá textilie samozřejmě potřebuje zdroj energie. Mohou jím být například fotovoltaické prvky, energii ale mohou poskytnout i piezoelektrická čidla, která přemění na potřebnou energii pohyb člověka.

Elektronika obsažená v tkanině by v žádném případě neměla ovlivnit funkčnost výrobku, například trička. Mělo by zůstat příjemné pro nošení, snadno tvarovatelné, včetně natažení. V tomto ohledu je nejšetrnější vodivý potisk, který umožní na tkanině vytvořit i složité elektronické obvody. Veškeré dosud používané vodivé potisky měly ale problémy při natažení tkaniny. Zdá se, že i tento poslední nedostatek byl překonán. Na Tokijské univerzitě oznámili, že se jim podařilo vytvořit speciální vodivý inkoust, který je i po nanesení na tkaninu nejen deformovatelný, ale tkaninu lze i natáhnout, aniž by příliš utrpěla vodivost natištěných obrazců (tranzistorů, LED diod, fotovoltaických nebo jiných prvků).

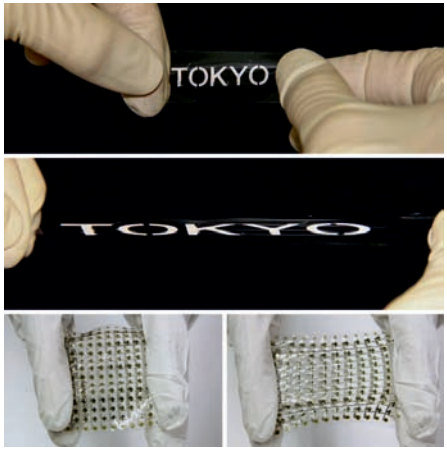
Nově vyvinutý inkoust obsahuje tři složky: stříbrné vločky, fluorizovaný kaučuk a fluorové smáčedlo. Smáčedlo snižuje povrchové napětí a řídí tvorbu povrchově lokalizovaných vodivých sítí stříbrných vloček v tištěném vodiči, který má vysokou vodivost a roztažitelnost. Při experimentech bylo dosaženo vodivosti 768 S/cm. Při roztažení obrazce na 215 % poklesla vodivost na dostačující hodnotu 182 S/cm. Pomocí tohoto inkoustu na Tokijské univerzitě nanesli na roztažitelný substrát síť tranzistorů, jejíž funkčnost se nezměnila ani při roztažení na 110 %. Na kus oděvu také natiskli EMG senzor (sleduje funkci kosterního svalstva na základě jím vydávaných elektrických biosignálů, jde o tzv. elektromyografii).

Zdá se, že není příliš daleko doba, kdy si na běžné inkoustové tiskárně na tričko natiskneme rozhlasový přijímač, biosenzory nebo mikrovlnnou anténu, abychom se stali vysílačem. Scifi se před našima očima stává nepřehlédnutelnou realitou.

■ Petr Kulhánek, 26. 6. 2015, AB 23/2015



Dipólová radioanténa natištěná na obyčejný papír. Zdroj: Manchesterská univerzita.



Nahoře: Natištěný vodivý nápis lze snadno roztáhnout. Dole: Pole roztažitelných tranzistorů. Snadno deformovatelné jsou zejména přívody. Zdroj: Tokijská univerzita.

Nanodiamanty

Alotropie – *vlastnost chemického prvku označující jeho schopnost vyskytovat se v několika různých strukturních formách, které mají výrazně odlišné fyzikální vlastnosti.*

Autokláv – *přístroj-reaktor konstruovaný pro reakce probíhající za vysokého tlaku a teploty. V laboratořích se autokláv typicky používá ke sterilizaci materiálů v laboratorním skle, zejména médií. Samotný proces sterilizace je prováděn za zvýšeného tlaku vlhkým teplým vzduchem.*

Konfokální mikroskop – *druh optického mikroskopu, jehož výhodou je vyšší rozlišovací schopnost daná detekcí světla pouze z ohniskové roviny mikroskopu.*

Nanodiamanty jsou diamanty, jejichž rozměry se pohybují v rozmezí 4 až 6 nanometrů. V přírodě je můžeme nalézt například v meteoritech. Patří k rozsáhlé skupině uhlíkových nanomateriálů. Nejvýznamnějšími vlastnostmi jsou vysoká tvrdost, velký index lomu a relativně velká tepelná vodivost. Nejvýznačnějšími chemickými vlastnostmi jsou stabilita, biokompatibilita a široká modifikace povrchu pro navázání organických molekul.

Představujeme uhlík

Uhlík je základním prvkem naší biosféry, který vznikl při jaderných reakcích v nitru hvězd postupným sloučením tří jader helia (tzv. 3 alfa proces, který navrhl anglický astronom Fred Hoyle). Je nepostradatelnou součástí všech organických sloučenin. Je to stabilní prvek vyskytující se ve dvou základních alotropních modifikacích – jako grafit, který krystaluje v šesterečné soustavě, a diamant, který krystaluje v krychlové soustavě.

Uhlík má chemickou značku C, latinsky se nazývá *Carboneum*, anglicky *Carbon*. V jeho jádře je 6 protonů a 6 neutronů. Relativní atomová hmotnost uhlíku je 12,011, v Mendělejevově periodické tabulce prvků patří do skupiny IVa. Za normálních podmínek je teplota tání uhlíku 3 825 °C a teplota varu 4 824 °C.

Briliantový brus v praxi. Zdroj: Klenotnictví Titan.



VLASTNOST	GRAFIT	DIAMANT
tvrdost	1 až 2	10
hustota (kg/m^3)	2 270	3 513
elektrická vodivost ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	10^5 až 10^6	10^{-11} až 10^{-18}
tepelná vodivost ($Wm^{-1}K^{-1}$)	25 až 470	2 000
rychlost zvuku (m/s)	1 470	18 350
index lomu	–	2,417
krystalizační soustava	šesterečná	krychlová

Diamant má ze všech přírodních materiálů, které nevykazují dvojlom, největší index lomu (kolem 2,4). Vysoký index lomu způsobuje světelné efekty, které diamanty vyzdvihly do popředí zájmu šperkařského průmyslu. Světlo se vzhledem k velkému indexu lomu pohybuje

v diamantu velmi pomalu, rychlostí pouze přibližně 120 000 km/s, což je zajímavé z hlediska různých fyzikálních experimentů. V uměle vytvořených médiích s extrémními vlastnostmi lze rychlost světla dále snížit, nebo dokonce světlo zastavit (to se poprvé podařilo v roce 2000 dánské fyzičce Lené Hauové).

Diamant

Diamant je nejtvrdší přírodní minerál a jedna z nejtvrdších látek vůbec. Vznikl ve svrchním zemském plášti za teplot 900 až 1 300 °C a tlaku 4,5 až 6 GPa v ultrabazických vyvřelinách, tzv. kimberlitech. Nejznámější naleziště je v Jižní Africe. Hmotnost diamantu se udává v karátech. Metrický karát (*carat*) je definován jako 0,2 gramu a značí se ct. Tedy diamant o hmotnosti 1 g má 5 karátů. Jeden z nejznámějších diamantů Koh-i-noor má hmotnost 108,9 karátů, tedy 21,78 g.

Diamant je jediným drahokamem, který může mít celou škálu barev. Na rozdíl od ostatních drahokamů, kde je barva žádoucí, je naopak vysoce ceněný diamant bezbarvý. Barva diamantu se posuzuje podle barevné stupnice GIA (*Gemological Institute of America*), která diamanty dělí dle barev za pomoci písmen abecedy od D po Z. Písmeno D označuje naprosto bezbarvé diamanty (prvotřídně bílé), písmeno Z je vyhrazeno pro nažloutlé diamanty.

Diamant nebo briliant?

Označení briliant nese diamant podle tzv. briliantového brusu, známého z roku 1910. První výpočet moderního brusu provedl Marcel Tolkowski v roce 1917. Spočítal správný sklon fazet. Ideální diamantový brus má 57 fazet: jednu horní plochu (tabulku), pak 32 fazet horních a 24 dolních.

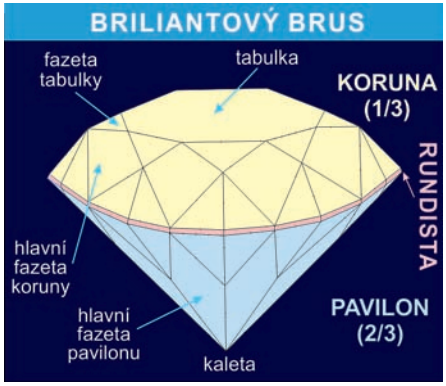
Diamanty se využívají zejména ve šperkařství (čiré přírodní) a nástrojové technice pro svoji tvrdost (tmavé až černé syntetické). První úspěšná syntéza diamantu byla provedena až v roce 1951, kdy ji v laboratoři *General Electric* uskutečnili Francis. P. Bundy, H. M. Hall, H. M. Strong a R. H. Wentorf.

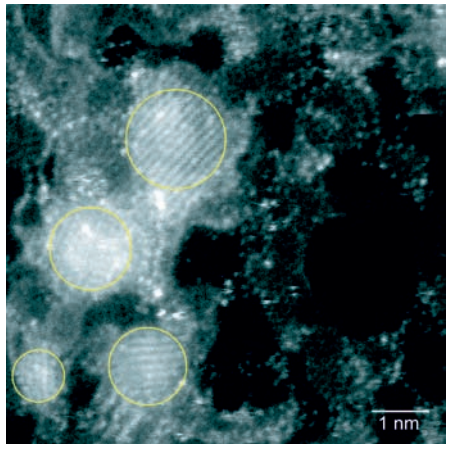
UDDG nanodiamanty vyrobené detonační technikou

Jak bylo řečeno v úvodu, nanodiamanty můžeme nalézt v meteoritech. To by nám k průmyslovému využití nebylo mnoho platné. Jak se tedy nanodiamanty průmyslově vyrábějí?

Rastrovací konfokální mikroskop – *zdrojem světla je laserový paprsek fokusovaný clonkou, který po průchodu objektivem dopadá na vzorek, kde je ohnisko. Průměr svazku na vzorku odpovídá difrakční mezi (rozlišení). Stejná optická cesta se využívá i v opačném směru pro odražený nebo rozptýlený paprsek a pro fluorescenci. Toto sekundární světlo je opět fokusováno. Bodový obraz je pomocí děliče paprsků veden na fotonásobič, kde je druhá konfokální bodová clonka, která nepropustí světlo přicházející z oblasti mimo ohniskovou rovinu mikroskopu. Celý obraz zaostřené roviny se získá skenováním (rastrováním) bod po bodu.*

Briliantivý brus. Kresba: Petr Kulhánek.





Obrázek čtyř nanodiamantů pořízený elektronovým mikroskopem. Nanodiamanty byly nalezeny ve vzorku z meteoritu Murchison, který dopadl v Austrálii v blízkosti vesničky Murchison dne 28. září 1969. Nanodiamanty jsou obklopené neuspořádanou formou uhlíku. Atomy nečistot vytvářejí jasné izolované skvrny. Zdroj: AJL.

UDDG (*Ultra Diamount Disperse Grafite*) nanodiamanty vznikají při explozi TNT (*Trinitrotoluen*) a RXD (*Research Department Explosive*) neboli hexogenu v uzavřené odpalovací komoře ve vodním nebo suchém prostředí. Vznikají na čele detonační vlny v časech kolem několika mikrosekund. Jejich velikost se pohybuje v řádu 5 nm. Proces exploze je intenzivně chlazen. Čím větší kapacita chladícího média v komoře, tím větší nanodiamanty se vyvinou.

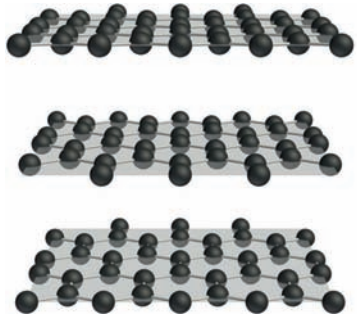
Detonační nanodiamanty jsou na povrchu obaleny slupkou grafitu a amorfního uhlíku. Pro další průmyslové využití se vzniklé „saze" nechají v autoklávech vařit s kyselinami při vysoké teplotě a tlaku po dobu několika dní, aby se odstranil přebytečný kontaminační materiál z materiálu komory a nediamantového uhlíku. Tím vzniká čistý nanodiamant UDD (*Ultra Diamount Disperse*).

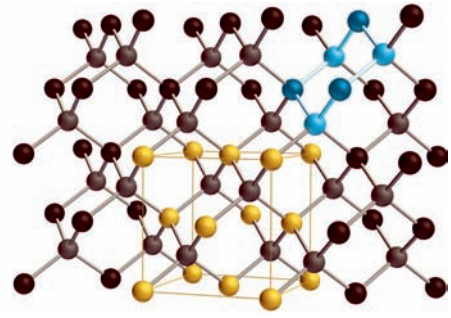
Ultrazvukově syntetizované nanodiamanty

Aplikováním vysoce intenzivního ultrazvuku v kapalinách docílíme velice extrémních jevů. Zvukové vlny, které se šíří v kapalině, způsobí lokální prudké zvýšení a snížení tlaku, které závisí na frekvenci. Přitom vznikají malé vakuové bubliny nebo dutiny (tzv. kavity). Jakmile tyto bublinky dosáhnou určité velikosti, nejsou dále schopny přijímat energii a následně při fázi zvýšeného tlaku kolabují. Tím vznikají rázové vlny šířící se rychlostí až 280 m/s. Tomuto jevu se říká ultrazvuková kavitace. Je nasnadě, že tímto procesem by docela dobře mohly nanodiamanty vznikat.

V roce 2008 se ukázalo, že je možné tímto způsobem vyrobit nanodiamnty ze suspenze grafitu v organické kapalině za atmosférického tlaku a teploty. V experimentu se použila kapalina s vysokým bodem varu a intenzita zvuku přibližně 80 W/cm^2. Při této konfiguraci se vytvořil tlak kolem 15 barů. Vzniklé nanodiamanty dosahovaly rozměrů 6 až 9 μm, byly velice ostré a vysoce opticky čisté.

Krystalografické soustavy grafitu (nalevo) a diamantu (napravo). Zdroj: Wikichemia.





Nanodiamantové filmy

Další účinnou metodou je urychlená depozice z plynné fáze při mikrovlnném výboji. Nejde tedy

o přírodní diamant ani o diamant syntetizovaný za extrémně vysokých teplot a tlaků, jež se již řadu desetiletí používá například pro přípravu diamantového brusiva. Jedná se o velmi čistý diamant připravený rozkladem směsi metanu a vodíku v mikrovlnném výboji (1 300 W) za sníženého tlaku (30 mbar) a při relativně nízké teplotě podložky (600 až 850 °C). Podložkou může být například křemíková destička o průměru 10 cm a více.

Mohsova stupnice tvrdosti minerálů – *vyjádření tvrdosti pomocí schopnosti rýt jedním materiálem do druhého. Stupnici vytvořil v roce 1812 německý geolog a mineralog Friedrich Mohs. Stupnice má deset stupňů: mastek (1), sádrovec (2), vápenec (3), fluorit (4), apatit (5), živec (6), křemen (7), topaz (8), korund (9) a diamant (10). Mohsova stupnice není lineární, například diamant je čtyřikrát tvrdší než korund, ale korund je jen dvakrát tvrdší než topaz.*

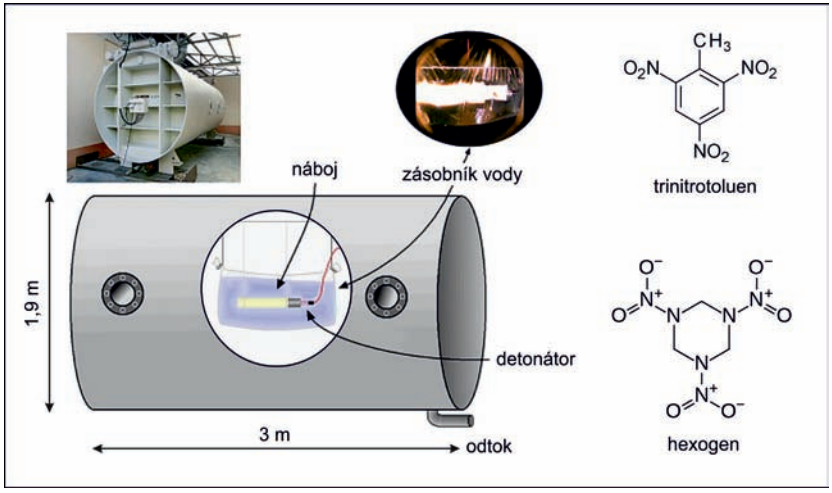
Vlastnosti nanodiamantů

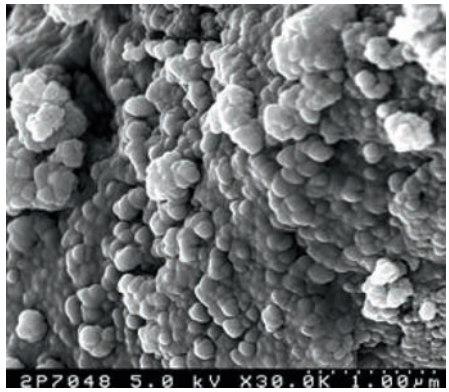
- *Tvrdost*. V Mohsově stupnici tvrdosti zaujímá nejvyšší příčku s číslem 10.
- *Optické vlastnosti*. Diamant, charakteristický krychlovou krystalovou mřížkou, je opticky jednoosý – má jen jedinou hodnotu indexu lomu – nevykazuje dvojlom. Hodnota indexu lomu je 2,417 (ale karbid křemíku Moissanit má vyšší 2,65 až 2,69). Z jednolomných materiálů je index lomu diamantu nejvyšší. Vyšší hodnoty jsou naměřeny jen u přírodního anatasu a rutilu, přičemž oba jsou dvojlomné.
- *Modifikace povrchu*. Na povrch lze mnoha způsoby navázat různé organické molekuly, například léčiva apod.
- *Tepelná vodivost*. Při pokojové teplotě několikanásobně převyšuje vodivost mědi (a dvacetinásobně vodivost křemíku), což řeší problémy s odvodem tepla z elektronických součástek.
- *Biokompatibilita*. Lidský organizmus přijímá nanodiamant jako svoji přirozenou součást, nejsou známé žádné negativní účinky. Naopak některé jiné nanostruktury jsou pro lidský organizmus karcinogenní.

Aplikace nanodiamantů

- *Nové typy tranzistorů*. Zakončení diamantového povrchu vodíkovými nebo kyslíkovými atomy mění jeho povrchovou vodivost více než milionkrát.

Výroba UDDG nanodiamantů. Zdrojem uhlíku pro růst nanodiamantu je výbušnina TNT a hexogen. Zdroj: Diamond Abrasives.



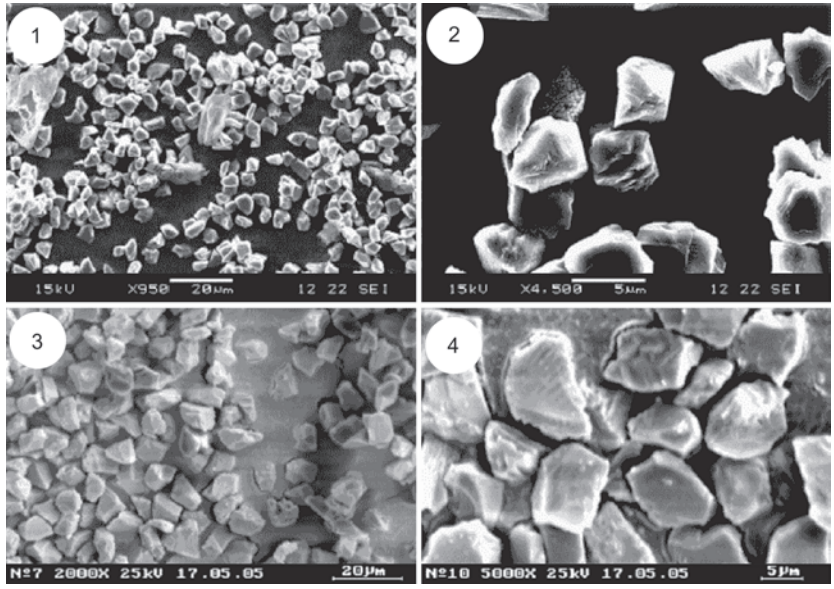


Disperze nanodiamantů ve vodě, rozměry jsou pět až sedm nanometrů. Zdroj: Life Science Journal.

Tyto unikátní povrchové vlastnosti potom umožňují pomocí oxidace hrotem AFM mikroskopu vytvářet například tranzistory či jiné umělé nanostruktury.

- *Aplikace léčiv*. Nanodiamanty mohou na svůj povrch vázat účinné látky, a stát se tak jejich nosiči.
- *Kontaktní čočky*. Zelený zákal je jednou z nejčastějších příčin slepoty na celém světě. Jsou vyvíjeny kontaktní čočky s nanodiamanty, které umožní snadné a postupné uvolňování léku.
- *Jaderná energetika*. Nanodiamanty se mohou využít k pokrytí jaderných palivových tyčí. Dosud užívaný zirkon reaguje za vysokých teplot s horkou vodou a párou a vytváří přitom výbušný vodík. Diamant je vůči okolí palivového článku neaktivní a navíc dobře vede teplo (patentová přihláška Ústavu energetiky Strojní fakulty ČVUT).
- *Maziva a barvy*. Suspenze nanodiamantů jako přísada do barev způsobí vylepšení mikrotvrdosti povrchu (otěru), vylepší tepelnou vodivost na povrchu a nezávislost barevného spektra na povětrnostních podmínkách.

Obrázek nanodiamantů pořízený elektronovým mikroskopem. Nanodiamanty byly syntetizovány ultrazvukovou kavitací. Zdroj: Khachatryan et al. 2008.



Nanodiamanty u nás

Pro výzkum rakoviny, buněčného metabolizmu i architektury buněk jsou potřeba mikroskopické metody umožňující sledovat buňku po velmi dlouhý čas při intenzivním osvětlení. Jednou z takových metod je tzv. *konfokální mikroskopie*, při níž jsou objekty obarvené fluorescenčními barvivy pozorovány s vysokým rozlišením v laserovém svazku.

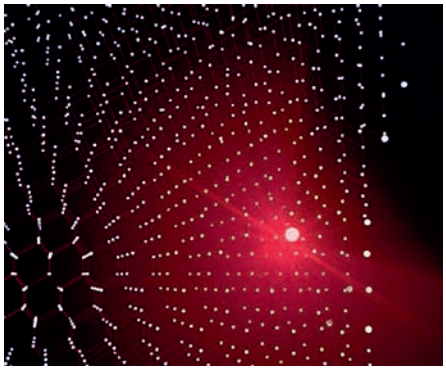
Fluorescenční barviva vykazují zvláštní chování: v odraženém a průchozím světle mají rozdílné barvy. Jedním z velkých nedostatků této i podobných metod je rychlá degradace barviv působením intenzivního světla. Vývoj nových

látek vysoce odolných proti degradaci světlem tak představuje jeden z klíčových problémů, jejichž překonání může posunout hranice metod, a zlepšit tak naše porozumění buněčným procesům.

Vědci z Ústavu organické chemie a biochemie AV ČR, Českého vysokého učení technického v Praze, Ústavu jaderné fyziky AV ČR a Fyzikálního ústavu AV ČR společně s kolegy z Belgie a Německa vyvinuli metodu, která pro nanodiamanty otevírá novou oblast aplikací. Z málo aktivních diamantových nanočástic lze nyní připravit vysoce jasné fluorescenční nanosondy. Tyto diamantové nanočástice mají unikátní vlastnosti, které je odlišují od jiných barviv: nelze je vybělit světlem, což u naprosté většiny podobných materiálů představuje kritický problém pro jejich aplikace.

K čemu všemu lidstvo dokáže nanodiamanty použít, si nyní možná neumíme ani představit, ale už teď víme, že jimi budeme v brzké budoucnosti doslova obklopeni.

■ **Vladimír Přibyl, 11. 8. 2015, AB 30/2015**



Do krystalové mříže nanodiamantu lze implementovat centra N-V (dusík-vakance), která vykazují velmi stabilní fluorescenci. Na obrázku je pohled do krystalové mřížky diamantové nanočástice obsahující tuto unikátní fluorescenční poruchu, která je nezničitelná působením světla. Zdroj: Chemagazin/Jiří Markalous.

Jaderné raketové motory

Kennedyho vesmírné středisko (KSC) – *Kennedy Space Center, americká raketová základna, která byla vybudována na východním pobřeží Floridy na mysu Canaveral (poloostrov Merritt Island). Středisko patří americké NASA a letěla z něho do vesmíru většina amerických družic, sond a pilotovaných letů. Středisko má 17 000 zaměstnanců a zabírá plochu přes 500 km².*

S pomocí dnešních mapových serverů dokážeme dosáhnout na fotografie, které by v historicky nedávné době asi byly klasifikovány jako přísně tajné, a jejich držitel by byl označen za špiona. Pojďme na takovou menší špionážní výpravu a otevřeme například Google Maps nad Kennedyho vesmírným střediskem na floridském poloostrově Merritt Island se slavným mysem Cape Canaveral.

Google Maps

Při zevrubném prozkoumání mapy v místě odpalovacích ramp nám padne do oka podezřelá odbočka z Crawlerway směřující k rampě 39B. Nikam nevede, po několika metrech končí v poli. Uvážíme-li, kolik stojí každý metr silnice, po které se přepravují několika set tunové náklady, vypadá taková nesmyslná křižovatka jako neuvěřitelné plýtvání.

Odbočka míří k původně plánované obří rampě 39C. Tato rampa nebyla nakonec postavena ani na plánovaném místě, ani v plánované velikosti. V červenci 2015 byla dokončena stavba menší rampy, která zdědila název 39C. Betonová rampa má průměr 15 metrů a je vysoká 30 metrů. Rampa bude sloužit k menším letům do vesmíru, zatím ale nebyla použita (2018). Nachází se v blízkosti pobřeží, severovýchodně od rampy 39B.



Odpalovací rampy 39A, 39B a 41 na Kennedyho vesmírném středisku. Z velkých ramp 39 startovaly nosné rakety Saturn V k Měsíci, v pozdější době raketoplány a z 39A nyní raketa Falcon. Z menší rampy 41 startovaly lodě Titan 3, 4 a Atlas V. Nalevo se vyjímá přistávací dráha pro raketoplány (Shuttle Runway, SR). V dolní části je patrná montážní hala VAB. Kroužkem je označena nedokončená odbočka. Zdroj: Google Maps, červenec 2018. Střed mapy má souřadnice 28.610411, –80.659657.

Záhad je tu více, sama montážní hala, známá *Vehicle Assembly Building*, je asi o padesát metrů vyšší než raketa Saturn V. Zadní strana budovy vyznívá poněkud nedodělaně. Jako by tu architekt počítal s možností rozšíření. To vše jsou doklady ambicí, které měla NASA na počátku budování kosmodromu. Po vztyčení americké vlajky na Měsíci upustila od myšlenky osmi výrobních hal, ve kterých by se současně sestavovaly rakety převyšující Saturn V, a usoudila, že dvě odpalovací rampy 39A a 39B budou stačit. Nejdéle

se držela myšlenky na nový raketový motor, který by výšku rakety prodloužil o dvacet metrů a zvětšil její nosnost o 50 %. Řeč je o jaderném raketovém motoru.

Jaderný raketový motor

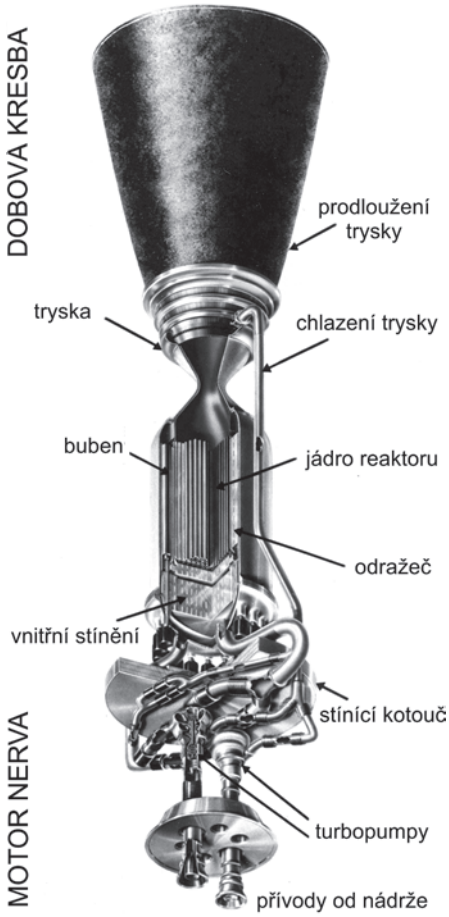
Raketový motor na jaderné palivo zní jako proprieta z fantastických románů padesátých let. Nikoho asi neudiví, že se v tomto období raketoví konstruktéři myšlenkami na jaderný pohon skutečně zabývali. Překvapující ovšem je, že nezůstalo jen u přemýšlení. Takové motory byly nejen vyvíjeny, ale i dotaženy do funkčního stavu a odzkoušeny. Je paradoxní, že motor na jaderné palivo je v principu dokonce jednodušší než klasický chemický motor. Když nic jiného, není tu třeba nádrž na okysličovadlo a s ní spojené choulostivé příslušenství, které je vždy do jisté míry rizikovým faktorem.

Od roku 1955 NASA začala financovat projekt vývoje jaderného raketového motoru. Popudem k tomuto kroku se stala rok stará studie Roberta Bussarda. Podle ní měla být hnána pracovní látka (vodík) kolem kompaktního grafitového reaktoru, tam by se zahřála na vysokou teplotu a unikala by velkou rychlostí tryskou ven.

Během pouhých čtyř let byl zkonstruován první funkční prototyp – raketový motor Kiwi A. Ačkoli byl výzkum teprve na počátku, dosažené parametry vypadaly slibně. Při výkonu 70 MW dokázal motor běžet pět minut, aniž by některá komponenta selhala. Jako pracovní látka byl použit vodík v plynném stavu, jaderné palivo tvořil karbid uranu ^{235}U. Tato koncepce reaktoru se ukázala velice šťastná. Karbid uranu má mnohem vyšší teplotu tání než čistý uran. Uhlík navíc fungoval jako moderátor.

Slibné výsledky zkoušek a probíhající závody o dobytí Měsíce zajistily finanční ventil naplno otevřený, a tak není divu, že zanedlouho přišel na svět jaderný motor Kiwi B. Výkon 1,1 GW, vysoká výtoková rychlost a nový druh pracovního média (kapalný vodík) však přinesly kvalitativně nové problémy, především nezvládnutelné vibrace, během kterých popraskaly palivové články. Odstranění nedostatků trvalo dva roky. Rok 1964 byl ve znamení zkoušek, v nichž motor obstál na výbornou. Výtoková rychlost 7,3 km/s, oproti 4 km/s u klasických chemických motorů, posunula stroj do úplně nové kategorie. Pracoval nepřetržitě osm minut, v jiných zkouškách zvládl i opakovaný start během jediného pokusu.

Jaderný raketový motor (JRM) – *motor pracující na reaktivním principu. Pracovní médium (většinou vodík) je ohříváno jaderným štěpením probíhajícím v tyčích z karbidu uranu 235U.*



Základní princip jaderného raketového motoru je jednoduchý. Pracovní plyn je ohříván reaktorem rozžhaveným jaderným štěpením. Dobový nákres motoru NERVA. Zdroj: Archiv NASA.

Raketová montážní hala (VAB) – *Vehicle Assembly Building, dříve Vertical Assembly Building. Raketová montážní hala v Kennedyho vesmírném středisku na Floridě. Postavena byla roku 1966. Se svým půdorysem 158×218 m a výškou 160 m patří mezi největší budovy na Floridě. Vnitřní objem 3,5 milionů m^3 je dostatečný k vytvoření vlastního počasí. Za vlhkých dní vznikají u stropu oblaka, ze kterých prší.*
NERVA – *Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application, americký jaderný raketový motor vyvíjený mezi roky 1964–1972.*
Specifický impulz – *viz strana 214.*

Motor NERVA a co dál

Úspěšným vývojem motorů řady Kiwi skončilo období pokusů. Roku 1965 přistupuje NASA k vývoji prototypu funkčního motoru. V průběhu následujících let dostávají motory NERVA (*Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application*) zřetelné obrysy. Jednotlivé součásti jsou integrovány do jediného celku, výkon motoru je využit k pohonu turbočerpadla a motor je připevněn na pohyblivé plošině k simulaci různých letových režimů. Doby kontinuálního běhu se při zkouškách posunují na desítky minut až hodiny, výkon se počítá v jednotkách gigawattů (jaderná elektrárna Temelín disponuje výkonem 2 GW), výtoková rychlost téměř 8 km/s je dvakrát vyšší než u klasických raket, pracovní teplota 2 200 °C, tah 250 kN. Z tohoto motoru měl být výhledově odvozen motor o výkonu 5 GW a tahu 900 kN. Po dobytí Měsíce však NASA ztratila zájem o pilotované lety na Mars, a s tím vyschl i finanční zdroj potřebný k dokončení projektu jaderných raketových motorů.

Na druhé straně železné opony se situace vyvíjela až dojemně podobně. Stejné cíle, stejné motivy a podobné konstruktérské zázemí daly vzniknout podobným technickým řešením i podobným problémům v zákulisí. Jako jaderné palivo byly použity tyče o délce 1,5 m z karbidu uranu vložené do keramických pouzder. Pracovní médium byl opět vodík, ale tentokrát obohacený hexanem. Výkon necelých 200 MW, tah 35 kN. Motor zvládl i deset startů po sobě. Ruský projekt nakonec skončil podobně jako ten americký. Po skončení závodů o Měsíc byl zrušen.



Motor Phoebus byl předstupněm motoru NERVA. Zde je připevněn na pojízdné konstrukci k testování činnosti v různých polohách. Zdroj: Wordpress.

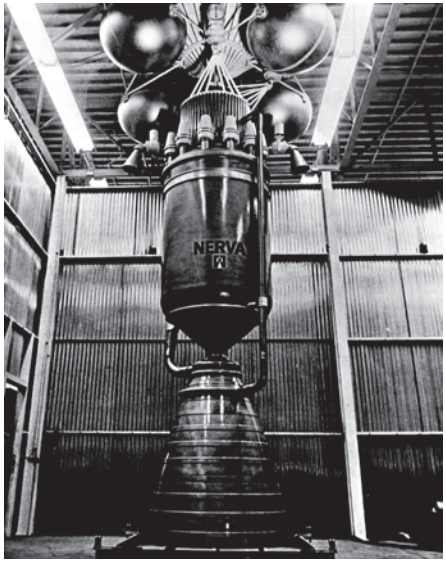
Jaderné raketové motory byly ve své době zajímavou alternativou ke klasickým chemickým motorům. Jejich obrovské výkony však byly více než vyváženy vysokou hmotností. Na druhou stranu disponovaly

velkým specifickým impulzem, což bylo ovšem dosaženo použitím lehkého pracovního média.

Nakonec je tu ještě otázka bezpečnosti, jmenovitě kontaminace okolí radioaktivním materiálem. Pokud vše funguje, jak má, nebezpečí prakticky nehrozí. Pracovní médium se sice dostává do blízkosti radioaktivního materiálu, ale protože se jedná o vodík, který z principu nemůže být radioaktivní, nemusíme mít ze záření obavy. Problém nastane, když dojde k selhání. V souvislosti s tímto nebezpečím zmiňme pokus, který nasimulovali technici při zkouškách motoru Kiwi. Vyzkoušeli, jak se bude chovat motor s neřízenou jadernou reakcí. Dopadl dle očekávání, vypařením radioaktivního materiálu, následnou explozí a kontaminací okolí. Raketa může havarovat i z jiných příčin. Příležitostí k úniku radioaktivního materiálu by se zajisté našlo mnoho.

Dnes už asi nikdo reálně nepočítá s nasazením jaderných motorů při startech ze Země. Myšlenka sestavení pohonné jednotky na oběžné dráze a použití motoru v otevřeném vesmíru však občas probleskne v souvislosti s hledáním, jak uskutečnit cestu na Mars.

■ **Rudolf Mentzl, 17. 6. 2016, AB 22/2016, aktualizováno**



Dobová fotografie motoru NERVA. Zdroj: NASA.

Nám, nám narodil se… …Vendelín

Stelarátor – *toroidální zařízení pro udržení plazmatu za účelem zažehnutí termojaderné fúze, v němž jsou poloidální i toroidální pole tvořena 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 Wendelsteinu a LHD (Large Helical Device), který funguje od roku 1998 v Japonsku.*

Zdá se, že lidské sny o elektrárně budoucnosti jsou zase o něco blíž realitě. Německý Institut Maxe Plancka pro fyziku plazmatu v Greiswaldu zažívá již dávno očekávaný průlom. Dne 10. prosince 2015 zde byla poprvé zažehnuta plazmatická reakce na obřím stelarátoru Wendelstein 7-X. Ten je největším fúzním zařízení typu stelarátor na světě – jeho stavba trvala více než 9 let a stála přibližně 370 milionů eur. Stejně jako stavba největšího tokamaku na světě ITER, který roste pod francouzským hradem Cadarrache, má i Wendelstein 7-X prokázat, zda je konstrukce tohoto typu fúzního reaktoru vhodným adeptem pro budoucí fúzní elektrárny. Obě zařízení jsou do jisté míry pozůstatkem studené války ve 20. století. Na západní straně železné opony byly vyvíjeny stelarátory, na východní tokamaky.

Per aspera ad astra

Známý latinský citát, který v českém překladu zní „*přes překážky ke hvězdám*“, by mohl být přesným motem stelarátoru Wendelstein 7-X. Název stelarátor je totiž odvozen z latinského stella, což v překladu znamená hvězda, a stejně jako tokamak je toto zařízení určeno pro udržení plazmatu pomocí magnetického pole za účelem řízené termojaderné fúze, tedy slučování jader deuteria a tritia za vzniku helia při uvolnění velkého množství energie ve formě neutronů. Koncept stelarátoru navrhl v roce 1951 americký teoretický fyzik Lyman Spitzer, který se mj. také rozhodující měrou zasadil o vybudování prvního dalekohledu na oběžné dráze – Hubblova vesmírného dalekohledu. Po samotném Spitzerovi je pojmenována vynikající infračervená observatoř – Spitzerův vesmírný dalekohled.

Magnetické pole stelarátoru je generováno výhradně vnějšími cívkami, které zpravidla mají velmi komplikovaný tvar. Hlavní výhodou stelarátorů oproti tokamakům je možnost uchovávat plazma v kontinuálním režimu a také skutečnost, že plazmatem neteče žádný proud (již samo plazma je zakřiveno, takže není nutné ho stabilizovat pomocí proudu). Proto se ale stelarátory neobejdou bez složitých dodatečných cívek na tvorbu poloidálního pole. Takové cívky jsou díky svému tvaru a účelu velmi drahé a musí být sestaveny s mimořádnou přesností.

Příprava jednoho segmentu komory stelarátoru W7-X v průběhu stavby. Dobře je patrný extrémně zakřivený tvar komory. Zdroj: MPI für Plasmaphysik.



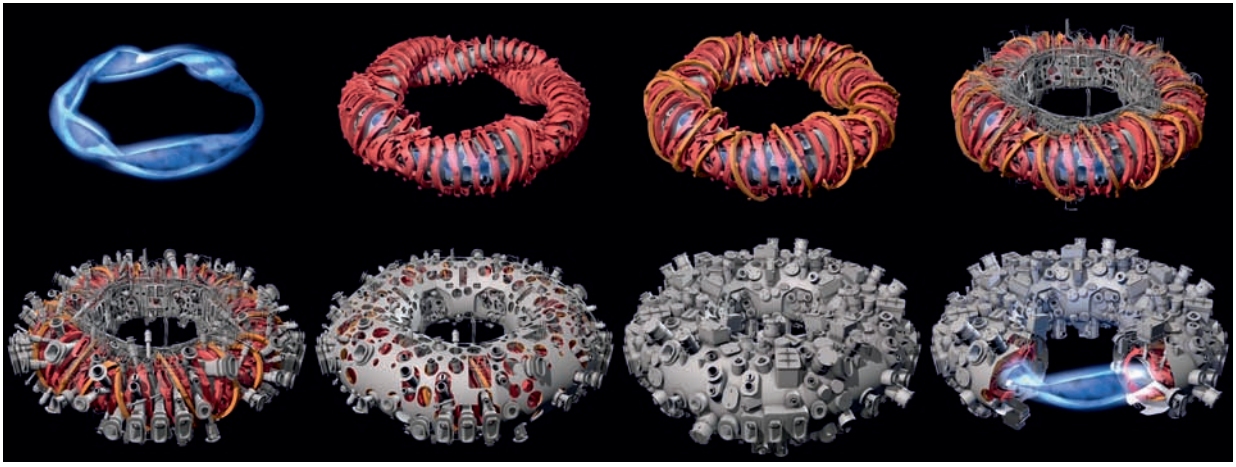
Vysoká cena a složitost stelarátorů je příčinou toho, že stelarátory byly předčeny tokamaky, které jsou podstatně levnější a jednodušší.

Dlouhá cesta k úspěchu

Stavba stelarátoru Wendelstein 7-X započala v dubnu 2005 a byla dokončena v květnu 2014. Komora stelarátoru o celkovém objemu 30 m^3 je tvořena z velkého ocelového toru o poloměru 5,5 metru, jehož tvar je upraven tak, aby kopíroval budoucí vytvořené plazma. Komora zde tvoří především pevný obal nutný k vytvoření vakua, jehož hodnoty se pohybují přibližně kolem 10^{-7} Pa. Kolem komory je umístěno 20 rovinných a 50 specifických (nerovinných) supravodivých cívek, které mají nejdelší rozměr přibližně 3,5 metru. Při provozu jsou všechny cívky podchlazeny na 4 kelviny (–269 stupňů Celsia) pomocí kapalného helia, přičemž cívkami protéká proud až 12,8 kA. Tyto cívky jsou schopny vytvořit magnetické pole až o velikosti 3 tesla. Soustava rovinných cívek za-



Pohled do vnitřní části komory při jejím pokrývání grafitovými kachličkami. Zdroj: MPI für Plasmaphysik, Jan Michael Hosan, 2017.

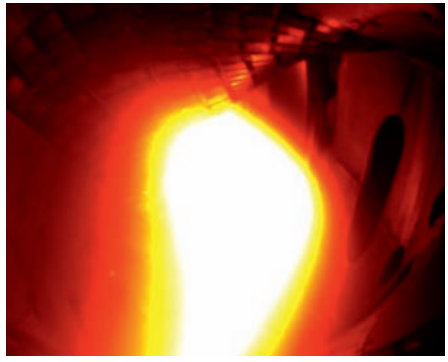


Tělo stelarátoru a jeho „vrstvy". Červeně jsou vyobrazeny specifické (nerovinné) cívky, oranžově pak cívky rovinné. Zdroj: MPI für Plasmaphysik.

Tokamak – *TOroidnaja KAmera s MAgnitnymi Katuškami, 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 navrhl v letech 1950 až 1952 Andrej Sacharov v bývalém Sovětském svazu. Největší tokamak je budován v jižní Francii pod hradem Cadarache, průměr komory bude mít 6 metrů, se spuštěním se počítá po roce 2025.*

W7-X – *obří stelarátor zprovozněný na konci roku 2015 v německém Wendelsteinu: plazmový prstenec má průměr 11 metrů a tloušťku zhruba metr. Plazma ve stelarátoru má objem 30 m^3, teplotu až 100 milionů stupňů Celsia a koncentraci 3×10^{20} částic v metru krychlovém. Magnetické pole na udržení plazmatu je až 3 tesla. Výboj by měl probíhat kontinuálně po dobu 30 minut s mikrovlnným ohřevem. Časová konstanta pro charakteristický úbytek energie se očekává 0,15 s.*

Fotografie prvního heliového plazmatu ve stelarátoru Wendelstein 7-X na sklonku roku 2015. Odhadovaná teplota uvnitř plazmatického sloupce je milion stupňů Celsia. Zdroj: MPI für Plasmaphysik.



jišťuje především vymezení životního prostoru pro plazma uvnitř komory, nerovinné cívky mají za úkol přesně stáčet plazmatický sloupec. Wendelstein 7-X by měl po správném nastavení všech parametrů, které se bude hledat několik let, dosáhnout hustoty plazmatu 3×10^{20} částic/m^3 při teplotách 60 až 130 milionů stupňů Celsia.

Za pomoci dodatečného mikrovlnného ohřevu bude zařízení schopno fungovat v „nepřetržitém“ provozu až po dobu 30 minut (k tomu by mělo dle plánu dojít kolem roku 2021), což je daleko za hranicí tokamaků pracujících v pulzním režimu. Budoucí tokamak ITER je při svých parametrech schopen udržet plazma kolem pěti minut, enormním úspěchem by byl výboj o délce 15 minut. Nejdelší udržený výboj, který trval 6,5 minuty, se podařilo uskutečnit na francouzském tokamaku Tore Supra. Tento tokamak se ale na dlouhé výboje přímo specializuje.

Od prvního plazmatu k fúzi

Od května 2014 se začalo zařízení postupně testovat a uvádět do provozu. Vše pak vyvrcholilo dne 10. prosince 2015, kdy byl do komory napuštěn přibližně jeden miligram helia, se kterým bylo dosaženo (s pomocí 1,3 MW dodatečného mikrovlnného ohřevu) výboje trvajícího přibližně desetinu sekundy. Plazma přitom mělo teplotu zhruba milion stupňů Celsia. Tento úspěšný experiment dokazuje perfektní kondici stelarátoru. V únoru 2016 byla zahájena vědecká etapa výzkumu a poprvé zažehnuto vodíkové plazma (80 milionů stupňů Celsia, 0,25 sekundy). V září 2017 byl vnitřek komory pokryt grafitovými kachličkami, které umožňují vyšší teplotu a delší dobu výboje. Doba udržení plazmatu se prodloužila na 26 sekund. V průběhu operační fáze 1 se testuje konfigurace a připravují změny pro operační fázi 2, kdy by měl být stelarátor provozován v ustáleném režimu a nikoli pouze v pulzním. Operační fáze 2 začne v roce 2019. Projekt financuje z 80 % Německo a z 20 % Evropská unie. V tuto chvíli nelze odhadnout, která z cest k termojaderné fúzi bud úspěšnější, proto je dobře, že výzkum probíhá na více zařízeních různého typu.

■ **Radek Beňo, 15. 1. 2016, AB 3/2016, aktualizováno**

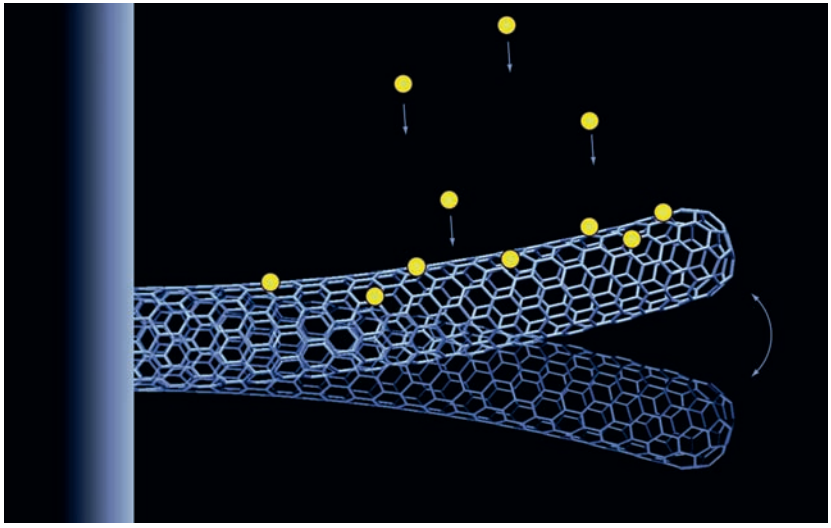
Nanoelektromechanické systémy

Nanoelektromechanické systémy (NEMS) jsou třídou zařízení, která integrují elektrické a mechanické funkce v měřítku řádu nanometrů. NEMS jsou dalším miniaturizačním krokem navazujícím na tzv. mikroelektromechanické systémy (MEMS). NEMS obsahují tranzistory, mechanické aktuátory, čerpadla nebo motory a mohou fungovat jako fyzikální, biologické a chemické senzory. Název zařízení vychází z jejich typických rozměrů v řádu nanometrů. Tyto malé rozměry vedou k nízké hmotnosti a vysoké mechanické rezonanční frekvenci. Součástky se už výrazněji chovají podle zákonů kvantové mechaniky a mají velký poměr povrchu k objemu, což je vhodné pro vytvoření povrchových snímacích mechanizmů, například pro detektory chemických látek v ovzduší. Jinou hojně využívanou aplikací NEMS jsou citlivé miniaturní akcelerometry (přístroje pro měření zrychlení).

Mikroskop atomárních sil – *AFM, Atomic Force Microscope. Zařízení skenuje povrch materiálu pomocí hrotu zavěšeného na pružném výkyvném raménku. Hrot je přitahován elektrostatickými a van der Waalsovými silami. Výkyvy raménka nad povrchem jsou sledovány laserem a je měřen tunelový proud elektronů mezi hrotem a povrchem. Mikroskop je tak citlivý, že může sledovat elektronové orbitaly molekul materiálu. AFM mikroskop byl vynalezen v roce 1986 Gerdem Binnigem, Calvinem Quatem a Christophem Gerberem.*

„Tam dole je spousta místa“

Na možnosti nanosvěta jako první poukázal Richard Philips Feynman, který svou vizi o nanotechnologiích nastínil v prosinci roku 1959 při příležitosti zasedání Americké fyzikální společnosti na Kalifornské technologické univerzitě. Jeho slavná přednáška měla název „*There's Plenty of Room at the Bottom*“ (*Tam dole je spousta místa*) a pojednávala o praktickém využití světa atomů v budoucnosti. Feynman diskutoval o možnostech, jak připravovat systémy o velmi malých rozměrech, jak využívat a měnit jejich vlastnosti a jaký přinesou technologický přínos. Systémy budoucnosti by měly mít malou velikost, vysokou účinnost, minimální spotřebu energie a nízké výrobní náklady.



Dvoustěnná uhlíková nanotrubička, která byla použita k měření hmotnosti jediného atomu zlata. Atomy přistávají na trubičce a mění její rezonanční frekvenci v závislosti na své hmotnosti. Je to podobné, jako když se potápěč odrazí od skokanského můstku. Zdroj: Lynn Yarris/ Berkeley National Laboratory.

Grafit – *forma uhlíku s atomy tvořícími, podobně jako led, šestiúhelníkovou krystalovou mříž. Atomy v jedné rovině jsou propojeny v pravidelné šestiúhelníky do tvaru připomínajícího včelí plástve. Tyto roviny jsou pak řazeny nad sebou tak, že tři uzlové body (atomy) sousedních vrstev krystalové mříže jsou právě nad geometrickými středy šestiúhelníků sousední vrstvy a tři jsou v zákrytu. Vzdálenost mezi vrstvami je 0,336 nm, strana šestiúhelníku 0,2464 nm, hustota grafitu je 2,26 g/cm^3.*

Diamant – *forma uhlíku s diamantovou krystalovou mříží. Sousední vazby (tzv. σ vazby) svírají úhel 109° 28' a jejich délka je 0,154 nm. Za normálních podmínek je hustota 3,51 g/cm^3 a index lomu n = 2,417. Je-li dotován kyslíkovými ionty, stane se polovodičem typu n.*

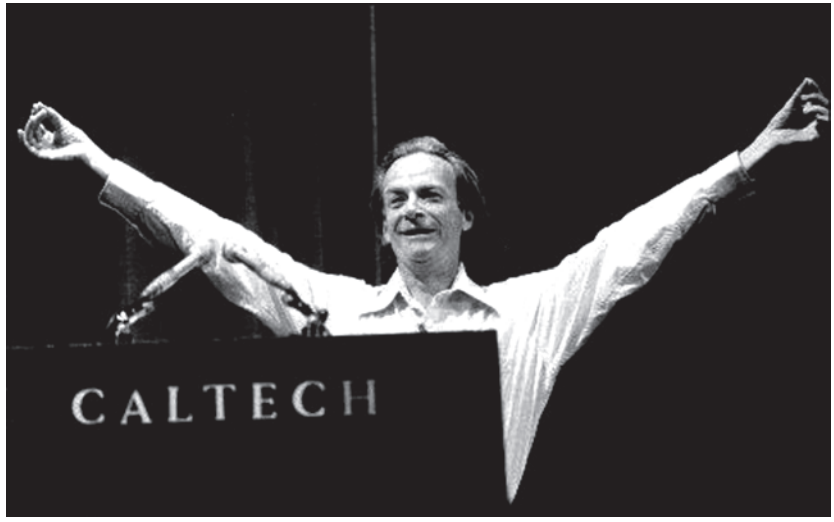
Mikroskopie atomárních sil

Feynman se zajímal o to, jakým způsobem lze zlepšit rozlišovací schopnost elektronových mikroskopů. Vycházel z toho, že jednou najdeme nějakou fyzikální cestu, jak syntetizovat libovolnou chemickou látku. Objevy rastrového tunelového mikroskopu a mikroskopu atomárních sil (AFM) ukázaly, že Feynmanova představa, že jednou nahlédneme do světa nanometrových rozměrů, byla správná. Hroty AFM dokáží nejen skenovat povrch materiálu, jsou také schopny přenášet i jednotlivé atomy a sestavovat je do předem daných konfigurací. Umožňují poznávat nanosvět a tato kladná zpětná vazba způsobuje další vývoj nanotechnologií. Vývoj hrotů AFM spoléhá na technologie NEMS.

Technologie NEMS fungují na velice malých rozměrech a lze očekávat, že významně ovlivní mnoho oblastí vědy a techniky a nakonec nahradí dnešní systémy MEMS. Menší a účinnější senzory umožňují vyšší citlivost dosahovanou technologií NEMS a vedou k detekci namáhání, vibrací a sil na atomární a molekulární úrovni a k detekci chemických i jiných signálů.

Přístupy k miniaturizaci

Existují dva vzájemně se doplňující přístupy k výrobě součástek technologií NEMS. Přístup „shora dolů“ (miniaturizace) používá k výrobě zařízení tradiční výrobní metody, tj. optickou a elektronovou litografii. Cílem je zmenšovat velikost mikrosystémů až na objekty (ideálně nanometrové), které získají unikátní kvantové vlastnosti. Výhodou metody je relativně snadná kontrolovatelnost výsledných struktur, nevýhodou jsou jejich dosti velké rozměry. Obvykle jsou zařízení vyrobena z tenkých kovových filmů nebo leptaných polovodičových vrstev. Přístup „zdola nahoru“ (výstavba) využívá chemických a fyzikálních vlastností jednotlivých molekul a atomů. Funkční celek vzniká postupnou výstavbou z nej-



Richard Philips Feynman na své slavné přednášce „There's Plenty of Room at the Bottom“ v roce 1959.

menších částí hmoty. To umožňuje vyrobit mnohem menší struktury, i když často za cenu omezených možností kontroly při výrobním procesu. Společnou snahou obou postupů je opakovatelná tvorba nanosoučástek. Používá se i kombinace obou přístupů, jejímž výsledkem je například uhlíkový nanotrubičkový motor, který je vytvořen z vícestěnných uhlíkových nanotrubic. Kotva a stator jsou ze zlata a k nanotrubici jsou připojeny pomocí elektronové litografie. Pohyb je udržován proudem z přívodních elektrod. Na rozdíl od současných bio-motorů mají NEMS motory velikost v nanometrech. Mohou sloužit jako aktuátory pro provoz v širokém rozsahu frekvencí, teplot a okolních podmínek, jako je vysoké vakuum a drsné chemické prostředí.

Nanofyzika – *obor fyziky, zabývající se vlastnostmi látky v nanometrových měřítcích. Spadá do fyziky pevných látek. O možnosti manipulovat s jednotlivými atomy v nanometrových měřítcích poprvé uvažoval Richard Feynman v roce 1959. V současnosti dokážeme přemísťovat atomy za pomoci hrotu mikroskopu atomárních sil. Na atomární úrovni umíme vytvářet různé součástky a dokonce miniaturní funkční stroje. Uvažuje se například, že nanostroje budou cíleně transportovat léčiva v lidském organizmu. Možnosti nanotechnologií jsou obrovské.*

Uhlíková mnohotvárnost

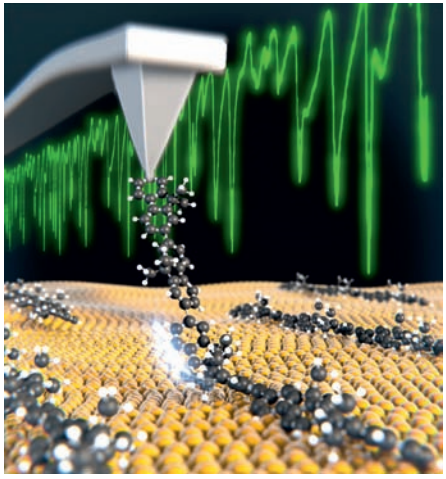
Mnoho z běžně používaných materiálů pro technologie NEMS je na bázi uhlíku, konkrétně diamantu, uhlíkových nanotrubic a grafenu. Tyto materiály mají užitečné vlastnosti, které přímo odpovídají potřebám pro součástky NEMS. Mechanické vlastnosti jednotlivých forem uhlíku (například velikost Youngova modulu pružnosti) mají zásadní význam pro stabilitu nanosoučástek NEMS. Materiály na bázi uhlíku mají specifickou kovovou a polovodičovou vodivost a lze je využít pro konstrukci tranzistoru.

Nízké tření nanotrubic umožňuje vytvořit takřka ideální ložiska, a toho lze využít k praktickým aplikacím nanotrubic jako konstrukčních prvků v NEMS. Typickými aplikacemi mohou být nanomotory, přepínače a vysokofrekvenční oscilátory. Ideálním konstrukčním prvkem pro součástky NEMS je také grafen. Grafen má velký Youngův modul pružnosti, malou hustotu a velkou povrchovou plochu. Mimořádná pevnost grafenu splňuje vysoké požadavky na namáhání materiálu. Používá se tam, kde běžné materiály obvykle selžou.

Mechanické výhody materiálů na bázi uhlíku spolu s elektrickými vlastnosti uhlíkových nanotrubiček a grafenu se pak využívají v mnoha elektrických komponentách technologie NEMS. Nanotranzistor byl vyvinut jak pro uhlíkové nanotrubičky, tak pro grafen. Tranzistory jsou jedním ze základních stavebních kamenů všech elektronických přístrojů. Tranzistory na bázi uhlíkových nanotrubic i grafenu jsou velmi důležité pro zařízení NEMS.

Uhlíkové nanotrubice se využívají jako nanoelektrické propojky, protože je lze zatížit velkou proudovou hustotou. Fungující dobře jako

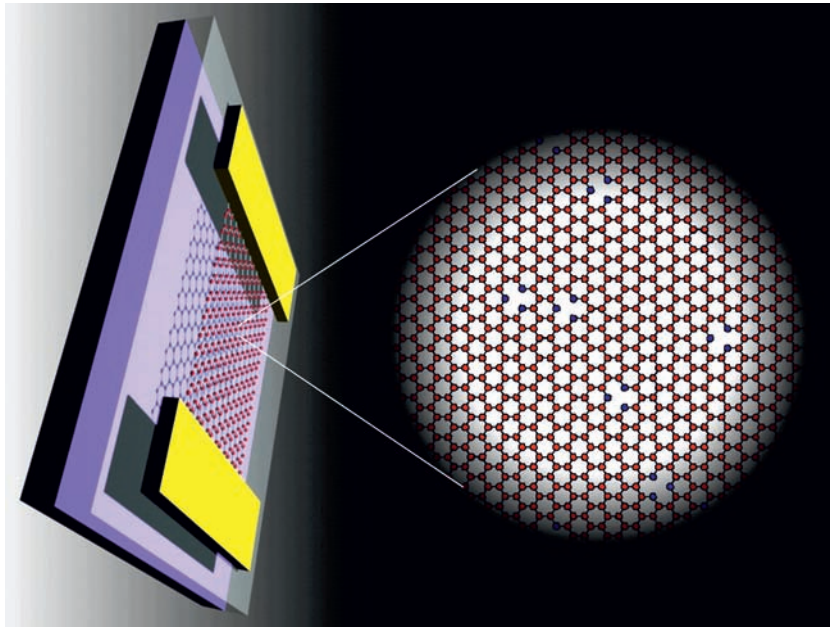
Mezi hrotem mikroskopu atomárních sil a povrchem tunelují elektrony. Ze vzniklého proudu (zelená křivka) se rekonstruuje povrch materiálu. Hroty jsou schopné přenášet jednotlivé atomy a molekuly. Zdroj: Nanolino/ Basilejská univerzita.



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, efektivity a výkonu při dodržení malých rozměrů.*

Nanovodiče – *válcové vodivé prvky submikronových průměrů, tj. v desítkách či stovkách nanometrů.*

Schéma grafenového tranzistoru obsahuje grafen (červená), zlaté elektrody (žlutá), oxid křemičitý (průhledná) a křemíkový substrát (černá). Výřez zobrazuje mřížku grafenu a její vady. Volná místa (chybějící atomy) jsou obklopena modrými atomy uhlíku. Zdroj: Marylandská univerzita.



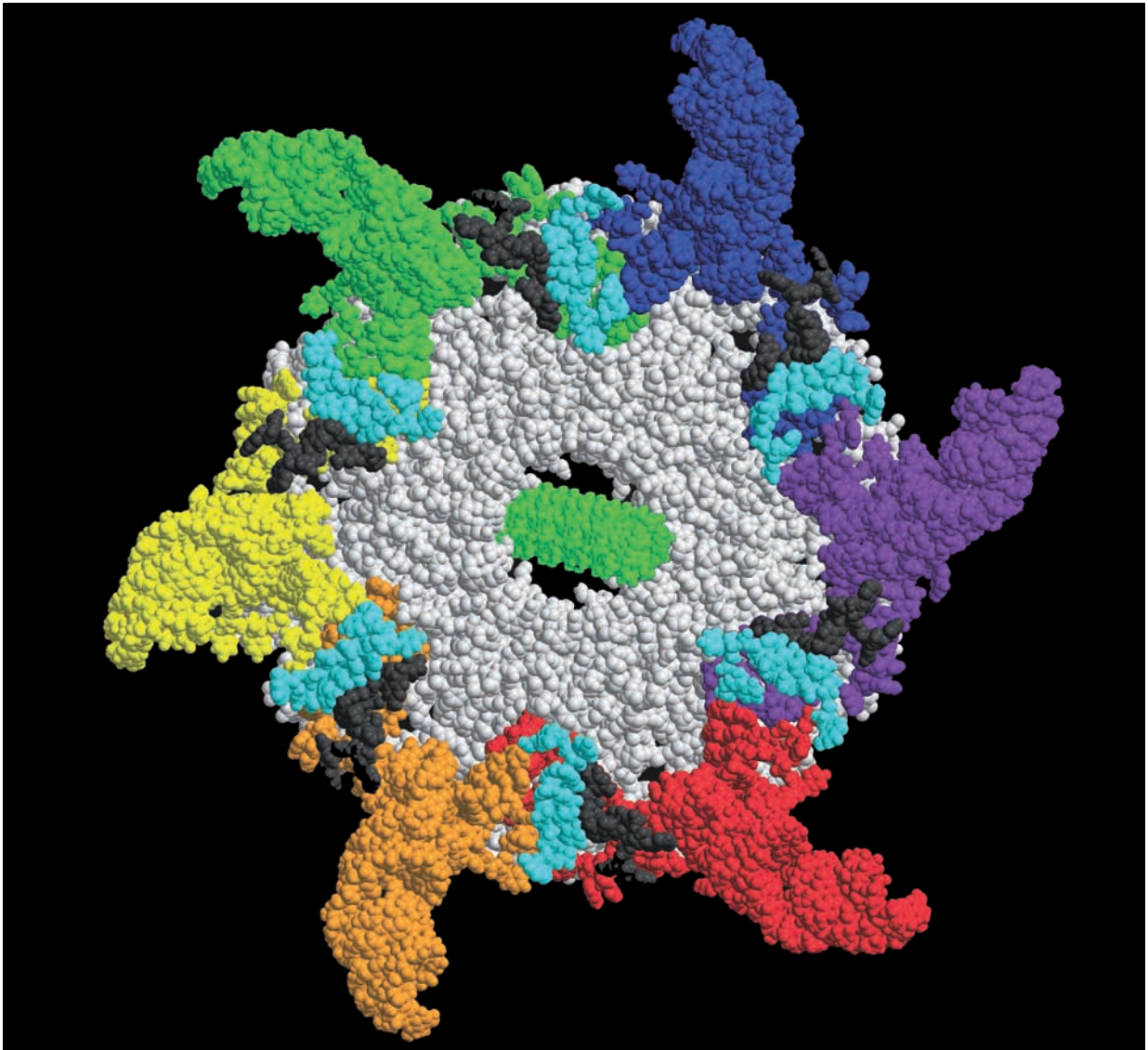
vodiče pro přenos proudu a jsou dalším základním stavebním kamenem jakéhokoliv elektrického systému. U uhlíkových nanotrubiček se zjistilo, že mají mnoho specifických vlastností pro použití v technologii NEMS, například při připojování uhlíkových nanotrubic k jiným nanostrukturám. Uhlíkové nanotrubice lze strukturálně nastavovat a mohou tvořit složité nanoelektrické systémy.

I když jsou vlastnosti uhlíkových nanotrubic a grafenu velmi užitečné, mají oba produkty i některé nevýhody. Jedním z hlavních problémů je chování uhlíku v reálném prostředí. Zjistilo se, že uhlíkové nanotrubice vykazují velkou změnu elektrických vlastností, když jsou vystaveny kyslíku. Před jejich implementací je proto nutné důkladně prozkoumat změny elektrických a mechanických vlastností, zejména jejich velký povrch, který může snadno reagovat s okolním prostředím. Kovová nebo polovodičová vodivost uhlíkových nanotrubic se mění v závislosti na jejich zkroucení při zpracování. Z tohoto důvodu musí nanotrubice projít speciální úpravou, která zajistí vhodnou vodivost u všech nanotrubic. Grafen má také velmi komplikované vodivé vlastnosti v porovnání s obvyklými polovodiči. Grafen totiž nemá zakázaný pás, a v podstatě se tak mění všechna pravidla pro pohyb elektronů v zařízeních na bázi grafenu. Obvyklé konstrukce elektronických zařízení tedy nefungují a musí se pro tyto nové elektronické přístroje navrhnout zcela nové architektury.

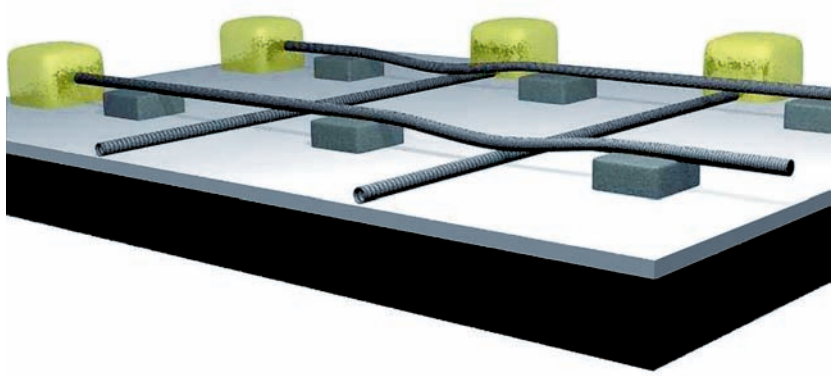
Non-volatilní paměť

Paměťový prvek NRAM (*Nonvolatile Random Access Memory*) je zařízení postavené z mřížky uhlíkových nanovodičů, které udrží informaci ON/OFF i v případě výpadku napájení.

Spodní vrstvu tvoří paralelní soustava nanodrátů (nebo nanotrubic) položených na dielektrické

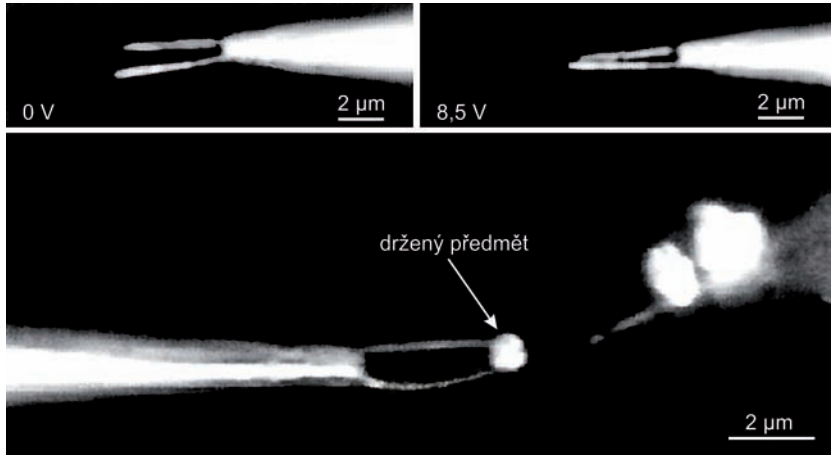


Nanomotor, který vyvinul profesor Peixuan Guo, je složen z šestice molekul pRNA (ozubí), které jsou navázány na řetězec DNA ve středu. Využití se předpokládá v nanomedicíně. Zdroj: Guo Laboratories.



Non-volatilní paměť (NRAM). Pohled na pole zavěšených příček obsahující čtyři křížení. Dva prvky jsou ve stavu ON (kontakt) a dva prvky jsou ve stavu OFF (oddělené). Tmavošedá vrstva dole je dopovaný křemík, světle šedá vrstva nad ním je dielektrikum. Kontaktní elektrody jsou zlaté. Zdroj: Thomas Rueckes/Science.

Nanopinzeta z roku 1999 vznikla připojením dvou nanotrubic o průměru 50 nm se zlatými elektrodami na mikropipetu. Nožičky se ovládají napětím na elektrodách. Zvyšováním napětí (z 0 V na 8,3 V) se nožičky začnou přibližovat. Po odstranění napětí se opět oddálí do původní polohy. Zdroj: Harvardova univerzita.



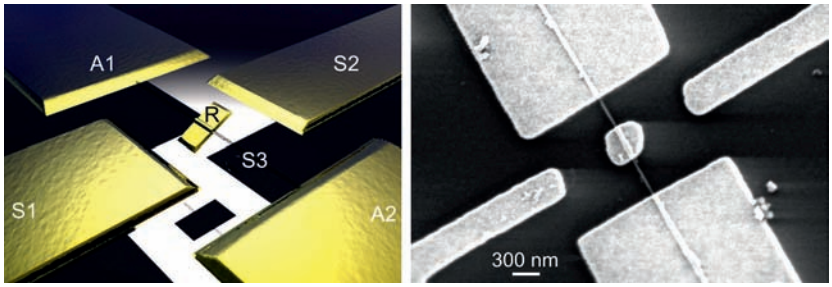
vrstvě, která je odděluje od základní vrstvy polovodiče (dopovaného křemíku). Horní vrstva pružných uhlíkových nanotrubic je zavěšena příčně nad spodní, a to na periodickém poli sloupků z organického nebo neorganického materiálu. V křížení působí dvě síly: pružnost zavěšených trubiček (odděluje horní soustavu od spodní) a van der Waalsova přitažlivá síla, která trubičky spojí, pokud se k sobě dostanou pod určitou kritickou vzdálenost, a udržuje je spojené i proti pružné síle horní nanotrubice. Každý spoj je tak v bistabilním stavu: přimáčkneme-li horní trubičku ke spodní, zůstanou trvale spojené van der Waalsovou silou. Ono „přimačknutí“ či odtržení mají na starosti napěťové impulzy procházející oběma vrstvami nanovodičů.

Odpor křížení dvou nanotrubic závisí exponenciálně na jejich vzdálenosti, proto je odpor rozpojených nanovodičů o řád vyšší než u spojených. Tím jsou velice dobře definované stavy ON a OFF a tyto stavy můžeme lehce přečíst změřením odporu přechodu. Navíc přepínání mezi stavy ON a OFF lze lehce provést přivedením vhodného pulzu na příslušnou elektrodu, a vyvolat tak přitažlivou či odpudivou silu. Aby toto bylo možné, musí být vzdálenost mezi vodiči přibližně 10 nm. Pod touto hodnotou překoná van der Waalsova síla elastickou sílu horní trubičky a oba nanovodiče zůstanou spojené i po odstranění napětí. Tím je v non-volatilní paměti informace uchována i bez přístupu ke zdroji elektrické energie.

Rotační nanomotory

Rotační motor založený na NEMS technologii vyvinuli například na

Kalifornské univerzitě v Berkeley. Jako rotor slouží pevný obdélníkový kovový plátek (na obrázku R), který je příčně připojen uhlíkovou vícestěnnou nanotrubicí. Ta je klíčovým prvkem v sestavě, slouží jako nosná hřídel rotorové destičky, jako elektrická průchodka mezi elektrodami (na obrázku jsou označeny A1, A2) a umožňuje samotnou rotaci destičky kolem osy. Přívodní elektrody leží na oxidovaném povrchu křemíkového čipu.



Rotor vyvinutý v Kalifornské univerzitě. Nalevo je schéma, napravo fotografie pořízená elektronovým mikroskopem před závěrečným vysokofrekvenčním leptáním zařízení. Rotor byl připraven metodou „shora dolů", tedy postupnou miniaturizací. Zdroj: UCB.

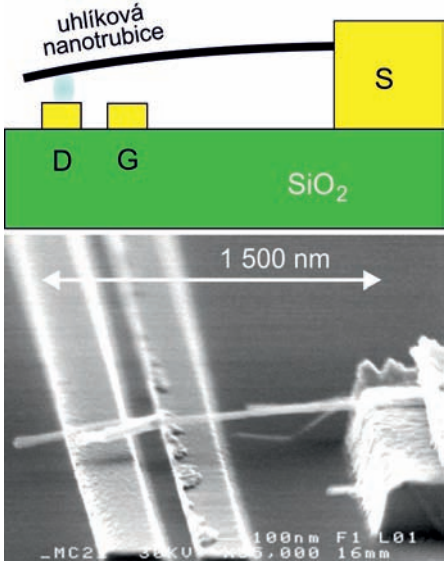
Tato sestava je obklopena třemi pevnými elektrodami statoru: dvě jsou uloženy vodorovně proti sobě v rovině rotoru (S1, S2) a třetí („hradlo" S3) je zanořena pod povrchem. Motor je řízen čtyřmi stejnosměrnými signály. Jeden přichází na rotorovou destičku a tři zbývající na statorové elektrody. Možné je měnit polohu destičky, rychlost a směr otáčení. Rozměry destičky byly přibližně 200 nm na 500 nm. Stejnosměrné napětí 50 V mezi rotorem a elektrodou S3 způsobilo vysokou rychlost otáčení rotoru. Po odpojení napětí se rotorová destička rychle vrátila do původní vodorovné polohy.

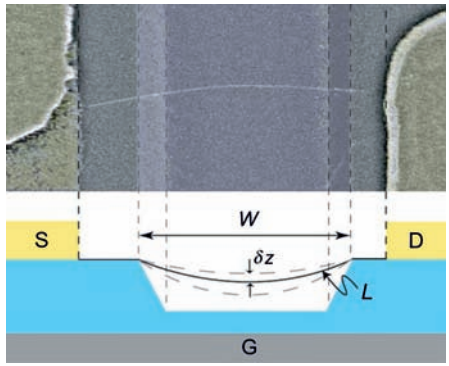
Obdobná zařízení bude možné využít jako senzorové prvky pro různá měření, rotační aktuátory, spínací prvky, pádélka pro detekci či vytvoření pohybu kapaliny v mikrofluidních systémech nebo také pro řízené přerušování optického svazku.

Nanorelátka

Nanorelé založené na pružné uhlíkové nanotrubici poprvé popsal Jari Kinaret v roce 2003 na Chalmersově univerzitě v Göteborgu. O rok později se tuto součástku podařilo vyrobit týmu pod vedením Eleanora Campbella. Jde o zařízení se třemi elektrodami (klasicky označovanými S, G a D). Nanorelé má tvar zvýšené terasy, na které je vodorovně k elektrodě S připevněna pružná uhlíková nanotrubice. Ta se vznáší ve výšce přibližně 80 nm nad dvěma dalšími elektrodami G a D, mezi nimiž je vzdálenost zhruba 250 nm. Přivedeme-li vhodné napětí mezi elektrody S a G (nad 10 V), dojde k zajímavému jevu. Rozdílné náboje ohnou nanotrubici směrem k elektrodě G a mezi nanotrubicí a elektrodou D se zmenší vzdálenost natolik, že elektrony začnou

Nanorelé s uhlíkovou nanotrubicí vyrobené na Chalmersově univerzitě v Goteborgu v roce 2004. Dole je fotografie z elektronového mikroskopu. Zdroj: Nano Letters, New Journal of Physics.





Laditelný elektromechanický oscilátor. V horní části je snímek zařízení pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem. Snímek je převeden do nepravých barev. Dobře patrná je zavěšená nanotrubice. V dolní části je schematický náčrtek laditelného elektromechanického oscilátoru. Zdroj: Nature.

tunelovat. Se zmenšující se vzdáleností prudce naroste elektrický proud a dojde k sepnutí relé. Napětím na elektrodách tak lze řídit proud tekoucí mezi nimi. Silně nelineární závislost na průhybu nanotrubice a její vzdálenosti od elektrody D vede k přechodu z nevodivého stavu (OFF) na vodivý stav (ON) v závislosti na napětí přivedeném na elektrodu G. Značná nelinearita obvodu umožňuje zesílení velice slabých signálů přivedených na elektrodu G. Předpokládá se, že nanorelé bude možné využít pro paměťové prvky, pulzní generátory, signálové zesilovače i logické prvky.

Laditelné elektromechanické oscilátory

Laditelný oscilátor připravili na Cornellově univerzitě v USA v roce 2004. Základem je nanotrubice zavěšená nad „údolím“. Oba konce jsou upevněny k elektrodám (materiál Au/Cr). Pod nanotrubicí je na křemíkovém čipu další elektroda, která je kapacitně vázána s trubicí. Celá soustava tvoří oscilátor s široce laditelnou frekvencí. Údolí pod trubicí je široké 1 200 až 1 500 nm a hluboké 500 nm. Pohyb nanotrubice je vyvolán a detekován pomocí kapacitní vazby s elektrodou nacházející se pod nanotrubicí. Napětí na této elektrodě má jak stejnosměrnou, tak střídavou složku. Stejnosměrná složka napíná nanotrubici a nastavuje tak její mechanické napětí. Střídavá složka vytváří periodickou sílu, která uvádí nanotrubici do pohybu. Pokud se střídavá složka blíží rezonanční frekvenci, začne nanotrubice kmitat s velmi velkou amplitudou.

Nanopapír

Komerčně prodávaný buckypapír společností NTL.



Nanopapír (nebo také *buckypapír* na počest architekta Buckminstera Fullera, který navrhoval kopule podobné molekulám fullerenu) je materiál složený ze slepených nanotrubiček. Hustota nanopapíru je menší než patnáctina hustoty oceli, jeho pevnost je ale pětisetnásobná. Navíc má ve směru uhlíkových nanotrubic vynikající tepelnou i elektrickou vodivost. Poprvé ho připravil v roce 2008 profesor Ding Wang ve Výzkumném středisku nanotechnologií v Pekingu. Dnes ho již komerčně vyrábí společnost NTL (*Nano Tech Labs*).

Zdá se, že buckypapír má před sebou skvělé vyhlídky. Své místo nepochybně nalezne v protipožární ochraně. Stačí předmět pokrýt tenkou vrstvou buckypapíru a o ostatní se postarají uhlíkové nanotrubičky. Spolehlivě odrážejí tepelné záření a chrání předmět před vznícením. Buckypapír by mohl posloužit jako účinné pancéřování. Uvažuje

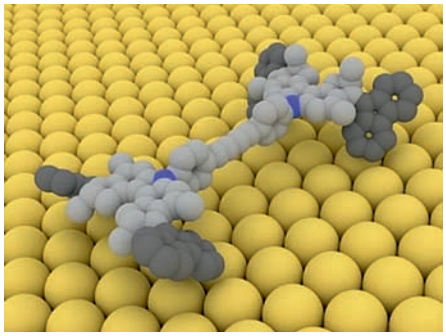
se také o jeho využití při konstrukci počítačových a televizních displejů nové generace. Vynikající tepelná vodivost umožní výrobu nových druhů chladičů, které budou odvádět teplo z elektroniky mnohem účinněji, než je to možné v současné době, což by mohlo vést k další vlně miniaturizace.

Tenký film z buckypapíru může chránit elektronické obvody a zařízení v letadlech před elektromagnetickým rušením. Takové vrstvy by mohly chránit i elektromagnetické „podpisy" ve vojenských letadlech, které slouží k jednoznačné radarové identifikaci. Buckypapír by také mohl fungovat jako filtrační membrána k zachycení mikročástic ze vzduchu nebo z tekutin. Nanotrubice v buckypapíru jsou nerozpustné a lze je nastavit do různých funkčních skupin, což umožní selektivně odstraňovat (nebo detekovat) určité látky. Buckypapír se může využít pro růst biologických tkání, například nervových buněk. Buckypapír může být elektrifikovaný a podpořit růst specifických typů buněk. Jako hudba budoucnosti zní úvahy o jeho využití jako umělého svalu. Cena za jeden arch buckypapíru (30×30 cm), který má plošnou hustotu 20 g/m^2 je 115 USD (přes 2 000 Kč).

* * *

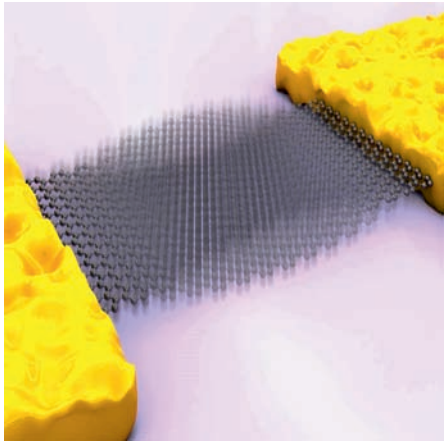
Vynikajícím pomocníkem při návrhu a testování NEMS technologií jsou počítačové simulace. Nejčastěji se simulace provádějí metodami molekulární dynamiky nebo simulacemi v rámci mechaniky kontinua. Simulace umožňují analýzu mechanických, elektrických a tepelných vlastností navrhovaných součástek, včetně jejich stability. Příprava nanosoučástek se postupně přesouvá z univerzitních laboratoří, kde byly vyráběny jednotlivé unikátní kusy, do laboratoří komerčních společností. Zde tyto prvky už nejsou raritou, ale stávají se postupně součástí nových technologií.

■ **Petr Panchártek, Jan Jílek, 29. 5. 2015, AB 19–20/2015**



V roce 2016 byla udělena Nobelova cena za chemii za stavbu nanostrojů z molekul. Získali ji Jean-Pierre Sauvage, J. Fraser Stoddart a Bernard Feringa. Na obrázku je jejich nanoauto. Zdroj: Nobelovský server.

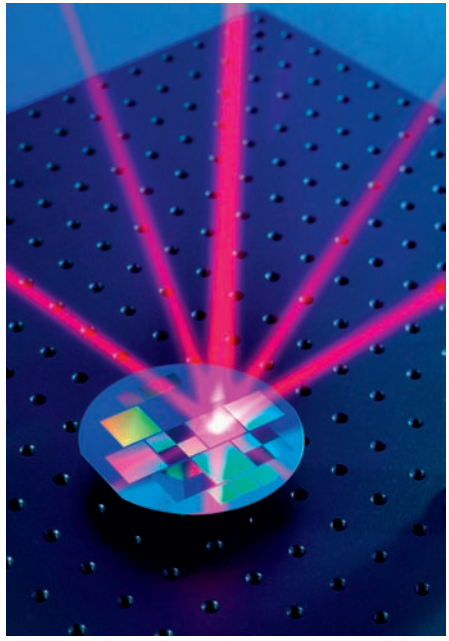
Mechanický nanorezonátor. Zdroj: ICFO/A. Bachtold.



Cestování s kvantovou technologií 2.0

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 a frekvence se dopplerovsky zvýší, 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,*

Vědci z Imperial College v Londýně a Národní fyzikální laboratoře (NPL) vyvíjejí polovodičové čipy s mikromřížkou, které mohou štěpit laserové světlo do mnoha paprsků. Ty lze potom využít k laserovému ochlazování atomů pro kvantové technologie. Zdroj: NPL.



Aniž bychom si to uvědomovali, mnoho věcí v našem okolí je založeno na kvantových technologiích. Jde například o lasery, kamery pro noční vidění a vlastně veškerou elektroniku, každá polovodičová součástka mohla být vyvinuta jen proto, že naši předchůdci porozuměli kvantovým vlastnostem polovodičů. Tyto i další podobné technologie bereme dnes jako samozřejmost a ani si neuvědomujeme, že souvisí s kvantovými vlastnostmi mikrosvěta. V posledních letech si ale razí cestu druhá generace kvantových technologií, která je založena na manipulaci s jednotlivými kvantovými objekty. Zpravidla jde o ultrachladné atomy držené v důmyslných elektromagnetických pastech, které přivedeme do superpozice stavů (například laserovými impulzy) a využíváme vlastností této superpozice.

Jeden příklad za všechny: chomáč ultrachladných atomů vymrštíme pomocí laserových impulzů na balistickou dráhu. Na tom není nic divného a dokážeme to například i s tenisákem. My ale dnes umíme tyto atomy přivést do superpozice stavů, takže každý z nich vystoupá do dvou výšek současně. Jako by byl schizofrenní a pohyboval se po dvou drahách naráz. A protože má takový atom i vlnové vlastnosti, interferují spolu vlny příslušející oběma drahám (tedy atom interferuje sám se sebou) a tento interferenční obrazec je závislý na hodnotě tíhového pole, které z něho dokážeme určit. Na světě je supercitlivý gravitační gradientometr (měří spád gravitačního pole) založený na základních principech kvantové teorie. Kvantové gradientometry, akcelerometry nebo gyroskopy založené na kvantovém chování atomů by mohly mít přesnost až o 10 řádů lepší než současná zařízení.

Chyby měření přístrojů založených na technologii 1.0 mají nejrůznější příčiny. U technologie 2.0 se chyby měření blíží až k teoretické hranici dané Heisenbergovými relacemi neurčitosti. Takové technologie označujeme 2.0 a stále intenzivněji pronikají do běžného života lidí. Podívejme se, jak se tyto technologie prosazují při navigaci.

Kvantová navigace

Navigaci na základě kvantové technologie vyvíjejí v řadě institucí, k nejvýznamnějším patří Národní fyzikální laboratoř (NPL, *National*

Physical Laboratory) ve Velké Británii. Související výzkum provádí také anglická laboratoř DSTL (*Defence Science and Technology Laboratory*), kde vyvíjejí zařízení ke kvantovému měření gravitace. Takové zařízení by mohlo odhalit nehomogenity gravitačního pole pod zemí a detekovat například staré důlní šachty či nová ložiska rudy vhodná pro další těžení.

Projekt je financován vládou Velké Británie a pro období let 2015 až 2020 bylo pro výzkum vyhrazeno 270 milionů liber (10 miliard Kč). V podstatě se jedná o vývoj akcelerometrů, gyroskopů, gravitačních gradientometrů a ultrapřesných hodin. Tyto přístroje nejsou založené na tradiční elektromechanice, ale na měření kvantových vlastností jednotlivých atomů nebo shluků atomů.

Pod pojmem „navigace“ si většina lidí představí navigační přístroj umístěný na čelním skle svého automobilu. Navigaci využívají hlavně dopravní prostředky na souši, na vodě či ve vzduchu. Satelitní navigace ale nefunguje pod vodou. Pokud se například GPS navigace, tak jak jí známe z automobilu, ponoří do vody (nedoporučuje se to zkoušet), pak stačí jen tenká vrstva vody a GPS navigace okamžitě ztratí nezbytný družicový signál.

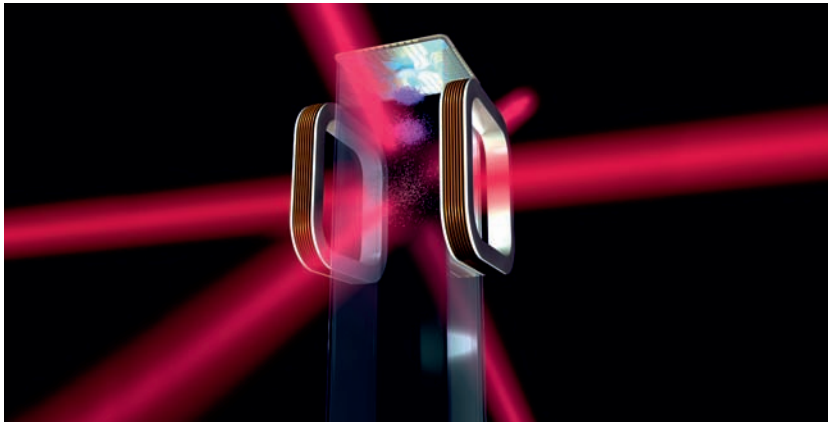
Prostředkům pohybujícím se často pod vodou, jako jsou ponorky, by se přesná navigace také hodila. Ponorky v současnosti zaznamenávají svou polohu pouze pomocí satelitní navigace na vodní hladině a po ponoru pak používají soustavu akcelerometrů ke zjištění směru pohybu a vypočtení polohy. Tato technologie není moc přesná, například po podmořské cestě trvající 24 hodin se může ponorka vynořit s až kilometrovou odchylkou. Proto se musí akcelerometry v ponorkách stále překalibrovávat a vyměňovat.

Navigační systém nové generace, který bude založený na kvantových principech, bude mít stejné komponenty jako normální navigační systém, tedy bude obsahovat tři akcelerometry, tři gyroskopy a hodiny, ale všechny komponenty budou provádět měření na základě chování ultrachladných atomů.

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-Tannoudjimu a Williamovi Philipsovi Nobelova cena za fyziku.

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. Například základní energetický stav atomu značíme symbolem |S>, vakuový stav symbolem |0>, živou kočku označíme |Ž>, mrtvou kočku |M> a podobně. Kvantový stav je zpravidla charakterizován sadou kvantových čísel a je matematicky vyjádřen tzv. vlnovou funkcí.*

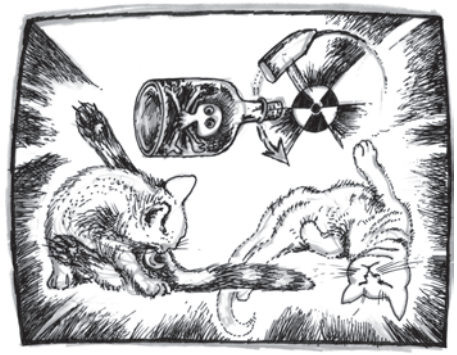
Umělecká vize magnetooptické pasti a atomového čipu, kterou vyvíjí NASA pro Laboratoř chladných atomů Mezinárodní kosmické stanice. Zdroj: NASA/JPL/Caltech.



Superpozice stavů – *pokud dva stavy představují fyzikálně realizovatelný stav systému, je možná i superpozice těchto stavů. Například kvantově mechanická kočka nemusí být jen živá nebo mrtvá, může být i „obojí zároveň“. Takový stav značíme a|Ž>+b|M>, kde a a b jsou čísla vyjadřující váhu. Pokud na kočce v tomto superponovaném stavu provedeme měření, s pravděpodobností $|a|^2$ ji najdeme živou a s pravděpodobností $|b|^2$ mrtvou. Kvantová superpozice stavů je běžná pro kvantové objekty, například elementární částice nebo atomy. U makroskopických objektů (kočka, člověk) komunikujících s okolím je nemožná.*

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. Stejné relace platí také mezi dalšími veličinami. Ve vakuu mohou po velmi krátkou dobu vznikat ve shodě s relacemi neurčitosti fluktuace (objekty) o určité energii. Čím vyšší energie, tím kratší doba života těchto fluktuací.*

Schrödingerova kočka. Nevíme, zda se ampule s jedem rozbila, či nikoli. Kočka je v superpozici živé a mrtvé kočky až do provedení měření. Kresba: Ivan Havlíček.



V následujícím přehledu se seznámíme s některými kvantovými komponentami vyvíjenými pro budoucí kvantové technologie.

Kvantový akcelerometr

Pro účely podmořského cestování byl vyvinut kvantový akcelerometr, založený na kvantové interferenci superchladných atomů. Toto zařízení umožní ponorkám přesně určit svou polohu do jednoho metru i po celodenním cestování pod vodní hladinou. V kvantovém akcelerometru se nachází optická soustava laserů, které dokáží ochladit pohybující se atomy na hodnotu blízkou absolutní nule. Atomy jsou přitom zmrazeny v určité poloze. Poté se měří změna pohybu těchto zmrazených atomů způsobená zrychlením. Na rozdíl od makroskopického kusu materiálu v klasickém akcelerometru, který podléhá namáhání a mění své vlastnosti s časem, je technologie v atomárním měřítku mnohem přívětivější. Díky tomu, že atom je stejný jako jiný atom téhož prvku, a díky tomu, že atom, jak ho vidíme dnes, bude stejný i za rok, umožňuje kvantový akcelerometr mnohem přesnější čtení a měření síly, která působí na jednotlivé zmrazené atomy.

Vědci z britské DSTL již takové zařízení vyrobili, nyní pracují na jeho zmenšení, aby jej mohla používat i pěchota, nejen ponorky či lodě. Uvažuje se i o využití v autech či mobilech dostupných běžným spotřebitelům. Klíčovým úkolem bude výrazná miniaturizace součástek včetně laserů, optiky a kontrolního systému. K dalším klíčovým úkolům patří vývoj a příprava velmi malé vakuové komory s vynikajícími optickými vlastnostmi.

Měření frekvence

Přesnost takových systémů je dána frekvencí využívanou při měření. V případě standardních cesiových atomových hodin je frekvence 9,2 GHz. V nových technologiích mohou být použity pulzní lasery s frekvencí až 100 THz. K měření frekvence se využívá technika optického „frekvenčního hřebenu“, jejímž vynálezcům (Roy Glauber, John Hall, Theodor Hänsch), byla udělena Nobelova cena v roce 2005. Optický frekvenční hřeben umožňuje měřit frekvenci s relativní přesností 10^{-15}, otevírá tak bránu k měřením s bezprecedentní přesností patnácti platných cifer. Poprvé lidstvo získává dostatečně přesný nástroj ke sledování možných změn základních přírodních konstant v čase a k vývoji nové generace přístrojů. Příkladem mohou být „optické“ atomo-

vé hodiny velikosti krabice od bot, které vytvořil tým profesora Kai Bongse z NPL na univerzitě Birminghamu.

Gravitační gradientometr

Gravitační gradientometr je zařízení, o němž jsme se zmínili již v úvodu. Za úkol má měřit gradient (spád) gravitačního pole. Základem klasického přístroje je měření zrychlení dvou těles nacházejících se ve dvou blízkých místech. Kvantová verze využívá atomů připravených za pomoci laserového pulzu v superpozici dvou stavů. V každém z obou stavů se vržený atom dostane do dvou různých výšek a hmotnostní vlny příslušející těmto kvantovým stavům spolu interferují. Tuto interferenci je možné mapovat za pomoci dalšího (rezonančního) laserového paprsku.

Předpokládaná přesnost je tak vysoká, že bude možné podrobně zmapovat dutiny ve skále (působí na okolí nižší gravitací), například ve starých dolech. Na tomto základě je možné sestrojit tzv. „kvantový dalekohled“, přístroj, kterým za pomoci gravitace uvidíme i za neproniknutelné překážky.

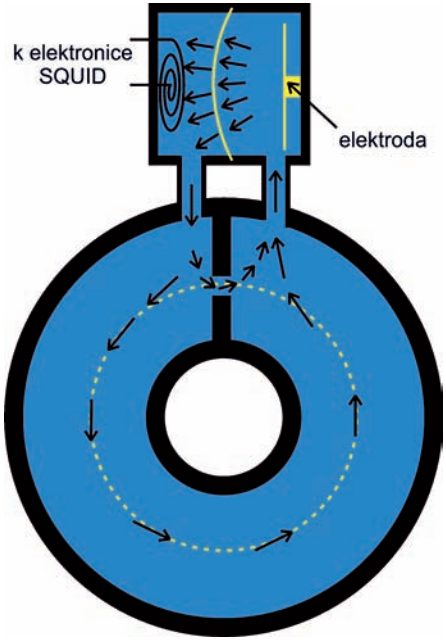
Současné algoritmy používané k vytváření obrazů z dat pořízených gradientometry jsou vhodné do desetinásobku citlivosti klasických zařízení. Pro kvantové verze bude třeba vyvinout zcela nové matematické algoritmy rekonstrukce obrazu. Kvantové gravitační gradientometry by měly být v budoucnosti základem přístrojů pro kvantovou navigaci.

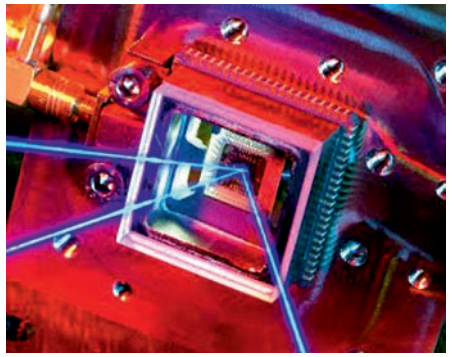
Kvantový gyroskop

První kvantový gyroskop založený na rotaci supratekutého helia zkonstruoval Richard Packard z Kalifornské univerzity v Berkeley. Změna orientace osy setrvačníku se měřila změnou tlaku na membráně způsobenou prouděním supratekutiny. V další variantě kvantových gyroskopů jsou ultrachladné atomy, které jsou drženy v asymetrické pasti magnetických a elektrických polí. Při otáčení pasti se chladné atomy dostanou do superpozice dvou stavů – rotujícího a nerotujícího. Atomy v takové superpozici jsou velmi citlivé na jakékoliv další otáčení. Na Univerzitě v Leedsu se využitím kvantových gyroskopů pro navigaci zabývá tým vedený profesorem Timem Spillerem. První výsledky ukazují, že se měření za pomoci kvantových gyroskopů skutečně blíží k hraniční přesnosti dané Heisenbergovými relacemi neurčitosti.

Kvantová interference – *skládání amplitud pravděpodobnosti několika možností vývoje systému. Amplitudy se mohou vyrušit, potom hovoříme o destruktivní interferenci. Pokud se amplitudy zesílí, hovoříme o konstruktivní interferenci. Pravděpodobnosti dějů jsou druhou mocninou součtu amplitud pravděpodobností jednotlivých možností. Je-li objekt v superpozici, stavů, mohou jednotlivé stavy interferovat, tedy objekt interferuje sám se sebou.*

Jedna z variant kvantového gyroskopu využívá k detekci změn rotace supratekuté rotující helium a jím způsobené změny tlaku. Zdroj: Weebly/NASA.





Iontová mikropast pro atomové hodiny ve formě čipu. Zdroj: National Physical Laboratory.

Iontová past

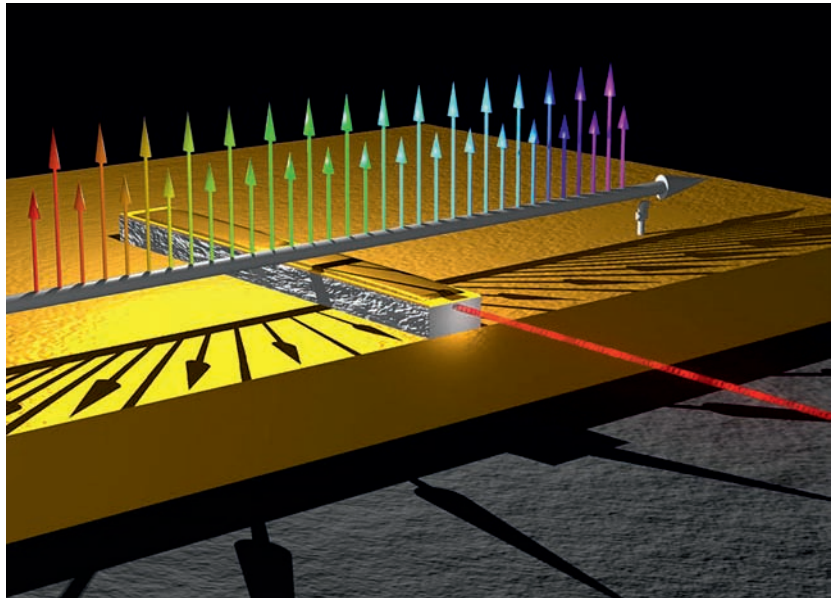
Iontové pasti jsou zařízení, která udržují v daném místě ionizované atomy nebo shluky atomů za pomoci důmyslné konfigurace elektrických a magnetických polí. Atomy jsou zpravidla laserově ochlazovány na velmi nízké teploty (až nanokelvinové), tím se sníží šance uniknout z pasti a eliminuje se tepelné záření.

V NPL vyvíjí tým pod vedením Alastaira Sinclaira miniaturní past velikosti čipu. Past má tvar štěrbiny v destičce (plátu), na hranách štěrbiny jsou vodiče vytvářející elektrické pole tvaru písmene X. V pasti může být zachycen buď jediný atom, nebo řada atomů s odstupy v mikrometrech a s přesností lokalizace v desítkách nanometrů. Vyvíjené zařízení se může hodit do atomových hodin (přechody v atomárních obalech mají přesně definované frekvence) pro přesné měření času nebo při zpracování kvantové informace.

Frekvenční hřeben

Laser poskytující kvantovou kaskádu frekvencí je zařízením, které umožnilo spektroskopická měření na zcela nové úrovni. Zdroj: Fabio Bergamin/ETH.

Frekvenční hřeben je dlouho chybějící detekční zařízení, které vyplňuje mezeru mezi světelným zdrojem se spojitým spektrem (například žárovkou) a monochromatickým zdrojem (například laserem). Frekvenční hřeben je zdrojem mnoha (řádově milionů) oddělených frekvencí. Je to stejné, jak kdybychom použili milion jednotlivých laserů s různými frekvencemi. Za pomoci měření na mnoha frekvencích lze analyzovat složení vzorků (například nečistot ve vodě) během sekund.

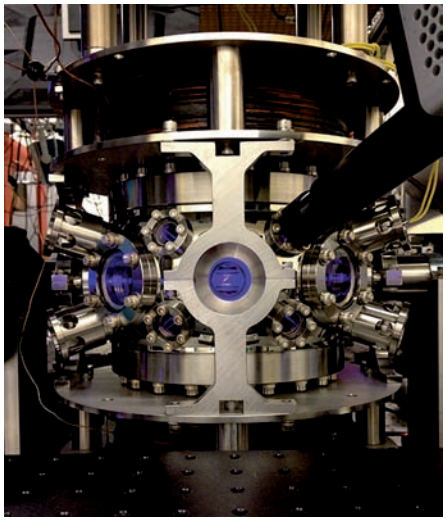


Na univerzitě v Glasgow a na Univerzitě Heriota Watta v Eddinburgu vyvíjejí miniaturní frekvenční hřeben, jehož frekvence by měly mít pravidelné rozestupy od stovek GHz (běžně elektronicky měřené frekvence) až po stovky THz (optické frekvence). Cílem jejich výzkumného projektu je postavit frekvenční hřeben o velikosti srovnatelné s běžným čipem.

Magnetooptická mikropast pro neutrální atomy

Relativně snadno lze zachytávat ionty. K mnoha experimentům jsou ale zapotřebí neutrální atomy. I takové objekty je možné zachytit v pasti z elektrických a magnetických polí, ale je třeba využít jejich dipólové vlastnosti (nesymetrické rozdělení náboje a nenulový magnetický moment). Takovou past vyvíjejí na Univerzitě v Southamptonu. Atomy jsou drženy ve vysokém vakuu a laserově ochlazovány na teplotu blízkou absolutní nule.

Zachycené neutrální atomy je opět možné využít jako médium pro atomové hodiny. Standardní atomové hodiny provozované za pokojové teploty se mohou od skutečného času odchýlit přibližně o jednu sekundu za 3 000 let. Přesnost hodin vyvíjených v Southamptonu by mohla být až o 7 řádů vyšší, teoreticky by se hodiny mohly odchýlit od správného času o 0,5 sekundy za celou dobu existence vesmíru. Současný prototyp je metr veliký. Odborníci z Univerzity v Southamptonu ale doufají, že se jim díky čipovým technologiím podaří vyvinout atomové hodiny o velikosti poštovní známky. Vakuová komora bude vyrobena z aluminosilikátového skla, které má mnohem nižší propustnost než jiné druhy skel.

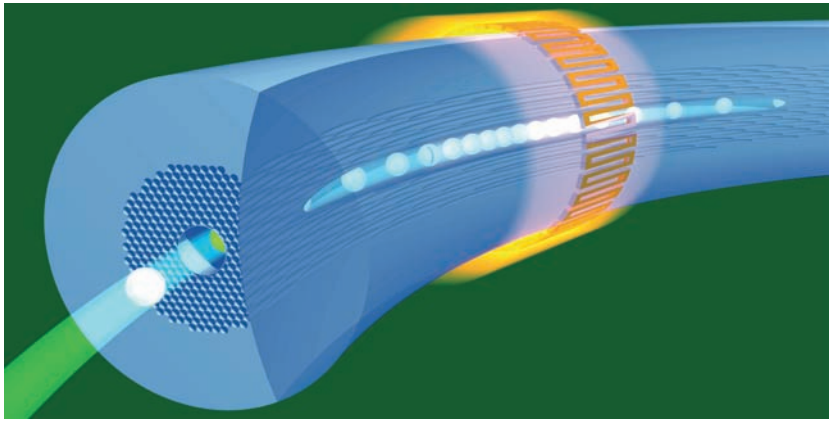


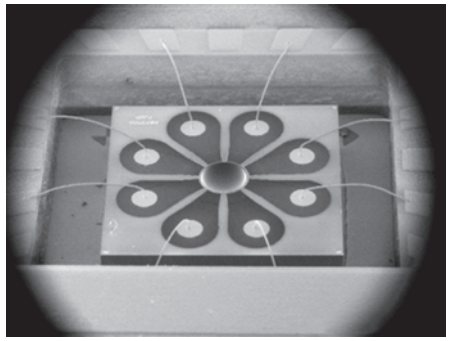
Magnetooptická past vyvinutá na Kalifornské univerzitě v Los Angeles. Slouží k výzkumu exotických chemických reakcí atomů vzácných zemin. Zdroj: S. J. Schowalter.

Duté optické vlákno jako fotonický krystal

Ve spolupráci NPL a ORC (*Opto-Electronics Research Center*) z Univerzity v Southamptonu je vyvíjen další nezvyklý prototyp atomových hodin. Jejich základem je duté vlákno, které má vnější průměr 350 μm a vnitřní jádro o průměru 80 μm. Podél vlákna je ve vnější části soustava paralelních otvorů, díky nimž se celé vlákno chová jako periodická dielektrická struktura, která v určitém kmitočtovém pásmu zabraňuje vniknutí elektromagnetických vln (tzv. fotonický krystal). V něm jsou zachyceny cesiové nebo rubidiové atomy. Ve standardních hodinách je signál snímán na frekvenci 9,2 GHz. Ve vyvíjených hodinách je signál detekován laserovým paprskem procházejícím

Duté optické vlákno naplněné chladnými atomy, na nichž je rozptylován laserový paprsek. Duté vlákno slouží jako fotonický krystal. Zdroj: American Institute of Physics.





Diamantový MEMS rezonátor vyvinutý v Laboratoři Charlese Starka Drapera. Zdroj: C. S. Draper Laboratory.

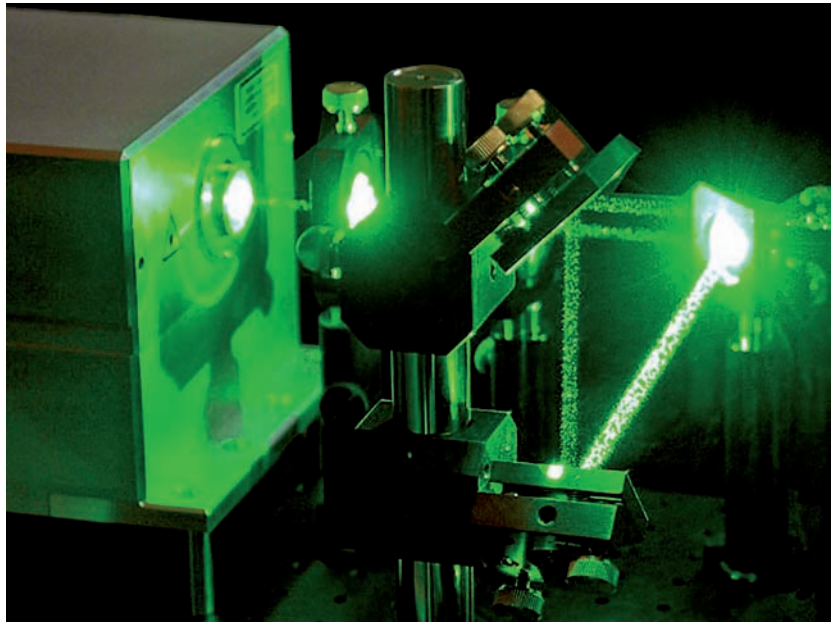
vláknem. Nová konstrukce umožňuje lepší odstup signálu od šumu, nižší spotřebu a miniaturizaci. Vývojáři doufají, že nové hodiny budou mít velikost notebooku.

Diamantový rezonátor

Elektromechanické součástky (MEMS) sice nemají nic společného s kvantovými součástkami založenými na vlastnostech atomů, ale jejich miniaturizace dosáhla fascinujících možností. Typickým příkladem je diamantový rezonátor – polokoule z diamantu na skleněném substrátu sloužící jako miniaturní setrvačníkový rezonátor může mít velikost jen 20 μm. Klasický křemenný piezoelektrický rezonátor v hodinkách a laptopech má rozměry kolem 1 mm. Diamantový MEMS rezonátor vyvíjejí například v britské společnosti Astrium nebo v americké Laboratoři Charlese Starka Drapera.

Laditelný laser

Pulzní laditelný titanový safírový laser, který je založen na mechanickém rezonátoru. Zdroj: Warsash Scientific.

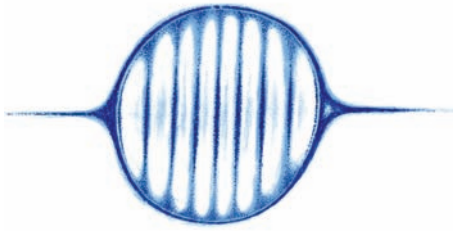


Společnost M^2 (*M squared*) v Glasgow vyvinula laditelný laser SolsTiS (Titanový safírový laser). Je velký asi jako větší kniha. Titanový safírový laser má údajně nejnižší šum z průmyslově vyráběných laserů, je laditelný, kontinuální a dává velmi úzkou spektrální čáru. Laser obsahuje kompaktní rezonátor s vysokou mechanickou stabilitou, který umožňuje jednoduché ladění a skenování. Laser lze využít v technologii laserového chlazení atomů, v holografii, v zařízeních s vysokou hustotou optických datových úložišť a v metrologii.

Budoucnost jistá

Pokud by se člověk žijící před sto padesáti lety probudil dnes, sotva by svět kolem sebe poznal. Elektrotechnická a později elektronická revoluce zcela změnila lidské životy, zasáhla do psychiky lidí,

mezilidských vztahů i do vnímání okolního světa. Nedokážeme si představit život bez elektrického osvětlení, ledniček, televizí, mobilů a počítačů. V současnosti ale elektronická revoluce přechází do další fáze, kdy začínáme využívat kvantové chování jednotlivých atomů včetně jejich spinu. Počínající příprava nových součástek nabírá na obrátkách a při rychlosti vývoje vůbec nemusíme čekat dalších 150 roků. Svět se změní před našima očima během deseti, maximálně dvaceti let. Naše křehká civilizace získá prostředky netušených možností a je jen na ní, jak s nimi naloží.



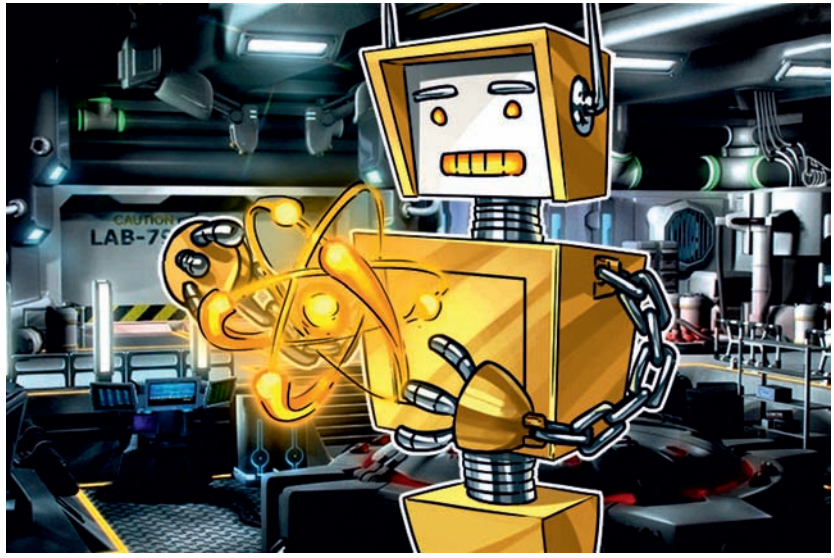
■ **Petr Panchártek, 27. 4. 2015, AB 24/2014, AB 15/2015**

Kvantové počítače

Kvantový počítač – *počítač využívající k zápisu informace kvantové vlastnosti objektů mikrosvěta, například spin elektronů nebo atomových jader. Kvantový počítač nese současně informaci o všech možných hodnotách sledované veličiny, a tím provádí paralelně výpočet všech možností, které mohou nastat. Výpočet je mnohonásobně efektivnější než u klasického počítače. Základní jednotka informace se nazývá qubit (kvantový bit).*

Kvantový bit, qubit – *kvantová verze bitu (jednotky informace). 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.*

U počítačů založených na elektronických prvcích došlo v posledním půlstoletí k neuvěřitelnému rozmachu. Počítače se staly základním rysem soudobé civilizace. Razantní miniaturizace počítačových součástek probíhala mnoho desítek let podle tzv. Moorova zákona, a to až do okamžiku, kdy se velikost jednotlivých prvků stala souměřitelná s objekty mikrosvěta a do jejich chování začaly zasahovat kvantové zákony. Další miniaturizace probíhá už pomaleji a brzy prolomí hranici kvantového světa. Tento fakt neznamená konec rozvoje výpočetní techniky. Naopak, v mezičase se lidstvo naučilo manipulovat s jednotlivými atomy a kvantové chování základních prvků integrovaných obvodů lze využít ke konstrukci počítačů zcela nového typu a zcela netušených možností. Ano, řeč je o kvantových počítačích, na jejichž vývoji se v současnosti usilovně pracuje v mnoha špičkových laboratořích po celém světě. První úspěchy zaplavují odborný tisk a ve vzduchu je cítit přicházející počítačová revoluce. Každý kvantový počítač, v němž křemíkové obvody nahrazují kvantové objekty, využívá tři základní jevy z kvantového světa: superpozici, provázanost a interferenci. Proto se nejprve seznámíme s některými vlastnostmi mikrosvěta.



Umělecká vize kvantového počítače, který manipuluje s jednotlivými atomy. Zdroj: Cointelegraph.

Spin

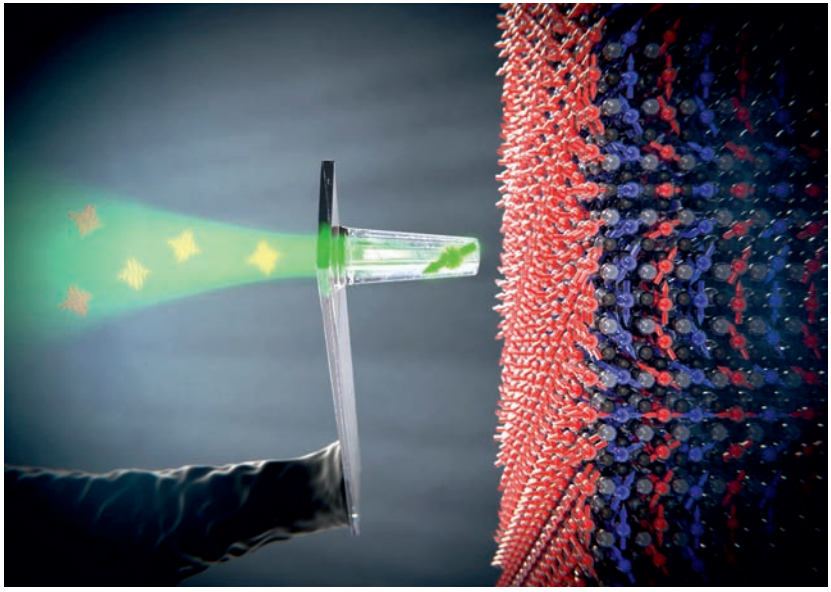
Některé vlastnosti částic, například elektronu, nemají vůbec žádný protějšek v makrosvětě. Typickým příkladem je spin. Každá makroskopická částice může mít nenulový moment hybnosti, který popisuje její oběh kolem určitého místa. Je-li částice nabitá, generuje tento otáčivý pohyb magnetické pole. V mikrosvětě má každá částice další podobnou vlastnost, které říkáme spin, a která se skládá s běžným momentem hybnosti. Tuto vlastnost si neumíme nijak představit, víme, že existuje a že je schopná u částic opět generovat

magnetické pole, a to dokonce i tehdy, když nejsou nabité (příkladem může být neutron).

Spin elektronu může být orientován dvěma směry, takže při měření dostaneme jednu, nebo druhou hodnotu (magnetický moment odpovídající spinu elektronu míří jedním, nebo druhým směrem). Odpovídající stavy můžeme označit například nahoru $|\uparrow\rangle$ a dolů $|\downarrow\rangle$, nebo jim přiřadit hodnoty $+\frac{1}{2}$ a $-\frac{1}{2}$ (přesněji $\pm\frac{1}{2}$ redukované Planckovy konstanty). Ve skutečnosti vždy měříme jen projekci spinu do určitého směru, takže tyto hodnoty vyjadřují velikosti projekcí.

Nejprve se začala bouřlivě rozvíjet elektronika, která v zařízeních využívá náboje elektronu, později začal razantní nástup spintroniky, která dokáže v našich technologiích využívat i spin elektronu nebo celého atomu. Kvantové počítače patří právě k takovým technologiím. Spin umíme měřit díky jím generovaným magnetickým účinkům. Nejjednodušší měření je založeno na průletu částice nehomogenním magnetickým polem. Částice se spinem $|\uparrow\rangle$ se vychýlí na jednu stranu, zatímco částice se spinem $|\downarrow\rangle$ se vychýlí na opačnou stranu. Částice s různou projekcí spinu, které prolétly magnetickým polem, proto dopadají do různých míst (detektorů). Takový experiment poprvé uskutečnili němečtí fyzici Otto Stern a Walter Gerlach v roce 1925. Dnes je možné vytříbenými postupy nejen měřit spin částic, ale dokonce s ním i manipulovat.

Moorův zákon – *pozorování Gordona Moora, jednoho ze spoluzakladatelů společnosti Intel, které říká, že počet tranzistorů na jednom čipu se přibližně každých 18 měsíců zdvojnásobí. Toto pozorování publikoval v roce 1965 s periodicitou 12 měsíců, v roce 1975 zákon upravil na dobu 18 měsíců. Nejedná se o přesný fyzikální zákon, ale toto tvrzení s malými odchylkami platilo přibližně až do roku 2015.*



Senzor měřící spin částic ve vzorku. Spin elektronu v hrotu reaguje se spinem atomů v měřeném vzorku, což se projeví změnami ve světelném signálu. Z těchto změn se poté rekonstruuje spinová struktura vzorku. Zdroj: Basilejská univerzita.

Nelokálnost mikrosvěta

To, že v mikrosvětě platí pro člověka nezvyklé zákony, je všeobecně známé. Objekty mikrosvěta nelze připodobnit ani ke kuličce, ani k pomeranči. Jedna jejich vlastnost je nám ale obzvláště nepříjemná (lépe řečeno těžko představitelná). Objekty mikrosvěta jsou totiž nelokální. Neutron může projít dvěma štěrbinami současně, foton může být současně ve dvou ramenech interferometru, elektron je ve všech



Místa dopadu elektronů po průchodu dvojštěrbinou vytvoří interferenční obrazec. Elektron se chová jako vlna i částice a prochází oběma otvory. Kresba: Ivan Havlíček.

místech elektronového obalu naráz, a svisle vržený atom se může nacházet ve dvou výškách. Kéž bychom to uměli i my lidé: být současně v hospodě i na pracovišti, střízliví i opilí, to by zmátlo leckterého úředníka a jeho hodnotící tabulky by se také rázem ocitly v superpozici stavů a byly by k ničemu. Právě nelokálnost je klíčem k mnoha jevům, které se nám na první pohled zdají nemožné. Měřením vlastností objektu v jednom místě se dozvídáme informace o jeho chování v místě jiném. A navíc má vše pravděpodobnostní charakter a my se dozvíme, v jakém je objekt stavu až skutečným měřením. Lépe řečeno, v okamžiku měření ho do tohoto stavu přivedeme. Právě na tom je založena tzv. kodaňská interpretace kvantové teorie. Objekt je v superpozici mnoha nelokálních stavů a teprve aktem měření získá některý z těchto stavů. Pokud objekt popisujeme vlnovou funkcí, hovoříme o tom, že při měření dojde ke kolapsu vlnové funkce do jednoho z mnoha stavů předchozí superpozice. V kvantové teorii je poprvé akt měření, a tím i pozorovatel, součástí teorie samotné a akt měření ovlivňuje chování kvantového objektu v mikrosvětě.

Pokud rozdělíme světlo laseru a k cíli se bude dostávat po dvou různých drahách, může se stát, že v některém místě dojde k destruktivní interferenci a signál detektoru zcela vymizí a v jiném místě dojde ke konstruktivní interferenci a signál bude maximální, tedy do tohoto místa budou dopadat fotony. Opět jde o ukázku nelokálnosti – fotony se nacházejí současně v obou možných trajektoriích neboli v superpozici obou možných stavů (jedna a druhá dráha). V detektoru, kde se obě možné dráhy setkávají, poté interferují samy se sebou, a v některých místech proto signál je, a v jiných není. Přitom nejde o porušení zákona zachování energie. Ta prostě není všude, energie elektromagnetického pole se vynoří jen v některých místech prostoru (v určitém detektoru).

Jsou procesy v kvantovém počítači podobné procesům v lidském mozku? Odpověď neznáme. Zdroj: YT/Wow Universe Works.



Kvantová superpozice

Princip superpozice je v mikrosvětě důsledně uplatňován. Objekty mikrosvěta mohou být ve více sta-

vech naráz a teprve v okamžiku měření se realizuje jeden ze stavů, který je výsledkem tohoto měření. V našem příkladu s elektronem, který má dvě projekce spinu, dojde k tomu, že se šíří v superpozici

$$\alpha\,|\uparrow\rangle + \beta\,|\downarrow\rangle.$$

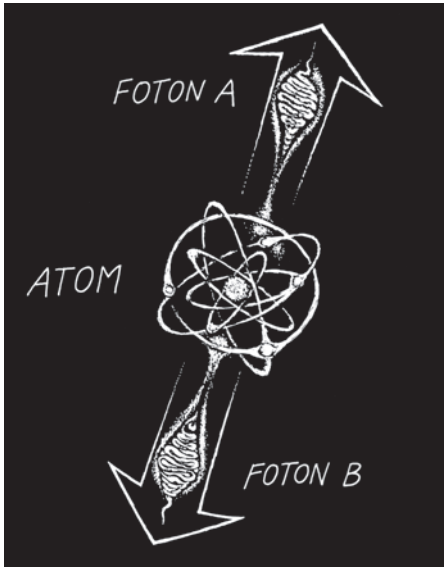
Koeficienty α, β určují jak „moc" je který stav v kombinaci zastoupený. V klasické fyzice by šlo o čísla z intervalu <0, 1>, pro která platí $\alpha + \beta = 1$ a která bychom interpretovali jako pravděpodobnosti výsledku měření. Například $\alpha = 1$, $\beta = 0$ by znamenalo, že s jistotou naměříme stav se spinem „nahoru". Kvantová teorie takto jednoduše ale nefunguje. Koeficienty superpozice jsou obecně komplexní čísla a mají význam amplitud pravděpodobností. Samotné pravděpodobnosti jsou druhou mocninou těchto amplitudud, tedy $|\alpha|^2$ a $|\beta|^2$. Součet všech pravděpodobností musí být rovný jedné, proto v kvantové teorii platí $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Uvažujme jako příklad kvantovou superpozici s koeficienty $\alpha = 1/\sqrt{2}$, $\beta = 1/\sqrt{2}$. Při měření mají obě možnosti stejnou pravděpodobnost, která je rovna 1/2. Pokud by koeficienty superpozice byly $\alpha = 1/2$, $\beta = \sqrt{3}/2$, budou příslušné pravděpodobnosti (tedy druhé mocniny) 1/4 a 3/4. Jak už jsme si uvedli, koeficienty superpozice nemusí být reálná čísla, může jít o komplexní čísla, z nichž každé je reprezentováno amplitudou a fází. Pravděpodobnosti jsou reálné nezáporné (jsou dány druhou mocninou amplitudy komplexního čísla).

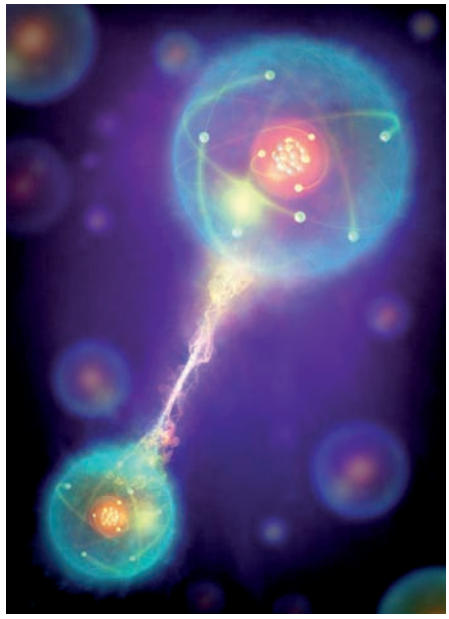
Kvantová provázanost

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 (1879–1955), ruskoamerický fyzik Boris Podolsky (1896–1966) a americko-izraelský fyzik Nathan Rosen (1909–1995). 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 ½. 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 +½, musí mít druhá částice projekci do téže osy −½,

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. Značíme $\alpha|AB\rangle+\beta|XY\rangle$, což znamená, že najdeme-li první částici ve stavu A, je druhá ve stavu B. Je-li první ve stavu X, pak druhá je ve stavu Y. Nelze ale měřit stav jedné částice, aniž bychom ovlivnili druhou. Někdy se také hovoří o propletených stavech.*

EPR paradox formulovaný za pomoci polarizace dvou fotonů. Kresba: Ivan Havlíček.





V provázaném stavu mají dvě částice společnou vlnovou funkci, ať jsou od sebe jakkoli daleko. Měřením na jedné částici se dozvíme i některé informace o druhé částioci. Zdroj: Mark Garlick/Science Photo Library, Getty Images.

Islandský vápenec tvoří přirozené dvojlomné krystaly, které lze využít k výrobě polarizátorů, zařízení propouštějící jednu rovinu polarizace světla. Zdroj: Energy Muse.



a naopak. Tedy jedna částice bude mít spin $|\uparrow\rangle$ a druhá $|\downarrow\rangle$. 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 opět tolik diskutované nelokální chování částic. Při měření na jedné částici zkolabuje vlnová funkce v celém prostoru, a to se projeví při následujícím měření na druhé částici. Obě částice jsou v tzv. provázaném stavu – mají společnou nelokální vlnovou funkci.

EPR paradox se často formuluje za pomoci polarizace dvou fotonů. Polarizací fotonu nazýváme rovinu kmitů elektrického pole. Ta se obecně může stáčet, nebo být fixní – pak hovoříme o rovinné polarizaci. Fotony, jakožto kvanta příčného elektromagnetického vlnění, mohou mít dvě nezávislé, navzájem kolmé rovinné polarizace. Skutečný stav fotonu je potom lineární kombinací obou polarizačních stavů v dané bázi. Měření polarizace fotonu lze uskutečnit například pomocí hranolu z islandského vápence, který je dvojlomný, a světelný paprsek se v něm proto dělí na řádný a mimořádný. Fotony putující ve směrech řádného a mimořádného paprsku mají navzájem kolmou polarizaci. Jinými slovy: islandský vápenec může fungovat jako registrační přístroj.

Uvažujme nyní zjednodušený experiment: předpokládejme, že atom má celkový moment hybnosti nulový a po jeho excitaci ho opustí dva fotony, jejichž polarizace je korelována, v našem případě budeme dokonce předpokládat, že fotony mají přesně opačnou polarizaci. Pokud na jednom fotonu naměříme v nějaké bázi „vodorovnou“ polarizaci (například ve směru osy x), bude polarizace druhého fotonu „svislá“ (ve směru osy y) a naopak.

Je jasné, že jde o stejnou formulaci jako dříve, jen je projekce spinu nahrazena polarizací fotonu (ta ale nakonec stejně závisí na projekci spinu fotonu do směru jeho pohybu). Výsledek měření není dopředu dán, je zcela náhodný. Jakmile ale provedeme měření na jednom fotonu, stav zkolabuje do jedné z obou možností a měření na druhém fotonu dá už jen doplňkový výsledek, ať je tento foton fyzicky lokalizován kdekoli. Stejný výsledek dostaneme i při volbě jiné báze, tj. měření budeme provádět pomocí polarizátoru otočeného o libovolný úhel. Při jakémkoli natočení hranolu budeme mít padesátiprocentní pravděpodobnost, že naměříme foton A s „vodorovnou“ polarizací a foton B se „svislou“ polarizací, a padesátiprocentní pravděpodobnost, že měření dopadne opačně.

Bellovy nerovnosti

Část fyziků kritizovala nelokálnost kvantové teorie a náhodnost výsledků. Tuto skupinu asi nejvíce reprezentoval Albert Einstein, který se s výše zmíněnými vlastnostmi kvantové teorie nesmířil a předpokládal, že kvantová teorie není úplná. Náhodnost výsledku při měření by mohla souviset s tím, že systém má nějaké další, tzv. skryté parametry, díky jejichž neznalosti dochází k zdánlivě náhodnému výsledku aktu měření. V roce 1964 irský fyzik John Stewart Bell (1928–1990) ukázal, že statistické vlastnosti měření polarizace fotonu budou v případě teorie se skrytými parametry jiné než při standardní kvantové interpretaci. Matematickým vyjádřením je tzv. Bellova nerovnost, kterou musí splňovat střední hodnoty opakovaných měření, pokud existují skryté parametry a výsledky měření jsou předem dány.

První experimenty, které vedly na porušení Bellových nerovností, byly uskutečněny už v roce 1972, nicméně fyzikální komunita je nepovažovala za průkazné. Přesvědčivý důkaz neplatnosti Bellových nerovností a tedy nemožnosti existence skrytých parametrů v kvantové teorii podala až skupina Alaina Aspecta ve francouzském Orsay v experimentech prováděných v letech 1976 až 1983. V těchto experimentech excitovali za pomoci laserových impulzů atomy vápníku. Excitovaný elektron se vracel na původní hladinu přes mezistav, při prvním přechodu vyzářil foton s vlnovou délkou 551,3 nm, při druhém foton s vlnovou délkou 422,7 nm. Jak excitovaný, tak původní stav měly celkový moment hybnosti nulový, zatímco mezistav měl celkový moment hybnosti nenulový, což vedlo k určité vazbě mezi polarizacemi obou vyslaných fotonů. Ukázalo se, že Bellovy nerovnosti neplatí a náhodné výsledky experimentů nejsou důsledkem skrytých parametrů, ale základní vlastností přírody samotné.

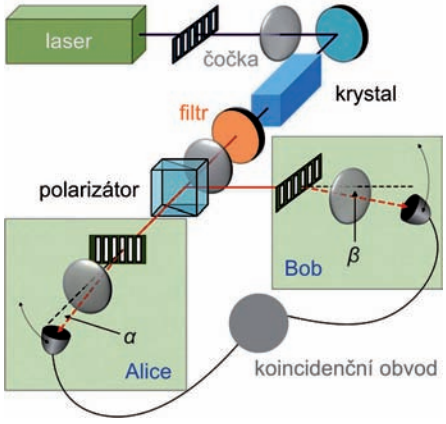


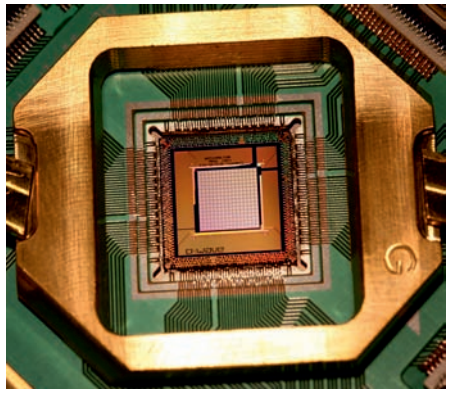
John Stewart Bell (1928–1990), severoirský fyzik, který ukázal, jak experimentálně ověřit, zda v mikrosvětě existují skryté parametry. Zdroj: CERN.

Kvantová interference

Systém, který je v superpozici stavů, se až do měření může vyvíjet mnoha způsoby. Amplitudy pravděpodobnosti jednotlivých možností se sčítají, a jak už víme, pravděpodobnost konkrétní superpozice je dána druhou mocninou velikosti výsledné amplitudy pravděpodobnosti. Jednotlivé stavy superpozice spolu interferují, což znamená, že probíhá jak destruktivní interference (pravděpodobnosti některých možností se snižují), tak konstruktivní interference (pravděpodobnosti některých možností se zvyšují). Situace je podobná, jako když se

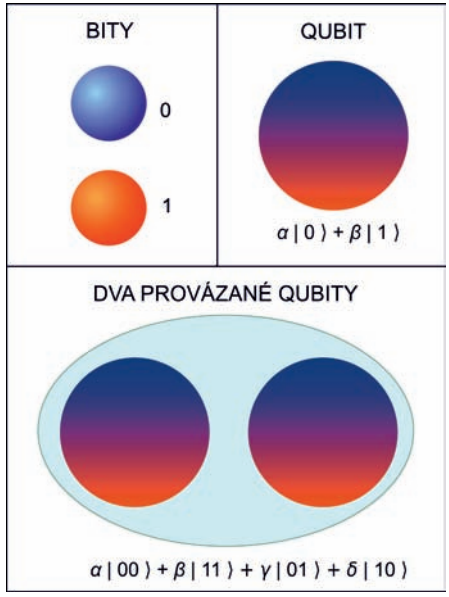
Jedna z možností, jak měřit Bellovy nerovnosti za pomoci dvojice provázaných fotonů. Zdroj: Nature.





Čip společnosti D Wave obsahující tisíc qubitů.

Symbolické znázornění dvou bitů, qubitu a dvou provázaných qubitů. Nula je znázorněna modrou barvou, jednička červenou. Kresba autor.



světlo šíří z bodu A do bodu B. Podle kvantové teorie se může šířit po libovolné trajektorii, tj. paralelně prochází mnoha trajektoriemi. Většina z nich má ale díky destruktivní interferenci s okolními trajektoriemi zcela mizivou pravděpodobnost. Ta trajektorie, kterou okolní trajektorie konstruktivní interferencí zesílí, bude realizována v přírodě. Je to trajektorie, kterou světlo urazí za nejkratší čas (tzv. Fermatův princip) – u ní jsou fáze blízkých trajektorií blízké a dochází ke konstruktivní interferenci. K obdobné interferenci dochází při kvantovém výpočtu: některá z paralelně udržovaných možností se konstruktivní interferencí zesílí natolik, že ji při finálním měření nalezneme jako řešení námi zadané úlohy.

Qubit

V klasickém počítači je informace nesena jako posloupnost nul a jedniček. Ty mohou být reprezentovány například určitým napětím na elektrodě nebo orientací magnetické domény v magneticky aktivním materiálu harddisku či jiného média. Jednotkou informace je „bit“, který může nabývat pouze dvou hodnot (ano/ne, černá/bílá, 0/1 atd.). V kvantovém světě můžeme objekt mikrosvěta nesoucí informaci přivést do superpozice obou stavů, tedy $\alpha \mid 0> + \beta \mid 1>$ a konkrétní hodnotu zjistíme až v okamžiku měření. Takovému objektu říkáme kvantový bit neboli „qubit“.

Qubity jsou často realizovány jako atomy či ionty držené v elektromagnetické pasti, které jsou přivedeny do superpozice dvou kvantových stavů. Jenže samotný qubit by pro kvantový počítač nestačil. Za pomoci magnetického pole, laserových impulzů nebo mikrovlnných rezonátorů můžeme dva qubity přivést do provázaného stavu. Výsledek měření může dopadnout čtyřmi způsoby: oba qubity mají hodnotu 0, oba mají hodnotu 1, první má 0 a druhý 1, první má 1 a druhý 0. Celkovou superpozici dvou provázaných qubitů lze popsat jako matematický výraz se čtyřmi koeficienty:

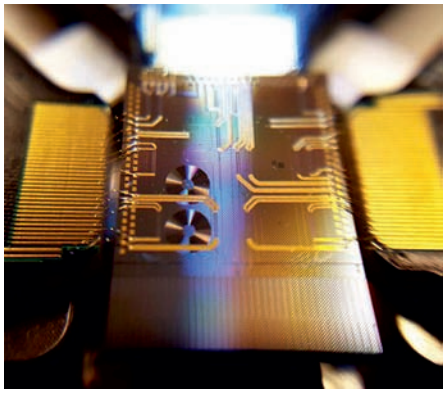
$$\alpha \mid 00> + \beta \mid 11> + \gamma \mid 01> + \delta \mid 10>.$$

V zápise odpovídá první hodnota prvnímu qubitu a druhá druhému. Pokud jsou například koeficienty α, β nulové, budou mít qubity navzájem opačnou hodnotu. Naměříme-li u takto připraveného systému měření na jednom z qubitů hodnotu 0, automaticky budeme vědět, že druhý má hodnotu 1.

V klasickém počítači s těmito nulami a jedničkami provádíme základní logické operace (například logickou negaci (NOT), logický součin (AND) nebo logický součet (OR). Pro určitou kombinaci nul a jedniček na vstupu je dána konkrétní kombinace nul a jedniček na výstupu (viz ukázka v následující tabulce). U kvantového počítače je informace nesena v celé superpozici stavů, tzv qubitem. Paralelně je nesena informace o všech koeficientech superpozice. V případě provázanosti dvou qubitů máme k dispozici 4 koeficienty (viz poslední vztah). Podaří-li se nám provázat N qubitů, je počet koeficientů 2^N, tj. pro 50 provázaných qubitů je počet koeficientů $2^{50} \approx 10^{15}$, tedy více informací, než je schopen pojmout jakýkoli klasický počítač. Samozřejmě, že příprava velkého množství provázaných qubitů a jejich udržení po dostatečně dlouhou dobu je velkým technickým problémem. Logické operace s qubity se zpravidla uskutečňují působením laserového nebo mikrovlnného impulzu či magnetickým polem. Při takových operacích se mění amplituda a fáze koeficientů superpozice. Operace je přirozeným způsobem paralelní (probíhá se všemi koeficienty superpozice), což umožňuje vytvářet účinné algoritmy řešení problémů. Zejména typické nepolynomiální úlohy, například faktorizace čísla (jeho rozklad na prvočinitele) by měla z exponenciální složitosti přejít u kvantového počítače na polynomiální složitost. Prolomení různých šifrovaných kódů by pro kvantový počítač mohlo být hračkou.

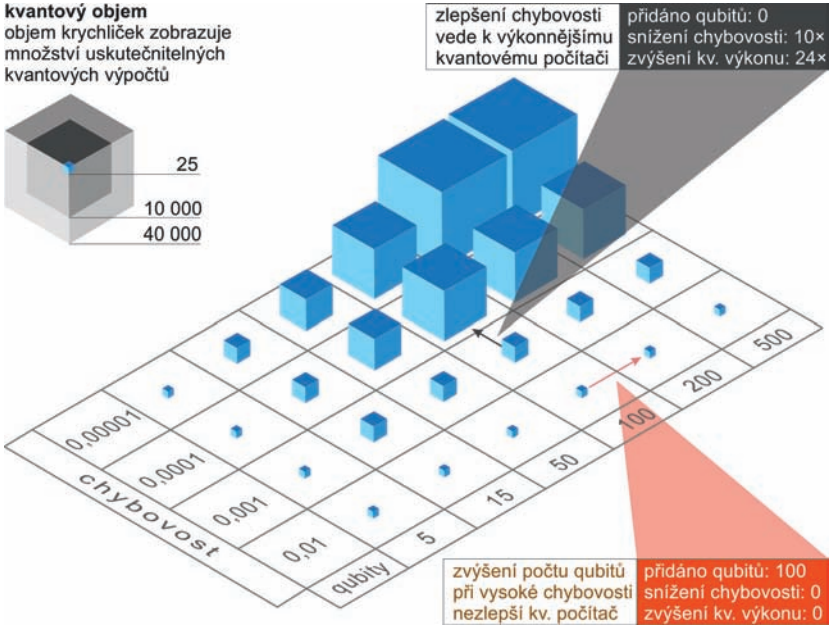
Operace s qubity se zpravidla realizují za pomocí laserového nebo mikrovlnného impulzu. Také je možné využít magnetické pole.

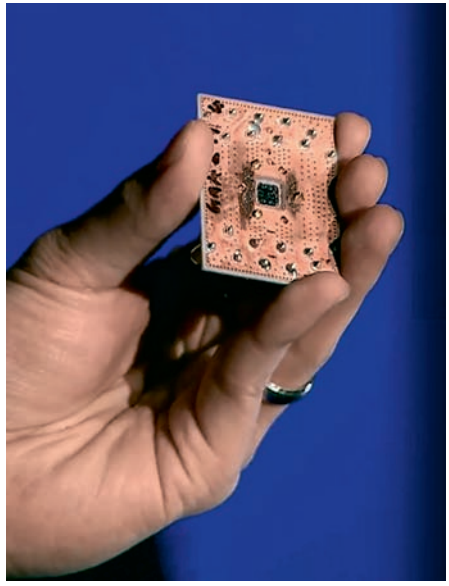
Než se pustíme do popisu skutečného procesoru, zopakujme se stručně, co dosud víme: Srdcem je objekt mikrosvěta v superpozici dvou nebo dokonce více stavů, který nazýváme qubit. Takovou superpozici je možné navodit laserovým nebo mikrovlnným impulzem.



Kanadský mikročip, který dokáže připravit dva provázané qubity, z nichž každý má 10 stavů. Zdroj: INRS, 2017.

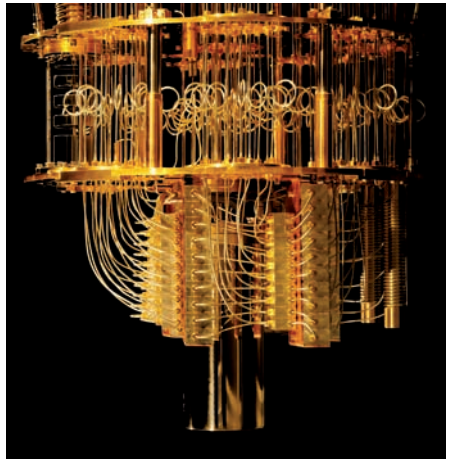
Velké množství qubitů zdaleka neznamená výkonnější kvantový počítač. Zdroj: IBM.





Kvantový čip společnosti IBM. Zdroj: IBM.

Kryogenní systém současného kvantového počítače IBM Q. Zdroj: IBM.



Qubit nebývá v procesoru sám, ale je jich větší množství a tyto qubity jsou kvantově provázané, což znamená, že byly (opět nějakým laserovým nebo mikrovlnným impulzem) přivedeny do stavu, v němž se při měření na jednom qubitu zjistí i některé vlastnosti ostatních qubitů. Informace o jednotlivých možných stavech provázané soustavy qubitů je nesena paralelně a jednotlivé amplitudy můžeme ovlivňovat logickými operacemi (realizují se magnetickým polem nebo elektromagnetickými impulzy). Kvantovou interferencí dojde k zesílení některých amplitud a jako výsledek výpočtu proto při finálním měření zjistíme určitý preferovaný stav soustavy qubitů.

Současný stav

Od prvních úvah z 80. let 20. století uplynulo velké množství času. V prvních experimentech byly qubity realizovány jako ultrachladné ionty zachycené v důmyslných pastech z elektrických a magnetických polí. Vědci ale zkoušeli i qubity založené na samotných elektronech nebo dokonce elektronových děrách.

V první polovině roku 2017 oznámily hned tři společnosti, že mají připraveny kvantové počítače a do roka jsou schopny zahájit komerční prodej. Šlo o D Wave Systems, IBM a Intel. Společnost D-Wave Systems měla k dispozici procesor s 2048 qubity, IBM a Intel s 20 qubity. Situace ale není tak jednoznačná. Procesor vyvíjený společností D-Wave Systems není ve skutečnosti základem univerzálního kvantového počítače, ale stroje určeného pro jeden typ výpočtu, tzv. adiabatického ochlazování, při němž se hledá optimální řešení pro úlohu s mnoha vstupy. Jde tedy o kvantový optimalizér. Navíc společnost IBM v několika článcích dokazovala, že nejde o kvantový počítač, neboť nestačí zvyšovat počet qubitů, ale je třeba zajistit i jejich malou chybovost a vzájemnou provázanost, což procesor společnosti D-Wave Systems nesplňuje a při výpočtu postupuje spíše jako klasický počítač. Nepochybně zde svou roli hraje konkurenční boj mezi oběma společnostmi, ale jednoznačně jsou prvním krokem k univerzálnímu programovatelnému kvantovému počítači procesory vyvíjené společnostmi IBM a Intel. V době psaní této knihy (červenec 2018) mají obě společnosti k dispozici procesor s 50 provázanými qubity.

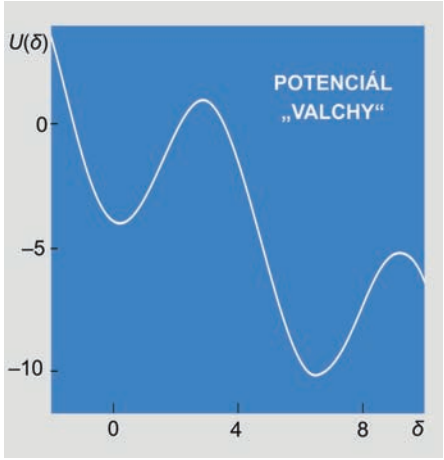
Jinou cestou se vydali kanadští odborníci z INRS (*National Institute of Scientific Research*), kteří v roce 2017 vytvořili dva provázané qubity, každý z nich byl ale v superpozici deseti stavů, což odpovídá

storozměrnému poli čísel. Vzniklo také několik simulátorů kvantových výpočtů, s nimiž lze na klasických počítačích simulovat kvantový výpočet (výpočet neprobíhá paralelně, ale jen sekvenčně a samozřejmě velmi pomalu). Jeden z nich vyvinuli na Harvardu, jiný implementovala společnost Microsoft do svého Visual Studia.

My se v tomto textu zaměříme podrobněji na počítač společnosti IBM, který je vyvíjen pod názvem IBM Q a informace o něm proběhly i v běžném tisku.

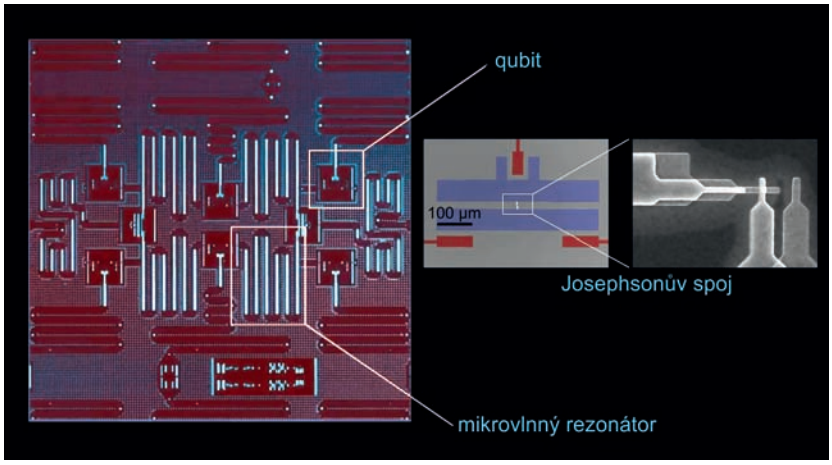
Qubit založený na Josephsonově spoji

Společnost IBM využívá jako qubit supravodivý Josephsonův spoj. Jde o dva supravodiče oddělené tenkou vrstvou izolantu tak, aby Cooperovy páry elektronů mohly tunelovat skrze izolant. Rozhraním teče elektrický proud, jehož velikost závisí na vnějším magnetickém poli a teplotě. Josephsonův spoj se už delší dobu používá jako senzor magnetického pole SQUID. Jak ho lze ale využít jako qubit, který potřebuje být v superpozici dvou stavů? Proud tekoucí Josephsonovým spojem lze vyjádřit jako $I = I_0 \sin \delta$, kde δ je rozdíl fází komplexních vlnových funkcí popisujících supravodivé stavy na obou stranách spoje. Kvantová teorie vede na rovnici pro veličinu δ, která připomíná pohybovou rovnici částice v potenciálu podobném valše, na které kdysi hospodyňky praly prádlo (byl to takový zvlněný plech, o který se prádlo doslova drhlo ve škopku s vodou). Hodnota fázového posunu δ se snaží zaujmout buď nejnižší minimum potenciálu valchy, nebo první excitovaný stav. Vše připomíná kvazičástici, která může nabývat dvou stavů. A právě tato kvazičástice je qubitem (někdy se mu říká fázový qubit), pokud ji připravíme v superpozici základního a prvního excitovaného stavu. K tomu slouží mikrovlnný rezonátor lokalizovaný v blízkosti Josephsonova spoje. Celý obvod se chová silně nelineárně (indukčnost je výrazně nelineární funkcí rozdílu fází δ). Dobře chlazený Josephsonův spoj



Potenciál valchy pro fázový posun δ. Kresba autor.

Qubity společnosti IBM jsou založené na supravodivém Josephsonově spoji. Zdroj: IBM.

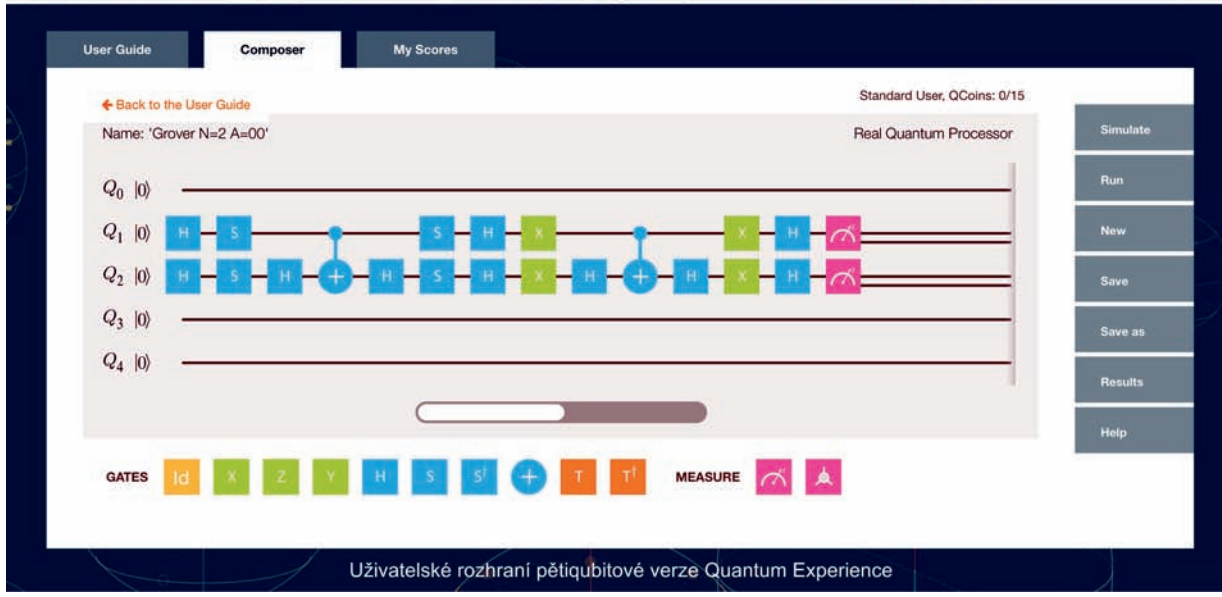




Kryogenní systém Blue Fors*, 2002



Pohled do nitra počítače IBM Q, 2017



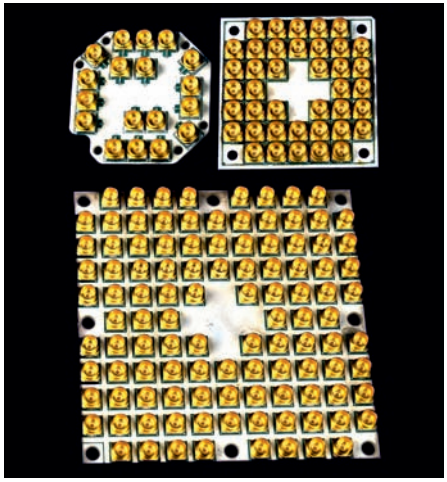
Uživatelské rozhraní pětiqubitové verze Quantum Experience

má malou disipaci energie a umožňuje dlouhodobé provázání kvantových stavů, což je pro funkci kvantového počítače nezbytné. Kvantové počítače vyvíjí řada společností, my se na závěr zaměříme na počítač společnosti IBM.

IBM Q

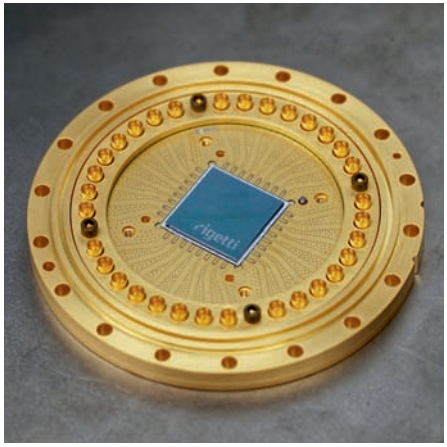
V první polovině roku 2017 společnost IBM vyvinula prototyp komerčního kvantového počítače pod názvem IBM Q se 17 qubity. V druhé polovině roku měla k dispozici již dvacetiqubitový počítač a v roce 2018 je vyvíjena padesátiqubitová verze. Procesor je chlazen na teplotu 15 milikelvinů, což je teplota nižší, než je v prázdném prostoru ve vesmíru (ta je dána teplotou reliktního záření, což je 2,73 kelvinu). Hlavním prvkem určujícím velikost počítače je kryogenní systém. Fotografie stroje IBM Q připomínají období prvních sálových počítačů ze sedmdesátých let dvacátého století. Tenkrát se k výpočtům využíval náboj elektronu, dnes jde o jeho spin. Společnost IBM učinila zajímavý marketingový tah (později ho zopakovala ještě jedna japonská společnost). Pod názvem *Quantum Experience* umožňuje registrovaným uživatelům zdarma vzdálený přístup ke svému kvantovému počítači. Na webových stránkách jsou jak základní, tak pokročilé návody, jak uskutečnit jednotlivé kvantové operace (uživatelské rozhraní jich umožňuje deset, viz dolní část obrázku na str. 348). Aplikační rozhraní je založeno na jazyku Python a lze se s ním připojit přes cloud IBM buď k pětiqubitovému nebo k šestnáctiqubitovému procesoru. Počet registrovaných uživatelů hned v roce 2017 přesáhl 60 000. Jde o fascinující možnost vyzkoušet si kvantové výpočty na reálném hardwaru, nikoli na simulátoru, kterých je celá řada (jeden z nich například zahrnula společnost Microsoft do svého Visual Studia). Vzhledem k tomu, že první dva kvantové počítače společnosti IBM zakoupila v roce 2017 americká NASA a počítačový gigant Google, lze konstatovat, že éra kvantových počítačů se právě stala realitou. Není bez zajímavosti, že Diracova medaile (druhé nejvyšší ocenění za fyziku po Nobelově ceně) byla v roce 2017, kdy se začaly prodávat kvantové počítače, udělena zakladateli kvantových informačních technologií Charlesu Bennettovi, průkopníku kvantových počítačů Davidu Deutschemu a objeviteli kvantového algoritmu pro faktorizaci Peteru Shorovi.

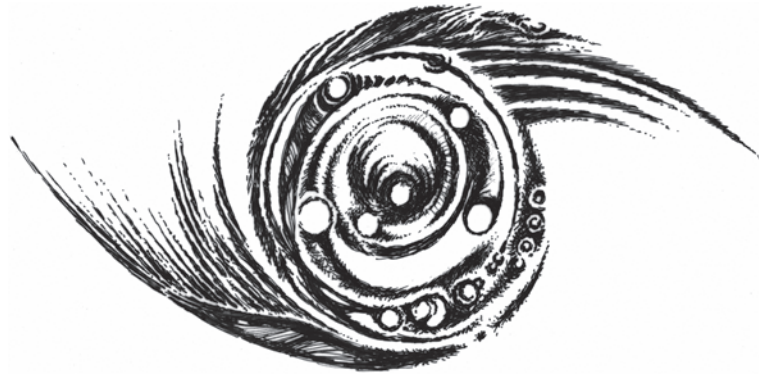
■ **Petr Kulhánek, AB 32/2016, 37–38/2017, aktualizováno 2018.**



Testovací čipy společnosti Intel: 7 qubitů, 17 qubitů (2017) a 49 qubitů (2018). Čip k činnosti opět potřebuje kryogenní systém. Zdroj: Intel Corporation.

Kvantový čip vyvíjí i kalifornská společnost Rigetti Computing. Na obrázku je devatenáctiqubitový čip této společnosti. Zdroj: Rigetti Computing.





Astronomie a fyzika – souvislosti

Petr Kulhánek a kolektiv autorů

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2018, 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 Kulhánek, CSc.
Doprovodná grafika a obálka: Ing. arch. Ivan Havlíček
Sazba: Ing. Martin Batelka
Design: Mgr. Jakub Rozehnal
Formát: 20×21 cm, 352 stran
Kontakt: aldebaran@aldebaran.cz, www.aldebaran.cz

Tisk: EUROPRINT a.s.

ISBN 978-80-906638-0-0

