

# ASTRONOMIE A FYZIKA SVÍTÁNÍ

**Petr Kulhánek  
a kolektiv autorů**





# ASTRONOMIE A FYZIKA

## SVÍTÁNÍ

# Astronomie a fyzika – svítání

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

Ing. Radek Beňo (1), RNDr. David Břeň, Ph.D. (1), Ing. arch. Ivan Havlíček (10), Ing. Miroslav Havránek (5), MSc. Jiří Hofman (2), Ing. Miroslav Horký (2), Ing. Lukáš Karas (1), Marie Kratochvílová (1), Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (30), MUDr. Ing. Vítězslav Kříha, Ph.D. (2), Jaroslava Losová (1), David Maňas (1), Ing. Michal Marčišovský (3), Ing. Ondřej Penc (2), Ing. Vladimír Příbyl (1), Mgr. Jakub Rozehnal (4), RNDr. Jiřina Scholtzová, Ph.D. (2) a Ing. Martin Zeman (1).

Obálka: Slunce z Mezinárodní kosmické stanice. NASA.

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2014, 1. vydání.

Žádná část této publikace nesmí být publikována a šířena žádným způsobem a v žádné podobě bez výslovného svolení nakladatelství 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](mailto:aldebaran@aldebaran.cz), [www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)

Tisk: EUROPRINT a. s.

**ISBN 978-80-904582-6-0**



# Obsah

<b>I. BLÍZKÝ VESMÍR</b>	<b>9</b>
První kvazikrystaly nevznikaly na Zemi.....	10
Mohou za blesky hydrometeory?.....	14
Experiment PAMELA – antiprotony ve vnitřním Van Allenově pásu .....	18
Curiosity, voda a život.....	20
Pluto, planeta-neplaneta.....	25
Titánské počasí .....	34
Enceladus – další kandidát na nositele života.....	40
Miranda – nedokončený příběh podivuhodného měsíce.....	50
Fungovala tekutinová dynamika i v menších tělesech? .....	54
Odkud přicházejí komety? .....	58
U komety Hartley 2.....	63
<b>Bonus: Expedice Aurora 2012.....</b>	<b>67</b>
<b>II. ZE ŽIVOTA HVĚZD</b>	<b>77</b>
Rození obří hvězdy v Pravítku.....	78
V molekulárním mračnu v Plachtách vznikají hvězdy ve vláknech.....	81
Mladé hvězdy a planety vyrůstají společně .....	84
Modří opozdilci .....	88
Pulzar obřím permanentním magnetem? .....	91
Zabrání elektroslabé hoření gravitačnímu kolapsu? .....	94
Observatoř Swift odhaluje tajemství černých děr .....	98
Jak vypadá černá díra v centru Mléčné dráhy?.....	103
Kompaktní trpaslík M60–UCD1 .....	108
Prstencové galaxie .....	111
<b>Bonus: Když vybuchne supernova.....</b>	<b>114</b>

### III. KOSMOLOGIE 127

Atomární látka .....	128
(Elektro)slabá interakcia a Higgsov bozón .....	133
Temná hmota.....	137
Od roztržitého chemika k detektorům temné hmoty .....	142
Most temné hmoty mezi dvěma galaktickými kupami .....	145
Přehlídkový projekt CLASH .....	148
Temná energie.....	151
Kvazar, který je nejdál .....	155
Žijeme ve vesmírné bublině?.....	161
Hledání vzdálených kup pomocí SZ jevu .....	165
<b>Bonus: Byly objeveny reliktní gravitační vlny?.....</b>	<b>168</b>

### IV. PŘÍSTROJE A SONDY 179

IKAROS – Japonci už plachtí .....	180
SDO – nejcitlivější vesmírná observatoř pro výzkum Slunce .....	185
První rozumné vysvětlení anomálie pohybu sond Pioneer .....	192
Zajíc, který běhá po Měsíci.....	196
WISE, bájný Fénix a prachoví psi.....	200
Iontový motor velikosti desetníku .....	204
Výnimočný detektor AMS-02 .....	208
Tevatrón predal štafetu do Európy.....	216
Obří ledová kostka v Antarktidě chytá neutrína .....	220
Nepořádek za humny aneb co s kosmickým odpadem? .....	225
<b>Bonus: Velký start (Herschel a Planck).....</b>	<b>229</b>

<b>V. FYZIKA</b>	<b>241</b>
Je gravitace skutečnou silou? .....	242
Měření gravitace v mikrosvětě.....	251
Pevnolátkový maser za pokojové teploty .....	254
Rydbergovy atomy simulují trojanské asteroidy .....	258
Díry v oblacích.....	262
Na stopě kulovému blesku .....	265
Produkce černých děr při částicových srážkách.....	270
Neutrinový experiment OPERA .....	273
Casimirův jev při pokojové teplotě.....	277
Jak tenký vodič ještě dokáže vést proud? .....	280
<b>Bonus: Nobelovy ceny za fyziku.....</b>	<b>283</b>
<b>VI. NOVÉ TECHNOLOGIE</b>	<b>293</b>
Akustická levitace vrací úder .....	294
Aplikace metamateriálů v transformační optice.....	302
Budou amorfnní metamateriály technologickým převratem? .....	305
Honba za vysokými tlaky .....	308
Nové fotovoltaické panely z Anglie .....	312
Break Junction, aneb jak změřit vodivost organické molekuly .....	315
Komunikace za pomoci neutrin .....	318
Komerční využití memristoru .....	322
Revoluční objev spinové kapaliny .....	327
<b>Bonus: Americká anabáze.....</b>	<b>331</b>
<b>Přílohy</b>	<b>339</b>
<b>Rejstřík</b>	<b>345</b>



Milí čtenáři,

po čtyřleté odmlce jsme pro Vás opět připravili výběr žhavých novinek z astronomie a fyziky. A bylo opravdu z čeho vybírat. Do knížky se nakonec dostala necelá třetina textů napsaných kolektivem soustředěným kolem serveru Aldebaran. Knižka, kterou máte před sebou, volně navazuje na Astronomii a fyziku – nové obzory. Výrazně vzrostl počet stran a kniha je bohatší o jednu kapitolu – kosmologii. Právě zde se asi odehrálo nejvíce. Sonda Planck provedla nejkompexnější přehlídku oblohy v mikrovlnné oblasti a její výsledky budou zpracovávány ještě po mnoho let. Na zařízení BICEP 2 umístěném na jižním pólu byly možná nepřímo objeveny reliktní gravitační vlny z nejranějšího období vesmíru. Některé přístroje hledající temnou hmotu mají pozitivní signál, ale jeho původ je prozatím nejasný. Střípky poznatků kolem temné hmoty a temné energie se postupně skládají do mozaiky, z níž začíná vyvstávat zatím neostrý obraz skutečnosti. Je vzrušující sledovat posun znalostí v této dynamicky se rozvíjející oblasti.

Každou z předchozích knížek provázela nějaká postavička. Ve Svítání naleznete různé variace na sférické bastardy. Tak ve 30. letech říkal svým spolupracovníkům Fritz Zwickey, objevitel temné hmoty. Původně hrubé slovo získalo v astronomické komunitě zcela jiný význam. Při tvorbě knížky jsme adresáři s těmito roztomilými postavičkami neřekli jinak než bastardárium. Snad Vám naši bastardíci oživí náročnou četbu.

Skladba kapitol v knize je tradiční. Začátek knihy je věnován blízkému a vzdálenému vesmíru, třetí kapitola je věnována kosmologii. Tři astronomické kapitoly jsou následovány třemi kapitolami věnovanými fyzice, unikátním přístrojům a sondám a špičkovým technologiím. Doufám, že si každý ve Svítání nalezne témata, která ho zaujmou. V knize je ponecháno i několik slovenských textů – věřím, že oba naše národy k sobě mají stále natolik blízko a není nutné texty překládat.

Na konci každé kapitoly je bonus – text, který souvisí s kapitolou jen volně a většinou není tak náročný na čtení jako zbytek knihy. Dva bonusy jsou věnovány našim expedicím, jeden Nobelovým cenám uděleným za fyziku v posledních čtyřech letech, další mimořádně úspěšným sondám Herschel a Planck a poslední (nikoli umístěním či významem) explozí supernov.

Rád bych poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku knížky – Ivanovi Havlíčkovi za doprovodné obrázky, Martinovi Batelkovi za sazbu, Rudovi Mentzlovi za podstatnou část jazykových korektur a samozřejmě autorům článků za jejich rukopisy. Pevně věřím, že se Vám čtenářům bude naše nová knížka líbit a vyvolá ve Vás ony opojné pocity z poznávání přírodních zákonitostí divotvorného světa, jehož jsme nedílnou součástí.

V Praze 1. července 2014

Petr Kulhánek





# I. BLÍZKÝ VESMÍR





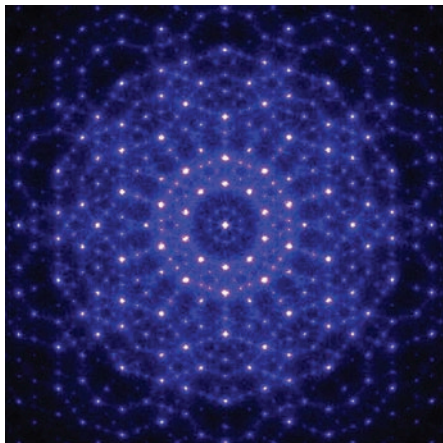
## První kvazikrystaly nevznikaly na Zemi

**Translační symetrie** – symetrie vzhledem k posunutí. Po určité vzdálenosti (periodě) se daný vzor opakuje. Krystalická látka má translační symetrii ve třech směrech.

**Rotační symetrie** – symetrie vzhledem k pootočení o určitý úhel. Při takovém pootočení splyne vzor sám se sebou. Četností symetrie nazýváme počet splynutí pootočeného vzoru s originálem při otáčení o  $360^\circ$ .

**Meteorit** – těleso pocházející z meziplanetárního prostoru, které se srazilo s planetou (Země, Mars...), přežilo průlet atmosférou a alespoň část dopadla na povrch.

Typický ohybový obrazec kvazikrystalu.  
Zdroj: Michiganská univerzita.



Některé pevné látky vytvářejí krystalické struktury. Základní charakteristikou krystalu je periodické opakování uspořádání atomů v určitých směrech a symetrie při pootočení krystalu kolem některé osy o vhodný úhel. První pokusy o popis krystalů pochází ze 17. století, ale ucelenou teorii geometrických vlastností krystalů publikoval až francouzský mineralog a katolický kněz René Just Haüy (1743–1822) na počátku 19. století. Ukázalo se, že jediné možné krystalografické symetrie jsou dvoučetné, tříčetné, čtyřčetné a šestičetné. Četností se zde rozumí, kolikrát se krystal v průběhu otáčení o  $360^\circ$  vrátí do původní podoby. Jiné symetrie nemohou vyplnit třírozměrný prostor periodicky, tedy beze zbytku. „Zakázané“ jsou veškeré symetrie s četností vyšší než šest a pětičetná symetrie. Krystalografické symetrie se snadno rozpoznají z ohybu elektromagnetického záření na periodické struktuře krystalické látky. Charakteristický ohybový obrazec je jakýmsi podpisem stvrzujícím přítomnost určité symetrie. Ohybové obrazce různých látek slouží k jejich třídění podle krystalografické struktury.

### Zakázané symetrie

Pětičetnou symetrii, která se u krystalů nevyskytuje, použil významný český architekt italského původu Jan Blažej Santini-Aichel (1677–1723) při stavbě kostela svatého Jana Nepomuckého na Zelené hoře. Tento komplex ve slohu barokní gotiky patří k jeho vrcholným dílům. Vše je podřízeno pětičetné symetrii – ať kostel samotný, kaple na periferii pozemku či podlaha v kostele. Podlaha, z níž se do dnešní doby dochovala jen malá část, byla tvořena pětiúhelníkovými kachlemi doplněnými dalšími tvary do neperiodického pokrytí. Mnohem později, v roce 1974, ukázal anglický matematický fyzik Roger Penrose (1931), že existuje neperiodické pokrytí roviny s pětičetnou symetrií (tzv. Penroseovo pokrytí) složené ze dvou kosočtverců. Přestože je pětičetná symetrie na první pohled patrná, obrazce se nikdy přesně neopakují, ať hledáte v jakékoli vzdálenosti od vybraného prvku. Penroseovo pokrytí postrádá přesnou translační symetrii (symetrii vzhledem k posunutí), hovoříme proto o kvaziperiodickém pokrytí.

Většina fyziků byla dlouho přesvědčena, že krystaly mohou tvořit jen takové tvary, které svým přesným opakováním beze zbytku vyplní celý prostor. O to větší bylo překvapení, když v roce 1982 pozoroval izraelský fyzik Dan Shechtman se spolupracovníky, že ohybové obrazce některých slitin hliníku s hořčíkem vykazují zjevnou desetičetnou symetrii, jenž vylučuje periodičnost a je zcela neslučitelná s tehdejšími představami o krystalech. Většina současníků se k objevu stavěla velmi skepticky. Dnes se podobným strukturám říká kvazikrystaly a Shechtman za jejich objev získal Nobelovu cenu za chemii pro rok 2011. Kvazikrystal je struktura se zjevným pravidelným uspořádáním, nicméně chybí jí translační symetrie. V dosti velké vzdálenosti od daného místa můžeme nalézt opakování struktury, které je téměř shodné s původním tvarem, ale přesto ne úplně totožné, proto hovoříme o tzv. kvaziperiodičnosti. Nezávisle na Shechtmanově objevu vytvořili první teorii krystalů se zakázanými symetriemi americký teoretik Paul Steinhardt a italský fyzik Dov Levine již rok před pozorováním Shechtmana. Umělých kvazikrystalů byly od té doby vytvořeny za přesně definovaných laboratorních podmínek stovky. Nikdo ale netušil, že by se obdobná struktura mohla vyskytovat v přírodních minerálech.

### Hon na kvazikrystaly

V roce 2008 našel italský mineralog Luca Bindi z Muzea přírodních věd ve Florencii ve sbírkách tamního muzea velmi zajímavý úlomek kamene o rozměru přibližně 1 milimetr, na kterém se nacházelo zrno o průměru 100 mikrometrů. Rentgenový ohybový obrazec tohoto zrna vykazoval desetičetnou symetrii typickou pro kvazikrystaly. Chemické složení zrna odpovídalo slitině mědi, hliníku a železa  $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{13}$  a složení okolního

**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.

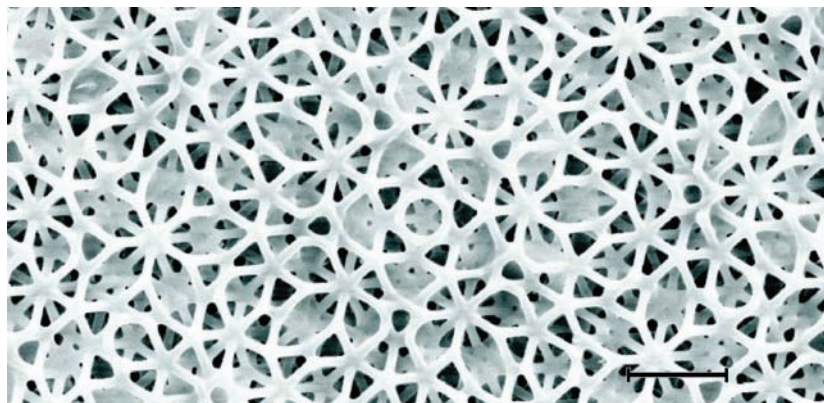
Úlomek kamene, v němž byl objeven v roce 2008 kvazikrystal. Zdroj: Muzeum přírodních věd ve Florencii.





Roger Penrose stojí na podlaze s Penroseovým pokrytím ve foyer Mitchellova ústavu fyziky a astronomie v Texasu. Zdroj: Wikipedie.

Fotografie uměle vytvořeného kvazikrystalu pořízená rastrovacím elektronovým mikroskopem. Úsečka na snímku má délku 4 mikrometry. Zdroj: Complex Photonics.

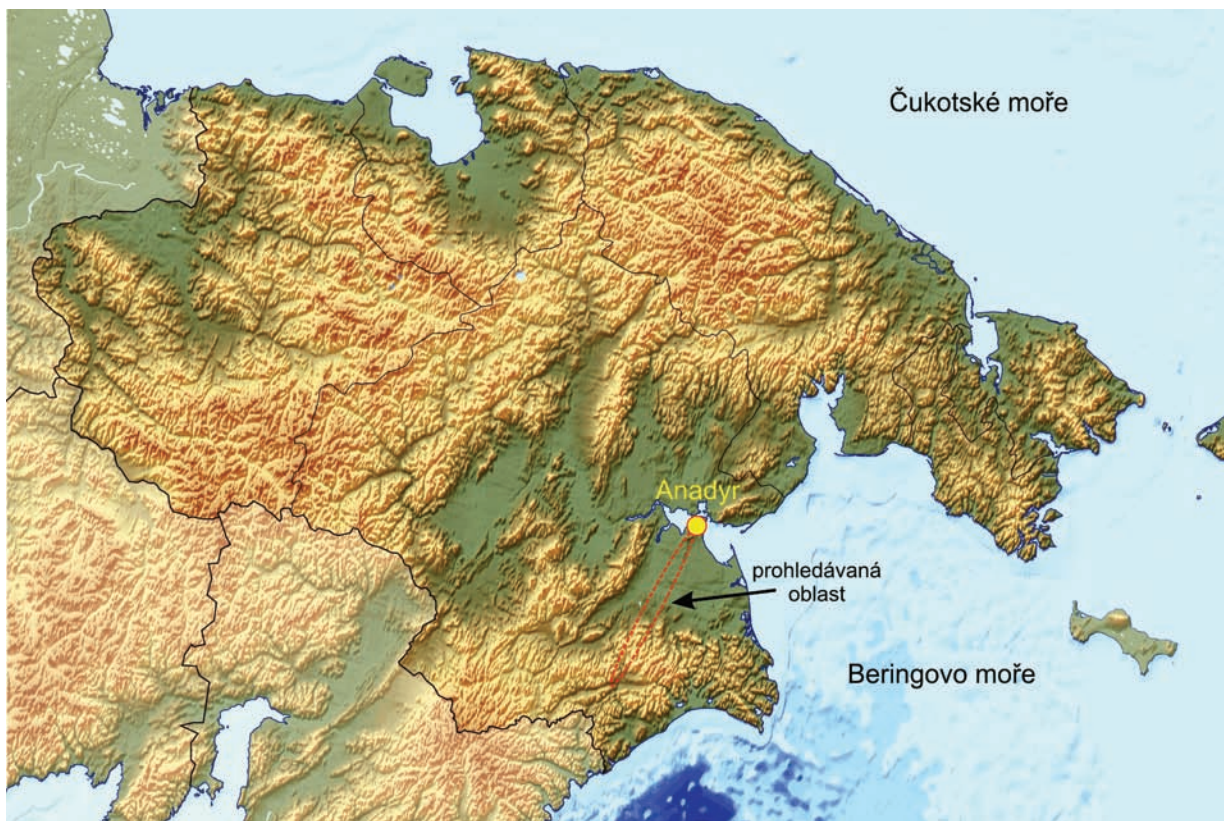


materiálu úlomku připomínalo uhlíkatý chondrit – jeden z nejběžnějších druhů meteoritů. Luca Bindi se obrátil se svým nálezem na Paula Steinhardta, který se již mnoho let neúspěšně pokoušel za pomoci různých databází ohybových obrazců nalézt kvazikrystaly v přírodě. Nastalo doslova detektivní pátrání po původu vzácného úlomku. Podle nálepky na krabičce pocházel úlomek z Korjackého pohoří v Rusku. Dalším pátráním se podařilo zjistit, že podivný kamínek objevil v roce 1979 jakýsi V. V. Krijačko v jílové vrstvě na Čukotce. Pokud by šlo skutečně o meteorit, znamenalo by to, že kvazikrystaly byly přítomné v protoplanetárním disku, ze kterého před 4,5 miliardami let vznikala sluneční soustava. Takový objev byl zcela nečekaný, vzrušující a téměř neuvěřitelný.

Nález přírodního kvazikrystalu byl natolik mimořádný, že se mnoho vědců domnívalo, že jde o podvrh. Paula Steinhardta napadlo, že pokud by šlo skutečně o meteorit, mohly by se v okolí nálezu nacházet další úlomky a spolu s Lucem Bindem a dalšími spolupracovníky zorganizoval v červenci 2011 expedici na Čukotku. Desetičlenná výprava vědců ze Spojených států, Ruska a Itálie spolu s dvěma řidiči a jedním kuchařem se vydala na Čukotku, kde 4 dni postupovala proti proudu potoka, ve kterém měl být podezřelý úlomek před čtyřmi desetiletími nalezen. Jejich rukama prošlo 1,5 tuny sedimentů z břehů potoka, ze kterých nakonec vybrali několik kilogramů minerálů pro další analýzy. Po šesti týdnech prohlížení sebraných vzorků našli na jednom zrnku kovovou skvrnku. Nejenže obsahovala kvazikrystaly, ale měla izotopové složení shodné se vzorkem z italského muzea. Přestože šance na

úspěch byla mizivá, houževnatost týmu se vyplatila. Autentičnost původního vzorku s katalogovým číslem 46407/G byla potvrzena. Téměř s jistotou lze nyní říci, že nalezené kvazikrystaly vznikly v protoplanetárním disku, což znamená, že budeme muset přehodnotit naše současné představy o krystalických látkách a o procesech, které probíhaly při vzniku sluneční soustavy. Vědci budou muset zjistit, zda meteorit pochází z vnitřní nebo





z vnější části sluneční soustavy a odpovědět na otázku, proč kvazikrystaly nevznikaly na Zemi, ale vznikaly jinde ve vesmíru.

■ Petr Kulhánek, 7. 9. 2012, AB 34/2012

**Penroseovo pokrytí** – bezzbytkové neperiodické pokrytí roviny několika základními vzory. Pokrytí se nikdy dokonale přesně neopakuje, tedy postrádá translační symetrii. Anglický matematik Roger Penrose (1931) tato pokrytí zkoumal v 70. letech 20. století.

**Ohyb (difrakce)** – skládání mnoha vln do maxim a minim charakteristické vlnové délky. Zdrojem skládaných vln může být okraj malého otvoru, hrana překážky nebo periodická struktura krystalové mřížky. Z ohybového obrazce se dají určit vlastnosti krystalu.

## Mohou za blesky hydrometeory?

**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  $\text{km}^2$ . Tak energetická částice se objeví přibližně jednou za sto let. Kosmické záření může vznikat v supernovách, pulzarech, aktivních galaktických jádrech atd. Naprostá většina částic kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, př-

*Atypické blesky na sopečném popelu nad vulkánem Puyehue v Chile. Červen 2011. Sloupec popelu byl vysoký 10 km. Zdroj: Carlos Gutierrez/Reuters.*



Bleskový výboj je jev, který každý z nás velmi dobře zná a v životě ho již někdy spatřil. Na Zemi jsou bouřky tak častým jevem, že každou sekundu někde na Zemi udeří blesk přibližně stokrát. Existují studie, které bleskům přisuzují významnou roli při formování zemské atmosféry a dokonce při vzniku života. Dnes se ale zaměříme na jinou problematiku – na vznik bleskových výbojů. Přestože jsou bouřky na Zemi velmi časté, stále nevíme, jak blesky vznikají, protože elektrické napětí mezi bouřkovým oblakem a zemí je o několik řádů menší než průrazné napětí pro atmosférický vzduch.

### Bleskové výboje

Existují čtyři typy blesků související s oblaky a povrchem země. Blesk mezi dvěma oblaky, mezi dvěma oblastmi oblaku, kladný blesk mezi oblakem a zemí a záporný blesk mezi oblakem a zemí. Poslední dva typy se liší polaritou, častější z nich je záporný blesk, při kterém elek-

trony vytvářejí vodivý kanál od oblaku směrem k zemi. Takový bleskový výboj vzniká ve dvou fázích. V první fázi se od oblaku dolů tvoří tzv. *strimer* (předvýboj), tj. lavinovitě roste vodivý kanál rychlostí přibližně  $10^6$  m/s. Po přibližně 50 metrech dojde k vytvoření *lideru* (hlavního výboje), což znamená, že vzniklý vodivý kanál se rozšíří a od jeho hrotu se směrem k zemi začne šířit další strimer. Tento proces se opakuje, dokud nedojde k vytvoření vodivého propojení mezi oblakem a zemí. Celý výboj trvá řádově stovky mikrosekund a poté se rozpadá.

Vzhledem k pomalým relaxačním procesům zůstává bleskový kanál vodivý dostatečně dlouho, takže může dojít k opakovaným výbojům, tentokrát již rovnou ve vodivém kanálu, tedy bez tvorby jednotlivých strimerů a liderů. Jak bylo výše zmíněno, největším problémem při vzniku bleskových výbojů je malé napětí mezi oblakem a zemí, proto v roce 1992 přišel Alexandr Gurevič s teorií, že tzv. ubíhající (*runaway*) elektrony dokážou dostatečně předionizovat atmosféru, a tím sníží hodnotu průrazného napětí pod hodnotu napětí mezi oblakem a zemí.

### Ubíhající (*runaway*) elektrony

Běžný elektron je elektrickým polem oblaku urychlován, ale srážky s ostatními elektrony a atomy atmosféry ho zase brzdí. Při určité rychlosti se ustaví rovnováha mezi urychlováním elektronu a jeho brzděním a elektron již vyšší rychlost nezíská. Pokud má ale elektron hned na počátku vysokou rychlost, stává se pro něho atmosféra téměř průhlednou a účinný průřez srážek s atmosférou je minimální. Elektron je neustále urychlován elektrickým polem, protože jeho srážky s okolím jsou téměř zanedbatelné. Hovoříme o tzv. ubíhajících elektronech, které získají relativistickou rychlost a značnou energii. Právě tyto elektrony mohou dostatečně předionizovat prostředí k vytvoření samostatného bleskového výboje.

Horní vrstvy atmosféry jsou neustále bombardovány částicemi kosmického záření o velké energii (~100 GeV), které srážkami s ionosférou produkují spršky sekundárních částic, převážně pionů a kaonů. Ty se vzájemně rozpádají na elektrony, pozitrony a další elementární částice. Elektrony z těchto sekundárních

*blízně 10 % jsou jádra helia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Viktorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5500 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry, a tím byl prokázán kosmický původ tohoto záření.*

**Pion** – elementární částice složená z jednoho kvarku a jednoho antikvarku první generace (mezi první generaci řadíme kvarky „u“ a „d“). Částice má nulový spin.

*Bouřkový oblak neboli Cumulonimbus je nejčastějším zdrojem blesků. Zdroj: NOAA.*

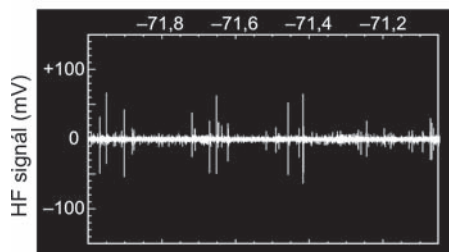
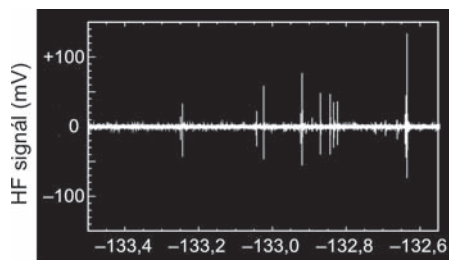




**Kaon** – elementární částice složená z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Jeden kvark/antikvark je z první generace („u“ či „d“) a druhý kvark/antikvark je podivný kvark „s“. Kaony v hojně míře vznikají v horních vrstvách atmosféry při její interakci s kosmickým zářením. Kaony mají spin buď nula, nebo jedna – podle toho je dělíme na skalární a vektorové kaony.

**Elektron** – první objevená elementární částice. Je stabilní. Hmotnost má  $9,1 \times 10^{-31}$  kg a elektrický náboj  $1,6 \times 10^{-19}$  C. Elektron objevil sir Joseph John Thomson v roce 1897. Existenci antičástice k elektronu (pozitron) teoreticky předpověděl P. Dirac v roce 1928 a objevil C. Anderson v roce 1932.

Rádiové záblesky naměřené před jedním z výbojů. Z dat je patrné, že záblesky jsou bipolární. Zdroj: PRL.



spršek mají dostatečnou rychlost na to, aby se staly ubíhajícími elektrony. Mechanismus navrhnul ruský fyzik Alexandr Gurevič (1930) v roce 1992. Ubíhající elektrony snižují průrazné napětí ze tří milionů voltů na metr na pouhých 280 tisíc voltů na metr.

## Nové poznatky

V květnu 2013 publikovali Alexandr Gurevič spolu s Anatolijem Karaštinem svoji novou práci v oblasti výzkumu jevů, které předcházejí vzniku bleskového výboje. Zaměřili se na měření rádiových záblesků předcházejících samotný výboj. Záblesky měřili u přibližně 3 800 bleskových výbojů v oblasti Nižného Novgorodu v Ruské federaci a v okolí hory Ťan-Šan v Kazachstánu. Rádiové záblesky měřili pomocí rádiového interferometru s časovým rozlišením 16 ns a šířkou pásma 0,1 až 30 MHz.

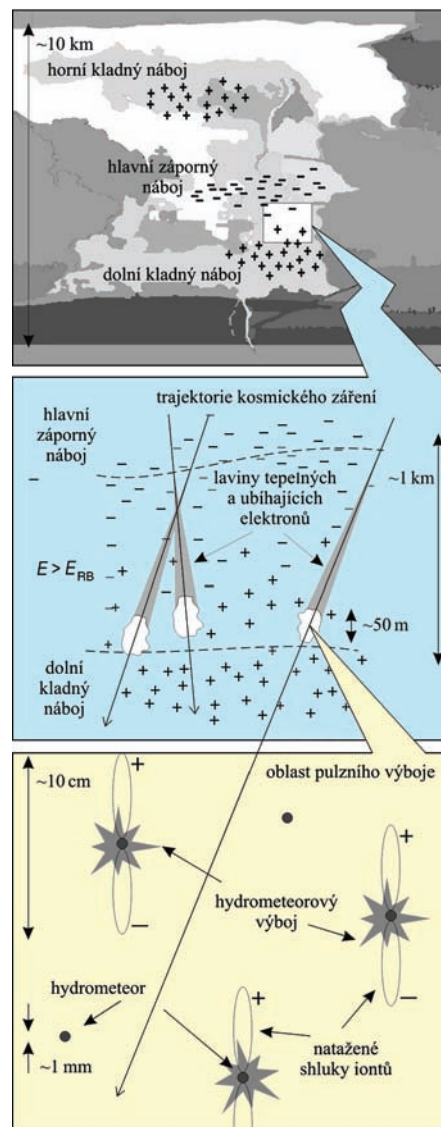
Tyto rádiové záblesky považovali za důsledek vzniku lavinovité ionizace od ubíhajících elektronů, nicméně po důkladném výpočtu zjistili, že aby měly záblesky amplitudu, kterou naměřili, muselo by mít kosmické záření energii odpovídající hodnotě  $10^{17}$  eV a vyšší. Takové energie jsou ale u kosmického záření velmi vzácné. Na oblast běžného bouřkového oblaku připadá taková situace přibližně jednou denně. Naproti tomu měřené záblesky měly před každým výbojem frekvenci 20 až 50 záblesků za milisekundu. Tato frekvence ale zhruba odpovídá tomu, jak často je Země bombardována kosmickým zářením s běžnými energiemi okolo  $10^{11}$  eV. Z tohoto paradoxu odvodili, že v bouřkových oblacích musí probíhat ještě nějaký jiný jev, který podporuje tvorbu rádiových záblesků a přišli s teorií, ve které amplitudu rádiových záblesků vysvětlují pomocí tzv. hydrometeorů. Oblaka jsou tvořena kondenzovanou vodou a ledovými krystalky. Jako hydrometeor je označovaná kapka vody nebo krystal, který je v elektrickém poli bouřkového oblaku polarizován. Kosmické záření o standardní energii spustí v oblaku lavinovitou ionizaci a uvolněné elektrony iniciují pulzní výboje právě v hydrometeorech. Tyto pulzní výboje jsou podle autorů zodpovědné za rádiové záblesky. Tím, že jsou iniciované sprškami sekundárních částic, mají frekvenci odpovídající právě četnosti bombardování běžným kosmickým zářením a zároveň jsou jednotlivé výboje v zásadě synchronizované, proto se jejich amplitudy sčítají a výsledkem je jeden rádiový záblesk.



I když výpočty odpovídají naměřeným datům, je potřeba udělat ještě dost práce, než bude možné plně rozhodnout o tom, co stojí na pozadí vzniku bleskového výboje. Joseph Dwyer z Floridského technologického institutu aktuálně pracuje se svým týmem na výzkumu, ve kterém měří rádiové záblesky a současně k nim i spršky sekundárních částic kosmického záření. Výsledek bude hrát zásadní roli v potvrzení Gurevičovy teorie.

■ Miroslav Horký, 24. 5. 2013, AB 17/2013

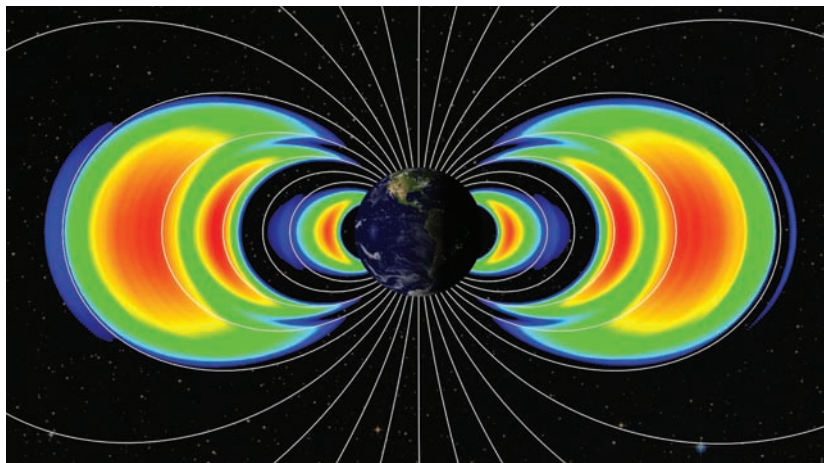
Náčrt vzniku pulzních výbojů v důsledku lavinové ionizace ubíhajícími elektrony. Zdroj: PRL.



## Experiment PAMELA – antiprotony ve vnitřním Van Allenově pásu

**Van Allenovy pásy** – oblasti kolem Země tvořené nabitými částicemi (elektrony, protony a ionty  $O^+$ ,  $He^+$ ), které jsou zachycené magnetickým polem Země. Pásy se nacházejí ve vzdálenosti 1,2 až  $7 R_Z$ . V polárních oblastech se odrážejí efektem magnetického zrcadla. Pásy existují dva, vnější složený především z elektronů a vnitřní obsahující především protony s vysokou energií. Částice v pásu pronikavě září. Jejich energie je od 1 keV do 100 MeV. Vnitřní pás objevil James Van Allen z Univerzity v Iowa. Oba pásy jsou mimořádným nebezpečím jak pro kosmické sondy, tak pro člověka.

Van Allenovy radiační pásy (červeně). Dočasné rozštěpení vnějšího pásu na dva bylo pozorováno v roce 2013 sondami Van Allen Probes. Zdroj: NASA.



Pamela (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) je italský částicový detektor umístěný na ruské výzkumné družici Resurs-DK1, která startovala již v roce 2006 z ruského kosmodromu Bajkonur. Na vývoji přístroje se podíleli vědci z Itálie, Německa, Ruska, Švédska, USA a Indie.

Družice byla do roku 2010 na eliptické dráze ve výšce od 350 do 600 km, nyní je na kruhové dráze ve výšce 570 km a je stále aktivní. Samotný detektor ke svému životu potřebuje příkon 360 W a denně chrlí 15 GB cenných vědeckých dat. Experiment PAMELA je schopný detekovat elektrony, pozitrony, neutrony, protony, antiprotony, lehká jádra a antijádra. Magnetický spektrometr zkoumá energetická spektra nabitých částic. K velmi zajímavým výsledkům patří detekce antiprotonů ve vnitřním Van Allenově pásu v oblasti nad jihoatlantickou anomálií.

### Jihoatlantická anomálie

Jihoatlantická anomálie se nachází nad Jižní Amerikou a Atlantickým oceánem mezi pobřežími Jižní Ameriky a Afriky.

Jde o místo, kde se vnitřní Van Allenův radiační pás nejvíce přibližuje k Zemi. Právě touto zajímavou oblastí prochází oběžná dráha ruské sondy Resurs-DK1, na níž je umístěn detektor nabitých a neutrálních částic PAMELA. V jihoatlantické anomálii je nejslabší magnetické pole, což je příčinou přiblížení radiačního pásu k Zemi.

## Detekce antiprotonů

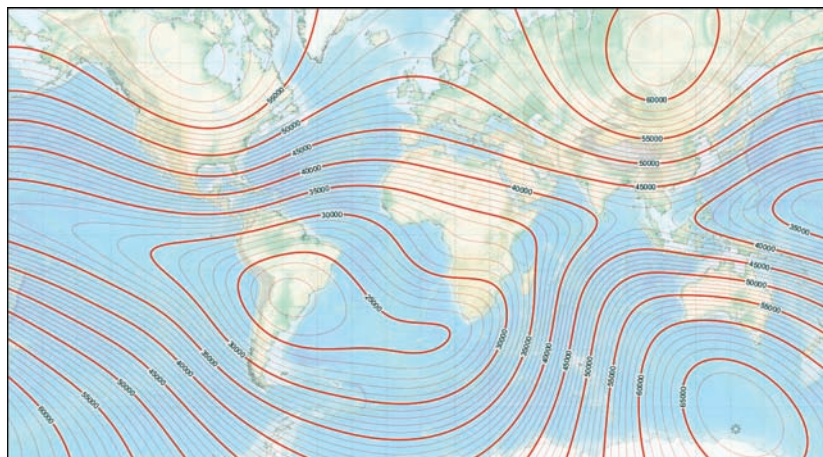
Během zhruba 850 dnů měření v oblasti jihoatlantické anomálie došlo k 28 případům detekce antiprotonu o energii z intervalu 60 až 750 MeV. Měření probíhalo v oblasti dané McIlwainovými souřadnicemi  $L$  mezi 1,1 až 1,3 a  $B$  nižší než 0,216. Souřadnicí  $L$  je definována siločára, která v oblasti magnetického rovníku probíhá na  $L$ -násobku poloměru Země. Souřadnice  $B$  je velikost pole v nanoteslách.

Tok antiprotonů v galaktickém kosmickém záření je o tři řády nižší než hodnoty naměřené ve Van Allenově radiačním pásu. Radiační pásy totiž fungují jako magnetická past a zachycují částice i antičástice vzniklé interakcí kosmického záření s ionosférou nebo s horními vrstvami atmosféry. Naměřené hodnoty toku antiprotonů ve vnitřním radiačním pásu jsou o dva řády nižší než teoreticky předpokládané. Důvod, proč tomu tak je, není zatím známý, jelikož se jedná o první pozorování antiprotonů ve vnitřním radiačním pásu.

## Závěr

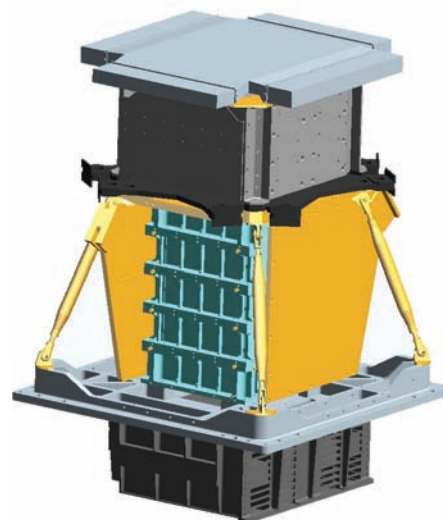
Vědci vyhodnocující data z detektoru PAMELA pozorovali poprvé v historii antiprotony o energiích nižších než 750 MeV ve vnitřním radiačním pásu Země, a potvrdili tak teoretické předpoklady, i když naměřené hodnoty jsou nižší, než se čekalo. Vzhledem k tomu, že zjištěné hodnoty toku antiprotonů v radiačním pásu překračují o tři řády hodnoty toku antiprotonů z kosmického záření, jedná se o největší zdroj antiprotonů v blízkosti Země.

■ Miroslav Horký, 9. 9. 2011, AB 34/2011, aktualizováno



*Jihoatlantická anomálie. Vrstevnice spojují místa se stejnou velikostí magnetického pole při povrchu Země. Pole mezi sousedními liniemi se liší o 1000 nT. Nad Jižní Amerikou je dobře patrný střed jihoatlantické anomálie. Model NOAA.*

*Detektor PAMELA má hmotnost 470 kg a výšku 123 cm. Je umístěn na družici. Resurs-DK1. Zdroj: INFN.*





## Curiosity, voda a život

**Rover** – automatické vozítko schopné vlastního pohybu určené k výzkumu těles sluneční soustavy. Rovy využívá především americká NASA k výzkumu Marsu.

**Sol** – marťanský den, je o 39 minut delší než den pozemský. U vozítek Spirit a Opportunity mise Mars Exploration se marťanské soly začaly počítat v okamžiku přistání Spiritu.

**Kosmický jeřáb** – přistávací manévry, při kterém visí přístroj na laněch pod raketovou pohonnou jednotkou a pomalu je spouštěn na povrch tělesa.

Závěrečná fáze přistání laboratoře MSL Curiosity. Let byl nejprve zbrzděn padákem, poté reaktivními tryskami. V poslední fázi visel rover na třech laněch pod pohonnou jednotkou (tzv. raketový jeřáb). Zdroj: NASA.



Planeta Mars je jedinou planetou, na jejíž povrch se můžeme dalekohledem přímo podívat. Je tak v průběhu jedné noci patrné, že Mars rotuje téměř stejnou rychlostí jako Země. Již po hodině je i malým dalekohledem zřejmé, že se tmavá a světlá místa na kotoučku Marsu vlivem otáčení posunula. Je to tak nápadné a pohled není za jasné pozemské noci už ničím jiným rušen, že velmi dlouho, téměř až do poloviny dvacátého století, astronomové spekovali, zda má Mars vůbec atmosféru. Parametry dráhy Marsu způsobují podobné sezónní změny, jaké pozorujeme na Zemi. Na Marsu jsou, již jen podle velikosti polárních čepiček a zbarvení povrchu oblastí na ně bezprostředně navazujících, viditelné změny jako důsledek probíhajících ročních období.

### Výzkum Marsu

Gigantická technická díla realizovaná v devatenáctém století, jako třeba Suezský průplav, spolu s úspěchy při konstruování velkých refraktorů, dala vzniknout romantickým snům o obyvatelích Marsu. Téměř v každé populární knize, která popisuje historii objevování Marsu, jsou zmíněny Schiaparelliho kanály. Ve své době mělo jít o gigantická vodní díla inteligentních Marťanů, kteří jimi přivádějí vodu z polárních oblastí do vyprahlých pouští kolem rovníku, a přizpůsobují si tak tvář planety k obrazu svému. S postupujícím planetárním výzkumem založeným na rozvoji kosmonautiky zůstali lidem podobní Marťani schopní teraformovat planetu dnes už jen ve fantastické literatuře.

Technické možnosti automatizovaných robotů, které byly postupně na Mars vysílány, se každou jejich novou generací zvyšují. První meziplanetární pouzdra, která na planetě přistála, změřila jen několik fyzikálních charakteristik a orbitální moduly snímkovaly povrch Marsu s neustále se zvyšujícími podrobnostmi. Dnešní kosmické stroje jsou schopné z oběžné dráhy změřit koncentraci nejen vody v podpovrchových horninách, ale i mnoha dalších chemických sloučenin a určit tak pravděpodobnost výskytu mnoha minerálů. Jsou známy globální údaje o atmosféře, jejíž převládající složkou je oxid uhličitý. Stále se však nepodařilo rozhodnout, zda na Marsu jsou, nebo alespoň někdy v minulosti byly podmínky, které považujeme za klíčové pro existenci života, jaký známe na Zemi. Přitom odpověď na tuto otázku byla hna-

cím motorem všech projektů, které pro výzkum Marsu prozatím lidé připravovali a ještě jistě připravovat budou.

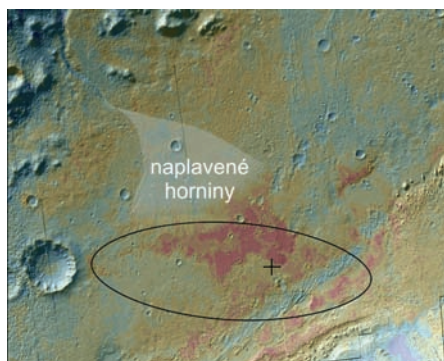
Na Mars bylo dosud vysláno 39 sond a z nich bylo jen 15 úspěšných. Úspěch zde znamená, že se podařilo navést sondu na oběžnou dráhu, nebo bezpečně přistát a získat očekávaná data. Od doby Vikingů, které byly v polovině sedmdesátých let vůbec prvními úspěšnými laboratořemi schopnými přímého povrchového průzkumu, se technika v mnohém zdokonalila. Dosud však stále zůstává nerozhodnuto, zda na Marsu živé organismy jsou, nebo alespoň kdysi v minulosti byly, či zda je to planeta bez života. Současný přímý terénní průzkum je prováděn zejména terénními vozítky, která jsou schopna samostatného pohybu po planetě a mohou si vybrat, jaké části povrchu budou zkoumat. Způsob, jakým to dělají, je tedy omezen jejich pohybovými možnostmi a přístrojovým vybavením, které si s sebou na Mars přivezly. Na Marsu dnes pracují dvě takové pojízdné aparatury. Z předchozí generace dvojice roverů je ještě stále aktivní Opportunity, který přistál na povrchu 25. ledna 2004 a po deseti letech činnosti překročil

**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 dlouhodobě 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, Mars Science Laboratory a dlouhá řada dalších.

**Curiosity** – pojízdná laboratoř, která na Marsu přistála 6. srpna 2012 v kráteru Gale. Hmotnost roveru je 899 kg, délka 2,9 metru a výška 2,2 metru. Na palubě je mnoho přístrojů o celkové hmotnosti 80 kg, včetně pece, vrtné soupravy, spektrografu a různých analyzátorů. Jde o největší laboratoř dosud dopravenou na povrch Marsu.

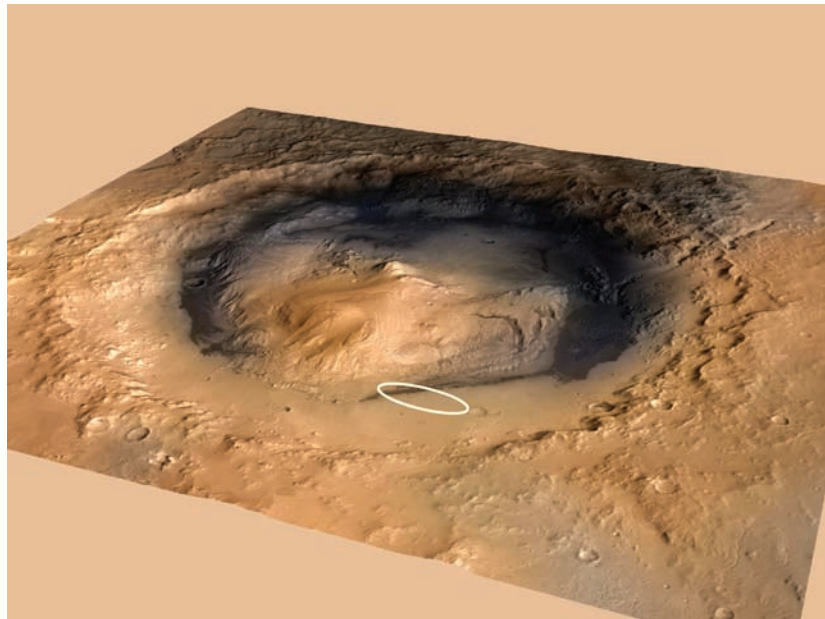
Umělecká vize laboratoře MSL Curiosity. Zdroj: NASA.





Detailní záběr místa přistání. Zdroj: NASA.

Přistávací oblast. Na fotografii je kráter Gale. Místo přistání roveru je vyznačeno bílou elipsou. Zdroj: NASA.



plánovanou životnost čtyřicetkrát. Dnes se nachází v blízkosti kráteru Endeavour. Dvojice identických vozítek Spirit a Opportunity byla vybavena zejména kamerami a spektrometry. Rovy byly navrženy pro průzkum klimatických podmínek, mikroskopický a spektroskopický průzkum minerálů a hornin a samozřejmě pro hledání čehokoliv, co by mohlo být vysvětleno jako projevy živých struktur. Výsledkem byla průkazná přítomnost vody na Marsu, jejíž vliv byl rozpoznán v erodovaných povrchových horninách. Rovy současně našly minerály a horniny, jejichž původ je na Zemi přítomností vody podmíněn. Druhým aktivním vozítkem je nejnovější projekt MSL (*Mars Science Laboratory*) pojmenovaný Curiosity (Zvědavost).

## Curiosity

Curiosity je pojízdná laboratoř již třetí generace, která je mnohem větší než všichni předchůdci. Laboratoř nese také mnohem složitější vybavení a je schopná přímého průzkumu hornin a zemín, který provádí několika rozdílnými metodami v uzavřeném prostředí za přesně definovaných podmínek. MSL Curiosity je vybavena 17 kamerami,

z nichž klíčové jsou tři systémy – MastCam s vysokým rozlišením na stožáru, MAHLI na robotickém rameni schopný snímat detaily velké jen 12,5 μm a MARDI určený pro detailní záznam povrchu při přistávacím manévru. Dalším typem vybavy jsou čtyři analytické experimenty, jejichž klíčovými přístroji jsou zejména spektrometry. Tyto experimenty jsou navrženy k detailnímu geologickému a atmosférickému průzkumu. ChemCam ostřeluje laserem horniny a analyzuje odpařený materiál. APXS analyzuje složení hornin pomocí rentgenové spektroskopie a ostřelováním hornin částicemi alfa. Prostřednictvím experimentu ChemMin je možné určit detailní che-



mické složení minerálů, které v sobě váží vodu. Je tak možné usuzovat na její přítomnost v době, kdy horniny vznikaly. Klíčovým fyzikálně chemickým experimentem je SAM, cca 40 kg velký komplex velikosti mikrovlnné trouby vybavený plynovým chromatografem a dvěma spektrometry. SAM obsahuje pec, ve které jsou vybrané vzorky půdy vyžháný při teplotě 1 000 °C a následně jsou analyzovány výsledky tohoto děje. Experiment je určen zejména pro vyhledávání organických uhlikatých molekul a sloučenin. Curiosity je dále vybavena dvěma detektory záření DAN a RAD, přístrojem MEDLI pro průzkum atmosféry při sestupném manévru a analyzátořem REMS měřícím fyzikální charakteristiky prostředí, ve kterém se laboratoř nachází. Curiosity je tedy komplexní pojízdná laboratoř schopná shromažďovat detailní poznatky o povrchovém složení a atmosféře Marsu v místech, kde se právě pohybuje.

Laboratoř Curiosity přistála na Marsu 6. srpna 2012. Za místo přistání byla vybrána vnitřní část kráteru Gale. Zde je, podle předchozích průzkumů, terén tvarován zejména naplaveninami sesutými z centrálního pohoří uvnitř kráteru. Je zde mnoho nejrůznějších hornin, které mohly vzniknout přeměnou dřívějších souvrství. Samotné místo, do kterého bylo vozítko raketovým jeřábem spuštěno, bylo zvoleno na relativně rovném dně kráteru, kde byly podmínky pro bezpečné přistání velmi výhodné. Jelikož je Curiosity již dosti velkým zařízením a přístrojové vybavení je oproti předchozím automatům také energeticky mnohem náročnější, panely slunečních baterií by byly příliš velké a pro jeho provoz nepraktické. Celá aparatura je tedy poháněna radioizotopovým termoelektrickým generátorem. Životnost mise je tak závislá na „vybití baterií“. Napájení by mělo vydržet alespoň jeden marťanský rok, tedy zhruba dva roky pozemské.

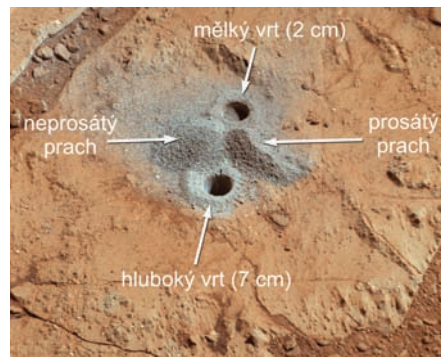
## Geologický průzkum

Geologický průzkum byl prováděn v oblastech Rocknest a Yellowknife Bay, které jsou v kráteru Gale, kde rover Curiosity přistál. Robot zde pomocí aparatury SAM, umístěné v těle vozidla, a aparaturou CHIMRA, umístěnou na předním pohyblivém rameni, analyzoval drť jemného prachu a kamínků jednak shrábnutou z povrchu a také vybranou z podpovrchových vrtů. Rozborem výsledků mnoha takových vzorků bylo zjištěno, že se v hornině nachází voda, které je zde, co se objemu týče, zhruba 2 %. Drť prachu a pískových zrn shrábnutá z povrchu byla

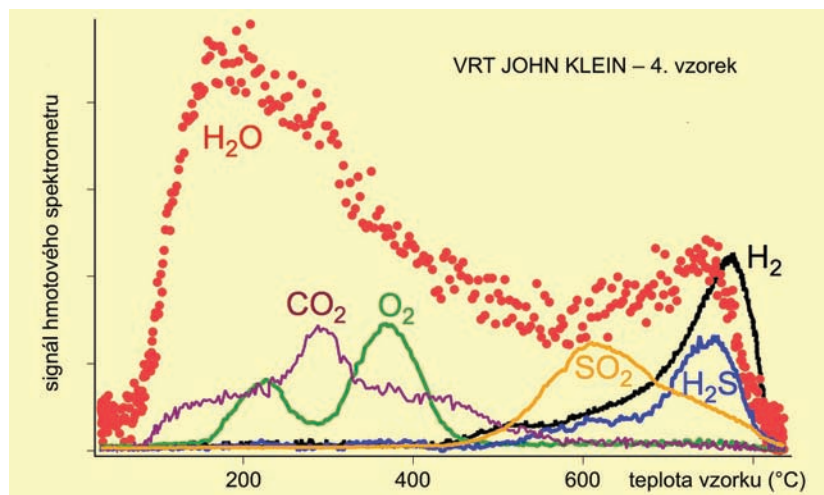
**Mars** – rudá planeta se dvěma malými měsíci, Phobosem a Deimosem, je v pořadí čtvrtým tělesem sluneční soustavy. Povrch planety je pokryt načervenalým pískem a prachem. Barva je způsobena vysokým obsahem železa. Načervenalá barva celé planety jí dala jméno (Mars je bůh váleka). Na povrchu se nacházejí 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 vzniklé pravděpodobně tekoucí vodou. Snímky ze sond ukazují místa, kudy dříve tekla voda. Zdá se, že Mars byl dříve vlhčí a teplejší, než je dnes. Rozpětí teplot, které na Marsu panují (zima ne větší než v Antarktidě) by bylo snesitelné pro některé primitivní formy života žijící na Zemi. Jejich existence se však dosud nepotvrdila.

**Teraformace** – přizpůsobení cizích planet pro možný pobyt lidí. Prozatím je teraformace zmiňována jen ve futurologických publikacích. Do různých podrobných kroků se promýšlí vytvoření biosféry na cizích planetách.

První vrty provedené do povrchových hornin v oblasti Yellowknife Bay. Prosátý prach vybraný z vrtů byl následně analyzován aparaturou CHIMRA. Zdroj: NASA.







Spektrum těkavých látek při zahřívání čtvrtého vzorku z vrtu John Klein. Výsledky prokazují přítomnost uhlíkatých, síranů a siričků. Odpar vodní páry prozrazuje jilové horniny. Zdroj: NASA.

sledky, které řídicí vědecký tým mise Curiosity nabídl, jsou dlouho očekávaným potvrzením existence vody v podzemních horninách a zeminách Marsu. Jde o shrnutí více než ročního pobytu a práce laboratoře na mnoha místech v geologicky velmi komplikované oblasti kráteru Gale. Místo, v němž experiment probíhá, bylo vybráno právě pro zřetelné známky vodní eroze, které jsou evidentní již ze satelitního průzkumu povrchu. Pojízdná laboratoř MSL Curiosity tak povrchovým průzkumem přímo potvrdila, že stále hledaná a očekávaná voda se v horninách i dnes nalézá a že interpretace geologické minulosti Marsu jako planety, na níž se voda vyskytovala, je oprávněná.

■ Ivan Havlíček, 27. 9. 2013, AB 29/2013

v aparatuře SAM zahřáta až na teplotu 835 °C a v průběhu zahřívání byly analyzovány uvolněné složky. Přítomnost vody v analyzované zemině je prokazatelně doložena a dle geologů by nemělo jít jen o vodu vázanou v minerálech. Hledání zemin a hornin, v nichž by se mohla nacházet voda, je prováděno také pomocí aparatury DAN. Jde o detekci odezvy na tok neutronů vystřelovaných aparaturou do podloží. Následné zachycení vodíku je interpretováno jako přítomnost hydroxyly nebo vody v podzemních vrstvách. Předložené vý-

## Pluto, planeta-neplaneta

Pluto je těleso, které obíhá kolem Slunce v těžko představitelné vzdálenosti téměř šesti miliard kilometrů. To je čtyřicetkrát dále, než činí průměrná vzdálenost Země od Slunce. V mrazivé hloubce prostoru, kde slabý sluneční svit zahřeje Pluto na pouhých 40 stupňů nad absolutní nulou, letí spolu se svými pěti měsíci po silně excentrické dráze pustým prostorem vstříc setkání s nepatrným lidským poslem – sondou New Horizons. Jaký je tento vzdálený svět? Jsou v této obrovské dálce jen mrtvá tělesa, jež se v nezměněné podobě řítí prostorem po tisíce a miliony let? Z posledních fotografií pořízených Hubblovým dalekohledem se zdá, že tomu tak není....

### ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PLUTA

hmotnost	$1,25 \times 10^{22}$ kg
průměr (rovníkový)	2 300 km
průměrná hustota	1,75 g/cm <sup>3</sup>
velká poloosa	39,5 au
rotační perioda	6,39 dní
oběžná doba	248,1 roků
sklon rotační osy	122,5°
sklon dráhy k ekliptice	17,1°
excentricita dráhy	0,25
průměrná teplota	44 K
albedo	0,3
složení atmosféry	metan a dusík
složení povrchových materiálů	metanový led
počet měsíců	5

**Pluto** – spolu s Charonem tvoří trpasličí dvojpřítelku v Kuiperově pásu, která patří do rodiny plutoidů. Do roku 2006 byl Pluto řazen konvenčně mezi planety. V blízkosti jsou čtyři menší měsíce Nix, Hydra, Kerberos a Styx. Pluto oběhne Slunce jednou za 248 pozemských let po protáhlé, eliptické dráze. Kolem vlastní osy se otáčí v opačném směru, než obíhá. Jeho povrch, patrně pokrytý metanovým ledem, dobře odráží světlo. Dráha Pluta je mimořádně excentrická, v některých obdobích je blíže ke Slunci než Neptun (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.

**Plutoidy** – trpasličí planety za drahou Neptunu. Tato skupina těles byla definována v roce 2008 na zasedání Mezinárodní astronomické unie ve Stockholmu. K typickým zástupcům patří Pluto, Eris nebo Makemake.

**Plutina** – objekty s oběžnou drahou podobnou Plutu, která rezonuje s Neptunovou v poměru 2 : 3 (na dva oběhy plutin připadnou 3 oběhy Neptunu). Odhaduje se, že plutin s průměrem větším než 100 km je zhruba 1 400. Největšími zástupci jsou pochopitelně Pluto a Charon.

**Planetesimály** – tělesa z raných fází vývoje sluneční soustavy. Jedná se o stavební kameny budoucích planetek, na kterých posléze docházelo k procesům diferenciaci 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.

**Kuiperův pás** – jedná se o 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 600 milionů těles o průměru větším než kilometr. V dnešní době jich známe více než 1 800. Průměry těles nepřesahují (až na ojedinělé výjimky) 100 až 300 km. Celková hmotnost všech těles se odhaduje na 0,1 hmotnosti Země. Nejznámějším tělesem Kuiperova pásu je zcela jistě Pluto.



Kopule Lowellovy observatoře v Arizoně. Zdroj: Wikipedia.

## Objev Pluta

Hledání deváté planety inicioval americký astronom, matematik a obchodník Percival Lowell (1855–1916). Na základě analýzy poruch drah Uranu a Neptunu dospěl k závěru, že je způsobuje další velké těleso za jejich drahami, které nazval Planeta X. Lowell založil dnes velmi známou Lowellovu observatoř v Arizoně, na které se věnoval pozorování domnělých kanálů na Marsu, jež se nakonec ukázaly optickým klamem. Na observatoři také se spolupracovníky usilovně hledal až do své smrti Planetu X. Je ironií osudu, že na dvou snímcích Pluto zachytili, nicméně jeho velmi slabý obraz nerozpoznali od hvězd.

Pluto byl nalezen až 15 let po Lowellově smrti. Objev zdržely tažnanice o dědictví, které vzplanuly mezi jeho manželkou a observatoří. Program hledání Planety X obnovil v roce 1929 Vesto Slipher, nový ředitel Lowellovy observatoře. Úkolu se zhostil na výbornou mladíček Clyde William Tombaugh (1906–1997), kterému bylo v době objevu pouhých 23 let. Systematicky snímkoval oblohu v blízkosti předpokládané polohy planety. Ke každému snímku pořizoval zhruba po 14 dnech kontrolní snímek. Oba snímky poté porovnával na tzv. světelném komparátoru, na kterém by se planeta objevila „skokem“ na neměnném hvězdném pozadí. Po roce hledání objevil 18. února 1930 objekt, který

skutečně mezi hvězdami měnil polohu. Z mnoha jmen navrhovaných pro novou planetu zvítězil nakonec návrh jedenáctileté školačky Venetii Burney z anglického Oxfordu (za vítězný návrh získala odměnu pět dolarů). Pluto byl římským bohem podsvětí a jméno nové planety tak navázalo na tradiční jména ostatních planet. Navíc první dvě písmena symbolizovala iniciály Percivala Lowella. Také astronomický symbol přijatý pro Pluto v sobě skrývá iniciály P a L.

Mnohem později, když byl objeven první měsíc Pluta, mohla být určena hmotnost nového tělesa a ukázalo se, že nemohl být zod-

Předpokládaná vnitřní struktura trpasličích planet a velkých měsíců. Zdroj: Doug Ellison a kol.



povědný za údajné poruchy drah Uranu a Neptunu, ze kterých Lowell vycházel. Jeho výpočty nebyly správné, jak se s konečnou platností ukázalo roku 1992. Tehdy totiž byla s pomocí dat z průletu Voyageru 2 revidována hmotnost planety Neptun. Ukázalo se, že planeta je přibližně o 0,5 % hmotnější, než se do té doby soudilo. Tato skutečnost je schopna vysvětlit vzájemné gravitační poruchy drah Uranu a Neptunu. Pátrání po Planetě X tedy bylo pouhým honem po přeludu.

Od počátku bylo jasné, že Pluto je výjimečné těleso a jeho dráha příliš nepřipomíná dráhu planet. Sklon dráhy k ekliptice činí  $17,1^\circ$  a je mnohem větší než u ostatních planet. Také excentricita dráhy je natolik velká, že Pluto se při každém oběhu Slunce dostane na 20 let blíže k Zemi než Neptun. Vysoký sklon rotační osy způsobuje, že se Pluto jakoby odvaluje po své dráze. A aby všem anomáliím nebyl konec, velikost Pluta je výrazně menší, než jsou rozměry našeho Měsíce. Nicméně i přes tyto vady na kráse byla nová planeta na světě a udržela si svou pozici deváté planety po tři čtvrtiny století. Podle této „planety“ dokonce pojmenoval Walt Disney slavného psa z kreslených seriálů. Také název prvku plutonium byl odvozen ze jména nové „planety“. V roce 2006 byl Pluto zařazen do nově vzniklé rodiny trpasličích planet.

## Pozorování Pluta

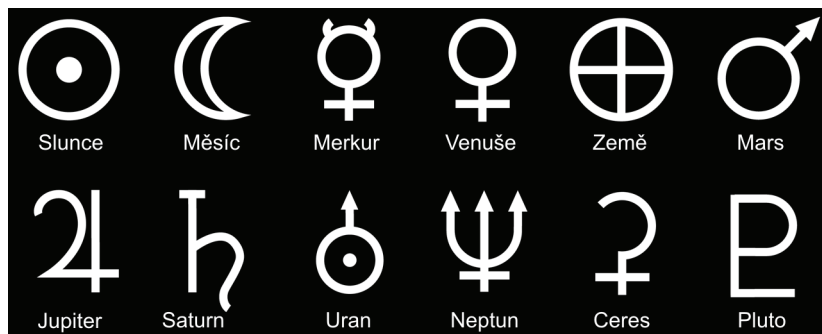
K pozorování Pluta potřebujeme dalekohled o průměru alespoň 25 cm, protože záření planety je přibližně tisíckrát slabší než záření nejslabších hvězd, viditelných na obloze pouhým okem. I tak v dalekohledu uvidíme Pluto jako nepatrnou „hvězdičku“ 14. magnitudy.

Albedo planety odpovídá zmrzlému metanu, atmosféra je složena z metanu a dusíku. Podrobnější informace bude možné získat až v roce 2015, kdy k Plutu dorazí sonda New Horizons. Největšími dalekohledy jsou na povrchu Pluta pozorovány skvrny, které mění svůj tvar. To svědčí o možné kryovulkanické aktivitě, která souvisí s nerovnoměrným ohříváním povrchu tělesa. Tuto hypotézu podporuje fakt, že k ochlazení povrchu planety dochází paradoxně ve chvílích, kdy se planeta přibližuje ke Slunci. Tento

**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, pro 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 velké těleso Kuiperova pásu, z nichž nejznámější je Pluto.

*Symbole používané v astronomii. Poslední dvě tělesa mají jedno společné: v době svého objevu byla považována za planety a později musela rodinu planet nedobrovolně opustit.*



**Albedo** – míra odrazivosti povrchu tělesa. Jde o poměr množství odraženého a dopadajícího elektromagnetického záření vyjádřený zpravidla v procentech nebo desetinných číslech. Pokud není specifikováno jinak, jde o viditelné světlo a kolmý dopad. Například albedo sněhu je 90 % (0,9), Země 31 % (0,31) a Měsíce 12 % (0,12).

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

**Mez stability** – u těles pod mezí stability se dráha transneptunických těles nekříží s dráhou Neptunu. Na mezí stability se dráha dotýká dráhy Neptunu, nad mezí stability se dráha kříží s dráhou Neptunu a obecně může dojít k blízkému přiblížení a tím pádem jsou dráhy těles s danými elementy nestabilní.

**Seeing** – z anglického seeing conditions (podmínky viditelnosti). Turbulence atmosféry v okolí dalekohledu mění strukturu obrazu objektu a způsobují jeho pohyb v zorném poli. Tyto projevy nazýváme seeing. Seeing vyjadřujeme v obloukových vteřinách. Údaj určuje limitní rozlišovací schopnost dalekohledů způsobenou projevem atmosféry.

„antiskleníkový“ jev je patrně způsoben odpařováním namrzlých těkavých látek, které odvádí z povrchu teplo. Jedná se o stejný efekt, využívaný v tropických zemích k samovolnému chlazení vody v porézních nádobách, jimiž tekutina prosakuje a posléze se odpařuje.

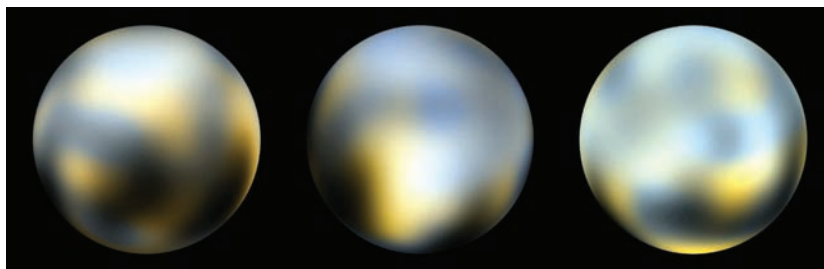
Snímkování povrchu takto vzdálených těles je výzvou pro současné technologie získávání a zpracování obrazového signálu. Úhlový průměr kotoučku Pluta je pouhých 0,1", což je řádově méně než běžná hodnota seeingu způsobeného turbulentním prouděním vzduchu v atmosféře. Bez dalekohledů vybavených systémem adaptivní optiky nebo dalekohledů na oběžné dráze se tedy v žádném případě neobejdeme.

Jednou z možností je rekonstrukce fotometrických dat, pořízených při přechodu Charonu přes disk Pluta. Vzhledem k tomu, že rotace planety a jejího měsíce je vázaná, pozorujeme při přechodu Charonu stále jeho stejnou stranu. Tok záření z tohoto tělesa se tudíž vůči vzdálenému pozorovateli na Zemi prakticky nemění. Odchytky v celkovém naměřeném toku ze soustavy obou těles lze proto přičítat změnám albeda na odkrývající se části povrchu Pluta a z fotometrických dat je možno rekonstruovat odrazivost různých míst na jeho povrchu.

## Plutovy měsíce

Trpasličí planeta Pluto má jeden velký měsíc Charon a čtyři menší měsíce Nix, Hydra, Kerberos a Styx. Charon byl objeven americkým astronomem Jamesem Christem dne 22. června 1978. Souputníka Pluta našel Christy jako periodicky se objevující výduť na fotografiích pořízených na Námořní observatoři Spojených států (*United States Naval Observatory*). Charon je relativně veliké těleso, má průměr 1 207 km, což je přibližně polovina průměru Pluta. Hmotnost Charonu činí 12 % hmotnosti Pluta. Těžiště soustavy leží nad povrchem Pluta, a tato dvojice proto splňuje definici binární soustavy. Slapové síly uvnitř obou těles vedly k vzájemně vázané rotaci. Pluto i Charon k sobě nastavují stále stejnou stranu a obě tělesa se otáčejí kolem své rotační osy za stejnou dobu, jakou potřebují k vzájemnému oběhu. Z obou těles se naskytá stále stejný pohled na

Albedové mapy Pluta pořízené z různých úhlů pohledu.  
Zdroj: HST/ACS/HRS, 2010.





druhé těleso. Na povrchu jsou místa, na kterých je druhé těleso stále nad obzorem a místa, ze kterých ho nikdy neuvidíme. Pluto s Charonem tvoří trpasličí dvojsystem. Objev Charonu umožnil výpočet hmotnosti obou těles. Zdá se, že Charon nemá žádnou atmosféru. Na jeho povrchu byly v roce 2007 z observatoře Gemini pozorovány skvrny z amoniaku a vodních krystalů, možná jde o důsledky činnosti chladných gejzírů. Měsíc byl pojmenován podle Charóna, který v řecké mytologii převážel mrtvé přes řeku Styx a Acheron do říše zesnulých.

V roce 2005 byly Hubblem vesmírným dalekohledem objeveny dva malé měsíce pojmenované Nix a Hydra. Název Nix je odvozen od jména řecké bohyně tmy Nyx, písmeno y bylo zaměněno za i, aby nedocházelo k záměně s planetkou 3908 Nyx. Měsíc Hydra byl pojmenován podle devítihlavé hydry, která v řecké a římské mytologii bránila vstup do podsvětí. Iniciály obou měsíců (N, H) jsou počátečními písmeny názvu sondy New Horizons, která do oblasti letí. Rozměry obou těles se odhadují na 20 až 80 km. V roce 2011 objevil Hubble dalekohled měsíc Kerberos a o rok později měsíc Styx. Rozměry posledních dvou měsíců se odhadují na 13 až 30 kilometrů.

### Vyřazení Pluta z rodiny planet

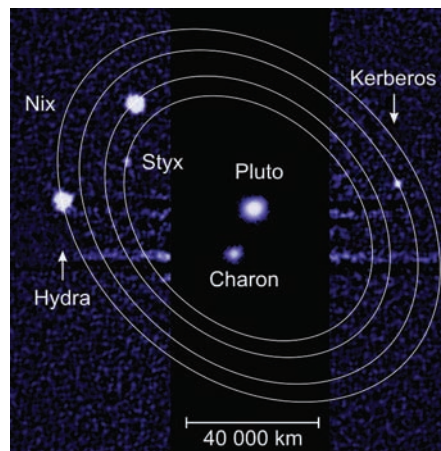
To, že Pluto nezapadá mezi ostatní planety, bylo zjevné již velmi dlouho. Postupně byla objevována další tělesa Kuiperova pásu, z nichž některá měla obdobné rozměry jako Pluto. Stále bylo zřejmější, že Pluto je jen jedním členem z rozsáhlé rodiny těles obíhajících za drahou Neptunu. Někdy se jim proto také říká transneptunická tělesa. První pokus byl učiněn v roce 2003 na XXV. Valném shromáždění Mezinárodní astronomické unie v australském Sydney. Návrh na vyřazení Pluta z rodiny planet tenkrát hlasováním neprošel. Vzhledem k tomu, že jde o jedinou planetu objevenou Američany, bylo logické, že návrh nepodpořili.

V roce 2006 proběhlo v Praze XXVI. Valné shromáždění Mezinárodní astronomické unie, na kterém byla situace zcela odlišná. V roce 2003 bylo objeveno těleso Eris, které je větší než Pluto (má průměr 2400 km) a v roce 2005 těleso Makemake, které je jen o něco málo menší než Pluto (má průměr 1500 km). Těles velikosti nad 600 km byla v Kuiperově pásu známa již první desítky a bylo zjevné, že pozice Pluta jako planety je nadále neudržitelná. Při zákulisním lobování sehrála svým šarmem významnou roli Jocelyne Bell Burnellová, která

**Mezinárodní astronomická unie** – *International Astronomical Union (IAU)*, 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.

**Astronomická jednotka** – *původně střední vzdálenost Země od Slunce, v roce 2012 ji IAU definovala jako 149 597 870 700 m přesně. Astronomická jednotka se používá především pro určování vzdáleností ve sluneční soustavě, pro přibližné odhady postačí hodnota 150 milionů kilometrů. Původně se označovala zkratkou AU, od roku 2012 má oficiální zkratku au (z anglického sousloví astronomical unit).*

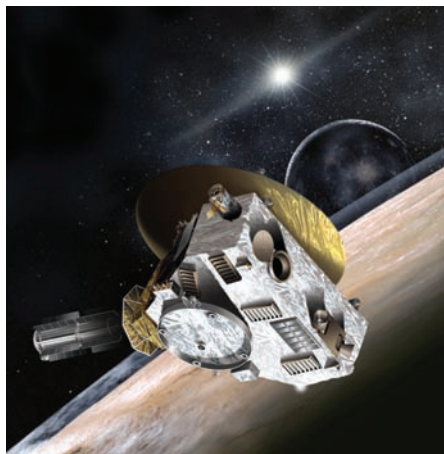
*Plutovy měsíce. Kolem Pluta obíhá větší měsíc Charon a 4 další menší měsíce. Poslední z nich byl objeven v roce 2012 Hubblem vesmírným dalekohledem. Zdroj: NASA/HST.*



**New Horizons** – americká sonda, která se vydala na cestu k Plutu v lednu 2006. Sonda byla vynesena raketou Atlas V551. Opuštění Zeměkoule je propočteno tak, aby sonda byla nasměrována k Jupiteru, který ji urychlí na cestu k Plutu. Po průletu kolem Pluta a Charonu v roce 2015 bude mise pokračovat do oblasti dalších transneptunických těles v Kuiperově pásu.

**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.

Umělecká vize sondy New Horizons letící k Plutu a dalším tělesům Kuiperova pásu. Zdroj: NASA.



v době svého postgraduálního studia objevila v roce 1967 v Cambridge první neutronovou hvězdu – pulzar, dnes známý pod katalogovým číslem PSR 1919+21. Díky jejímu taktu proběhlo hlasování hladce a byly přesně vymezeny pojmy planeta a trpasličí planeta. Pluto byl přeřazen do rodiny trpasličích planet spolu s ostatními velkými tělesy Hlavního pásu planetek a Kuiperova pásu.

Podobná situace nenastala v astronomii poprvé. Ceres, první objevené těleso Hlavního pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem, byla považována za planetu od roku 1801, kdy byla objevena, až do poloviny 19. století, kdy byla nalezena řada dalších těles Hlavního pásu. Pluto ale získal přece jen jednu výsadu. Od roku 2008 je po něm pojmenována celá skupina těles, tzv. *plutoidy* (trpasličí planety za drahou Neptunu). Dnes k nim patří Pluto, Charon, Eris, Makemake, Haumea a další tělesa.

Vyřazení Pluta z rodiny planet prospělo mnohému. Došlo k nápravě paradoxního stavu, kdy každý, kdo se jen trochu zajímal o astronomii, věděl, že Pluto není planeta, ale zároveň se děti ve škole stále nově učily odříkávat „... , Uran, Neptun, Pluto“. Tahanice o Pluto však především vzbudily zájem v laických kruzích, a tím možná prospěly planetární astronomii daleko více, než by si mnozí odborníci mysleli. Umožnily totiž širokou veřejnost informovat o současném pohledu na sluneční soustavu, který je v mnohém na hony vzdálen obecně zažitým a přijímaným tezí o jejím vzniku a vývoji. Pojem Kuiperův pás se tak dostal do povědomí veřejnosti mnohem rychleji, než by to stačilo učinit nové učebnice.

## Plutina

Plutina jsou tělesa blízkého Kuiperova pásu, která se nacházejí v rezonanci pohybu 3 : 2 s planetou Neptun. To znamená, že zatímco Neptun oběhne Slunce třikrát, tělesa rezonanční populace učiní okolo Slunce právě dva oběhy. Jinými slovy: po každých třech obězích Neptunu, resp. dvou obězích plutin zaujmou tato tělesa tutéž prostorovou konfiguraci. Jak vyplývá z názvu, největším představitelem těchto těles je právě trpasličí planeta Pluto. Mezi další členy této populace se řadí například planetka 90482 Orcus s průměrem 950 km.

Za povšimnutí stojí poloha těchto těles vůči tzv. hranici stability. Objekty, které se nacházejí na této hranici, mají při dané velikosti velké poloosy takovou excentricitu, že jejich přísluní se shoduje s vel-



kou poloosou Neptunu. Zdálo by se, že taková tělesa se nutně musí po čase s Neptunem srazit, nebo je alespoň blízké setkání gravitačně zcela destabilizuje a vynese na zcela jiné dráhy. Ve skutečnosti je to ale právě rezonance, která tato tělesa před nepříjemným koncem zachrání. Pokud budeme pozorně sledovat tělesa, ke kterým se Pluto nejvíce přiblíží, zjistíme, že je to poněkud překvapivě planeta Uran – k té se Pluto může přiblížit až na vzdálenost kolem 11 au, zatímco minimální orbitální vzdálenost mezi Neptunem a Plutem je mnohem větší – dosahuje hodnoty přibližně 18 au. Rezonanční populace plutin však není pouhou raritou. Její bližší studium nám poskytuje klíč k zajímavé minulosti sluneční soustavy.

### Pozdní fáze formování sluneční soustavy

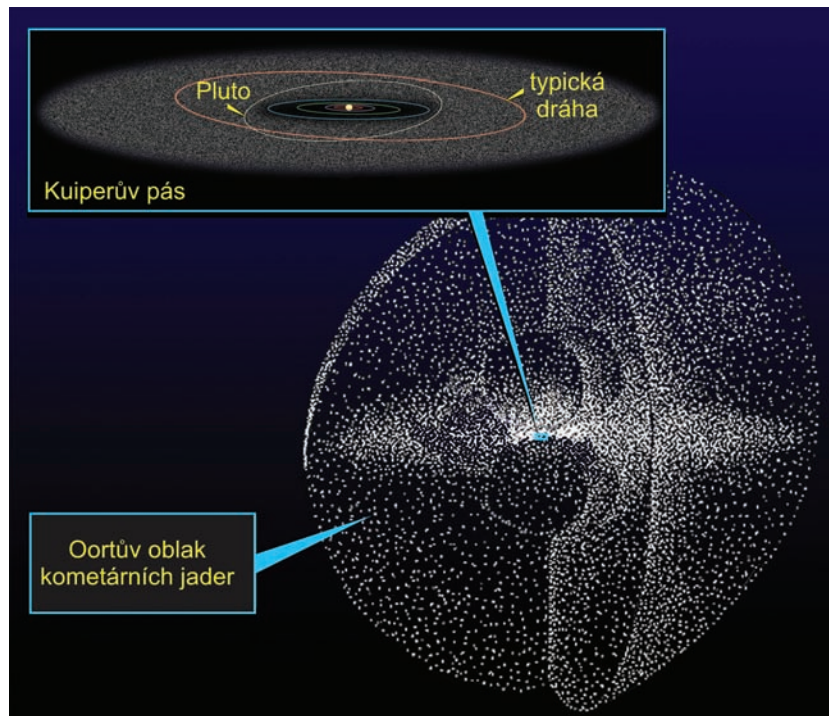
V závěru formování sluneční soustavy planety zřejmě migrovaly na současné dráhy díky interakci s prstencem planetesimál, které již neakreovaly na větší tělesa. Tento disk měl původně hmotnost cca  $35 M_Z$  (hmotností Země). Nejbližší tělesa tohoto planetesimálního disku obíhala těsně za dráhou poslední planety (která se tehdy nacházela ve vzdálenosti 15 až 17 au) a jeho okraj sahal do vzdálenosti přibližně 30 au.

Pomalou migrací, která je způsobená výměnou momentu hybnosti mezi planetami a planetesimálami a posléze působením rezonance Jupiteru a Saturnu, byly dráhy vnějších planet destabilizovány. To způsobilo, že Neptun měl doslova „vletět“ do disku planetesimál, kde byla jeho dráha působením dynamického tření v planetesimálním disku opět změněna na přibližně kruhovou, ovšem s větší velkou poloosou. Původní planetesimální disk byl z velké části rozptýlen do

#### Oortův oblak – také Oortovo-Öpikovo mračno.

Jedná se o jakousi zásobárnu kometárních jader, která se nachází ve vzdálenosti zhruba 20 000 až 100 000 au od Slunce. Obsahuje velké množství nepravidelných těles s drahami o sklonech v rozmezí  $0^\circ$  až  $90^\circ$ . Jedná se většinou o slepence zmrzlých plynů, vodního ledu a úlomků hornin, které se dostávají do blízkosti Slunce vlivem gravitačních poruch. Jejich počet se odhaduje na jeden bilion při celkové hmotnosti do  $10 M_Z$ .

Kuiperův pás a Oortův oblak. Zdroj: NASA.



**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.

**Migrace** – změna dráhy planety v raných fázích vývoje sluneční soustavy. Migraci popisuje tzv. model z Nice. Podle něho je migrace způsobená výměnou momentu hybnosti planety s protoplanetárním diskem, který je tvořen především plynem, prachem a planetesimálami.

prostoru a v dané oblasti zůstalo jen nepatrné procento původních těles. Takováto stochastická událost musela ovšem nutně zanechat v dnešním Kuiperově pásu viditelný dynamický otisk. Je tedy dnešní Kuiperův pás opravdu pozůstatkem mnohem hmotnějšího planetesimálního disku?

Rodney Gomes z Národní observatoře v Rio de Janeiru se spolupracovníky dospěl v roce 2005 k závěru, že současná pozice Neptunu a malá hmotnost Kuiperova pásu implikují, že protoplanetární disk původně končil na hranici 30 au. Ve své studii migrace v takovém disku vědci ukazují, že planeta se nemusí zastavit na okraji disku. Ve skutečnosti, z důvodu nutnosti zachování momentu hybnosti během procesu migrace, závisí konečná pozice planety více na momentu hybnosti disku než na poloze jeho okraje. Protoplanetární disk končící ve vzdálenosti 30 au může vysvětlit i současnou hodnotu velikosti velké poloosy Neptunu. Malé rozměry disku mohly být způsobeny slapovými silami hvězdy procházející v těsné blízkosti, nestabilitami ve vnější oblasti disku, tlakem záření blízkých hvězd nebo třením v plynném disku.

## Zachycení v rezonanci během migrace

Jedním z důsledků migrace planet je, že se příslušné oblasti rezonancí také pohybují. Jestliže je objekt zachycen v rezonanci, pak se nadále pohybuje zároveň s ní. Rezonanční populace zůstává v přibližně početně ustáleném stavu takovou dobu, po jakou se oblast rezonance nachází v disku, protože zatímco objekty s vysokou excentricitou rezonanci opouštějí, nové do ní vstupují. Pokud ale rezonance překročí hranici disku, není již dále doplňovaná novými tělesy a rezonanční populace se s dalším pohybem rezonance směrem ven postupně rozpadá. Minimální excentricita těles rezonanční populace tedy postupně narůstá a relativní zastoupení těles s malou excentricitou postupně klesá.

Největší dosud známá tělesa Kuiperova pásu. Objekt 2007 OR<sub>10</sub> dosud nemá oficiální jméno. Neoficiálně se mu říká „Snow White“, tedy Sněhurka. Zdroj: NASA/HST.



Již jsme zmínili, že modely předpokládají konec protoplanetárního disku na hranici přibližně 30 au. Z toho plyne, že Kuiperův pás, který dnes pozorujeme, musel být vytlačen směrem ven během vývoje dráhy Neptunu a numerické simulace takový scénář podporují.

Jak vidno, Pluto svou degradací vůbec neztratil na důležitosti. Naopak, je tělesem, které nám má mnohé co říci nejen samo o sobě, ale jako nedílná součást Kuiperova pásu vnáší světlo až ke kořenům vzniku sluneční soustavy.

■ **Jakub Rozehnal, Petr Kulhánek, 2. 7. 2010, AB 23/2010**



Američané protestující proti vyřazení Pluta z rodiny planet. Zdroj: NMSU/Darren Phillips.

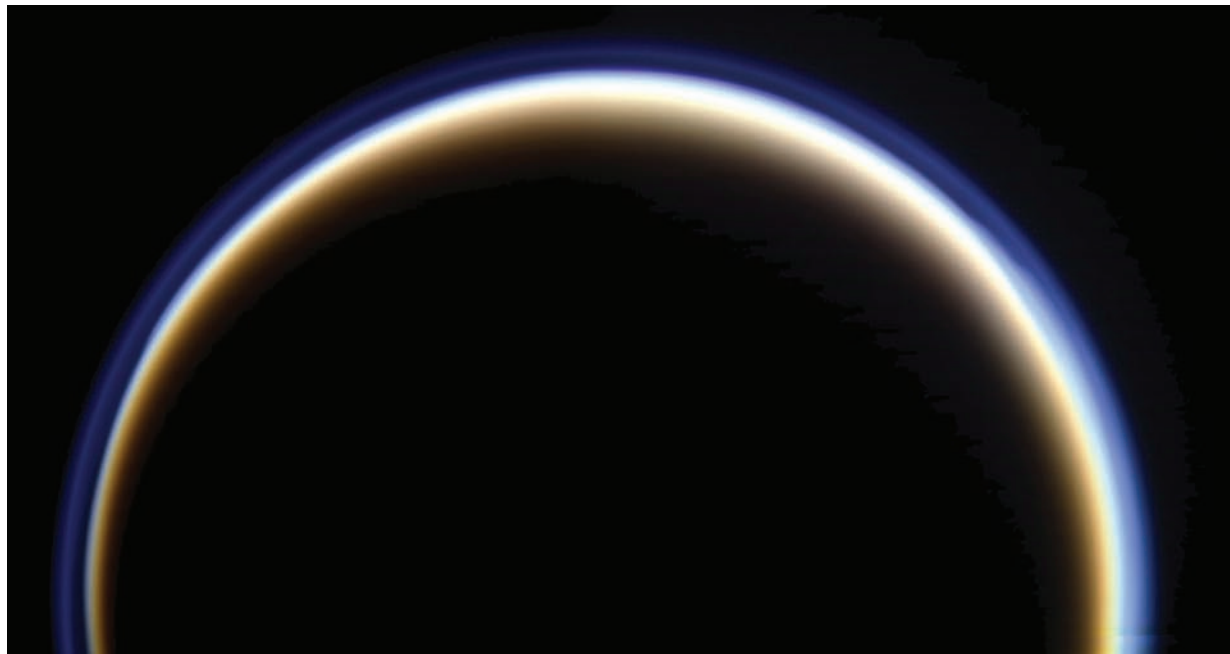


## Titánské počasí

**Titan** – největší Saturnův měsíc s průměrem 5 150 km. Byl objeven v roce 1655 Christiaanem Huygensem. Má hustou atmosféru, v níž převažuje dusík s trochou metanu. Tlak atmosféry na povrchu je 1,5 atm, teplota  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Měsíc Titan je větší než planeta Merkur. Často se spekuluje o možnosti primitivních forem života na Titanu. Dne 14. ledna 2005 na povrchu Titanu měkce přistála evropská sonda Huygens, která byla součástí mise Cassini. Sonda na ledovém povrchu objevila jezera z metanu a dalších uhlovodíků.

Atmosféra Titanu proti slunečnímu svitu. Snímek byl pořízen sondou Cassini ze vzdálenosti 145 000 km dne 12. října 2009. Zdroj: NASA.

Již od června roku 2004 provádí průzkum Saturnova světa prstenů a měsíců observatoř Cassini, která se tehdy dostala na oběžnou dráhu kolem planety. Od té doby se díky přesným a nadlouho dopředu naplánovaným průletovým manévřům, využívajícím přitažlivost jak samotného Saturnu, tak jeho měsíců, již mnohokrát dostala k mnoha měsícům na velmi malé vzdálenosti a provedla zde podrobná snímování povrchu včetně mnoha dalších měření. Saturnův měsíc Titan se do 19. dubna 2011 již stal klíčovým elementem dráhy sondy celkem 80×. Titan byl zvolen pro gravitační korekce dráhy, protože je mezi Saturnovými měsíci největší a nehmotnější. Podobně byly ale využity už i jiné velké měsíce, například Enceladus nebo Dione a další. Řídící tým sondy při průletech v různě volených vzdálenostech od velkého měsíce využívá jeho gravitace k dalšímu nasměrování sondy na dráze v Saturnově světě. Mnohé z těchto průletů byly velmi těsné a podařilo se při nich pořídit detailní snímky povrchu těles, kolem kterých sonda

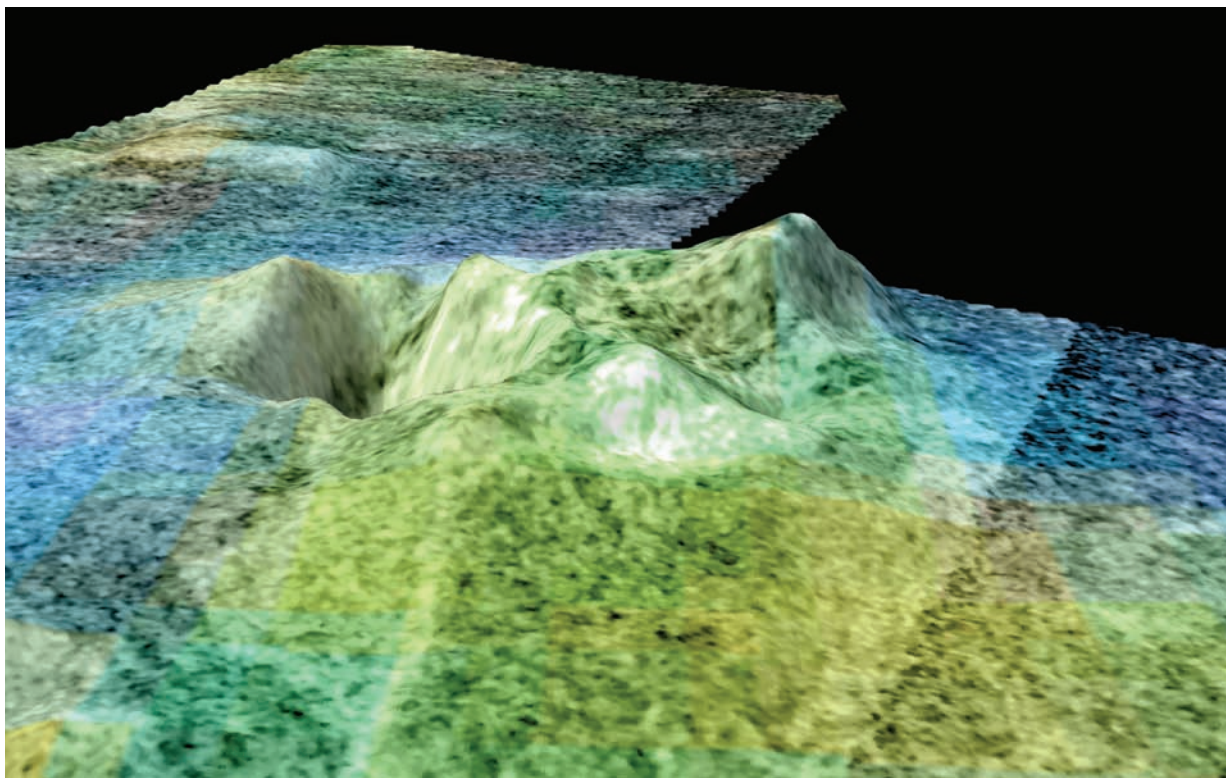




Cassini prolétala. Měsíc Titan má velmi hustou atmosféru, přes kterou viditelné světlo nepronikne. Snímkování zde proto probíhá v infračervené oblasti spektra a pomocí radaru. Jelikož již bylo průletů za dobu mise velké množství, je možné ze získaných pozorování vytvořit docela slušný obraz o počasí na tomto druhém největším měsíci sluneční soustavy (ještě do průletu Voyageru 1, dokud nebylo známo nic moc o jeho vysoké a husté atmosféře, byl Titan považován za největší měsíc slunečního systému). Atmosféra Titanu nabízí podobnost tohoto světa se Zemí před několika miliardami let, v dobách, než do ní začaly dávné protoorganismy pumpovat kyslík. Saturnův svět je sice od Slunce přibližně desetkrát dále než Země a rok zde trvá téměř třicetinasobek roku pozemského, snaha o nalézání vzájemných podobností však stále sytí planetární výzkum.

**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 ( $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Průměrná hustota planety  $0,7\text{ g/cm}^3$  je nejnižší z celé sluneční soustavy, dokonce nižší než hustota vody. Saturn patří k obřím planetám. Oběhne Slunce za 29,46 roku.

Ledový kryovulkán Sotra Facula z digitální 3D rekonstrukce radarových měření. Zdroj: NASA/ESA.

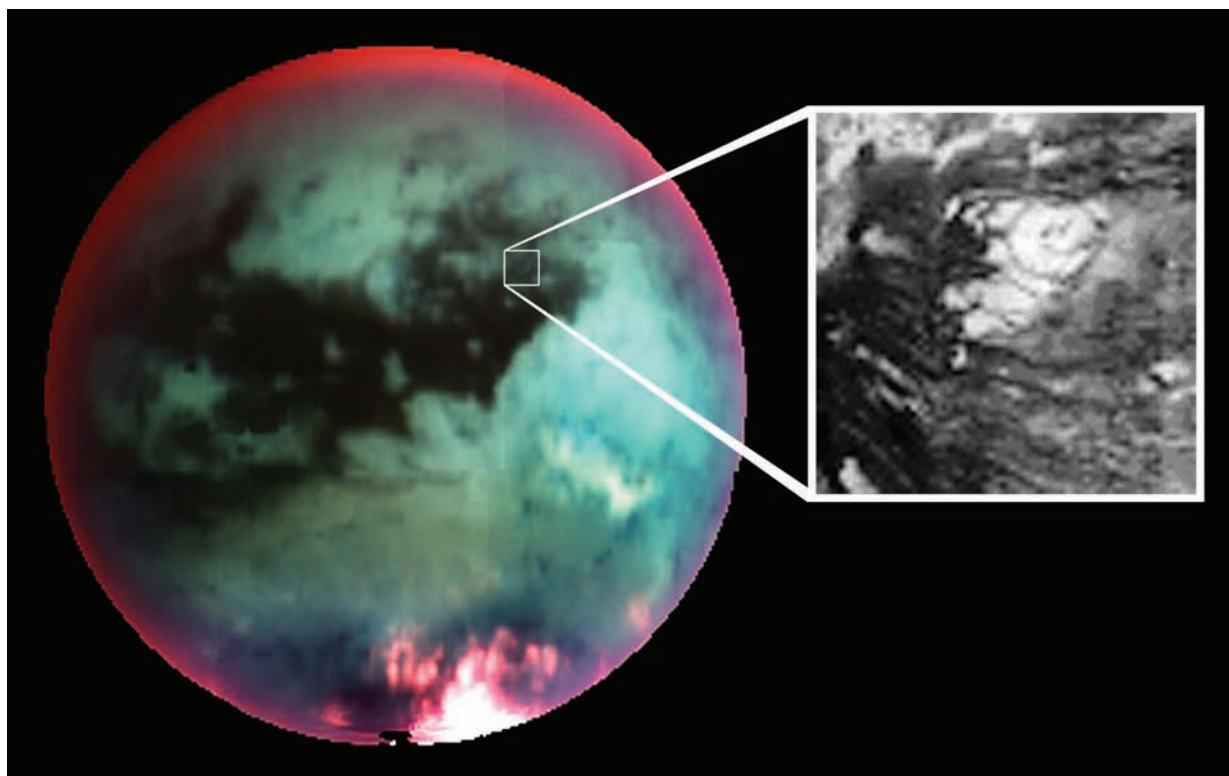


Saturn se otočí kolem vlastní osy za necelých 11 hodin. Rychlá rotace způsobuje vznik pásů. V atmosféře jsou pozorovány velké žluté či bílé skvrny. Atmosféra je tvořena oblaky čpavku, vodíkem a heliem. V nitru je snad malé jádro z křemičitanů obklopené kovovým vodíkem. Vítr v atmosféře dosahuje rychlosti až 1 800 km/h. Magnetické pole má dipólový charakter s osou téměř rovnoběžnou s rotační osou.

Mikrovlnný snímek údajného kryovulkánu z roku 2004 ze vzdálenosti 1 200 km. Sopka byla nazvána Tortula Facula. Atmosféře je na snímku přiřazena červená barva, povrch je zobrazen v modré a zelené. Zdroj: NASA.

## Základní charakteristiky Titanu

Titanova atmosféra je tvořena z devatenácti dvacetin dusíkem, pouze jedna dvacitina její hmotnosti je tvořena metanem a dále nepatrnými příměsemi jiných uhlikatých sloučenin. Jelikož Titan je mnohem menší a lehčí než Země, nedokáže svou atmosféru tak těsně přimknout přitažlivostí k povrchu. Hranice jeho plynného obalu díky tomu dosahuje až do výšek kolem 600 km nad kamenitý a zmrzlý povrch. V horních vrstvách atmosféry ve výškách mezi 200 až 250 km byly zjištěny procesy, při nichž se, za přispění slunečního ultrafialového záření a vysokoenergetických částic urychlených Saturnovým magnetickým polem, slučují metan a dusík na kombinace nejrůznějších organických sloučenin. Rozhraní mlžného oparu je ve výšce kolem 300 km. Vrstva plynu pod 200 km je pro viditelné světlo neprůhledná.

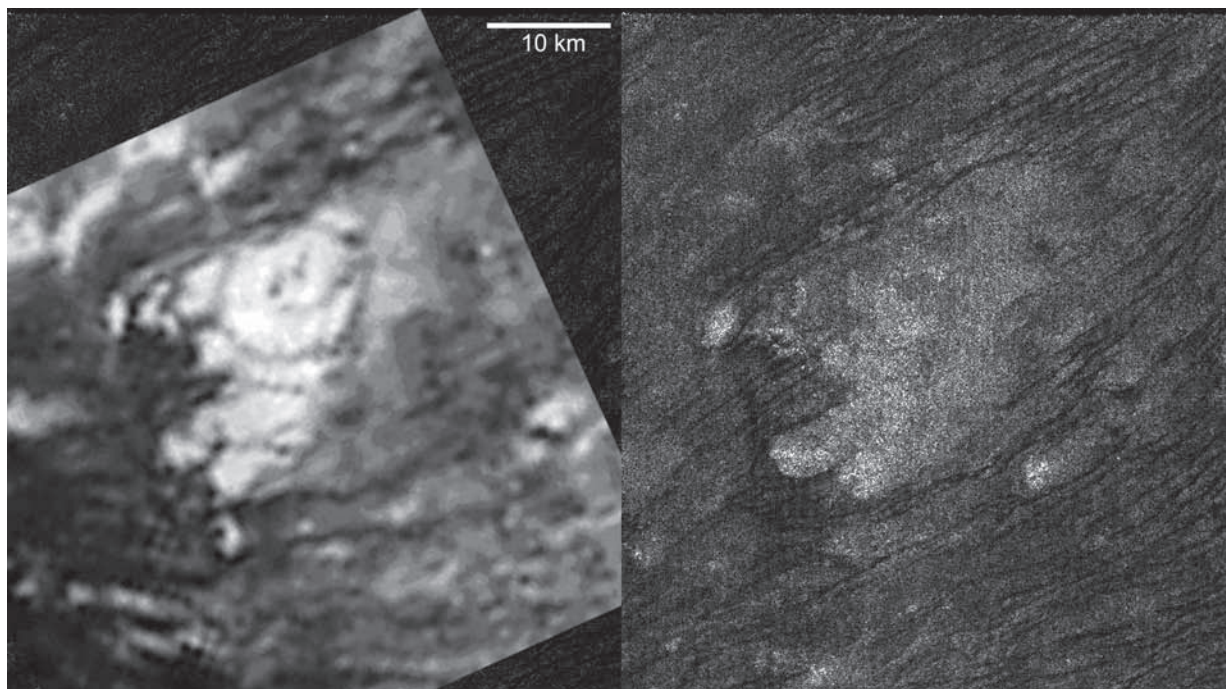


Na povrchu Titanu byly postupně nacházeny roztodivné útvary. Šlo zejména o krátery, vyvýšeniny, brázdy a rýhy, ale také o duny a řečiště. Na Zemi přicházely snímky dlouhých písečných nebo ledových návějí, které se táhnou v rovníkových oblastech desítky i stovky kilometrů. Sopky soptící ledovou tříšť či mrazivý plyn pod metanovým deštěm, to by mohla být docela lákavá scénérie povrchu, kde je obvyklá teplota kolem  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

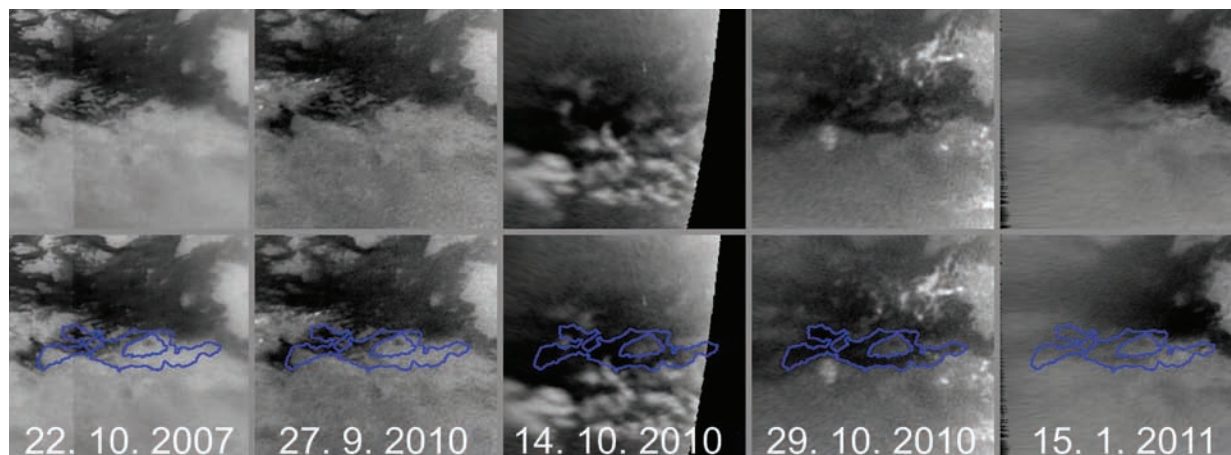
Povrchové útvary na Titanu se v názvoslovné nomenklatuře označují *facula* (z latinského slova *pochodeň*), což znamená jasné, světlé místo na povrchu a *macula* (z latinského slova *skvrna*), kteréžto označení přísluší místu tmavšímu než okolní terén. Velmi zajímavá je oblast *Sotra Facula* – podle planetárních geologů jde o typický příklad kryovulkanické činnosti. Jsou zde dva vrcholy čnící cca 1 km nad okolní terén a prohlubeň zejíci jícnem do hloubi 1,5 kilometru. V podobné oblasti *Tortula Facula* nebyl ale kryovulkanismus prokázán, sonda Cassini zde našla v roce 2008 jen naváté duny.

**Cassini** – meziplanetární sonda NASA, ESA a ASI (Italská kosmická agentura) určená k průzkumu Saturnu. Startovala 15. října 1997 z Cape Canaveral, k Saturnu dorazila 30. června 2004. Celková hmotnost Cassini při startu byla 5600 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 Giovanniho Domenica Cassiniho (1625–1712). Podle tohoto vědce je pojmenována i část Saturnových prstenců, tzv. Cassiniho dělení. V roce 2010 byla mise prodloužena až do roku 2017.

Oblast *Tortula Facula* s údajným kryovulkánem. Napravo (rozlišení 300 km/px, 2008) jsou zřetelné naváté duny. Srovnání obou snímků bylo publikováno 7. dubna 2011. Zdroj: NASA.







Přechod metanové oblačnosti (nejjasnější skvrny) nad rovníkovou oblastí Titanu. Oblaky prosvítá povrch v různých odstínech šedi. Patrné jsou zřetelné změny v oblasti ohraničené modrou linií (jižní okraj dunového pole Belet). Zdroj: NASA.

Jednou z možností, jak odhadovat příčiny a původ povrchových útvarů na různých tělesech, je pokusit se porovnat podobně vypadající struktury. Na povrchu Titanu byly nalezeny krátery, které by mohly být jak impaktního (po dopadu tělesa), tak vulkanického původu. Byly zde nalezeny písečné duny a řečiště. Podobné útvary je možné nalézt také na jiných tělesech planetárního systému. Impaktní krátery jsou známy na mnoha jiných měsících, ale také na Zemi nebo na Marsu, o kterých víme, že mají ještě také atmosféru. Atmosféra způsobuje erozi a navíc, pokud je nasycena něčím, co může kondenzovat a po malých kouscích padat z nebe, probíhá eroze povrchu intenzivněji. Písečné duny bez vlivu povětrnosti nevzniknou a řečištěm také musí něco protékat.

## Počasí

Zajímavé jsou snímky rovníkové oblasti pořízené v době bouře v rozmezí několika týdnů. Zachycují totiž přechod oblačnosti nad povrchem měsíce. Za nejjasnější skvrny je zodpovědná metanová oblačnost v troposféře. Oblaky prosvítá povrch v různých odstínech šedi. Pořízené fotografie ukazují zřetelné změny na jižním okraji dunového pole nazvaného *Belet*. Oblast *Belet* je tmavá, protože je geologicky odlišná od okolní krajiny. Titanovy rovníkové oblasti bývají nejčastěji suché. Tato část Titanova povrchu je sledována již roky, byly pořízeny mnohé snímky, na kterých je vidět, jak zde povrch obvykle vypadá. Ztmavnutí povrchu je přičítáno metanovému dešti, který zmáčel povrch, podob-

**Huygens** – část sondy Cassini. Jde o pouzdro, které se od ní odpoutalo, a poté dne 14. ledna 2005 měkce přistálo na povrchu Saturnova měsíce Titanu. Pouzdro bylo vyrobeno Evropskou kosmickou agenturou ESA, jeho hmotnost je 350 kg. Je pojmenováno podle objevitele Titanu, známého holandského fyzika Christiaana Huygense (1629-1695).

**Metan** – nejjednodušší uhlovodík,  $\text{CH}_4$ . Patří mezi tzv. alkyany. Při pokojové teplotě je to netoxický plyn bez barvy a zápachu, lehčí než vzduch. Hlavním zdrojem metanu na Zemi je přírodní surovina, které říkáme zemní plyn.



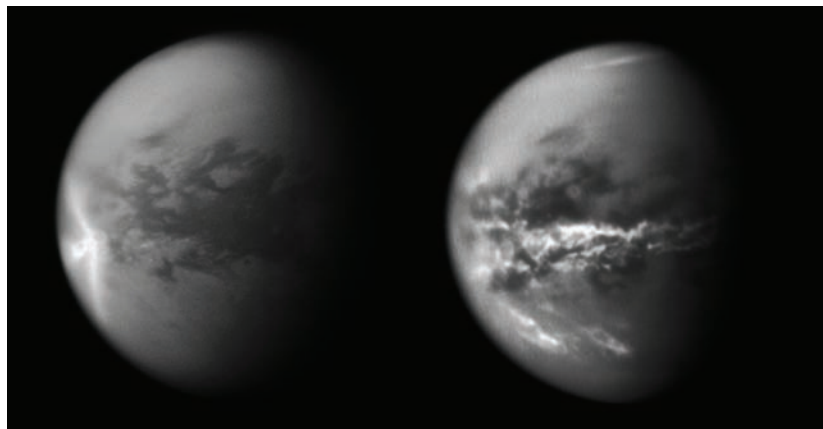
ně jako na Zemi, když prší voda. Mokrý terén je patrný ještě zhruba měsíc po bouři.

Prozatím není příliš jasné, jaké jsou hlavní mechanismy utvářející Titanův povrch. V současnosti se ale stále více prosazují známky vlivu počasí na tomto obrovském světě s mrazivou metanodusíkatou atmosférou. Představy o povrchových změnách díky kryovulkanizmu, které mohou probíhat rychleji než vlivy počasí, se prozatím příliš nepotvrdily. Spíše vše nasvědčuje

velkým přesunům atmosférických mas, které s sebou unášejí cokoliv, co na povrchu nedrží dostatečně pevně. A navíc je možné, že co neodnese vítr, odplaví metanové řeky.

Zajímavá analýza byla publikována na počátku roku 2013. Ultrafialové záření ze Slunce a energetické částice ze Saturnovy magnetosféry štěpí molekuly dusíku a metanu na ionty. Vzniklé reaktivní radikály spustí sérii chemických reakcí, při nichž se vážou organické molekuly a ionty do větších a větších uhlovodíků. Mnoho z nich bylo již detekováno v atmosféře Titanu, a to včetně polycyklických aromatických uhlovodíků. Některé uhlovodíky obsahují také atomy dusíku. Větší částice pak klesají hlouběji do atmosféry, shlukují se do větších celků a z těch se vytvářejí aerosoly, které jsou součástí „smogu“ pozorovaného ve spodních vrstvách atmosféry Titanu. Částice aerosolu do sebe narážejí, koagulují a nakonec se z nich stane „déšť“ různých uhlovodíků, který na Titanu plní kanály a jezera a tvoří uhlovodíkové duny. Určitě se ještě ve výzkumu Titanu máme na co těšit a mnohá další překvapení nás neminou.

■ Ivan Havlíček, AB 16/2011, aktualizováno



*Oblačnost na Titanu. Levý snímek je z 27. 9. 2010 (malá část z 9. 7. 2010). Pravý snímek byl pořízen 18. 10. 2010. Snímky spadají do období zhruba jednoho pozemského roku od Saturnovy rovnodennosti. Je možné, že podobné bouře provázejí změnu ročních období, kdy dochází ke změně orientace systému vůči Slunci. Zdroj: NASA.*

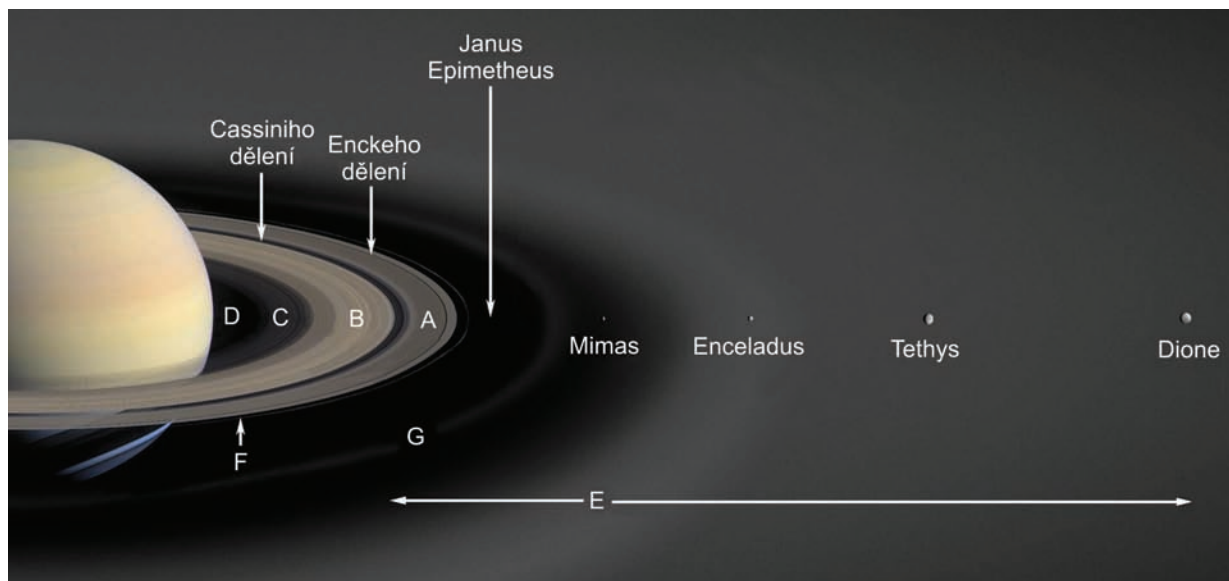
## Enceladus – další kandidát na nositele života

**Kryovulkanismus** – druh sopečné činnosti, při které dochází k výronům chladné hmoty. Narozdí od vulkanizmu při kryovulkanizmu sopky chrlí hmotu při velice nízkých teplotách.

**Viskózní relaxace** – uvolnění povrchového napětí tečením – povrch planety nebo měsíce, například rozbrázděný krátery či jinak šokově přetvořený, je následně přetvořen plastickým tečením povrchových vrstev.

Poloha měsíce Enceladus ve vnitřní části systému Saturnových prstenců. Zdroj: NASA.

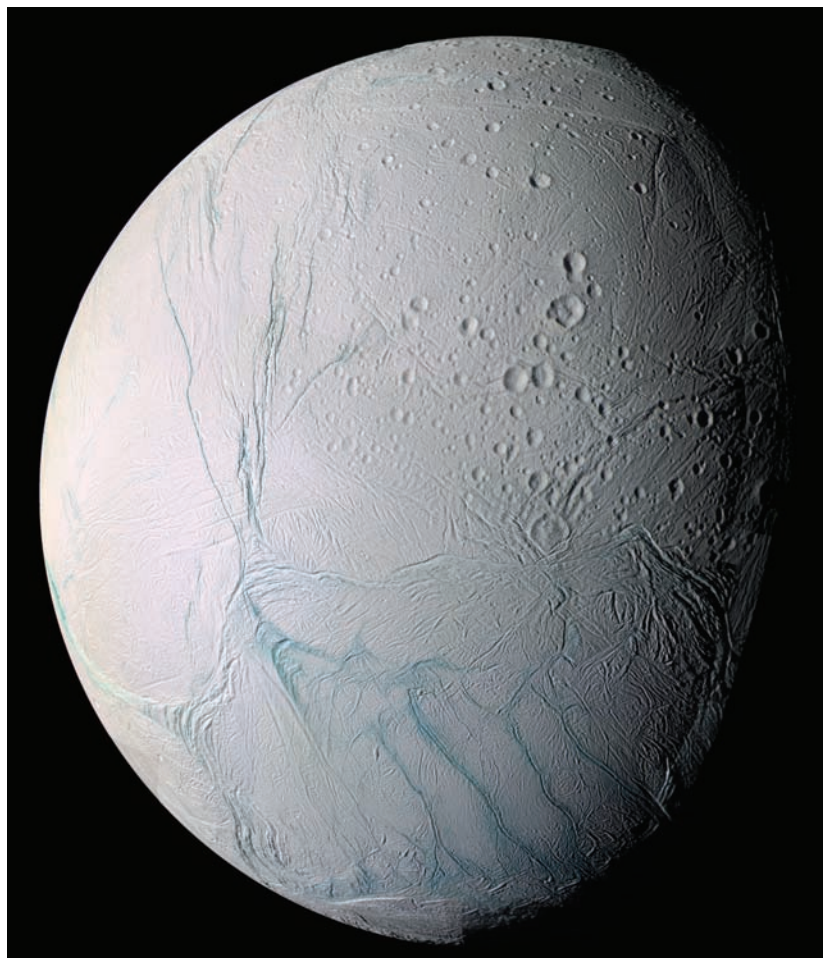
Enceladus je šestým největším měsícem planety Saturn. Planetu obíhá mezi měsíci Mimas a Tethys v nejhustší části neohrazeného širokého prstence Saturnu, který se nazývá prstenec E. Tento prstenec se rozkládá od oběžné dráhy Mimas až téměř po oběžnou dráhu měsíce Rhea. Enceladus dostal své jméno podle Titána Enkelada z řecké mytologie, má průměr pouhých 504 km a byl objeven roku 1789 Williamem Herschelem. První sondou prolétuvší v roce 1981 kolem Enceladu ve vzdálenosti 90 000 km byl Voyager 2, bohužel však o tomto tělese příliš informací nepřinesl. Základní charakteristikou Enceladu je jeho vysoká odrazivost, odráží téměř 100 % dopadajícího světla. Spektrální analýzou bylo zjištěno, že povrch je pokryt převážně vodním ledem. Na povrchu je možno nalézt místa jak pokrytá krátery, tak i hladké pláně bez kráterů. Prvotní otázkou, která vyvstala mezi planetárními geology, bylo tedy nalézt vysvětlení tohoto stavu. Kromě kráterových a hladkých oblastí jsou na Enceladu navíc pozorovány také oblasti



zvrásněné úzkými hřebeny a křivými zlomy. Dobře patrná je odlišnost obou polokoulí.

## Výzkum Enceladu

První studie se zabývaly vysvětlením rozsáhlých změn na povrchu, pozorovaných na snímcích z Voyageru 2. Oblasti bez kráterů se nabízely jako mladé s nedávnou geologickou aktivitou. Nebylo jasné, zda Enceladus byl schopen utvářet povrchovou morfologii jen díky svým vnitřním procesům, jako je například vulkanická činnost, nebo zda byl povrch formován nějakými vnějšími meziplanetárními vlivy. Planetární geologové prověřovali modely umožňující viskózní relaxaci, zlomové vrásnění a kryovulkanizmus. Bylo odhadnuto, že potřebné množství tepla pro tyto projevy by byla schopna vygenerovat rezonance mezi rotační periodou měsíce a jeho oběžnou periodou v poměru 1 : 3, a to za předpokladu, že Enceladus prochází nucenými libracemi o amplitudě několika stupňů. Enceladus ale obíhá kolem Saturnu stejně, jako obíhá Měsíc kolem Země, jeho rotace je vázaná a rezonanční poměr je 1 : 1. Pozdější měření prováděná sondou Cassini žádnou libraci požadovaného měřítka neodhalila, ačkoli probíhala po více než polovinu oběžné dráhy Enceladu a zaznamenala i nejbližší a nejvzdálenější bod dráhy od Saturnu. Současný pohybový stav Enceladu tedy nenabízí vlastní zdroj vnitřní energie, která by umožnila vytvarovat povrch do pozorovaných útvarů. Výše uvedené platí za předpokladu povrchu tvořeného převážně vodním ledem. Pokud by však součástí povrchu byl



*Na snímku Encelada je zřetelně ohraničená jižní polární oblast ve tvaru šestiúhelníku. Je lemovaná prasklinami a uvnitř jsou Tygří pruhy z tmavšího modrého materiálu. Zdroj: NASA.*

**Eutektická směs** – směs dvou nebo více látek, která utuhne při určité teplotě. Látky jsou mísitelné v tekutém stavu, nemísitelné ve stavu pevném. Zatuhlá směs sestává z více fází. Eutektická teplota je nejnižší teplota, při níž je eutektická směs v kapalném stavu. Může být nižší než jednotlivé teploty tání složek směsi.

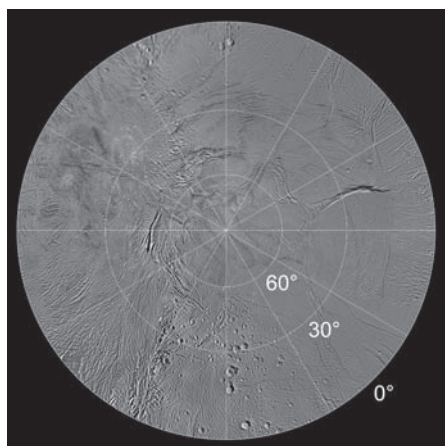
**Librace** – malé periodické výkyvy v rotaci měsíce nebo planety způsobené nejrůznějšími vlivy.

**Archea** – dříve též archebakterie, první ze tří domén (nadřší) organizmů. Jde o jednobuněčné organizmy, které obvykle vytvářejí buněčnou stěnu a nemají obsah buňky rozdělený membránami na oddělené prostory. Osídlují Zemi nejméně 3,5 miliardy let. Vyskytují se v rozmanitých prostředích včetně stanovišť s extrémní teplotou, pH nebo s vysokým obsahem soli. Přestože jsou uspořádaním buněk podobné bakteriím, z hlediska kódování genetické informace mají blíže k eukaryotům, organismům vytvářejícím buněčná jádra a jiné organely ohraničené membránou. Jednotlivý organizmus se označuje archeon.

ve větší míře i amoniak, který by spolu s vodním ledem tvořil eutektickou směs, byla by potřebná teplota tání povrchu mnohem nižší. Pak by bylo možné povrchovou morfologii vysvětlit jako projevy kryovulkanizmu. V úvahu byla brána také orbitální evoluce měsíce, která může být provázána intenzivním zahříváním nitra obíhajícího tělesa vyvolaným slapovými silami.

Sonda Cassini započala v červenci 2004 průzkum Saturnových měsíců a již v únoru 2005 se přiblížila k Enceladu. Prolétla ve vzdálenosti 1 179 km nad rovníkovou oblastí přivrácenou k Saturnu. Pomocí magnetometru bylo zjištěno propojení magnetického pole Saturnu s magnetosférou Enceladu, k čemuž zřejmě napomáhají těžké ionty uvolňované z povrchu Enceladu. Průlet potvrdil, že povrch je složen hlavně z vody, oxidu uhličitého, dusíku a metanu. Amoniak zde však nalezen nebyl. Podrobné snímky ukázaly jemnou síť zlomů v oblastech, které se dříve zdály být zcela hladké. Při dalším průletu 9. března 2005 ve vzdálenosti 497 km nad rovníkovou oblastí tentokrát odvrácené strany Enceladu od Saturnu, byl magnetickým měřením potvrzen zdroj vodních iontů, hromadících se v plazmosféře Enceladu, pravděpodobně pocházejících z jeho jižní části. Třetí průlet Cassini 14. července 2005 byl již cíleně zaměřen na průzkum jižní polární oblasti. Velmi těsný průlet proběhl ve vzdálenosti 175 km. Podrobné snímky (4 m/pixel) ukázaly oblast posetou ledovými balvany o velikosti rodinného domu vzniklými pravděpodobně tektonickou aktivitou, téměř bez kráterů.

Jižní polokoule Enceladu. Zdroj: NASA.



## Tygří pruhy

Nejzajímavější na jižní polární oblasti je skupina rovnoběžných dlouhých zlomů, které byly nazvány „Tygří pruhy“. Pruhy jsou asi 500 m hluboké, 2 km široké a 130 km dlouhé a jsou na obou stranách lemovány hřebeny vysokými až 100 m. Rozloženy jsou 35 km paralelně od sebe a mají orientaci 45° ze Saturnova směru. Celá tato oblast je ohraničena hradbou vinoucích se zlomů a hřebenů, převyšujících okolní terén o stovky metrů. Tato oblast ve tvaru přibližně šestiúhelníku se rozkládá na ploše zhruba 70 000 km<sup>2</sup>, což je zhruba 9 % povrchu. Rohy šestiúhelníku tvoří jakési prohlubně ve tvaru Y směřující k rovníku. Jsou to nejmladší geologické útvary této oblasti a z nich vybíhají severojižně orientované praskliny a průrvy.

Zdaleka nejvyšší teploty naměřené na povrchu Enceladu (114 až 157 K) vykazuje jižní polární oblast. Povrch měsíce odtud vyzařuje do



prostoru  $60 \text{ W/m}^2$ . Pro srovnání: v geotermální oblasti v Yellowstone je to pouhých  $2,5 \text{ W/m}^2$ . Vyzařování určitě nějak souvisí s Tygřími pruhy. Byla jasně prokázána přítomnost oblaků vodních par a částic ledu tryskajících z této oblasti, ale opět nebyl nalezen žádný amoniak. Jeden z průletů odhalil výtrysky vodních par a jemných ledových částic, které nad povrchem vytvářejí zmíněná oblaka. Většina takto vyvržených částic dopadá zpět na povrch. Dle prozatím vytvořených modelů přibližně 1 % částic unikne a zásobuje materiálem prstence E.

Tygří pruhy lemuje tmavší materiál, který má o 10 % nižší albedo než zbytek povrchu. Kontrast mezi odrazivostí Tygřích pruhů a pláňmi mezi nimi je největší, jaký lze na povrchu pozorovat, v odrazivosti jde o téměř 20 %. Tyto vlastnosti zřejmě přímo souvisí s vyvrhováním a následným spadem částic zpět na povrch. Zbytek Enceladu je převážně pokryt jemně zrnitým regolitem, který vznikl rozrušováním vysokorychlostními částicemi pocházejícími z prstence E, nebo redistribucí (naprašováním) částic. Jižní oblast regolitem pokryta není, povrch je zde tedy mladý, velmi pravděpodobně v nedávné době prošel termální přeměnou.

Na Enceladu se nacházejí oblasti s různou hustotou kráterů. To je nejspíše způsobeno přetrvávající geologickou aktivitou. Nejnižší hustota kráterů byla naměřena kolem Tygřích pruhů. Lze tam najít pouze několik kráterů, ne větších než 1 km. Dle charakteru a počtu kráterů na celém povrchu bylo odhadnuto, že měsíc prošel spíše několika jednotlivými obdobími geologické aktivity, oddělenými mnohem delšími obdobími klidu, nežli jedním spojitým dějem. Absolutní stáří terénu se odhaduje na přibližně 4 miliardy roků, avšak jižní oblast je určitě mladší než 500 000 roků.

## Ohřev tělesa

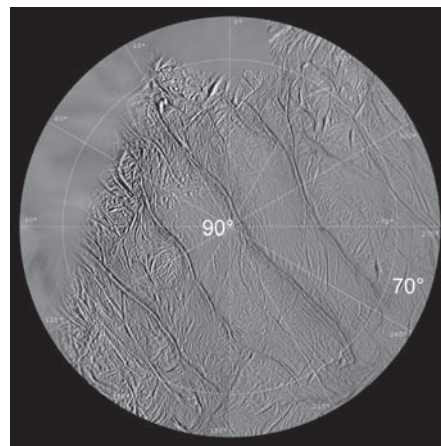
Nejnovější pozorování a měření umožnila mnohem lépe odhadnout hustotu tělesa, a tím i radiogenní ohřev. Probíhá v mnohem větším rozsahu, než bylo předpokládáno. Vnitřek Enceladu je teplý a pravděpodobně stále geologicky aktivní. Standardní sféricky symetrické termální modely se na nitro Enceladu aplikovat nedají, protože nedokáží vysvětlit anomální teplotu jižní polární oblasti. Podpovrchová struktura Enceladu je pravděpodobně velmi nerovnoměrná.

Tvar dráhy měsíce by mohl být klíčem k otázce ohřevu, pokud by jeho zdrojem byly slapové síly. Jenže podle matematických modelů

**Bakterie** – druhá ze tří domén (nadřší) organizmů. Jde o jednobuněčné organizmy, které obvykle vytvářejí buněčnou stěnu, až na výjimky nemají obsah buňky rozdělený membránami na oddělené prostory. Typické tvary bakterií jsou kulové a tyčinkovité, mohou mít však i jiné tvary, například spirální. Velikost bakterií se obvykle pohybuje od zlomků mikrometrů po jednotky mikrometrů. Rozmnožují se nepohlavně.

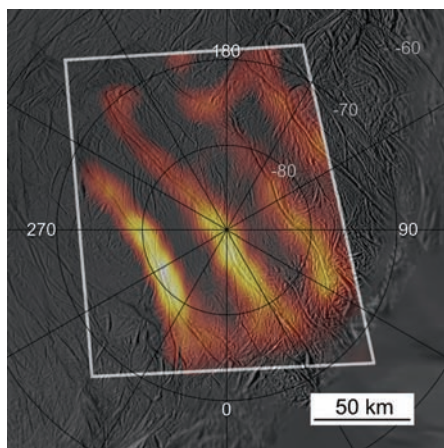
**Eukaryota** – poslední ze tří domén (nadřší) organizmů. Jde o jednobuněčné i vícebuněčné organizmy, které obvykle mají obsah buňky rozdělený membránami na oddělené prostory a genetickou informaci umístěnou v podobě lineárních řetězců DNA ve formovaném jádře. Rozmnožují se pohlavně i nepohlavně.

Oblast kolem jižního pólu s Tygřími pruhy. Zdroj: NASA.



**Metanogen** – jednoduchý organizmus, který produkuje (jako důsledek získávání energie) metan. **DNA** – Deoxyribonucleic acid, deoxyribonukleová kyselina. Organický polymer tvořený cukrem, heterocyklickou bází a můstkem z kyseliny fosforečné. Cukremou složkou je 2-deoxyribóza. Báze jsou tvořeny především čtveřicí adenin, thymín, guanin a cytosin; vzájemně vytvářejí páry adeninu s thyminem a cytosinu s guaninem. DNA díky tomuto párování vytváří dvoušroubovici z navzájem komplementárních opačně orientovaných řetězců, pracovního a paměťového. Její hlavní funkcí je uchovávání genetické informace.

Zvýšená teplota Tygřích pruhů, jak ji zaznamenal infračervený spektrometr CIRS na palubě sondy Cassini. Zdroj: NASA.



se oběžná dráha Enceladu nemohla v minulosti lišit o více než 5 % od současné dráhy, což slapový ohřev vylučuje. Ohřev by mohl být způsoben také kýváním (librací) měsíce. Pátření po libraci se uskutečnilo při 1 375 měřeních 190 kontrolních bodů na 129 snímcích, ale bez úspěchu. Dostatečný pro tání povrchových materiálů není ani ohřev způsobený rezonancí s měsícem Dione v poměru 2 : 1. Často se uvažuje o přítomnosti amoniaku, který by snížil teplotu tání, i když dosud detekován nebyl. Další možností je ohřev pomocí sekundární rezonance mezi vychylováním osy rotace (librací) a samotnou rotací tělesa, který mohl probíhat alespoň v minulosti. Pokud byl někdy Enceladus v sekundární rezonanci, je potřeba najít způsob, jak se mohl do tohoto stavu dostat a proč v něm není i v současnosti. Jednou z možností je dopad většího tělesa, který způsobil vychýlení Enceladu, jenž se tímto impulzem dostal do potřebné rezonance.

## Gejzíry

Snímky sondy Cassini odhalily mnoho oddělených výtrysků vycházejících z povrchu z různých směrů, dosahujících výšky až 435 km. Zdroj výtrysků odpovídá oblasti Tygřích pruhů. Měření jasu a tedy hustoty sloupce částic odtud tryskajících bylo provedeno ze snímků pořízených v listopadu 2009 nad jižní polární oblastí. Cílem bylo určit hustotu částic v závislosti na výšce a také množství unikajících částic. Buď je zdrojem gejzírů sublimace ledu, nebo by se pod povrchem mohl nacházet geotermální rezervoár vody. Výtrysky obsahují velké množství ledových částic. Poměr plynu a ledu v gejzírech je v rozporu s první teorií. Naopak podporuje druhou možnost. Vroucí tekutina může produkovat oblak plynu a ledu, pokud jsou kapičky vody unášeny parami z gejzírů a následnou expanzí zmrznou v ledové částice. To by znamenalo, že na Enceladu existuje pod ledovou krustou voda v tekutém stavu. V gejzírech byly detekovány vodní páry, dusík a jednoduché organické sloučeniny včetně metanu.

Do roku 2014 zvládla sonda Cassini 19 průletů kolem Enceladu. Podle zprávy z dubna 2014 je existence podpovrchového jezera velmi pravděpodobná. Odborníci z NASA tak usuzují na základě detailních gravitačních měření. Jezero by mělo být hluboké 10 kilometrů a nacházet se pod 30 kilometrů tlustou vrstvou ledu. Stále ovšem není jasný zdroj energie, který jezero ohřívá a způsobuje výtrysky. Plánuje se průlet sondy skrze výtrysky a jejich výzkum přímo na místě.

## Život na Enceladu

Teorie, které uvažují o životě na Enceladu, počítají s podpovrchovým jezerem vody v kapalném stavu, nacházejícím se v jižní polární oblasti měsíce. Klíčovou otázkou z astrobiologického hlediska je, zdali by tento vodní rezervoár již mohl existovat dostatečně dlouhou dobu na to, aby se v něm vyvinul život. Podle povrchových změn v této oblasti však lze jeho výskyt usuzovat i na několik stovek milionů let.

Pokud výtrysky pocházejí z podpovrchového jezera, pak je také z hlediska možnosti života důležité, zda je voda dostatečně bohatá na látky, u kterých předpokládáme, že jsou nutné k fungování ekosystému. Zajímají nás hlavně amoniak a nejrůznější soli. Prozatím v gejzírech nebyla detekována žádná sůl, avšak voda v gejzírech může pocházet z horních vrstev podpovrchového jezera, které jsou v podstatě bez solí. Spodní vrstvy mohou být naopak na soli bohaté. Ani amoniak zatím zaznamenán nebyl, ale několik geofyzikálních argumentů jeho přítomnost naznačuje – například zaznamenaná přítomnost dusíku, který by mohl pocházet z amoniaku. Je možné, že amoniak je v jezeře přítomen, avšak než se dostane výtrysky na povrch, je rozkládán na molekuly vodíku a dusíku. Také bychom měli počítat s tím, že naopak vysoká koncentrace amoniaku může mít toxický efekt, který může být pro život nepříznivý.

## Architektura organizmů na Zemi

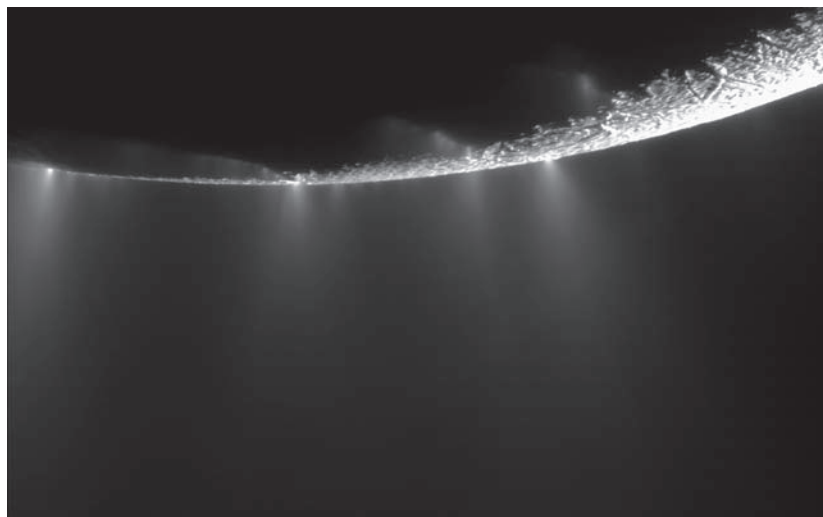
Život, jak jej známe na Zemi, má přes svou rozmanitost a složitost společné základní schéma: nositelem informace, nezbytné pro udržení jedince a jeho rozmnožování, jsou nukleové kyseliny. Udržení struktury a zajištění většiny funkcí organismu je doménou bílkovin vytvořených z aminokyselin. Vymezení organismu vůči okolí, díky čemuž je možné udržovat relativně stálé vnitřní prostředí, je zajištěno plazmatickými membránami. Tyto základní složky života se navzájem

**Bílkoviny** – proteiny, vysokomolekulární biopolymery aminokyselin s molekulovou hmotností tisíc až milion. Tvoří strukturální i funkční podstatu živé hmoty.

**Serpentinizace** – přeměna některých tmavých minerálů, například olivínu nebo pyroxenu, na haec (serpentin).

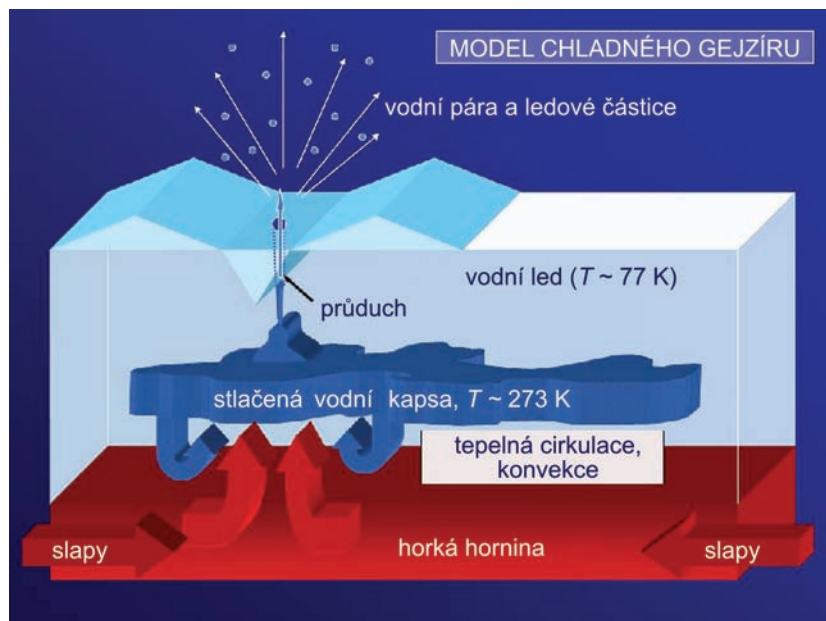
**Sulfát** – síran, sůl kyseliny sírové; v biochemii též anion kyseliny sírové  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Gejzíry z jižní polární oblasti. Zdroj: NASA.



**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. Obdobná slapová vazba existuje mezi Zemí a Sluncem a je pravděpodobně hlavní příčinou současného vzdalování Země od Slunce. Slapovými silami také působí planety na své měsíce. Ve větších měřítkách působí slapové síly například při srážce (prolínání) dvou galaxií.

Model výtrysků na Enceladu. Zdroj: NASA Ames Research Center



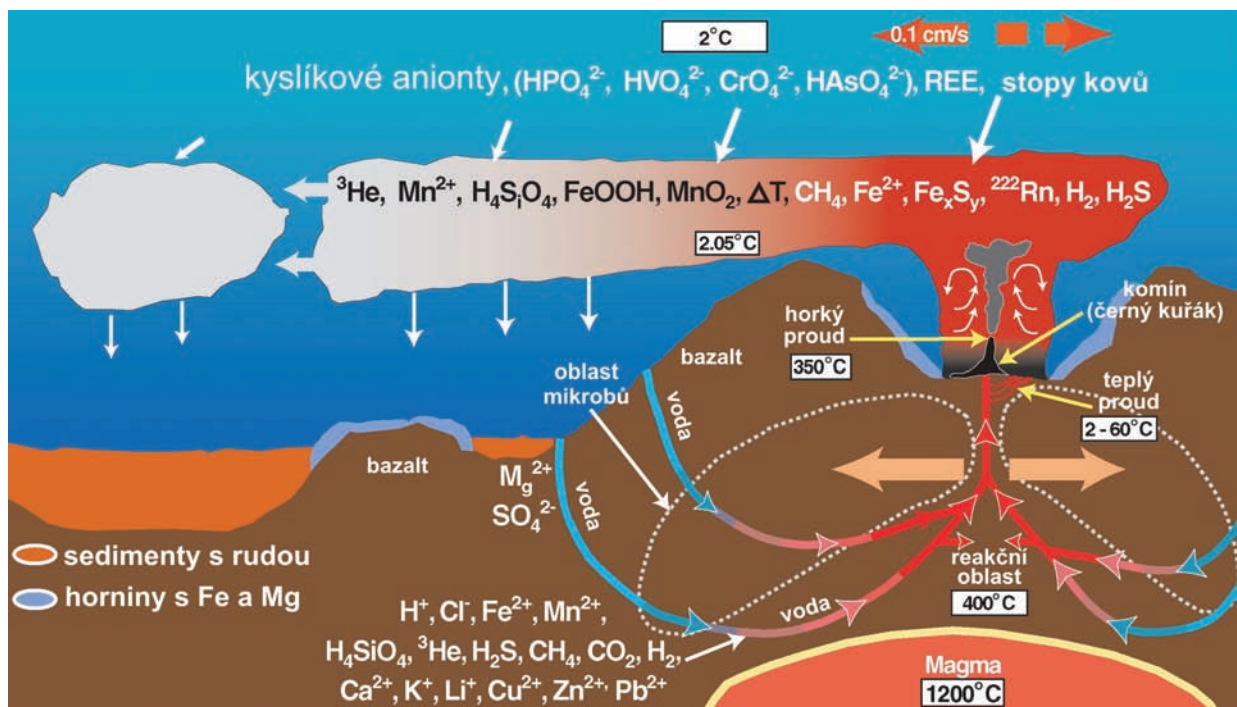
doplňují – bílkoviny se strukturně i funkčně podílejí na ukládání, přenosu, zdvojování a opravách informace v nukleových kyselinách, nukleové kyseliny samy vytvářejí funkční struktury, součástí plazmatických membrán jsou bílkoviny, které umožňují asymetrický transport hmoty a informace do vnějšího prostředí a do buňky.

## Život hluboko pod zemí

Ve druhé polovině dvacátého století se ukázalo, že se život může vyskytovat i ve zcela atypických místech. Na Zemi jsou známy tři mikrobiální ekosystémy, které nepotřebují sluneční svit, kyslík, nebo organické látky produkované na povrchu. Dva z těchto ekosystémů byly nalezeny v letech 1995 a 2002 hluboko ve vulkanických skalách na severozápadě USA. Získávání energie je zde založeno na archebakteriích, které spotřebovávají vodík (vznikající *serpentinizací* olivínů v hornině) a produkují metan (proto se jim říká *metanogeny*). Třetí ekosystém byl nalezen v roce 2006 hluboko pod zemí v Jižní Africe a je založen na bakteriích redukujících sulfát, které konzumují vodík a síranové anionty, oboje produkované radioaktivním rozpadem. Eko-

systemy spotřebovávající vodík by mohly korespondovat s prostředím a látkami nalezenými na Enceladu. Nalezený metan by právě mohl být produktem metanogenů. Ty jsou schopny růst i při relativně nízkých teplotách a byly nalezeny i v permafrostech při teplotě  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při této teplotě je obsah tekuté vody v půdě kolem 1 až 2 %, což je pro metabolickou aktivitu metanogenů dostačující množství. Jejich život je založen na redukčních reakcích, které však vyžadují zpětnou přeměnu látek pomocí oxidace, jinak by metanogeny brzy vyčerpaly palivo a zahynuly by. Látky potřebné k oxidaci (oxidanty) vznikají na povrchu, ale k ekosystémům trvale pod ledem se nemají jak dostat.





Není známo, zda by tyto kolonie mohly fungovat trvale pod ledem, bez přístupu oxidantů. Možnost, jak udržet systém v chodu, je, že by pod ledem mohla existovat místa s teplotou kolem 500 °C. Taková teplota dokáže destabilizovat molekuly metanu a vody a dojde k oxidaci. Délka fungování takového společenství je závislá na tepelném zdroji.

### Život hluboko pod hladinou

V hloubce několika kilometrů existují na Zemi uzavřené ekosystémy, které nepotřebují sluneční světlo a využívají živiny a energii dodávané vulkanickou činností. Tato společenstva jsou až překvapivě bohatá. Základnu potravního řetězce tvoří archea a bakterie, které dokáží zužitkovat teplo, metan, siřné sloučeniny, či dokonce slabé tepelné záření horké vody a rozžhavených hornin jako zdroj energie. Na ně navazují vyšší organizmy, kroužkovci, červi a škeble. Vyskytují se zde i garnáti, krevety, krabi a ryby.

Biochemický cyklus černého kuřáku (podmořské sopky na Zemi). Zdroj: Wikipedia.

**Regolit** – vrstva nepevněného materiálu, který pokrývá celistvé podloží. Zpravidla jde o drť vzniklou dopadem drobných těles nebo jinou erozivní činností. Vrstvu regolitu najdeme na Měsíci, v některých oblastech na Zemi, na kometách, měsících i jiných tělesech sluneční soustavy. Výpravy mise Apollo dovezly měsíční regolit na Zemi v 70. letech dvacátého století.



Gejzír na Enceladu vyfotografovaný při těsném přiblížení sondy Cassini v roce 2005. Zdroj: NASA.

Příprava sondy Cassini. Zdroj: NASA.



## Možnosti vzniku života na Enceladu

Naše hledání života na jiných světech se většinou omezuje na znalosti o ekosystémech, které známe z naší vlastní planety. Na Marsu, Europě nebo Enceladu hledáme tedy to, co alespoň přibližně známe ze Země. Z hlediska původu života na Zemi existují dva základní směry teorií. Jeden bere v úvahu zavlčení života na Zemi z jiného vesmírného tělesa (teorie panspermie) a druhý počítá se vznikem života přímo na Zemi, samostatně a nezávisle.

Teorie o spontánním vzniku života na Zemi dávají dobré předpoklady k tomu, že by se život mohl spontánně vyvinout i na jiném tělese, tedy proč ne na Enceladu. Prozatím každý organismus, který známe, potřebuje ke svému vývinu a reprodukci vodu v tekutém stavu. Ta by na Enceladu mohla existovat.

Vezměme tedy v úvahu teorie spontánního vzniku života. První se zabývá vznikem života z prvotní „organické polévky“, tedy z různých organických látek, koncentrovaných ve vodě. Na Zemi mohly být tyto organické látky dopraveny spolu s dopadajícími kometami nebo s meziplanetárním prachem. Až čtvrtinu hmotnosti komet mohou tvořit organické látky. Led na Enceladu může mít podobné složení, jako je tomu u komet, a tedy může být na organické látky dostatečně bohatý pro spontánní vznik života.

Druhá teorie vychází ze vzniku života pouze na chemickém základě bez přístupu slunečního světla. Tato teorie se také na Enceladus hodí velmi dobře, předpokládáme-li tepelný zdroj pod jezerem tekuté vody.

Z fosilního záznamu na Zemi můžeme pouze odhadnout, jak dlouho životu trvalo se prosadit. Dle simulací se vhodné podmínky pro život na Zemi objevily před necelými 4 miliardami let. Radiokarbovovou metodou jsme schopni určit, že před 3,8 miliardami let zde již byly organické látky, avšak buněčný život jsme schopni prokázat jen 3,4 miliardy let nazpátek. Životu to tedy trvalo zřejmě 0,4 miliardy let, než vznikl. Jedná se o horní hranici. Ke vzniku života mohlo dojít i daleko rychleji.

Na základě dvou hlavních větví teorií můžeme odhadnout dobu potřebnou ke vzniku života na Enceladu. Teorie panspermie říká, že život přicestoval z okolí a mohl se rovnou dále rozvíjet. Nepotřeboval tedy čas ke svému vzniku. Teorie spontánního vzniku života uvádí čas odvozený z fosilního záznamu na Zemi, nejdéle 0,4 miliardy let. Dolní mez potřebnou pro vývoj života zatím můžeme pouze odhadovat,

neboť neznáme jednotlivé kroky vývoje od proteinu k buňce – kroky nutné k přeměně neživé látky v živou.

O délce trvání příznivých podmínek ke vzniku života na Enceladu zatím nemáme důkazy. Nevíme tedy, jak dlouho již případné podpovrchové jezero na Enceladu existuje.

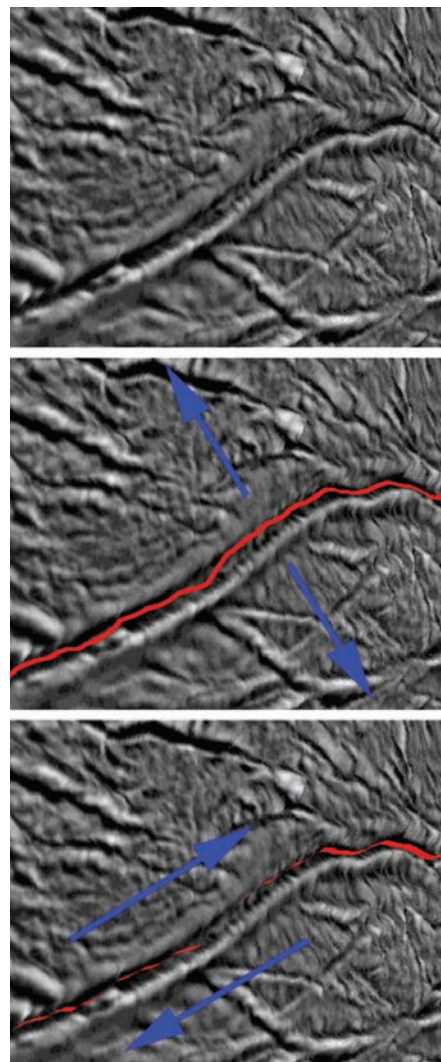
Ekosystém potřebuje ke své existenci prostředí tekuté vody, výživné látky a zdroj energie. Na Zemi je dominantním zdrojem Slunce. Dokonce i organizmy žijící za trvalé nepřítomnosti slunečního světla potřebují ke svému životu látky, vznikající na povrchu pomocí fotosyntézy, tedy opět za přítomnosti slunečního světla. I ekosystémy hlubokomořských geotermálních komínů využívají k životu reakci sulfidu s kyslíkem obsaženým ve vodě, který je také výsledkem fotosyntézy.

## Závěr

Na Enceladu přichází v úvahu pouze ekosystémy na slunečním světle naprosto nezávislé. Na Zemi byly zatím nalezeny pouze tři takto fungující ekosystémy. Z informací, které dosud máme o Enceladu a podmínkách, jež na něm panují, se zdá, že by tento měsíc nositelem života být mohl.

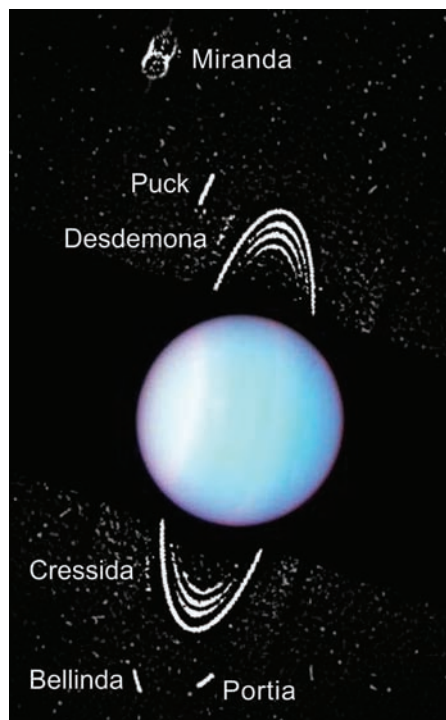
Enceladus nepochybně patří mezi žhavé kandidáty na nositele života, ale jeho potvrzení či vyvrácení bude ještě stát nemalé úsilí. Enceladus mění naše názory na obyvatelnou zónu, a to jak v naší sluneční soustavě, tak i u jiných hvězd. V každém případě není nalezení života mimo Zemi nemožné. Pokud se tak jednou stane, půjde o jeden z nejvýznamnějších objevů, který způsobí velký rozruch mezi vědci i laiky.

- Jaroslava Losová, David Mañas, Vítězslav Kříha, 14. 5. 2010, AB 16/2010, aktualizováno



Znázornění gravitačních sil, kterými působí planeta Saturn na svůj měsíc Enceladus v jižní polární oblasti, kde jsou známé Tygří pruhy. Zdroj: NASA/JPL-Caltech/SSI.

## Miranda – nedokončený příběh podivuhodného měsíce



Uran s některými ze svých měsíců. Zdroj: Planetárium v Ravenně.

Těžko říci, jak si Gerard Kuiper, ředitel texaské McDonalldovy observatoře, představoval nový objekt, který objevil na snímcích pořízených dvoumetrovým Struveho dalekohledem, jenž v té době patřil mezi největší dalekohledy světa. Psal se 16. únor 1948 a Miranda se stala v pořadí pátým známým měsícem planety Uran. Během následujících desetiletí se ukázalo, že Miranda se v některých směrech odlišuje od ostatních měsíců velkých planet. Při pozorování ze Země například významně narůstala jasnost Mirandy v období kolem její opozice se Sluncem. Tento tzv. opoziční jev je způsoben tím, že se při opozici díváme na povrch, který není pokryt stíny – vidíme tedy i do osvětlených „jamek“, které mohly vzniknout například dopady meteoritů a mikrometeoritů. Z velikosti tohoto jevu astronomové usoudili, že povrch Mirandy musí být velmi porézní nebo členitý. Zajímavé bylo také zjištění, že rovina oběhu tohoto měsíce je vůči rovině rovníku Uranu skloněna o více než  $4^\circ$ , což není u větších měsíců v blízkosti obřích planet obvyklé. Než však mohli astronomové poprvé spatřit povrch Mirandy, muselo uplynout ještě několik desítek let. V lednu 1986 prolétala okolo Uranu sonda Voyager 2 a na jejích snímcích spatřili vědci měsíc o průměru přibližně 480 km, který vypadal, jako kdyby byl poskládan z různých úlomků, které se zcela nespojily. To bylo velkým překvapením, protože u tělesa, které je asi sedmkrát menší než Měsíc, nepředpokládali známky silné geologické aktivity.

### Voyager u Uranu

Je třeba poznamenat, že cesta sondy k Uranu se vlastně nemusela kvůli rozpočtovým škrtnům vůbec uskutečnit. Uran se prostě nezdál tak „zajímavý“ jako Jupiter či Saturn a o jeho měsících se soudilo, že budou jen dalšími klony prototypů ledových měsíců. Teprve poté, co Voyager 1 prozkoumal zblízka systém Saturnu, dostal Voyager 2 zelenou na cestu k nejvzdálenějším planetám. Navíc nebylo jisté, v jaké kondici se sonda probudí ze svého spánku, do kterého byla uvedena v roce 1981,



aby ušetřila peníze Reaganově administrativě. Ani podrobný průzkum Mirandy nebyl vlastně dopředu plánován – došlo k němu v podstatě náhodou. Aby sonda získala potřebnou rychlost na cestu k Neptunu, musela proletět v těsné blízkosti Uranu – planetu tak minula ve vzdálenosti 81 500 km nad svrchními vrstvami atmosféry. Vzhledem k tomu, že celý systém Uranu je vůči ekliptice, ve které se pohybovala sonda, skloněn o téměř 90 stupňů, byla Miranda jediným měsícem, který sonda zkoumala z bezprostřední blízkosti. Voyager 2 navíc prolétal v takové blízkosti Mirandy (sonda se přiblížila až na vzdálenost 30 160 km), že dlouhé expoziční časy, nutné kvůli velké vzdálenosti od Slunce, by způsobily „rozmazání“ snímku (osvětlení je zde srovnatelné s tím, jaké byste měli v pokoji osvětleném dvacetiwattovou žárovkou). Celá sonda se proto musela v průběhu expozice natáčet, aby vyrovnala svůj vlastní pohyb. Výsledkem je skutečnost, že snímky Mirandy mají z celé mise Voyageru 2 nejlepší rozlišení. Zatímco většina ledových satelitů byla pořízena s rozlišením 2 až 3 km, detaily na povrchu Mirandy byly snímány s rozlišením 560 až 740 metrů.

### Podivný povrch Mirandy

Hlavním rysem na povrchu Mirandy jsou tři velké oválné oblasti, označované jako *korony*. Ve sluneční soustavě jsou dosti vzácné, kromě Mirandy najdeme podobné útvary například ještě na Venuši, kde však pravděpodobně vznikly vulkanickými procesy. Jedná se o systémy brázd a údolí, které jsou navzájem odděleny oblastmi hustě posetými krátery – z toho usuzujeme, že korony jsou výrazně mladší než zbytek povrchu. Kromě těchto pozoruhodných útvarů nacházíme na povrchu Mirandy i hluboké systémy kaňonů a útesů, které dosahují úctyhodné výšky až 20 km – pokud bychom z okraje takového kaňonu hodili dolů kámen, pak by díky malé gravitaci dopadl na jeho dno až po deseti minutách!

První teorie o původu zvláštního terénu předpokládaly rozbití

**Uran** – jedna ze čtyř obřích planet, sedmá planeta sluneční soustavy má charakteristický modrozelený nádech. Průměrná hvězdná velikost 5,5 m je na hranici viditelnosti lidským okem. Planeta má soustavu prstenců a kolem krouží rozsáhlý systém měsíců podobně jako u ostatních obřích planet. Kromě vodíku a helia obsahuje atmosféra také metan, způsobující namodralé zbarvení. Ve středu Uranu je jádro z hliníku a železa. Rotační osa Uranu je vzhledem k rovině oběhu stočená na bok (98°), patrně díky střetu s jinou velkou planetou při vzniku sluneční soustavy. Rotace je diferenciální s periodou 16 až 17 hodin. Rychlost větrů v atmosféře dosahuje až 600 km/h. Magnetická osa svírá s osou rotace úhel 59° a je značně excentrická (prochází 8 000 km od středu planety). Magnetosféra je výrazná, intenzita pole je srovnatelná s intenzitou pole Země. Vlastní rotace planety způsobuje zkroutění ohonu do tvaru vyvrtky.

Sonda Voyager. V horní části dominuje radioanténa zajišťující přenos dat na Zemi, v levé horní části je patrné rameno magnetometru. Zdroj: NASA.

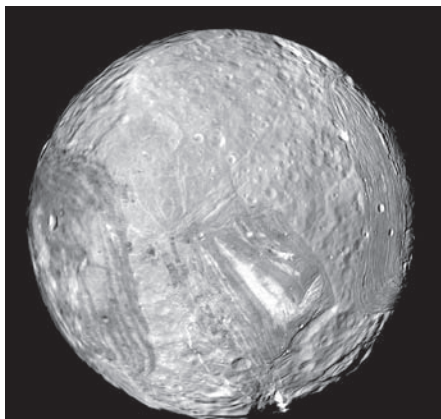


**Voyager** – dvojice sond NASA, která startovala v roce 1977 pomocí nosných raket Titan/Centaur. V roce 1979 proletěly obě sondy kolem Jupiteru, v roce 1980 (Voyager 1) a 1981 (Voyager 2) kolem Saturnu. Voyager 2 pokračoval dále k Uranu (1986) a Neptunu (1989). Obě sondy se zásadním způsobem zasloužily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

**Pericentrum** – bod na eliptické dráze kolem centrálního tělesa, který je tomuto tělesu nejbližší. Pro Slunce se používá výraz perihelium, pro Zemi perigeum, pro Měsíc periluna, pro hvězdu periastrum.

**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 hvězdu apoastrum.

Počítačem sestavená mozaika snímků ze dne 24. ledna 1986. Ukazuje jižní polokouli měsíce s dvěma zcela odlišnými typy povrchů – starým povrchem posetým krátery a mladými oválnými oblastmi. Ty jsou tvořeny systémy světých a tmavých pásů, zlomů a hřebenů. Zdroj: NASA.



měsíce při katastrofické srážce s jiným tělesem a jeho následnou reakci na oběžné dráze. Přestože současné modely ukazují, že je tento scénář dosti nepravděpodobný, je tato zastaralá teorie stále široce zastoupena v astronomické populární literatuře.

Mezi alternativní vysvětlení patří například vytvoření korun při obřích impaktech, které roztavily ledový povrch i podpovrchové vrstvy. Soudě na základě střední hustoty je Miranda tvořena směsí ledu a křemičitanových hornin. Během lokálně vybuzené geologické aktivity pak mohlo dojít k periodicky se opakujícím záplavám vodou unikající z podpovrchových vrstev a jejímu následnému namrzání na povrchu impaktové pánve. Mladší terén může být také výsledkem nedokončené diferenciaci měsíce, při které došlo k vynesení lehčího materiálu směrem k povrchu.

Rozložení povrchových útvarů může také naznačovat, že v minulosti došlo k reorientaci celého měsíce. Rotační osa těles je stabilizována tím, že se v oblasti rovníku nacházejí oblasti s hustším materiálem nebo s přebytkem hmoty, zatímco řidší oblasti se nacházejí u pólů. Pokud dojde k přerozdělení hmoty na povrchu či uvnitř měsíce, může to způsobit nestabilitu a následnou reorientaci jak rotační osy tak vedlejších os. Teorii o reorientaci měsíce také podporuje asymetrie mezi krátery vytvořenými na straně obrácené po směru oběhu měsíce a na straně opačné – vzhledem k tomu, že měsíc má vázanou rotaci, lze očekávat, že meteoroidy dopadající na „návětřnou stranu“ měsíce vytvoří odlišnou hustotu a velikost kráterů než na straně opačné. Tato asymetrie je na povrchu Mirandy skutečně patrná, ale hranice mezi těmito dvěma oblastmi neprochází současným pólem měsíce a neprochází ani spojnicí mezi „suburanským“ bodem a jeho protějškem. Podrobnější analýzou povrchových struktur došli geologové k závěru, že u Mirandy mohlo dojít k „prohození“ vedlejších os a a b (hlavní osa prochází pólem, jedna z vedlejších os míří k Uranu a druhá směřuje ve směru tečny k oběhu) a zároveň mohlo dojít k posunu pólu měsíce až o 20 stupňů.

Spouštěcích mechanismů, které vedly k reorientaci měsíce, mohlo být několik. Jednou z možností je dopad velké planetky, při kterém vznikla obří impaktní pánve. Při její následné relaxaci pak mohlo dojít k průniku materiálu z podloží, které bylo při impaktu roztaveno. Díky tomu došlo k jeho gravitační diferenciaci a lehčí materiál vystoupil na povrch, což způsobilo změnu rozložení hmoty na povrchu měsíce. Sla-

pové síly Uranu, které na měsíc při jeho reorientaci působily, pak mohly vyvolat další tektonickou aktivitu, která poznamenala celý povrch Mirandy. Podobným procesem reorientace mohl v minulosti projít také Saturnův měsíc Enceladus.

Dalším procesem, který mohl vybudit geologickou aktivitu měsíce, je slapový ohřev. U měsíce, který má vázanou rotaci, však nedochází k slapovému ohřevu, pokud není jeho dráha dostatečně excentrická. Dnes je dráha Mirandy prakticky kruhová – její excentricita je pouze 0,001, což je 50× méně ve srovnání s excentricitou dráhy našeho Měsíce. V minulosti se však Miranda zřejmě nacházela v rezonanci 3 : 1 s měsícem Umbriel. Tato rezonance zvyšovala excentricitu Mirandy, podobně jako k tomu dochází mezi galileovskými satelity Jupiteru. Vysoká excentricita dráhy Mirandy umožňovala efektivně vytvářet slapové tření, při kterém se uvolňovalo teplo, jež bylo zapotřebí k přetvoření povrchu Mirandy. K úniku Mirandy z rezonance s Umbrielem došlo zřejmě díky rozvoji sekundárních rezonancí, tedy jakýchsi „rezonancí mezi rezonancemi“, které vznikly díky vzájemné blízkosti primárních rezonancí. Těch je v systému Uran, Miranda, Umbriel celkem šest – tři mezi uzly a sklony drah a tři mezi pericentry a excentricitami. Při malých excentricitách a sklonech jsou tyto rezonance vzájemně dostatečně oddělené, ale slapový vývoj systému může tyto rezonance „přiblížit“, čímž dojde k sekundárním poruchám systému a následnému úniku Mirandy z rezonance. Excentricita dráhy „volné“ Mirandy je pak utlumena slapy a dráha se stává kruhovou. Tento scénář úniku Mirandy z rezonance podporuje výrazný sklon roviny oběhu Mirandy vůči rovině rovníku Uranu.

Přesto, že některé modely, snažící se o vysvětlení podivného vzhledu Mirandina povrchu, jsou velmi propracované, nejsou vzájemně konzistentní. Miranda si tak své tajemství stále uchovává a k jeho odhalení patrně nedojde dříve, než budeme mít k dispozici další poznatky – například o vzhledu její severní polokoule, která byla při průletu Voyageru v permanentním stínu. Již nyní je jasné, že se toho jen tak nedočkáme.

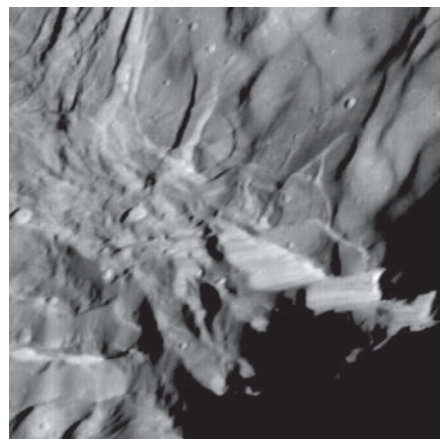
■ **Jakub Rozehnal, 18. 4. 2014, AB 15/2014**

**Sklon dráhy** – jeden ze základních elementů dráhy tělesa v gravitačním poli. Pro tělesa ve sluneční soustavě jde o úhel mezi rovinou oběhu tělesa a rovinou ekliptiky (pohybu Země kolem Slunce).

**Uzel** – průsečík dráhy tělesa s rovinou oběžné dráhy Země kolem Slunce (s tzv. rovinou ekliptiky). Dráha skloněná vzhledem k rovině ekliptiky s ní má dva průsečíky (uzly).

**Délka vzestupného uzlu** – úhlová vzdálenost mezi spojnicí Slunce – jamí bod a průvodičem planety v okamžiku, kdy se nachází ve vzestupném uzlu dráhy (bodu, ve kterém dráha protíná ekliptiku směrem z jihu na sever).

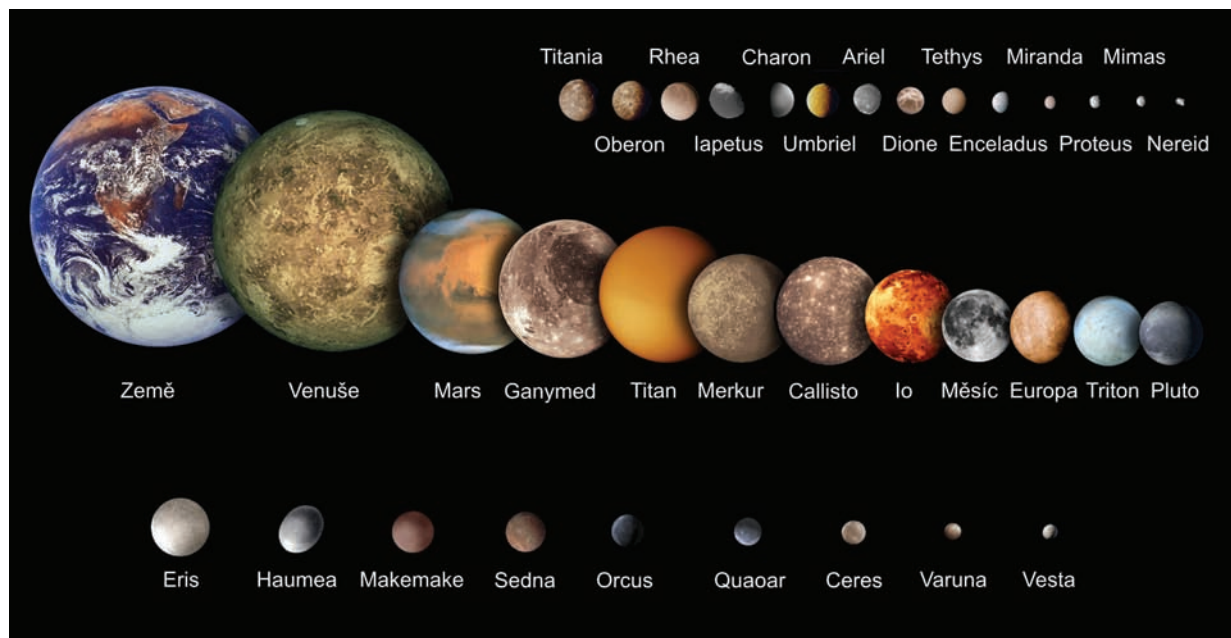
*Tento systém hlubokých kaňonů a hřebenů vznikl patrně vrásněním. Největší zlom či útes je patrný napravo a dolů od středu obrázku. Ukazuje rýhy v hladké stěně, které vznikly při vzájemném tření zlomených bloků, což svědčí o jejich tektonickém původu. Zdroj: NASA.*



## Fungovala tekutinová dynamika i v menších tělesech?

Nad tím, že tekutinové dynamo dobře funguje v obřích planetách, se nikdo nepozastavuje. Je to logické. Jupiter je největší planetou sluneční soustavy a v jeho složení převládá vodík. Ten je za vysokých tlaků v nitru planety v kovovém stavu a dobře vede elektrický proud, což jsou ideální podmínky pro tekutinové dynamo. Jupiterova magnetosféra je proto největší ze všech planet a její ohon dosahuje do vzdálenosti 5 astronomických jednotek, tedy až k dráze Saturnu. Jde o největší plazmatický útvar ve sluneční soustavě. Silná magnetická pole mají i ostatní obří planety. U terestrických planet je situace velmi zvláštní. Magnetické pole má jen Merkur a Země. U Merkuru, který je malým

*Malá tělesa sluneční soustavy. Vesta má průměr jen něco málo přes 500 km. Zdroj: Wikipedia.*





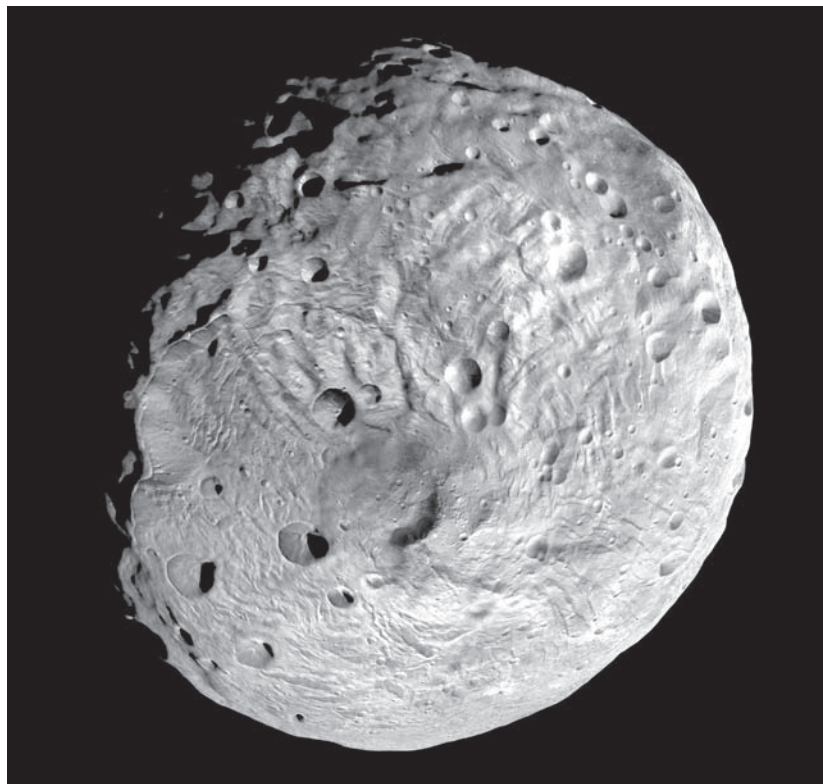
tělesem, bylo magnetické pole spíše překvapením, naopak Venuše je přibližně stejně veliká jako Země a neexistence jejího magnetického pole je záhadou. Sonda Mars Global Surveyor navíc našla na Marsu zbytková magnetická pole zaznamenaná v povrchových horninách, která svědčí o tom, že Mars kdysi globální magnetické pole měl a později o něj přišel. Možná měla magnetické pole i Venuše, ale případné zbytkové pole je v povrchových horninách nevratně ztraceno, neboť povrchová teplota (460 °C) je nad Curieovou teplotou, při které dochází k přemazání magnetického záznamu. Vlastní magnetické pole má Jupiterův měsíc Ganymed, ten je ale větší než Merkur, takže jeho vlastní magnetické pole není velkým překvapením. Měsíce Europa a Callisto sice vlastní pole nemají, ale deformují pole Jupiteru natolik, že to je jedním z důkazů existence vodivých (tedy slaných) podpovrchových oceánů. Na konci roku 2012 přišli vědci z MIT s tím, že meteorit ALHA81001, který pochází z planety Vesta, v sobě ukrývá magnetický záznam a mohl by být svědectvím, že i tak malé těleso, jakým je Vesta, by v minulosti mohlo mít vlastní magnetické pole generované tekutinovým dynamem. Objev by mohl znamenat, že v raných dějinách sluneční soustavy mohla mít vlastní magnetické pole i velmi malá tělesa.

### Vesta

Mezi Marsem a Jupiterem se nachází pás mnoha menších těles, kterým říkáme planety. Tento pás získal označení Hlavní pás. Další obdobná tělesa se nacházejí za drahou Neptunu v Kuiperově pásu. Vesta je s průměrem 557 kilometrů třetím největším tělesem Hlavního pásu planetek. Největší je Ceres (975×909 km), která byla považována

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

*Jižní pól planety Vesta ze sondy Dawn. Zdroj: NASA.*

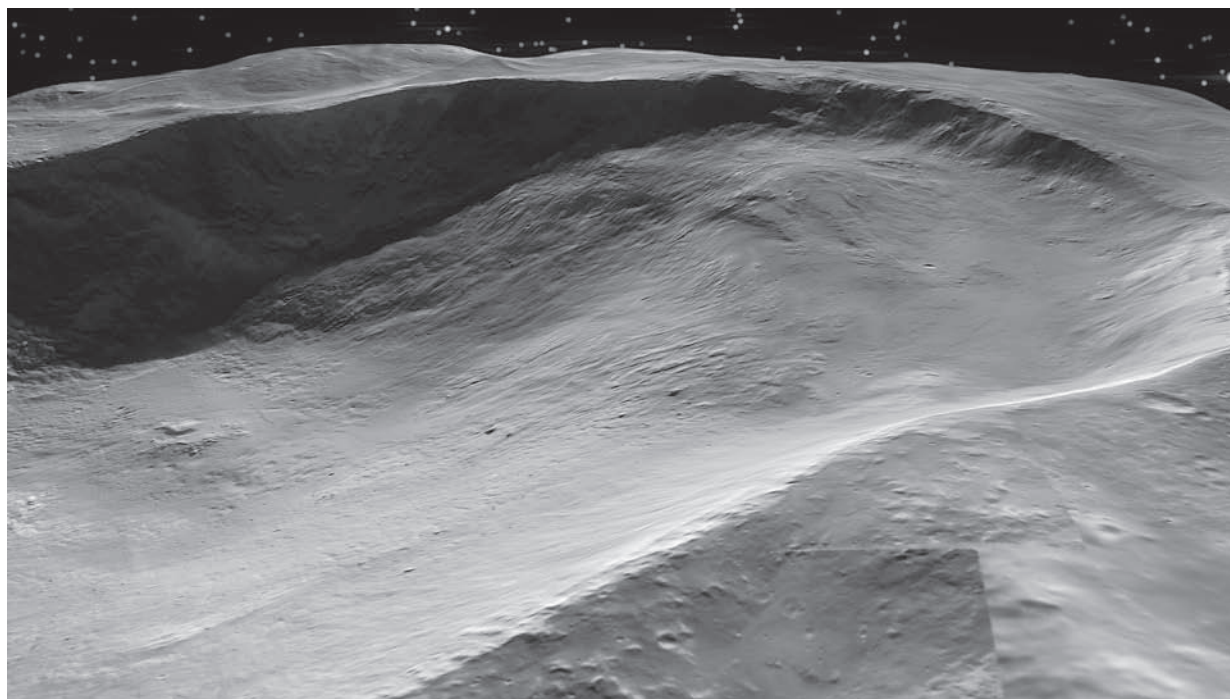


**Omega efekt** – jev, při kterém rotující těleso (například Slunce) přeměňuje dipólovou složku magnetického pole na azimutální. Magnetické pole je zamrzlé do plazmatu tělesa a otáčí se s ním. Pokud má těleso diferenciální rotaci, magnetické siločáry jsou v místech, kde je rotační rychlost vyšší, vytažovány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

*Krajina na povrchu Vesty v okolí kráteru Marcia. Jeho průměr je 58 kilometrů. Na snímku ze sondy Dawn jsou patrné detaily veliké 70 metrů. Zdroj: NASA.*

nejprve za planetu, poté planetku a od roku 2006 je přeřazena do kategorie trpasličích planet. Druhé místo co do velikosti zaujímá Pallas (582×556×500 km) a třetí Vesta (572×557×446 km). Vesta je v pořadí čtvrtým objeveným tělesem Hlavního pásu, proto má katalogové číslo 4. Vesta má vysokou odrazivost, a tak je jediným tělesem Hlavního pásu, které je viditelné pouhým okem.

Planetku objevil německý astronom a lékař Hans Olbers v roce 1807. Předtím, v roce 1802 objevil také planetku Pallas. Nešlo o náhodu, systematicky prohledával oblast v okolí drah planetek Ceres a Pallas, neboť předpokládal, že jde o pozůstatky rozpadu nějaké větší planety, která získala jméno Phaeton. Dnes víme, že se v této oblasti planeta nestihla zformovat, takže jde spíše o planetesimály (zárodky planet). Pojmenování Vesty pochází od známého německého matematika Carla Friedricha Gausse. Vesta je v římské mytologii bohyní rodného krbu, dcerou boha Jupitera a bohyně Juno. Na Vestě se nachází



obří kráter o průměru 505 kilometrů, který je dobře patrný ze snímků velkých dalekohledů, neboť pokrývá podstatnou část povrchu. Je důsledkem obřího impaktu. Dno kráteru je 13 kilometrů pod povrchem a centrální vrcholek je vysoký (ode dna) 23 kilometrů. Odhaduje se, že srážka nastala před miliardou roků, Vesta ztratila přibližně procento své hmotnosti. Tento materiál občas dopadne i na Zemi, je známo několik meteoritů, jejichž analýza napovídá, že mateřským tělesem je právě Vesta. V roce 2011 zkoumala Vestu americká sonda Dawn, která byla navedena na oběžnou dráhu kolem planety.

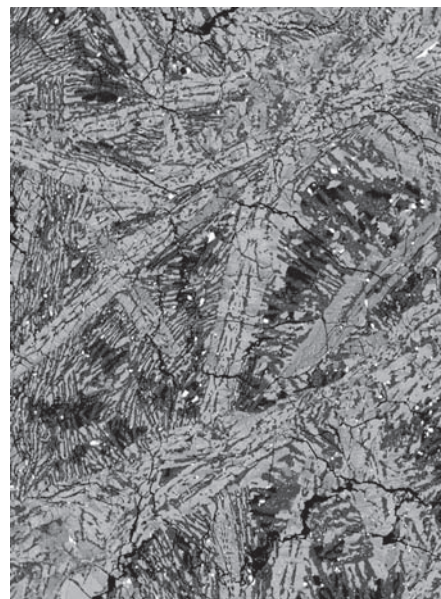
### Magnetické pole Vesty

V roce 1981 byl v Antarktidě nalezen meteorit ALHA81001 o hmotnosti 50 gramů. Podle složení jde o meteorit pocházející z planety Vesta. V roce 2011 získala skupina vědců z MIT vzorek o hmotnosti 1 gram. Roger Fu a Benjamin Weiss se pokusili tento úlomek důkladně prozkoumat. Ve vzorku našli malé orientované krystalky, které mají nenulový magnetický moment. To znamená, že v době vzniku meteoritu byla roztavená látka zorientována ve směru tehdejšího magnetického pole planety. Na základě zastoupení argonu  $^{40}\text{Ar}$ , který vzniká rozpadem radioaktivního draslíku  $^{40}\text{K}$ , určili stáří meteoritu na 3,7 miliardy roků. Samotná Vesta vznikla před 4,5 miliardami let. Fu a Weiss vyslovili hypotézu, že prvních 100 milionů roků po vzniku planety v ní fungovalo tekutinové dynamo, které vytvořilo globální pole planety. V povrchových horninách zůstal magnetický záznam z tohoto období. Při analýze zjistili, že meteorit prošel dvěma fázemi ochlazení. Nejprve proběhlo prudké ochlazení, při kterém vznikly jemné krystalky. Následovala relativně dlouhá fáze pomalého ochlazení. Magnetické pole nalezené v meteoritu bylo uloženo v této dlouhodobé fázi, a nemělo by proto souviset s krátkým obdobím impaktu, při kterém bylo těleso z Vesty vyvrženo. Pokud jsou závěry správné, mohlo tekutinové dynamo fungovat u mnoha planetesimál již při vzniku těles sluneční soustavy, což poněkud mění naše představy o poměrech v protoplanetárním disku, ze kterého se sluneční soustava rodila.

■ Petr Kulhánek, 31. 5. 2013, AB 18/2013

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

Krystalická struktura meteoritu ALHA81001. Řez o velikosti 0,35×0,5 mm je zobrazený elektronovým mikroskopem. Zdroj: MIT, laboratoř paleomagnetizmu.

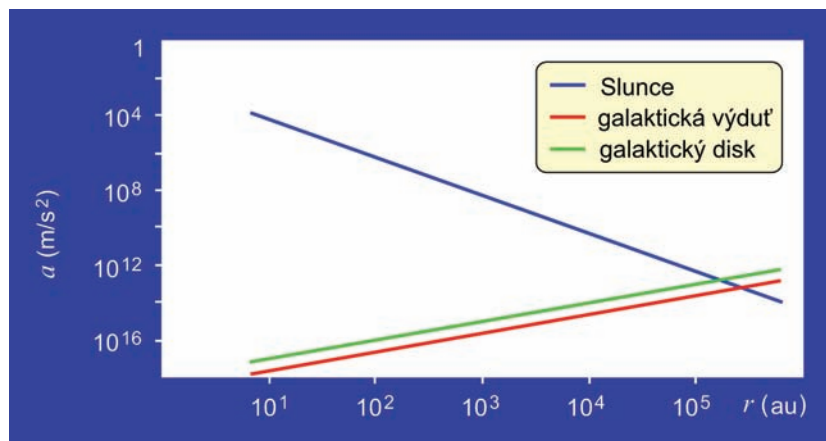


## Odkud přicházejí komety?

**Transneptunická tělesa** – veškerá tělesa za dráhou Neptunu. Dnes, kdy je známo přes 1 800 transneptunických těles, je možno mezi nimi najít populace s charakteristickými vlastnostmi. Z dynamického hlediska proto tělesa v oblasti za dráhou Neptunu rozdělujeme na klasický Kuiperův pás, rozptýlený disk a oddělený disk.

**Klasický Kuiperův pás** – tělesa obíhající na drahách s nízkým sklonem a relativně malou excentricitou (cca do 0,15). V tomto pásu také leží historicky první objevené těleso, označené QB1 (proto se také někdy anglicky označuje jako „cubewanos“). Klasický Kuiperův pás je ohraničen dvěma rezonančními populacemi. Jsou to plutina (tělesa v rezonanci 2 : 3 s Neptunem) a tělesa v rezonanci 1 : 2 s Neptunem, která vytvářejí jakousi přirozenou hranici klasického Kuiperova pásu.

Gravitační zrychlení udělované tělesu ve vzdálenosti  $r$  od Slunce slapovými silami galaktické výdutě (červeně), galaktického disku (zeleně) a Slunce (modře). V dlouhodobých škálách ve vzdálenostech nad 50 000 au. jsou dráhy planetesimál destabilizovány, nad 200 000 au galaktické slapy zcela převládou.



Kometární materiál je pro astronomy zabývajícími se studiem vzniku sluneční soustavy nesmírně cenným materiálem. Máme totiž zato, že komety jsou vlastně pozůstatkem prvních těles, tzv. planetesimál, která vznikla akrecí z prachoplynného disku v době před přibližně 4,5 miliardami roky. Jedná se o geologicky nedotčený materiál, který nám může prozradit cenné informace o vzniku a raném vývoji sluneční soustavy. Dynamika kometárních drah nám navíc pomáhá doplnit i informace o pozdních fázích vývoje planetárního systému, ve kterých probíhala migrace planet.

### Model z Nice

Stručně řečeno, tento model popisující migraci těles sluneční soustavy, je založen na gravitační interakci mezi mladými planetami a diskem planetesimál, který je obklopoval. Díky ní docházelo k postupnému narůstání excentricit a poloos velkých planet (s výjimkou Jupiteru, který se naopak mírně přiblížil ke Slunci). Při této pomalé migraci došlo k rezonanci oběžných dob Jupiteru a Saturnu v poměru 2 : 1. Fakt, že se po každých dvou obězích Jupiteru, resp. jednom oběhu Saturnu opakovala tatáž konfigurace dvou největších planet, měl pro dnešní podobu sluneční soustavy dalekosáhlé důsledky. Rezonance „rozkývala“ velké planety natolik, že si dvě vnější planety možná dokonce

„vyměnily“ pořadí. Dráha Neptunu se stala natolik excentrickou, že zasahovala do disku planetesimál. A právě tehdy se začal psát příběh, na jehož konci stojí dnešní komety.

Planetesimály z dynamicky erodovaného disku byly „vystříleny“ na extrémně protáhlé dráhy s velikostmi velkých poloos v řádu tisíců i desetitisíců astronomických jednotek. Z původního disku planetesimál o odhadované celkové hmotnosti  $35 M_Z$  (hmotnosti Země) zbyl je zlomek těles, která utvářejí dnešní Kuiperův pás. Jeho



současnou hmotnost odhadujeme na pouhou  $0,1 M_Z$ . Neptun (spolu s ostatními planetami) tedy během migrace rozptýlili více než 99 % původní populace těles.

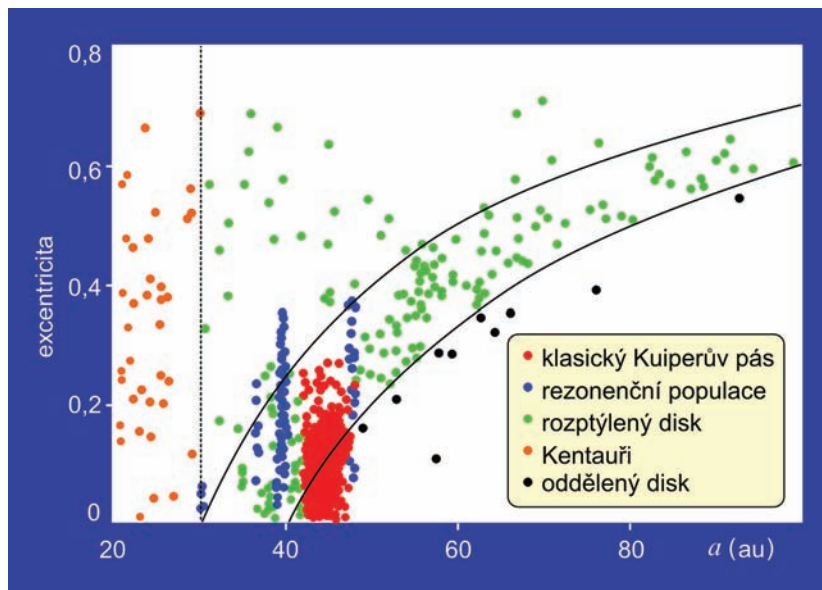
Afelium (odsluní) rozptýlených těles leželo typicky ve vzdálenostech 10 000 až 100 000 au (pokud se rovnou neocitla na hyperbolických drahách). V těchto vzdálenostech se již pomalu vyrovnává gravitační působení Slunce s gravitací okolních blízkých hvězd a zejména gravitačních slapů. Jejich prostřednictvím docházelo k cirkularizaci původně protáhých eliptických drah planetesimál (tento proces popisujeme jako tzv. dynamické tření), která dala vzniknout kulovitému oblaku těles na drahách s velkou poloosou v rozmezí přibližně od 50 000 do 100 000 au. Tělesa v něm mají víceméně izotropně rozdělené sklonky. Existenci tohoto oblaku předpověděl již v polovině minulého století Jan Hendrik Oort (1900–1992). Oortův oblak (jak se od té doby tato struktura nazývá), je zdrojem dlouhoperiodických komet. Kometární jádra zde obíhají po mírně eliptických drahách, ale působením galaktických slapů či gravitačních poruch hvězd, které náhodně projdou v blízkosti Slunce, se mohou dostat opět na vysoce excentrické dráhy a zamířit zpět ke Slunci. Oortův oblak ovšem není jediným zdrojem komet. Pojďme si proto krátce shrnout, co o kometárních drahách dnes víme.

## Dráhy komet a transportní mechanismus

V prvním přiblížení bývá zvykem komety rozdělovat na „krátkoperiodické“ (s periodou do 200 let) a „dlouhoperiodické“. Je pravda, že toto rozdělení je velmi hrubé a nic neříká o skutečném původu komety – díky přiblížením k planetám a jejich gravitačnímu rušení (to se týká zejména Jupiteru) se dráhy i periody komet mění. Daleko přesněji lze komety rozdělit podle hodnoty tzv. Tisserandova parametru, což je veličina, která má přímý

**Rozptýlený disk** – rozprostírá se do větších vzdáleností (tělesa se vzdalují od Slunce i nad 100 au). Tělesa mají vysoké sklonky (i  $40^\circ$ ) a velké excentricity (větší než 0,4). Jejich perihelia však leží u dráhy Neptunu. V prostoru vlastních elementů zaujímají tělesa rozptýleného disku jiné oblasti než klasický Kuiperův pás.

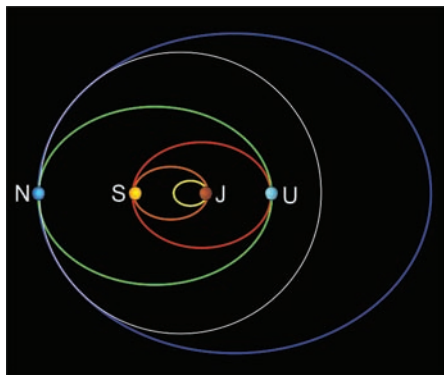
Strukturu těles Kuiperova pásu odhaluje graf vlastních elementů planetesimál. Klasický pás, rezonanční populace a rozptýlený disk jsou pozůstatky dějů, které probíhaly v období migrace planet. Kentauři jsou tělesa rozptýleného disku, která po perturbaci Neptunem putují do vnitřních částí sluneční soustavy, aby se po několika milionech let připojila k rodině Jupiterových komet.



**Oddělený disk** – typickým představitelem této populace těles je Sedna. Její dráha je oddělená od Neptunu, nikdy se k ní nepřimyká, tudíž se na ni nemohla dostat poruchami způsobenými Neptunem. Je možné, že se tato tělesa na současné dráhy dostala gravitačním rušením blízkými hvězdami v období, kdy bylo Slunce členem mladé otevřené hvězdokupy.

**Kentaury** – tato tělesa se sice nenacházejí v transneptunické oblasti, jejich dráhy leží mezi drahami velkých planet, původ však mají v oblastech rozptýleného disku.

*Mechanismus transportu těles Kuiperova pásu do vnitřních částí sluneční soustavy. Těleso rozptýleného disku (modrá dráha) je po těsném přiblížení k Neptunu rozptýleno na oběžnou dráhu s pericentrem u Uranu (zelená dráha). Po těsném přiblížení k Uranu se situace opakuje a těleso tak „poskakuje“ až k Jupiteru.*



vztah k tzv. zobecněné energii, která se při řešení problému tří těles zachovává. Podle hodnoty tohoto parametru rozdělujeme komety na *ekliptikální* a na komety s *izotropním sklonem*.

Mezi ekliptikálními kometami, tj. těmi, které obíhají přibližně v rovině ekliptiky, tedy s malými sklony, dále rozlišujeme komety Jupiterovy rodiny, dále objekty typu Chiron (objekty obíhající mezi drahami Jupiteru a Neptunu) a dále komety typu Encke (obíhají ve vnitřní části sluneční soustavy).

Domníváme se, že komety Jupiterovy rodiny jsou tělesa, která pocházejí z Kuiperova pásu. Transportní mechanismus přitom není těžké objevit – podíváme-li se na strukturu současného Kuiperova pásu, zjistíme, že tělesa tzv. rozptýleného disku obíhají na drahách, jejichž přísluní leží vždy v blízkosti dráhy planety Neptun. To je logický důsledek dynamických dějů, které provázely ono „vlétnutí“ Neptunu do planetesimálního disku. Dráhy rozptýlených těles se totiž musí vždy přimykát k dráze tělesa způsobujícího poruchu. Je dobré si uvědomit, že obecně platný princip kauzality nedovolí dráze tělesa podléhajícího poruše, aby zcela „odskočilo“ od dráhy planety, která poruchu způsobila.

Protože je jednotkový moment hybnosti (vztažený na jednotku hmotnosti) těchto těles větší než jednotkový moment hybnosti Neptunu, dochází ve většině případů při přiblížení obou těles ke snížení energie planetesimály. Ta proto putuje do vnitřních částí sluneční soustavy, kde však obíhají další planety. Tento „skok“ se proto může ještě znovu opakovat u Uranu a Saturnu – u Jupiteru však tato tělesa svá putování již skončí.

Transport komet z oblastí Kuiperova pásu (resp. rozptýleného disku) tedy vysvětluje nejen původ komet Jupiterovy rodiny, ale také přítomnost těles „na cestě“ – to jsou právě objekty typu Chiron, tzv. Kentaury. Typická doba transportu transneptunických těles do oblastí dráhy Jupiteru je v řádu jednoho milionu let, populace Kentaurů je tedy nestabilní a pokud by nebyla neustále doplňována tělesy z Kuiperova pásu, nemohli bychom ji vůbec pozorovat.

S druhou kategorií komet, tedy těch, které k nám přicházejí z Oortova oblaku, však zřejmě není vše úplně v pořádku. Alespoň si to myslí tým astronomů, vedený Halem Levisonem, jedním z tvůrců modelu z Nice, který v polovině roku 2010 představil dosti exotickou možnost původu těles Oortova oblaku.

Levison poukazuje na rozpor mezi odhady počtu těles v Oortově oblaku a v rozptýleném disku. Protože populace obou těles spojuje společná minulost, lze z modelu odvodit přibližný poměr velikostí populace rozptýleného disku a Oortova oblaku. Tento poměr je přibližně roven 0,1, což znamená, že by měl rozptýlený disk obsahovat přibližně desetkrát méně těles než Oortův oblak.

Dolní mez odhadovaného počtu těles Oortova oblaku s průměrem větším než 1 km je přibližně  $4 \times 10^{11}$ . K této hodnotě lze dospět porovnáním pozorovaného toku „nových“ komet s frekvencí a intenzitou poruch způsobenými galaktickými slapy a blízkými hvězdami. Za předpokladu správného určení poměru mezi počtem těles Oortova oblaku a rozptýleného disku by tedy měl rozptýlený disk obsahovat přibližně  $4 \times 10^{10}$  těles. Odhady učiněné z pozorování (za předpokladu obvyklého rozdělení velikostí v populaci) ovšem dávají hodnotu pouhých  $6 \times 10^8$  těles, tedy 70× méně, než kolik model předpovídá.

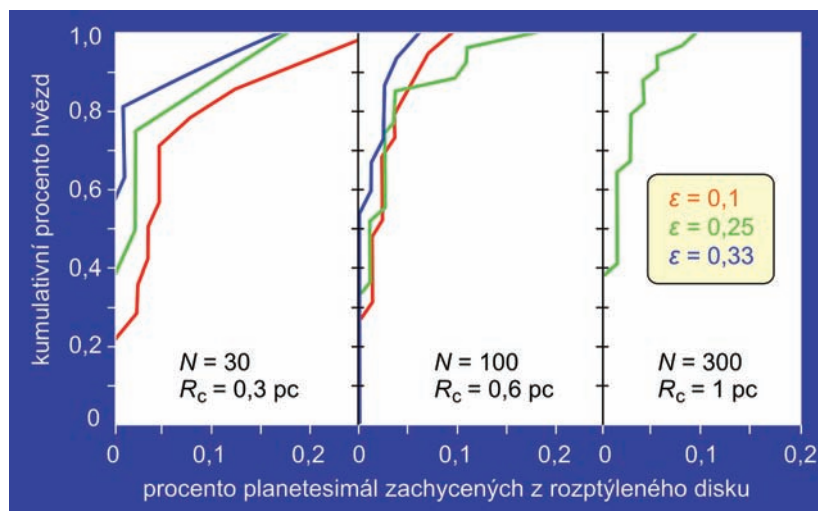
Levisonův tým proto přišel s myšlenkou, že by tělesa Oortova oblaku mohla z velké části pocházet z oblastí mimo sluneční soustavu – z období, kdy bylo Slunce součástí mladé otevřené hvězdokupy, a kdy mohlo do svého Oortova oblaku díky chaotickým pohybům planetesimál mezi těsnou formací hvězd „nachytat“ planetesimály, jež původně vznikly u jiných hvězd.

## Numerické simulace

Pro ověření pravděpodobnosti takového scénáře bylo provedeno několik simulací dynamického vývoje mladých hvězdokup o průměru od 0,3 do 1 pc, které obsahovaly 30 až 300 mladých hvězd. Kolem každé hvězdy byl vytvořen rozptýlený disk 100 planetesimál s drahami o velikosti velké poloosy v rozmezí 1 000 až 5 000 au. V modelu byla také uvažována přítomnost mezihvězdného plynu, který byl po třech milionech let od počátku integrace vypuzen hvězdným větrem mimo hvězdokupu. Integrace

**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.

Procento komet z rozptýleného disku jedné hvězdy, které se zachytilo u ostatních hvězd na orbitách podobných drahám komet v Oortově oblaku. Barevné křivky představují simulace hvězdokup s různým obsahem mezihvězdného plynu (červená nejvíce, modrá nejméně). Obrázky ukazují výsledky pro různé počáteční konfigurace hvězdokupy (počet hvězd  $N$  a průměr  $R_c$ ).





Kometa Lovejoy (C/2011 W3) vyfotografovaná z Mezinárodní kosmické stanice. Zdroj: NASA/Dan Burbank

pokračovala do doby, než střední vzdálenost mezi hvězdami narostla na 500 000 au, tj. pětinašobek poloměru Oortova oblaku. Do této fáze dospěla integrace typicky v časové škále 10 až 50 milionů let. Po ukončení simulace byl spočítán poměr těles, která se z rozptýleného disku mateřské hvězdy dostala na typicky „oortovské“ dráhy u cizí hvězdy. Ukázalo se, že přibližně u 20 % hvězd se žádná taková tělesa nezachytila, na druhou stranu se u všech hvězd zachytilo až 26 % procent těles jednoho rozptýleného disku. Přitom byly pozorovány dva typy záchytů:

- Náhodné zachycení, ke kterému došlo ve chvíli, kdy se těsná konfigurace hvězd počala rozptylovat. Do té doby se planetesimály víceméně náhodně pohybovaly po celé hvězdokupě.
- Přímý transport, ke kterému došlo během těsného průletu dvou hvězd. Tímto způsobem byl pozorován transport až 19 % populace rozptýleného disku hvězdy A do Oortova oblaku hvězdy B.

Nyní nastala nejproblematičtější část konstrukce hypotézy – odhad množství těles, která mohla utvářet typický rozptýlený disk hvězdy. V případě našeho Slunce lze dospět k odhadu kolem  $2 \times 10^{13}$  planetesimál. Pokud je tento odhad správný, znamenalo by to, že typický Oortův oblak může obsahovat toto množství planetesimál, násobené účinností přenosu z rozptýleného disku cizí hvězdy. Pro výše uvedený odhad množství komet v Oortově oblaku vychází koeficient 0,03, což není vůbec nereálné. Za předpokladu, že jsou uvedené předpoklady správné, dospíváme k fantastickému závěru, že až 90 % těles Oortova oblaku ve skutečnosti může pocházet z oblastí mimo sluneční soustavu!

■ **Jakub Rozehnal, 3. 12. 2010, AB 44/2010**



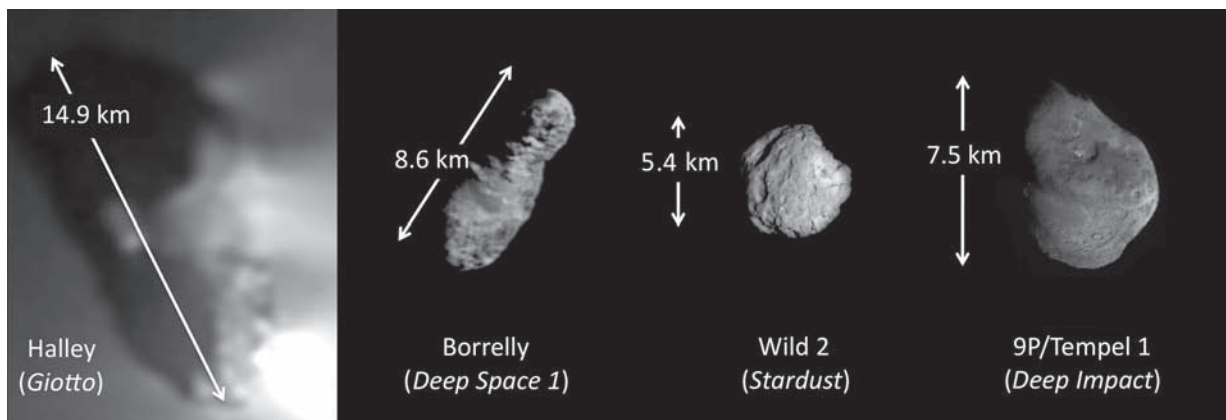
## U komety Hartley 2

Ke kometám se nelétá tak často, jak by se zdálo. Přeci jen se ale ve čtvrtek 4. listopadu 2010 podařilo přidat k dřívějším nemnohým návštěvám komet další úspěšný těsný průlet, tentokrát kolem jádra komety 103P/Hartley 2. Kometa Hartley 2 byla objevena v roce 1986 Malcomem Hartleym na observatoři Siding Spring v Austrálii. Její oběžná doba byla určena na 6,46 roků, jde tedy o krátkoperiodickou kometu, která dolétne od Slunce nanejvýše do vzdálenosti, ve které obíhá planeta Jupiter. Přesná měření charakteristik komety byla prováděna nejrůznějšími metodami. Spitzerovým vesmírným dalekohledem bylo na základě měření ze srpna 2008, kdy byla kometa vzdálena od Slunce 5,5 au, zjištěno, že průměr jádra by měl být něco málo přes jeden kilometr (poloměr  $0,57 \pm 0,08$  km), albedo bylo změřeno na  $0,028 \pm 0,009$ . Velkým překvapením proto byla vysoká hodnota emise molekulární vody změřená Spitzerovým vesmírným dalekohledem ( $3 \times 10^{28}$  molekul za sekundu). Při tak malém jádru by to nutně znamenalo výtrysky vytvářející komu z celého povrchu jádra, a to dokonce i v afeliu (odsluní), poblíž kterého se kometa právě nacházela. Pro srovnání na kometě 9P/Tempel 1, kterou sonda Deep Impact navštívila v roce 2005, byla tryskajícími proudy z jádra aktivní jen zhruba jedna pětina povrchu a ani u ostatních blíže známých kometárních jader nebylo zatím nikdy jádro natolik aktivní.

**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.

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

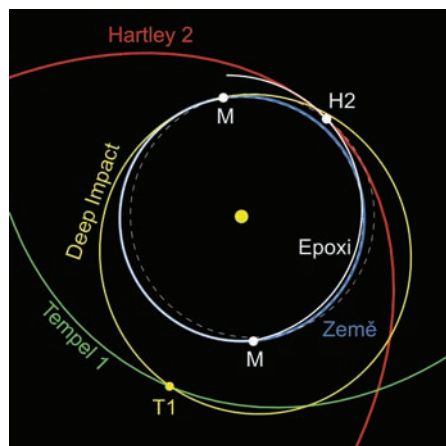
Jádra dosud navštívených komet při těsných průletech kosmických sond, které se podařilo vyfotografovat před projektem EPOXI. Zdroj: NASA.



**Deep Impact** – mise NASA ke kometě Tempel 1. Sonda startovala 12. 1. 2005, impaktor dopadl na kometu 4. 7. 2005. Sondou vynesla nosná raketa Delta 2, hmotnost sondy při startu byla 1020 kg, primární anténa pro přenos dat měla průměr 1 metr a zajišťovala přenosovou rychlost 175 kb/s. Maximální výkon slunečních článků byl 620 W. Po úspěchu u komety Tempel 1 pokračovala mise pod názvem EPOXI a sonda dne 4. listopadu 2010 prolétla ještě kolem komety Hartley 2. Mise byla ukončena po ztrátě signálu ze sondy v září 2013.

**Giotto** – sonda ESA, která startovala 2. července 1985, mise úspěšně skončila 23. července 1992. Zkoumala komety Halley a Grigg-Skjellerup. Přinesla první fotografie kometárního jádra zblízka.

Dráhy komet Tempel 1 a Hartley 2, které se staly cílem sondy Deep Impact přejmenované posléze na EPOXI. Jednotlivé symboly znamenají: M – gravitační manévr, H2 – přiblížení ke kometě Hartley 2, T1 – přiblížení ke kometě Tempel 1. Zdroj: EPOXI.



## Výzkum komet

Prozatím byla zblízka pozorována a zkoumána jen nemnohá jádra komet. Poprvé se podařilo uvidět jádro komety Halleyovy, a to evropské sondě Giotto, dne 14. března 1986 ze vzdálenosti 596 km. Giotto se pak 10. července 1992 ještě přiblížila ke kometě 26P/Grigg-Skjellerup, ke které se dostala dokonce na vzdálenost 125 km. Mise byla čtrnáct dní poté ukončena pro nedostatek paliva. Následovala mise Deep Space 1, která po návštěvě planetky 9969 Braille v roce 1999 prolétla 22. září 2001 ve vzdálenosti 2200 km kolem jádra komety Borelli. Dalším kometárním návštěvníkem byla sonda Stardust, která prolétla 2. ledna 2004 kolem jádra komety 81P/Wild 2 ve vzdálenosti 240 km. Cílem této mise bylo dopravit na Zemi částice kometárního materiálu, kterým je jádro obklopeno, což se nakonec podařilo. Následovala sonda Deep Impact, která měla připraven experiment s nastřelením impaktoru do jádra komety Tempel 1 a následné studium takto vyvržené látky z hloubi jádra pod viditelným povrchem, jak samotnou sondou, tak pozemskými teleskopy. Tento experiment se podařilo provést 4. července 2005. Jelikož na impaktoru byla také umístěna kamera, byly získány snímky povrchu jádra s velmi vysokým rozlišením detailů ještě před nárazem a rozbitím impaktoru o kometu.

Úspěšná mise sondy Deep Impact byla v roce 2006 prodloužena, sonda byla přesměrována k novým úkolům a byly vytvořeny dva nové dílčí projekty. Prvním projektem, který byl pojmenován EPOCH (*Extrasolar Planet Observation and Characterization investigation*), je sledování extrasolárních planet a jejich charakteristik. Druhým cílem se stalo sledování komet, zejména pak návštěva komety Hartley 2. Tato část projektu byla pojmenována DIXI (*Deep Impact eXtended Investigation of comets*). Celá mise tak byla přejmenována na EPOXI, název vznikl jako složenina jmen EPOCH a DIXI. Sonda měla ještě dle parametrů své dráhy šanci prolétnout kolem komety 85P/Boethin. Z experimentu ale sešlo, protože se kometu nepodařilo dohledat.

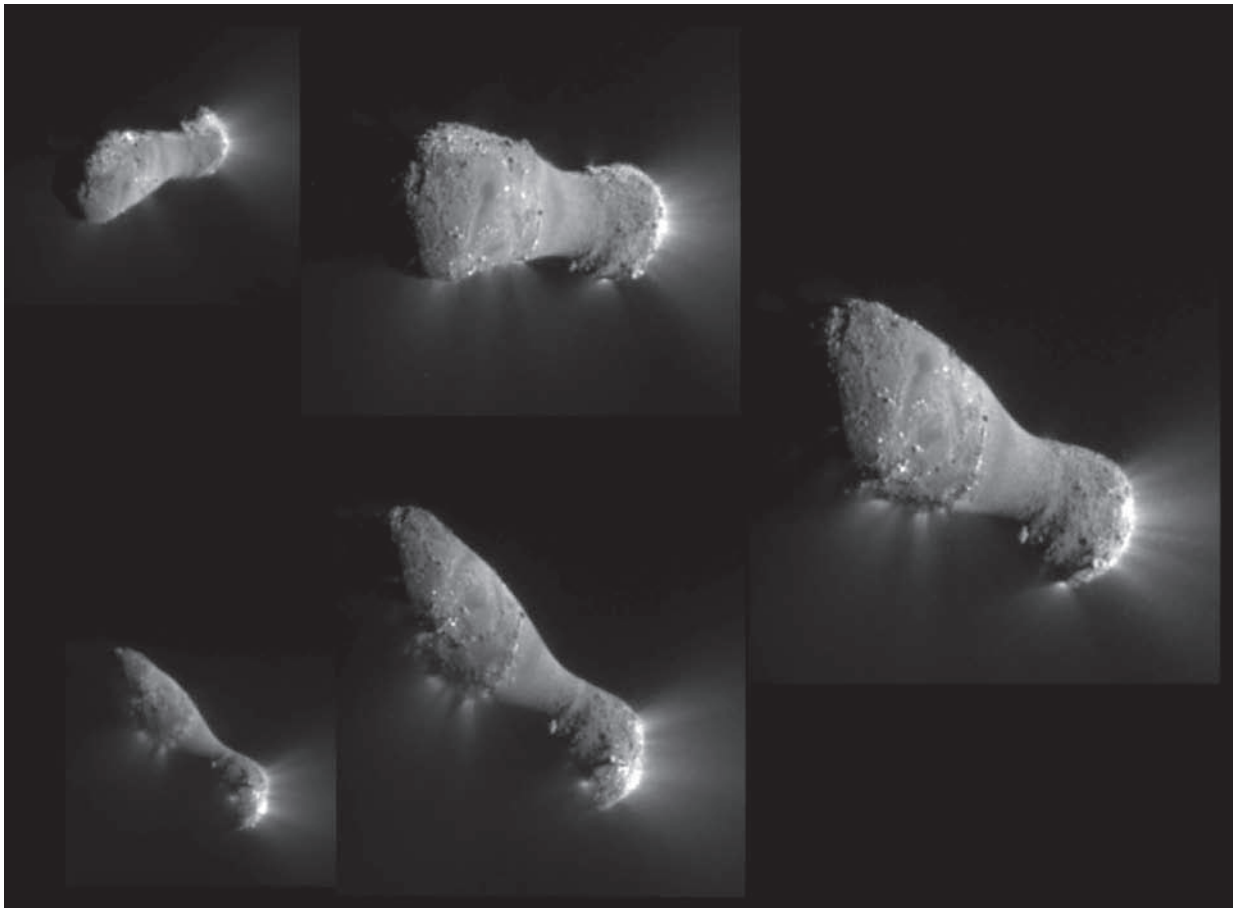
## Setkání s Hartley 2

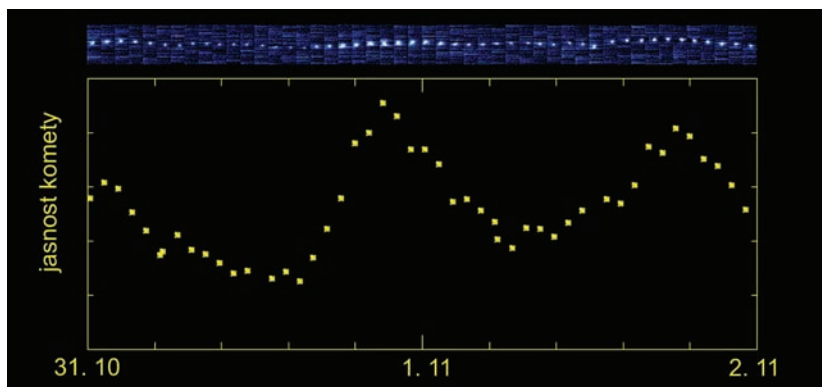
Novým cílem staronové mise EPOXI se tak stala kometa Hartley 2. Již při průletu sondy kolem Země v prosinci 2007 (a následně ještě 30. prosince 2008 a 28. prosince 2009) byla zemská přitažlivost využita pro nasměrování sondy tak, aby následně jemné korekce její dráhy umožnily těsný průlet sondy kolem komety dne 4. listopadu 2010, kdy

se kometa Hartley 2 dostala téměř do perihelia a současně velmi blízko k dráze Země.

Při rychlém průletu se podařilo pořídit unikátní snímky jádra komety. Povrch jádra je nápadně různorodý i ve velkém měřítku. Nečekávaná je hladká střední část tělesa, která není nikterak rozrušena krátery či jinými nerovnostmi typickými naopak pro oba konce protaženého tělesa. Výtrysky, které jsou původci zářící hlavy komety, jsou evidentní výhradně z koncových hlavic protáhlého jádra a na hladké střední části se nenacházejí.

*Pět snímků jádra, které vznikly při průletu kolem komety Hartley 2. Snímky byly pořízeny postupně od horního levého přes pravý uprostřed k dolnímu levému ve směru hodinových ručiček. Jádro má na délku pouhé dva kilometry. Zdroj: NASA/EPOXI.*





Fluktuace výronů  $\text{CO}_2$ . Na horním pruhu jsou snímky komety filtrované na emisi  $\text{CO}_2$ . Snímky odpovídají spodní datové stupnici. Celková jasnost komety je znázorněna žlutými body. Zdroj: EPOXI.

**Stardust** – sonda NASA vypuštěná 6. února 1999. Za pomoci aerogelu sbírala prachové částice a páry z ohonu komety Wild 2, fotografovala jádro komety a provedla předběžný rozbor kometárního prachu. K návratu vzorků na Zemi došlo v návratovém pouzdru 15. ledna 2006. Vlastní sonda pokračovala v letu pod názvem Stardust NExT ke kometě Tempel 1.

Jádro komety Hartley 2 vypadá jako obří kosmická ohlodaná kost. Na tak malé těleso jde ale o velmi aktivní útvar. Z radiových měření jsou známa podobná tělesa, která by mohla být i jen několika spojenými volnými kusy skal, které jsou vázány slabou vzájemnou gravitací, možná i elektromagnetickými silami, pokud by šlo o drobný prachový materiál. Je možné, že jádro komety vzniklo složením nesoudržných, původně nesouvislých

složek a střední část je pokryta jemným prachem. Ve spektru komety, které je nejspíše spektrem zejména plynů obklopujících jádro, byly nalezeny jako hlavní složky voda a oxid uhličitý. Intenzita výronů oxidu uhličitého se mění s periodou přibližně 1 den. Tento jev je pravděpodobně způsoben rotací kometárního jádra spolu s nerovnoměrným rozvrstvením zmrzlého oxidu uhličitého. Díky slunečnímu osvětlení dochází v průběhu rotace k nestejnorodému odpařování tohoto plynu v čase.

Sonda EPOXI úspěšně prolétla dne 4. listopadu 2010 ve vzdálenosti pouhých 700 km od jádra komety. Míření sondy s takovou přesností přitom probíhalo na několikrát v průběhu předchozích čtyř let. Pořízení pěti velmi kvalitních snímků jádra, kolem kterého prolétla sonda rychlostí 12,3 km/s se přitom jeví jako malý zázrak. Budiž tedy všem odměnou pohled na krásně ohlodanou kosmickou kost, která se na nás přilétla podívat z doby, kdy sluneční soustava teprve vznikala.

■ Ivan Havlíček, 12. 11. 2010, AB 41/2010



## Expedice Aurora 2012

První expedice Aurora se uskutečnila již v roce 2002 a známé rčení „do stejné řeky dvakrát nevstoupíš“ se pokusila vyvrátit skupina šestnácti nadšenců přesně o deset let později. V září 2012 jsme dvěma auty a jedním mikrobusem najeli přes 8 600 kilometrů a kromě pozorování polárních září jsme navštívili řadu zajímavých míst – čtvrt kilometru dlouhý laser FLASH a stavbu tříkilometrového laseru XFEL v německé částicové laboratoři DESY, švédský národní park Skuleskogen a důlní město Kirunu, fjordy rozprostírající se v souostroví na norských Lofotách, nejsevernější bod Evropy Nordkapp, největší měděný důl v Evropě Pyhäsalmi a v něm vybudovanou mionovou observatoř, kráter Ilumetsa v Estonsku a další zajímavosti. Necelé tři týdny utekly jako voda, voda řeky, do které někteří z nás vstoupili podruhé.

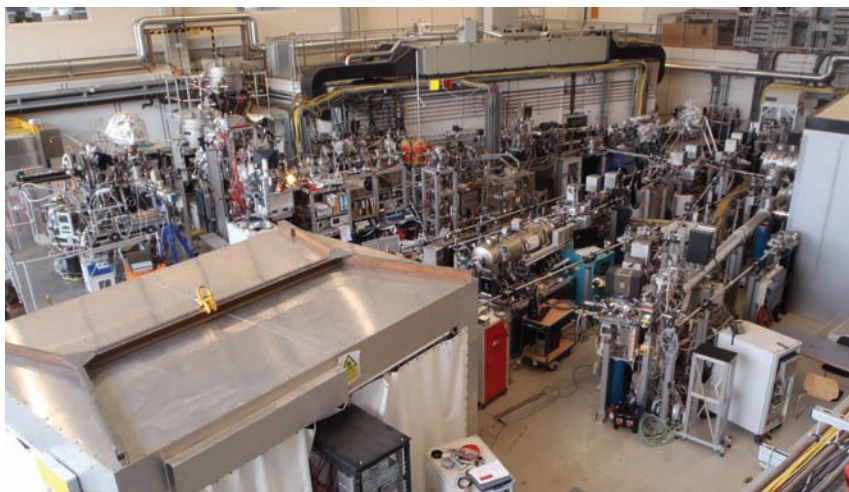
### Za obřím mikroskopem

Naše první cesta vedla do Hamburku, kde jsme měli domluvenou návštěvu německé částicové laboratoře DESY. Cesta z Prahy začala dle plánu. Celkem 16 lidí se naskládalo do dvou osobáků a jednoho mikrobuse. O „Mikrobu“ jeho majitel tvrdil, že s ním jezdí po Alpách a že jde o téměř nové auto, které je pro takovou cestu jako dělané. Dělané bylo, to ano. V očích jeho dočasných obyvatelů by však šlo před slovo dělané dát předponu „po“. To auto totiž nedošlo ani na hranice. V děčínském autoservisu museli opravovat ucpaný katalyzátor. To byl ale jen začátek. Vše vygradovalo daleko na severu, když za mnou Tomáš přišel s tím, že bude potřebovat asi novou „pnešku“. Zpočátku jsem nechápal, ale při pohledu na auto bylo jasno. Bylo potřeba vyměnit nikoli jednu, ale hned dvě „pnešky“. Něco takového jsem ještě neviděl. Pneumatiky sjeté natolik, že z nich čouhaly dráty z kordu. To téměř nové auto



*Nostalgie nočního Hamburku.*

*Optická laboratoř na výstupu laseru FLASH.*





*To nejsou popeláři, ale Aldebaran před vstupem na stavbu obřího evropského laseru XFEL.*

*Jeden z pěti tunelů, kterými bude přicházet laserové světlo z tříkilometrového laseru XFEL do podzemní experimentální haly.*



mělo gumy, které snad objely kolem dokola celou zeměkouli, jinak si to nedokážu představit. Škoda, že jsme ho neprohlédli před cestou a slepě věřili v mikrobovo mládí. Ne, že bychom tomu vozítku přáli něco zlého, ale s jistým zadostiučiněním jsme přijali fakt, že si při zpáteční cestě poněkud pošramotilo střechu, když v podpalubí traktu strhlo požární hlásič.

Vraťme se ale do Hamburku, kam dvě auta dorazila podle plánu za světla a jedno až po půlnoci. V Hamburku jsme strávili dva dny. V tomto největším

německém přístavu a druhém největším městě žijí téměř dva miliony obyvatel. Nachází se zde údajně přes 2 400 mostů. Nevím, nepočítali jsme je. Strávili jsme dvě noci v obřím hostelu v blízkosti nádraží a měli jsme to štěstí, že druhý večer probíhal festival STAMP, a tak to v ulicích žilo uměleckými představeními nejrůznějšího žánru: bubeníci, ohniví elfky, různé kapely nebo gymnasté. První večer jsme se prošli přístavem s pro nás tolik nezvyklými loděmi a všudypřítomnými jeřáby. K mání zde byla i ponorka U434, která sloužila jako muzeum a někteří z nás ji druhý den navštívili. Po oba večery nebylo možné přehlédnout ulici Reeperbahn plnou nevěstinců, prostitutek a obchodů se sexuálními pomůckami nejrůznějšího určení. Ulici jsme si přejmenovali na „Kurví díru“ – myslím, že to její náplní zcela odpovídalo.

Druhý den po příjezdu jsme vyrazili do DESY – malého vědeckého městečka uprostřed Hamburku. Nedokážu si představit, že by v Čechách fungovala částicová laboratoř s urychlovači uprostřed města, aniž by ekologičtí aktivisté neorganizovali mohutné demonstrace proti všemu a všem. Nicméně v Německu to jde.

Ve středisku DESY je řada unikátních zařízení. Kdysi největší urychlovač HERA, s obvodem prstence 6,4 km, je již minulostí. V současnosti je funkční poněkud menší PETRA III, urychlovač, který lemuje obvod kanceláří a vědeckých budov. Již po vstupu do

DESY návštěvníka upoutá řada exponátů vystavených v parku, které připomínají historii částicové fyziky. Spatřit tu můžeme detektor, bublinkovou komoru nebo monochromátor. My jsme se přijeli podívat především na čtvrtkilometrový laser FLASH. Je to v podstatě urychlovač elektronů, vystřelovaných do undulátoru, kde je magnety střídající se polarity vychylují z dráhy. Elektrony se pohybují po zvlhěné dráze a přitom vyzařují laserové světlo. Tedy světlo – jde o elektromagnetické záření na pomezí



Národní park Skuleskogen.

ultrafialového a rentgenového oboru. Signál je přiváděn do experimentální haly, kde se větví do mnoha optických lavic, na kterých se provádějí experimenty. Druhým lákadlem byla stavba většího příbuzného, tříkilometrového evropského laseru XFEL.

Princip je přibližně stejný jako u laseru FLASH. Laser se staví pod zemí, na konci se rentgenový signál větví do pěti tunelů, ze kterých přichází do v době naší návštěvy právě stavěné podzemní experimentální haly. Na zařízeních jako je FLASH a XFEL se mohou studovat extrémní stavy hmoty (jaké jsou například v nitru obřích planet nebo hvězd) nebo může rentgenové světlo posloužit k detekci struktur srovnatelných s jeho vlnovou délkou. XFEL se vlastně po dokončení stane největším mikroskopem světa, s rozlišením kolem 0,1 nm (současný FLASH má rozlišení cca 5 nm).

Takové rozlišení umožní poprvé přímo sledovat chemické reakce a dynamiku atomů a molekul. Jak poznamenal náš průvodce, smělé plány se uskuteční jen za předpokladu, že bude fungovat izolace proti spodní vodě. Jinak se namísto podzemní experimentální haly bude v Hamburku nacházet nejdražší bazén na světě.

Plní dojmů opouštíme následující den město. V supermarketu vrátíme prázdné plechovky od piva (to není akt zoufalství, ale ukázka fungujícího ekologického myšlení) a vydáváme se dál na sever vstříc dalším dobrodružstvím.

**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 čtvrtkilometrový laser na volných elektronech FLASH. Ve stavbě je tříkilometrový laser XFEL, do provozu by měl být uveden v roce 2015.

**XFEL** – rentgenový laser, jehož stavba započala v roce 2008, se nachází v blízkosti německého Hamburku a bude mít délku 3,4 km. Půjde o laser na volných elektronech. Elektrony jsou nejprve urychleny v lineárním urychlovači pomocí soustavy rezonančních dutin. Poté shluky elektronů s vysokou energií přijdou do undulátoru. Jde o speciální magnetickou strukturu, ve které se periodicky střídá orientace magnetického pole. Elektrony se pohybují po vlnovité dráze a přitom vyzařují synchrotronní záření v rentgenovém oboru. Emitované rentgenové paprsky vytvoří extrémně intenzivní laserový záblesk koherentního a monochromatického záření.





Příprava jídla.

**Laser na volných elektronech** – laser, v němž jsou zdrojem energie a zároveň aktivním prostředím urychlené elektrony. Ty procházejí polem magnetů (undulátorem), které zakříví jejich dráhu do tvaru vlnovky. Na takové dráze elektrony září v dopředném směru. Záření je zachyceno mezi zrcadly rezonátoru a nakonec poslouží jako laserový pulz. Takové lasery jsou snadno laditelné, což je ideální pro vědecké experimenty. Změnu vlnové délky lze docílit buď změnou energie elektronů, nebo změnou intenzity magnetického pole.

**Undulátor** – struktura periodicky se střídajících magnetů, která se využívá k vybuzení synchrotronního záření prolétávajícího svazku nabitých částic. Trajektorie částic se vlivem střídajícího se pole vlní a nabitě částice proto vyzařují. Pro velkou amplitudu oscilací částic se zařízení nazývá wiggler. Původně se undulátorem nazýval zapisovací přístroj pro podmořskou telegrafii sestavený Lauritzenem. Skládal se ze 4 vlnitých elektromagnetů se střídající se orientací a dvou otočných obloukovitých magnetů na hřídeli. Elektrický proud procházející vlnitými magnety vybudil pole, které otáčelo pohyblivými magnety, a jejich pohyb byl přenášen na zapisovací zařízení.

## Cesta na sever

Dlouhou cestu Švédskem jsme si zpestřili dvoudenní zastávkou v národním parku Skuleskogen, který se nachází na východním pobřeží. Park byl založen v roce 1984 a jeho rozloha činí 3 062 ha. Jde o unikátní soubor geologických útvarů a vzácných rostlinných a živočišných společenstev. Na jediném místě naleznete divoké soutěsky, morénová pole, jezera, hluboké lesy i romantické výhledy na moře. Stanování je povoleno jen

na vyhrazených místech, ale ta svému účelu skutečně slouží. Jsou zde dokonale vybavená tábořiště s ohništěm, nasekaným dřevem k volnému použití, přístřeškem proti dešti, ve kterém naleznete nejen základní vybavení, jako je sekera, ale i karimatky. Co kdyby si je náhodní turisté zapomněli? Pro středoevropana zvyklého na to, že co není připoutané řetězem, zmizí během deseti minut, je to nezvyklý zážitek. V parku je i několik chatek s palandami a základním vybavením, ve kterých lze zdarma přespát. My jsme tento luxus nevyužili.

Tam, kde to bylo možné, jsme si vařili sami. Hlavně proto, abychom ušetřili. Před expedicí jsme nakoupili v hypermarketu velké množství potravin ve slevových akcích. Taková konzerva texaského guláše získala po přidání poloviny pytlíku chilli natolik ďábelskou chuť, že i nejzarytější odpůrci museli uznat, že výsledek už rozhodně nechutnal jako psí žrádlo, a přestalo jim vadit i koňské maso avizované na obalu plechovky.

Jen neradi jsme opouštěli nádherný park a vydali se na další pouť. Polární kruh přejždíme za hustého deště. Symbolické bouchnutí šampusu a cesta nás vede do městečka Pajala, kde máme objednaný kemp. Není kemp jako kemp. Severské kempy jsou vybavené chatkami s topením, ledničkou a minikuchyňkou, to vše za cenu, která odpovídá ubytování ve stanu u nás doma. V Pajale bychom mohli vidět polární záře, ale počasí nám nepřeje, déšť nás provází na každém kroku. Druhý den odjždíme do Kiruny, část se vydává za bránu kosmodromu Evrop-



ské kosmické agentury, zbytek pokračuje v cestě. Cílem jsou norské Lofoty, kde máme na několik dní pronajatý domek pro 16 lidí. Podle původního plánu mělo jít o hlavní stanoviště pro pozorování polárních září. Jenže prší, prší a prší.

Jednoho dne jsme na internetu zjistili, že by asi 30 kilometrů od nás měla být větší díra v mracích. Je po půlnoci a my se rychle auty přesouváme na vyhlédnuté stanoviště. Parta šestnácti podivných individuí ze vlujících za deště na parkovišti neunikla bystrému oku policejní hlídky. Nejvíce je zaujal – jak jinak – náš mikrob. Po chvíli se vše vyjasňuje. Tedy nikoli obloha, ale náš vztah k policistům. V podobné dodávce totiž nějaká parta Poláků vykrádala místní chaty...

Deštivé dny trávíme různými výlety do okolí. Jeden z nich, kterého jsem se zrovna nezúčastnil, zavedl část z nás na sobí farmu. Zde spolu se soby žila podivná bytůstka, snad vědma či čarodějnice ze severských pohádek. Na dotaz, jaké máme šance spatřit polární záře, prý reagovala poněkud nezvykle: promnula nejbližšímu sobovi pohlavní žlázy a pravila známou větu: „Zítřka bude hezky, zítřka by to šlo!“ My středoevropané jsme zvyklí na věštění z koulí jiných, křišťálových, i když účinnost takové věštby je velmi nejistá. Jak se ukázalo, severské věštby jsou mnohem sofistikovanější, v našem případě stoprocentní. Druhý den jsme totiž odjeli z Lofot a večer se nám skutečně podařilo poprvé pozorovat polární záře.

## Polární záře

Polární záře severní, *Aurora Polarioris Borealis*, je jev, za kterým se vyplatí jet přes půl Evropy. My jsme z Lofot jeli nejprve do Tromsø, nádherného města na ostrově, kde v podzemí naleznete ještě jeden svět, svět tunelů a křižovatek, v němž nechybí ani kruhové objezdy. Na povrch vyjedete zkrátka jen tam, kde to potřebujete. V Tromsø je Univerzitní muzeum, ve kterém uvidíte polární záře za každého počasí. Mají tu totiž kopii Birkelandovy



*Terrela v Tromsø je zárukou polárních září za každého počasí. Jde o napodobeninu Země s elektromagnetem, která je umístěna ve vakuové komoře. Při ostřelování elektrony se v polárních oblastech vytvoří ve zbytcích plynu plošný výboj, který připomíná polární záři. Terrelu poprvé zkonstruoval na počátku 20. století norský fyzik Christiaan Birkeland. Dnes je Birkeland s terrelou vyobrazen na norské dvousetkorunové bankovce.*

*Polární záře v Birtavarre dne 10. září 2012.*



**Aurorální ovál** – excitovaná oblast na přibližně 70. stupni magnetické šířky. Aurorální ovál může být široký až 5°. Nejlépe je viditelný v UV záření z kosmického prostoru. Aurorální ovál může být různě deformovaný. Jeho intenzita souvisí přímo se sluneční aktivitou. V období zvýšené sluneční aktivity se v oblasti aurorálního oválu vytvářejí nádherně strukturované polární záře. Polární záře mohou vznikat ojedinelé i mimo aurorální ovál, potom mají ale výrazně chudší strukturu. Z fyzikálního hlediska je aurorální ovál oblastí elektrických proudů tekoucích podél magnetických siločar Země.

*Pod aurorálním oválem. Jeho struktura je dobře patrná.*



terrely, malé napodobeniny Země, na které lze demonstrovat vznik polárních září.

Z Tromsø jsme jeli do kempu v Birtavarre. Krásný kemp u úpatí hor. Pro jistotu stavíme hlídky – co kdyby měla severská čarodějnice pravdu a vyčasil se... Hluboko po půlnoci nás Dan budí. Začíná jedno z nejkrásnějších nebeských divadel. Elektronky slunečního větru excitují atmosféru, a ta se ve výšce od 70 do 1 000 kilometrů rozzáří stěnami polárních září. Kolem 70. magnetické rovnoběžky svítí aurorální ovál, ze kterého vybíhají vlnící se stěny připomínající barevné záclony ve větru.

Zpočátku pozorujeme našedlý pás, který je stále výraznější. Je to aurorální ovál, jenž se právě začíná aktivovat. Po dvaceti minutách se rozvlní zelenými záclonami polárních září. Někteří fotografují, jiní se jen kochají. Fotografování je obtížné. Polární záře se mění v časovém horizontu desítek sekund. Na snímcích s krátkou expozicí je vidět velmi málo, snímky s dlouhou expozicí jsou rozmazané. Je třeba experimentovat a nalézt zlatou střední cestu. Máme velké štěstí, aurorální ovál se pomalu přesouvá nad nás a my můžeme spatřit jeho vrstevnatou strukturu. Nálada je výborná a všichni víme, že ať už nás potká cokoli, naše expedice byla úspěšná.

### Měděný důl

Po krátké zastávce na Nordkappu, nejsevernějším místě Evropy, míříme Finskem na jih. Jeden z objednaných a předem zaplacených kempů je zavřený, ale to nám zkazit náladu nemůže. Nalézáme jiný kemp, ve kterém jsou luxusní chatky se saunami. Společnost pronajímající kempy uznala po našem návratu svou chybu a nejenže vrátila peníze, ale doplatila i rozdíl v ceně obou kempů.

Při cestě na jih pozorujeme polární záře ještě jednou, tentokrát v krásné scénérii nad hladinou jezera. Z chatky jsem vyběhl tak rychle, že se mně ji podařilo zabouchnout a klíč nechat uvnitř. Situaci zachránil telefonát majitelce kempu, která ve dvě ráno přijela s úsměvem na tváři z deset kilometrů vzdálené vesnice a zachránila nás. V té době se k nám přidal Jirka, jeden z mých bývalých studentů, který před nástrahami živelně se rozvíjejícího tržního kapitalizmu v naší vlasti raději přesídlil do stabilnější ekonomiky finského Tampere.

Společně jsme navštívili měděný důl Pyhäsalmi, který je jedním z největších měděných dolů v Evropě. Jeho hloubka je 1440 metrů a je provozován těžební společností Inmet Mining. Společnost byla založena v Kanadě, dnes provozuje finský důl Pyhäsalmi, turecký důl Cayeli, španělský důl Las Cruces a ve stavbě je panamský důl Cobre. Těžební průzkum se provádí ve Finsku, Chile, Mexiku a Peru. Vedlejším produktem těžby mědi je zinek, stříbro a především síra. Do spodní části dolu se lze dostat šachtou „Timo“, ve které jede výtah rychlostí 12 metrů za sekundu. V hloubce téměř 1,5 kilometru je hornická jídelna, kde jsme měli oběd. Po prohlídce činné části dolu jsme se odebrali do hloubky „pouhých“ 75 metrů, kde se staví experiment EMMA. Zatím jsou v provozu dvě měřicí budky, brzo jich bude pět a další postaví v hloubce 45 metrů. V budkách jsou detektory mionů, které pocházejí ze sekundárních spršek kosmického záření. Jde o dvě dvojité vrstvy plynových detektorů a jednu dvojitou vrstvu plastových scintilačních detektorů. Ve vzdálenější budoucnosti by zde měl přibýt ještě detektor neutrin přilétajících z 2 000 kilometrů vzdáleného střediska evropského jaderného výzkumu CERN.

Na první pohled je patrné, že místní parta fyziků patří mezi nadšence, kteří s omezeným rozpočtem dokážou divy. Zápal pro věc je totiž základní podmínkou úspěchu a peníze jsou sice potřebné, ale ne vždy rozhodující.

## Zpátky domů

Z Pyhäsalmi odjíždíme do Tampere, navštívit Jirkův nový domov. Jeho manželka připravila vynikající guláš a my sbírali síly na poslední část cesty. Brzo ráno jsme vyrazili na trajekt z Helsinek do estonského Tallinnu. Změna životní úrovně obou zemí byla znát na první pohled. Posledním astronomickým zážitkem expedice se stala prohlídka jednoho z Ilumetských kráterů. Nazývá se Pekelný hrob. Vzniknul po dopadu

**Polární záře** – světelný atmosférický jev, při kterém je atmosféra excitována elektrony slunečního větru a následně svítí. Nejčastější je vlnová délka 557,7 nm neutrálního kyslíku, která způsobuje zelenou barvu polárních září. Polární záře se vyskytuje od výšky 70 km do přibližně 1 000 km. Polární záře v severovýchodních oblastech se správně nazývají Aurora Polaris Borealis, ve vysokých jižních šířkách Aurora Polaris Australis.

Čert u vstupu na naučnou stezku vedoucí k jednomu z Ilumetských kráterů.







*Pekelný hrob – dně kráteru vzniklé před 6 000  
lety po dopadu meteoritu: Litva, Ilumetsa.*



meteoritu přibližně před 6 000 lety. Průměr má 75 až 80 m a hloubku 12,5 m. Jeho podloží je porušeno do hloubky asi 30 m. Okrajový val vystupuje až 4,5 m nad úroveň okolního terénu. Na dně kráteru leží přes dva metry usazenin, které tvoří malou bažinu. Přístupová cesta je lemována dřevěnými sochami. Většinou znázorňují čerty. Belzebub u vstupní brány třímá nad hlavou kámen – meteorit, který se chystá vrhnout před sebe.

Prohlížíme si kráter a všichni víme, že dobrodružství končí. Snad se zase setkáme někdy v časech příštích na další expedici s neméně vznešenými cíli. Nyní nám zbývá už jen cesta Polskem domů a po ní návrat do české reality.

■ Petr Kulhánek, 10. 5. 2014



*Stravovat se dá všude, i na parkovišti.*



## II. ZE ŽIVOTA HVĚZD





## Rození obří hvězdy v Pravítku

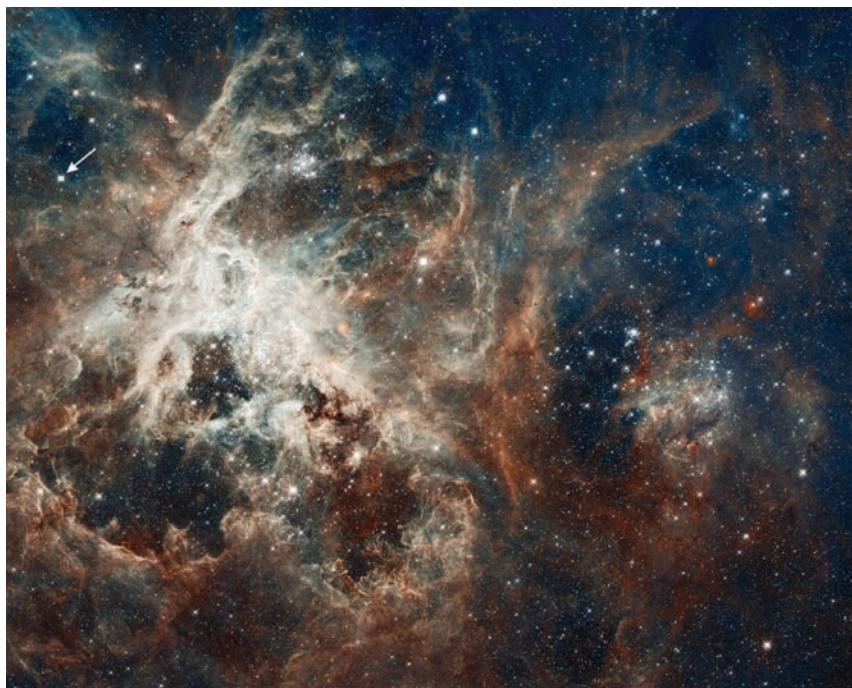
**Svitivost hvězdy** – zářivý výkon hvězdy. Roste se čtvrtou mocninou povrchové teploty hvězdy. Pokud hovoříme o bolometrické svítivosti, jde o výkon vyzařovaný v celém elektromagnetickém spektru.

Nejhmotnější známý hvězdný systém R144 (pravděpodobně binární). Nachází se v mlhovině Tarantule ve Velkém Magellanově oblaku. Najdete ho v levé horní části snímku a je označen šipkou. Zdroj: HST.

Hvězdy vznikají zhuštěním mezihvězdné látky. Čím větší porce mezihvězdné matérie je schopna se zkoncentrovat do hustot, v nichž pak neustálým navyšováním tlaku dojde ke spuštění termonukleárních reakcí, tím větší nová hvězda se narodí. Co se týče rozměrů, jsou známy hvězdy velké jako sluneční soustava. V takovém případě jde ale spíše o objekty podobné svojí průměrnou hustotou mlhovinám. Co do hmotnosti seskupené do jediného objektu je ale velikostní rozpětí mnohem menší. Největšími dosud známými hvězdami jsou objekty několikasetnásobně hmotnější než Slunce. Není příliš jasné, zda a kde má hmotnost takto velkých objektů svoji hranici. Donedávna byla za hranici hmotných hvězd, které se ještě nezhroutí vlastní vahou do sebe a jsou schopny svítit do okolního prostoru, považována hodnota někde mezi 100 až 150 ekvivalenty hmotnosti Slunce.

### Dosavadní rekordman – R144

Za dosud nejhmotnější pozorované hvězdy jsou dnes považovány složky soustavy R144 v souhvězdí Mečouna na jižní obloze. R144 vypadá v dalekohledu jako hvězda v oblasti 30 Doradus (mlhovina Tarantule) ve Velkém Magellanově oblaku. Velmi pravděpodobně jde, díky její vysoké svítivosti a silnému záření v rentgenovém oboru, o binární systém, i když zatím nebyla přesně stanovena vzájemná doba oběhu potenciálních složek. Nabízí se interval mezi dvěma až šesti měsíci, nelze ale, pokud by složky obíhaly





po extrémně výstředné dráze, vyloučit ani periodu delší jednoho roku. Podle vysoké svítivosti systému, která odpovídá zhruba šesti milionům svítivosti Slunce, lze odhadovat celkovou hmotnost v intervalu mezi 200 až 300 hmotnostmi slunečními. To činí R144 nehmotnějším známým hvězdným systémem, který byl dosud pozorován. Odhaduje se, že v době svého vzniku dosahovala soustava více než 400 slunečních hmotností.

Prozatím předpokládaný scénář nově vznikající hvězdy srovnatelných obřích rozměrů však nebyl až donedávna potvrzen pozorováním. Nově vybudovaná síť radioteleskopů ALMA, pracující v mikrovlnné oblasti, nabídla astronomům pohled do nitra zárodečného prachoplyného oblaku, v němž by mohla podobně mohutná hvězda či hvězdná soustava vznikat právě v současné době. Jde o oblast pojmenovanou SDC 335.579-0.292 (*Spitzer Dark Cloud* – Spitzerův temný oblak) v souhvězdí Pravítka na jižní obloze.

## Spitzerův temný oblak v Pravítku

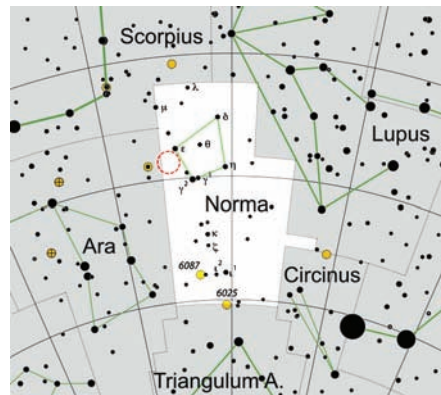
Uvnitř temného prachového oblaku narůstá protohvězdné jádro, které je obkružováno dlouhými vlákny hustého materiálu. Prostřednictvím těchto vláken je z okolního prostoru nasáváno všechno, co se později stane zárodkem nově se zrodivšího hvězdného obra. Hmotnost zachycovaného okolního materiálu, která tvoří jednotlivé filameny, se odhaduje v jednom každém vlákně na stovky hmotností slunečních. Oblak a jeho vláknitá struktura byly nejprve objeveny Spitzerovým vesmírným dalekohledem a také zkoumány Herschelovým dalekohledem. Ale teprve až síť radioteleskopů ALMA pro submilimetrovou oblast dokázala zobrazit mnohem podrobněji centrální oblast celého systému, v níž roste hvězdný otesánek. Díky pozorování ALMA se podařilo stanovit přesnější hmotnosti vznikajícího systému a odhadnout pomocí numerických simulací také jeho budoucí vývoj.

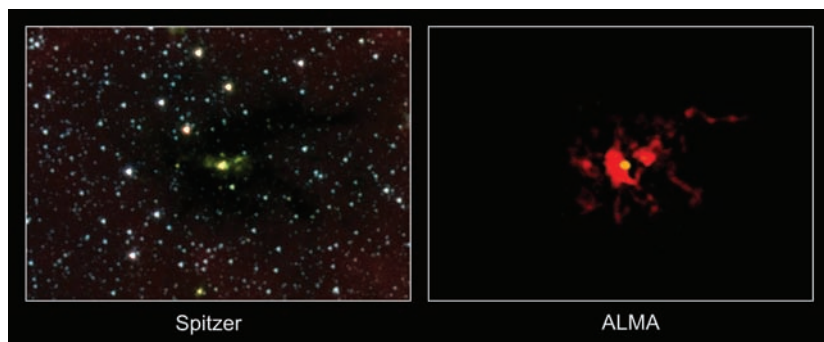
Z prozatím provedených pozorování je patrné, že do centrální oblasti stále proudí několika dlouhými vlákny materiál rychlostmi zhruba do 1 km/s. Množství látky, které takto neustále padá do centra z okolí, se odhaduje na  $2,5 \times 10^{-3} M_{\odot}$  ročně. Celý proces by vydržel probíhat podle dosud provedených výpočtů zhruba 300 000 roků. Hmotnost pozorovaných jader byla odhadnuta na několik stovek až něco přes tisíce hmotností Slunce a je pravděpodobné, podle různých scénářů, jimiž by se mohlo kolabování oblaku ubírat, že zde vnikne obří hvězda hmotnostně

**Velký Magellanův oblak** – *Large Magellanic Cloud (LMC)* je trpasličí souputník naší Galaxie ve vzdálenosti 180 000 ly. Jde o nádherný objekt viditelný spolu s Malým Magellanovým oblakem na jižní obloze.

**ALMA** – *Atacama Large Millimeter Array*. Síť 66 radioteleskopů o průměru 12,5 metru, kterou vybudovala Evropská jižní observatoř (ESO) v chilských Andách ve výšce 5 100 m nad mořem na planině Lano Chajnantor v blízkostech 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.

Oblast Spitzerova temného oblaku v souhvězdí Pravítka (*Norma*) je označena červeným čárkovaným kroužkem. Oblast je vzdálena 11 000 světelných roků, její velikost je zhruba 8 světelných roků a celková hmotnost je odhadována na  $5\,500 M_{\odot}$ . Zdroj: ESO.

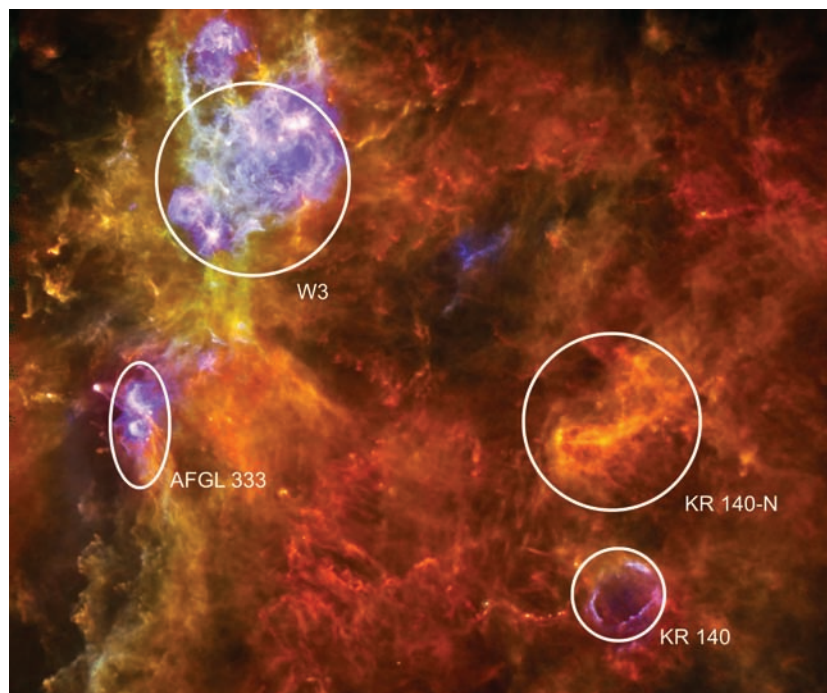




Pozorování SDC 335 Spitzerovým dalekohledem a sítí ALMA. Zorné pole obou obrázků je stejné. Zdroj: ESO.

srovnatelná s 50 až 100 slunečními hmotnostmi. Jde o jedinečný případ zrodu takto obrovské hvězdné soustavy, který máme možnost pozorovat v přímém přenosu. Radioteleskopická síť ALMA, která je nejlepším současným přístrojem pro milimetrovou oblast, bude soustavu SDC 335 sledovat průběžně. V budoucnu tak s větším časovým odstupem od prvních napozorovaných dat bude určitě celý proces vzniku obrovitých hvězd popsán mnohem podrobněji. Jde o unikátní pozorování, jelikož obří hvězdy žijí velmi krátkým životem. Možnost jejich sledování je tak omezena na, z astronomického hlediska, velmi krátké okamžiky, v němž se v Galaxii rozsvítí a po krátké době zakončí svůj život jako supernovy či hypernovy.

■ Ivan Havlíček, 12. 7. 2013,  
AB 20/2013



Oblast hustých molekulárních oblaků v Perseově spirálním galaktickém rameni. Zakresleny jsou obrovité hvězdné líhně vytípané Herschelovým dalekohledem, v nichž by bylo možné nalézt v budoucnu také nově vznikající obří hvězdy. Oblast W3 je vzdálena 6 200 světelných roků. Byly zde nalezeny obdobné struktury jako v podrobněji zkoumané oblasti SDC 335. Zdroj: ESA.

## V molekulárním mračnu v Plachtách vznikají hvězdy ve vláknech

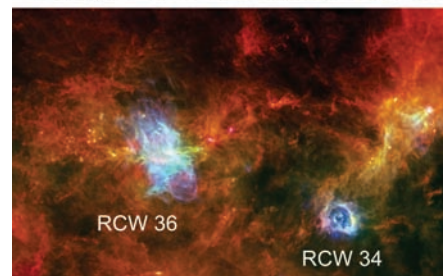
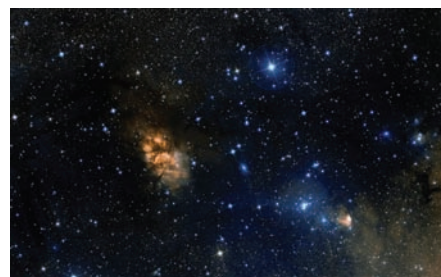
Přibližně v rovině naší Galaxie se v souhvězdí Plachet ve vzdálenosti 2300 světelných roků nachází velmi rozsáhlé molekulární mračno. Ve viditelném oboru je zde vidět několik mlhovin a jinak jen hvězdy. Pohled v dalekém infračerveném oboru ale odhalí rozsáhlé oblasti plynu a prachu, které jsou formovány do viditelných vláknitých propletenců, v nichž vznikají uzlíky se zárodky hvězd. Takový obraz vzniku hvězd je zcela odlišný od klasického scénáře, při kterém vznikají hvězdy ze sférických zhuštěnin zárodečné mlhoviny, jež jsou nadále gravitačně smršťovány až do zárodečné protohvězdy. Objev vláknitých struktur umožnila infračervená Herschelova vesmírná observatoř, která byla se svým zrcadlem o průměru 3,5 metru dosud největším dalekohledem vynesným do vesmíru.

### Infračervené snímkování

Pro pochopení vzniku hvězd je nutné pořizovat snímky oblohy v submilimetrové oblasti. Chladný plyn a prach v mlhovinách, ze kterých hvězdy vznikají, totiž září jen v infračerveném oboru. Samotného prachu nebývá ve hvězdných porodnicích mnoho, ale o to větší je jeho důležitost. Na rozdíl od jednotlivých atomů a molekul září prach v kontinuu a z kolabující zárodečné mlhoviny odvádí zářením podstatnou část uvolňované energie. Jedině tak se může oblast s rodícími se hvězdami smršťovat i nadále. Herschelův dalekohled pracoval od roku 2009 až do roku 2013, kdy došlo kapalně helium nutné pro chlazení přístrojů. Měl na palubě tři přístroje, které pokrývaly rozsah vlnových délek 55 až 672  $\mu\text{m}$ . V infračerveném oboru také probíhá snímkování za pomoci balónového experimentu BLAST, který má „jen“ dvoumetrové zrcadlo. Pozoruje vždy několik dní ve vysokých výškách, kde již není infračervené záření pohlcováno atmosférou. První testovací let proběhl v roce 2003 v Novém Mexiku, v roce 2005 startoval BLAST z kosmodromu u švédské Kiruny, v roce 2006 z Antarktidy a zatím poslední let na konci roku 2010 odstartoval opět z Antarktidy. Není bez zajímavosti, že v ohnisku slouží jako detektor bolometrické pole vyvinuté pro

**BLAST** – Balloon-borne Large-Aperture Submillimeter Telescope. Jde o dvoumetrový dalekohled pro dalekou infračervenou a submilimetrovou oblast, který je vynášen do výšky cca 30 km balónem. Přístroj má za sebou 4 lety (2003, 2005, 2006, 2010), z toho poslední tři vědecké. Dalekohled snímkuje oblohu na vlnových délkách 250, 350, a 500  $\mu\text{m}$ . Hlavním cílem projektu je výzkum vzniku hvězd a galaxií. Na projektu se podílejí vesmírné agentury NASA a CSA a univerzity z USA, Kanady, Velké Británie a Mexika.

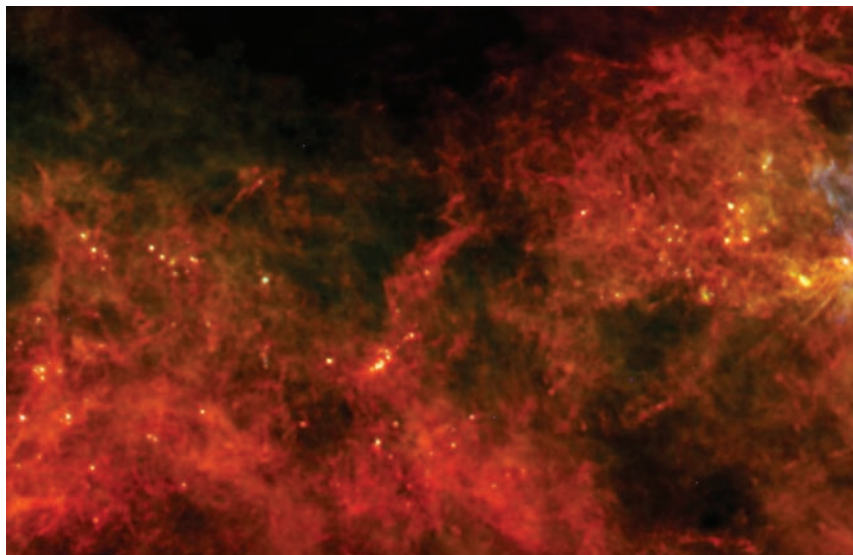
Oblast Vela C fotografovaná v optickém (nahoře) a vzdáleném infračerveném (dole) oboru. Plyn a prach, ze kterého vznikají hvězdy, je vidět pouze v infračerveném oboru. Zdroje: DSS 2, Herschel.





**Herschelova vesmírná observatoř** – observatoř Evropské kosmické agentury, která byla vynesena do vesmíru 14. května 2009. Šlo o obří infračervenou observatoř se zrcadlem o průměru 3,5 metru, která byla umístěna do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce. Observatoř pokrývala obor vlnových délek od 55  $\mu\text{m}$  do 672  $\mu\text{m}$  a byla pojmenována po vynikajícím anglickém astronomovi a objeviteli infračerveného záření Williamu Herschelovi. Šlo o vůbec největší dalekohled umístěný lidstvem ve vesmíru. Herschelův vesmírný dalekohled pracoval do roku 2013, kdy došlo kapalně helium nutné k chlazení přístroje.

Detail oblasti západně od mlhoviny RCW 36, kde jsou patrné protohvězdy a předhvězdná jádra.



přístroj SPIRE na observatoři Herschel (pokryje vlnové délky 250, 350 a 500  $\mu\text{m}$ ). Oba obří přístroje tedy mají něco společného.

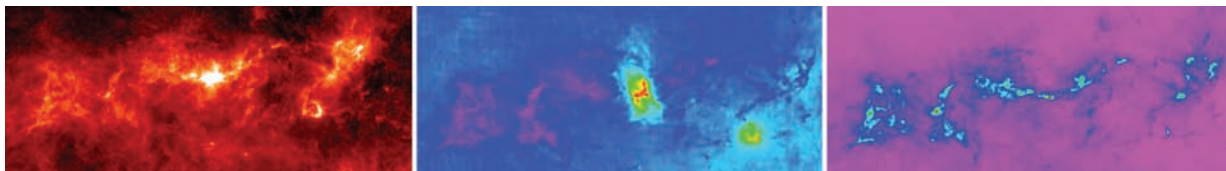
## Hřeben molekulárních mračen v Plachtách

Napříč souhvězdím Plachty se na jižní obloze táhne podél roviny Mléčné dráhy hřeben molekulárních mračen, která vyniknou na infračervených snímcích. Oblast má na délku  $10^\circ$  a je široká  $4^\circ$ . Ve viditelném oboru jsou patrné jen velmi malé části, které osvětila některá z již vzniklých hvězd. Celý hřeben poprvé detailně zmapoval balónový dalekohled BLAST. Skládá se z několika oblastí, z nichž nejhustší je označována písmenem C (Vela C). Právě na podrobné snímkování oblasti Vela C, která se nachází ve vzdálenosti 2 300 světelných roků, se v roce 2011 zaměřila Herschelova vesmírná observatoř.

Snímkování probíhalo paralelně přístroji PACS (na vlnových délkách 70 a 160  $\mu\text{m}$ ) a SPIRE (250, 350 a 500  $\mu\text{m}$ ). Podrobná analýza snímků byla provedena v letech 2011 a 2012. V oblasti VELA C jsou ve vizuálním oboru dobře patrné dvě mlhoviny – jasnější RCW 36 a méně jasná RCW 34. Obě tyto mlhoviny jsou dobře patrné na nejkratší vlnové délce, která je kódována modrou barvou, i na kombinovaném snímku z Herschla. RCW 36 je částí molekulárního mračna VELA C, ale dodnes není jasné, zda RCW 34 do oblasti patří, nebo zda se do místa jen promítá z větší vzdálenosti.

Z analýzy se ukázalo, že v oblasti vznikají jak hvězdy málo hmotné, tak obří hvězdy s hmotnostmi 10 až 20 hmot slunečních. Vzniklé hvězdy jsou staré méně než milion roků, tedy z astronomického hlediska velmi mladé. Největším překvapením byla předhvězdná jádra kopírující hustá, složitě propletená vlákna. Je jasné, že nejprve nějakým mechanismem vznikla tato vlákna a že nešlo o gravitační interakci. Ke vzniku vlá-





Mapa teploty (uprostřed) a koncentrace (napravo) v oblasti VELA C. Celou oblast lze rozčlenit na pět samostatných celků (hnízd a mostů). Zdroj: ESA.

ken snad mohly přispět toky a turbulence látky za přítomnosti magnetického pole. Teprve poté začal zrod hvězd v nejhustších oblastech těchto vláken. Jasně flíčky patrné ve vláknech jsou buď předhvězdná jádra, nebo oblasti, ve kterých již vznikají první protohvězdy.

Je možné, že podobná síť bude objevena i v jiných hvězdných porodnicích (mlhovinách s překotnou tvorbou hvězd) a že alespoň v některých mlhovinách nevznikají hvězdy kolapsem kulových oblastí, ale z uzlíků lineárních vláken. Pokud by byl takový scénář potvrzen u více mlhovin, znamenalo by to, že se na zrodu hvězd podílejí výraznou měrou i nelineární síly a klasický scénář kolapsu části mlhoviny na zárodečnou globuli a poté protohvězdu bude třeba pozměnit.

■ Petr Kulhánek, 26. 10. 2012, AB 40/2012

**Infračervené záření (IR)** – obor elektromagnetického spektra, který objevil v roce 1800 William Herschel při rozkladu slunečního světla hranolem. Zjistil, že za červenou barvou existuje další záření, které zahřeje teploměr. Infračervené záření má vlnovou délku v rozsahu od  $0,75 \mu\text{m}$  do  $400 \mu\text{m}$ . Typickými útvary s touto velikostí jsou například prvoci. IR záření využíváme v infrazářičích, v infrolampách, při infraterapii, v dálkových ovladačích, v termovizí, v čídelech na zloděje, v dálkových teploměrech a při dálkovém průzkumu Země. V astronomii se využívá IR záření k výzkumu meziplanetární hmoty, planetárních atmosfér, plynu a prachu v galaxiích, hvězdných porodnic, hnědých trpaslíků, červených veleobrů, exoplanet, protoplanetárních disků a mlhovin. IR záření prochází zemskou atmosférou jen částečně, v tzv. oknech.



## Mladé hvězdy a planety vyrůstají společně

**Exoplaneta** – extrasolární planeta, planeta obíhající okolo jiné hvězdy, než je naše Slunce. Jejich existence byla předpovězena dlouhou dobu, první exoplaneta byla ale objevena až v roce 1995. Do dubna 2014 bylo objeveno přibližně 1 800 exoplanet. Většinou jde o velká tělesa s hmotností a velikostí jen o málo menší, než mají hnědí trpaslíci.

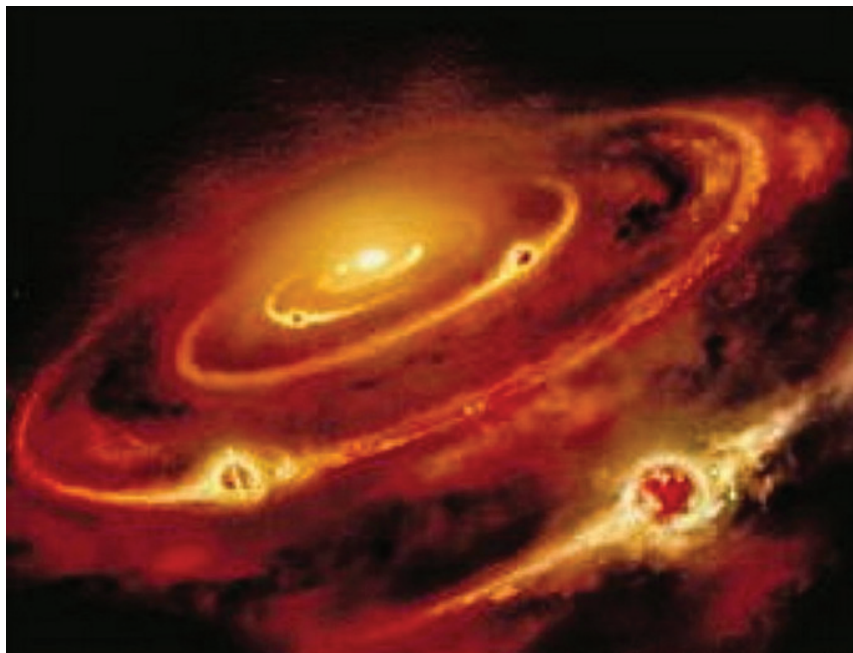
Nesoulad mezi poměrem hmotností hvězdy a planet a poměrem jejich pozorovaných momentů hybnosti by mohl být odstraněn, pokud by mladá hvězda vznikla jen z vnitřní kulové souměrné části. Ani tento koncept ale nevysvětluje vše, co v planetárních soustavách pozorujeme. Zdroj: Tufts University.

Utváření planetární soustavy je děj, který je dnes již všeobecně přijímán jako počátek existence planet kroužících kolem hvězdy. Že takový děj musí existenci planetárního systému předcházet, objevovali přírodovědci pomalu a postupně teprve od sedmáctého století. První ucelená teorie, jejíž základy popsali pánové Emanuel Swedenborg, Immanuel Kant a Pierre-Simon Laplace, pochází ze století osmnáctého a až do druhé poloviny dvacátého století přetrvávala bez výraznějších změn. Této teorii se říká *nebulární* nebo také česky mlhovinová. Ve hrubém zjednodušení se podle tohoto popisu celý planetární systém utvořil zhuštěním obrovského oblaku mezihvězdného prachu a plynu, jehož rozlehlost zaujímal o několik řádů větší prostor než výsledná oblast, v níž krouží kolem zrodivší se hvězdy velké planety. Ve zhuštěném materiálu převládá jeden orientovaný rotační pohyb, díky němuž

došlo ke vzniku plochého rotujícího prachového disku. Z tohoto útvaru se pak za vydatného přispění záře mladé a bujné hvězdy zahustily a gravitací dokulatilily velké planety. Všechny zbylý materiál, který nepojala hvězda a který nespotebovaly ke svému růstu velké planety, byl vykázan na okraj dynamicky se rozvíjející a přetvářené centrální, ale jinak velmi prázdné planetární zóny, kde se potuluje dodnes.

### Nedostatky nebulární teorie

V naší sluneční soustavě bylo možné srovnáním rotace Slunce a dynamiky ostatních planet již v devatenáctém století objavit



rozpor, který výše uvedený scénář nedokázal nijak vysvětlit. Většinu momentu hybnosti systému totiž nesou planety a Slunce rotuje naopak příliš pomalu, i když pro sebe uchvátilo více než 99 % hmotnosti celé soustavy a rozdělení momentu hybnosti by tomu mělo rámcově odpovídat. Postupně byly nabízeny různé dílčí úpravy nebulární teorie, ale v principu zůstal scénář vzniku soustavy zhuštěním velmi řídkého oblaku mezihvězdné látky stále aktuální.

Koncem dvacátého století začíná být konečně tato teorie ověřována i mimo naši sluneční soustavu, a to zejména pozorováním planet u cizích hvězd. Díky systematickému vyhledávání exoplanet vesmírnými observatořemi Kepler, COROT a jinými moderními přístroji je dnes možné vznik planetárních systémů pozorovat přímo. Pro pozorování exoplanet a jejich okolí jsou využívány nejen velké optické dalekohledy opatřené adaptivní optikou, které jsou schopné extrémního rozlišení až setin úhlové sekundy, ale také rádiové teleskopy a radioteleskopické sítě, jako například nejmodernější síť ALMA zprovozněná na konci roku 2012.

## Hvězda HD 142527

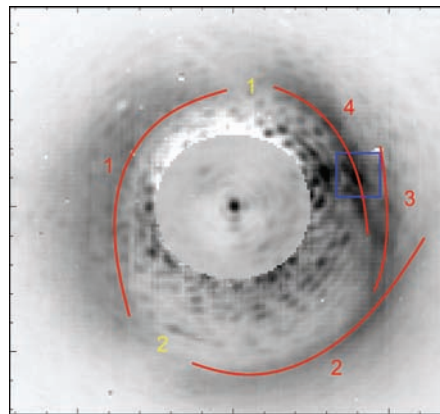
Mladý systém kolem hvězdy HD 142527 ve vzdálenosti 450 světelných roků je od nás natolik blízko, že je možné v jeho protoplanetárním disku pozorovat dynamické změny celkové struktury. Pomocí koronografu NICI na dalekohledu Gemini South byl uvnitř souvislého plynného obalu těsně kolem hvězdy zjištěn malý vnitřní disk do vzdálenosti 10 au. Odtud se trhliny či mezery táhnou až do vzdálenosti 140 au, kde začíná opět souvislý vnější disk, jehož vnější okraj dosahuje poloměru alespoň 300 au. Postupné snímkování ukázalo dynamické změny trhlin a také náznaky spirálových ramen ve vnějším disku, které se s postupujícím časem vyvíjejí. Na základě hydrodynamických simulací by mohla být příčinou této struktury velká planeta odpovídající desetinasobné hmotnosti Jupiteru a pohybující se zhruba ve vzdálenosti 90 au od centrální hvězdy. Matematickými simulacemi byla vyloučena planeta do vzdálenosti 35 au.

Vnitřní disk, v němž je usazena centrální hvězda, musí být, vzhledem k jejímu vyzařovanému výkonu, neustále doplňován plynem z vnějších oblastí. Pokud by se tak nedělo, vlivem akrece na hvězdu by tento disk nevydržel stabilní déle než rok. Vnější disk je tedy jakýmsi zásobníkem, ze kterého postupně mladá hvězda saje látku a roste.

**Gemini** – dvě observatoře se zrcadly o průměru 8,1 m. Na severní polokouli je Gemini-N (Mauna Kea, Havaj, 4100 m) a na jižní polokouli Gemini-S (Cerro Pachón, Chile, 2 737 m). Oba dalekohledy byly uvedeny do provozu v roce 2000 a využívají, tak jako všechny současné velké dalekohledy, systém adaptivní optiky.

**COROT** – COnvection ROfation and planetary Transits, evropská družice, která vznikla na základě spolupráce Francouzské kosmické agentury a Evropské kosmické agentury. Hlavní úlohou je hledání exoplanet. Název má připomínat francouzského malíře Jeana Baptista Camilla Corota. Družice startovala na konci roku 2006 z kosmodromu Bajkonur. Družice je ve výšce 900 km, má hmotnost 670 kg a dalekohled o průměru 27 cm. Doba mise se předpokládala na 2,5 roku, ale postupně byla prodloužována až do roku 2015. V roce 2012 bylo ztraceno spojení se sondou. Pokusy o jeho obnovení byly zatím neúspěšné.

Systém HD 142527 na infračerveném snímku ve světle  $H_2$  z dalekohledu Gemini South. Žlutá čísla 1, 2 označují mezery ve struktuře disku, červené křivky očíslované od 1 do 4 zvyrazňují spirální ramena disku. Modrý čtvereček označuje zhuštění – uzel – ve spirálním rameni. Zdroj: Chilská univerzita.



**Kepler** – sonda NASA z roku 2009 určená především pro vyhledávání exoplanet. Na palubě má Schmidtův dalekohled o průměru 1,5 metru a foto-metr složený z 42 CCD čipů. Pozoruje fixní výsek oblohy v souhvězdí Labutě o průměru 12°. V roce 2012 byla mise prodloužena do roku 2016. V roce 2013 nastala porucha na mechanické části, kvůli které byla činnost dalekohledu dočasně ukončena a hledají se možnosti dalšího využití.

Systém HD 142527 nakreslený podle dat napozorovaných radioteleskopy ALMA. Vnější plynný hustý disk jako zásobárna látky pro rostoucí slunce je propojen plynnými mosty s centrální oblastí. Planety, které mosty udržují, aby jimi látka mohla proudit, jsou zakresleny červeně. Zdroj: NRAO.



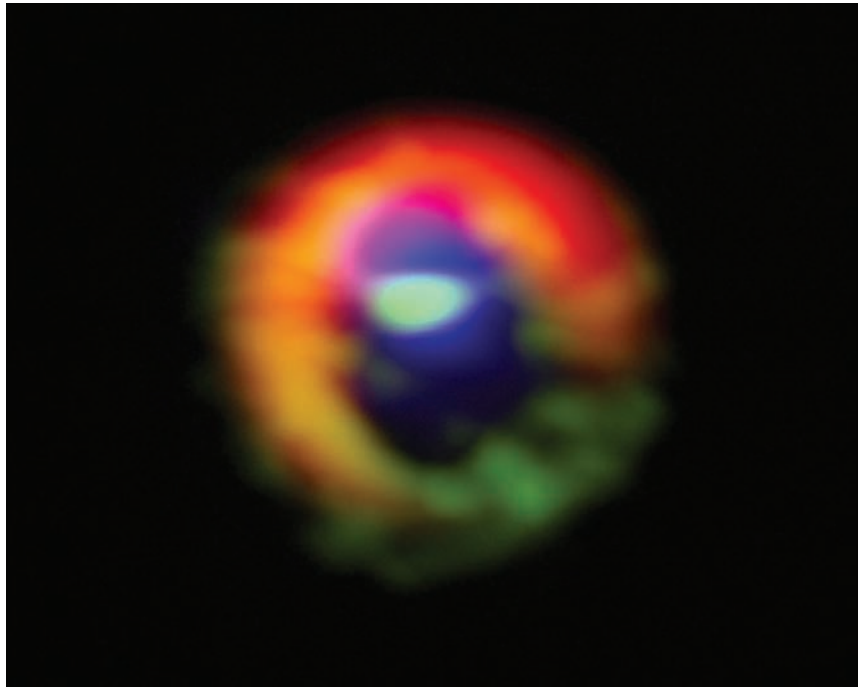
Infračervená pozorování provedená dalekohledem Gemini zobrazila oblast HD 142527 ve světle molekulárního vodíku. Radiová teleskopická síť ALMA je ale schopna zobrazit i jiné molekuly, jako například CO nebo ionty  $\text{HCO}^+$ . V takto zobrazených strukturách je možné se ve vysokém rozlišení podívat i do vnitřních oblastí systému. V radiovém obraze zde, dokonce bez zastínění centrální hvězdy, zřetelně vystoupí mosty propojující vnější disk s vnitřním diskem podobně jako loukotě na kole spojují ráfek s nábojem. Podle naměřených hodnot rychlostí a odhadovaných koncentrací látky v loukotích jimi protéká množství látky odpovídající  $7 \times 10^{-9}$  až  $2 \times 10^{-7}$  hmotností Slunce za rok. Naměřená hvězdná akrece  $7 \times 10^{-8}$  hmotností Slunce ročně tomu také odpovídá. Vysvětlení takové struktury by mohlo být následující: nově vznikající hvězda nasává látku prostřednictvím vnitřního akrečního disku, do kterého proudí materiál z vnějších oblastí. Propojující mosty, kterými plyn přitéká, jsou udržovány čerstvě vznikajícími planetami ve velkých vzdálenostech desítek au. Tyto planety ale také čerpají látku z vnějšího disku. Celé to připomíná obří čerpací stanici velikosti planetární soustavy. Jde možná o nalezení mechanismu, kterým mohly vzniknout velké plynné planety i v naší sluneční soustavě.

Podobný děj nasávání plynu do neustále se koncentrující nahuštěniny byl prozatím ve vesmíru pozorován u velkorozměrových struktur a snad by mohl být i jednou z možností, jak vznikají galaktické soustavy. Zde jde ale o trochu jiné měřítko. Pokud je tento scénář a vysvětlení napozorovaných dat správné, znamená to, že velké planety vznikají souběžně s centrální hvězdou a oba typy těchto nebeských těles vyrůstají pospolu z vnějšího zásobního



plynného disku. Prozatím není jasné, zda souběžně vznikají také planety zemského typu, je ale možné, že pokud nová planetární soustava taková rozdílná tělesa obsahuje, může jít o objekty rozdílného stáří. Plynné planety vznikly souběžně s mladou hvězdou a kamenné planety se zformovaly až mnohem později.

■ Ivan Havlíček, 18. 1. 2013,  
AB 3/2013



*Snímek systému HD 142527 pořízený radioteleskopickou sítí ALMA. Prach ve vnějším disku je zobrazen červeně. Hustý plyn, který se táhne napříč diskem a mezerami uvnitř, je vybarven zeleně. Rozptýlený plyn v centrální oblasti je zobrazen modře. Propojujícími mosty proudí látka z vnějšího disku do centra. Vnější disk měří v průměru dva světelné dny. Zdroj: ESO/ALMA.*

## Modří opozdilci



Modří opozdilci v kulové hvězdokupě NGC 6397 ze souhvězdí Oltáře. Jádru hvězdokupy je v levém horním rohu. Opozdilci mají výrazně modrou barvu. Zdroj: HST.

Modří opozdilci jsou namodralé svítivé hvězdy v kulových a někdy i otevřených hvězdokupách, které se podle dostupných parametrů zdají mladší než jejich sourozenci. Odtud vzniknul jejich název opozdilci (anglicky *stragglers*) – hvězdy opožděné ve vývoji. První modří opozdilci byli objeveni americkým astronomem Allanem Sandagem (1926–2010) v kulové hvězdokupě M3 v souhvězdí Honicích Psů již v roce 1953. Jejich původ byl po dlouhá desetiletí záhadou, protože hvězdy v kulové hvězdokupě vznikají společně a jejich stáří by nemělo mít výraznější odchylky. Pokud nalezneme v hvězdokupě různé staré hvězdy, měl by rozdíl být způsoben výhradně různou hmotností hvězd. Hmotnější hvězdy se totiž vyvíjejí rychleji než méně hmotné. To je dáno vyšším tlakem a teplotou v jejich nitru, což vede k „bouřlivější“ termojaderné syntéze. První objevení modří opozdilci měli ale hmotnost

kolem  $2 M_{\odot}$ , velikou rotaci a intenzivně svítily v modré barvě. Podle těchto i dalších charakteristik šlo o relativně mladé hvězdy, které nemají v kulové hvězdokupě co pohledávat. V kulových hvězdokupách se nacházejí nejstarší hvězdy z Galaxie. Původně se uvažovalo o třech možnostech: 1) opozdilci byli hvězdokupou zachyceni a nevznikli spolu s ní, 2) jsou důsledkem srážky dvou hvězd, 3) jsou důsledkem hvězdného kanibalismu. Dnes je víceméně potvrzena druhá a třetí hy-

potéza. Nejčastěji jde o hvězdný kanibalismus v těsné dvojici hvězd, kde hmota z jedné složky přetéká na druhou, a ta se jeví efektivně mladší, než ve skutečnosti je. Dalo by se říci, že si stará babice oblékne mladistvě vypadající kabát.

## Opozdilci v hvězdokupách 47 Tuc a M30

V roce 2006 vědci z Evropské jižní observatoře systematicky sledovali modré opozdilce za pomoci čtveřice dalekohledů VLT v Chile. U 43 modrých opozdilců z hvězdokupy 47 Tuc bylo spektroskopicky zjištěno zastoupení jednotlivých prvků. U šesti z nich se ukázalo, že jejich spektrum poukazuje na zjevný nedostatek uhlíku a kyslíku oproti okolním hvězdám. Podle numerických simulací takový materiál pochází z nitra průvodce a na povrch hvězdy se mohl dostat jen přetokem hmoty z druhé složky podvojně soustavy. V nitru hvězd hmotnějších než Slunce probíhá tzv. CNO cyklus a uhlík a dusík jsou katalyzátory této jaderné reakce. V nitru hvězdokupy 47 Tuc jsou hvězdy velmi blízko u sebe. V centrální části o velikosti krychlového světelného roku se nachází 4 000 hvězd. Srážky mohou být velmi časté a vést k vytváření těsných dvojhvězd a posléze modrých opozdilců. Hvězdokupa se nachází v souhvězdí Tukana ve vzdálenosti 15 000 světelných roků.

V dalším projektu se v roce 2009 Hubbleův vesmírný dalekohled zaměřil na kulovou hvězdokupu M30 ze souhvězdí Kozoroha. Hvězdokupu objevil Charles Messier již v roce 1764. Je od nás vzdálená 28 000 světelných roků a má průměr 90 světelných roků. Stáří hvězd se odhaduje na 13 miliard let. Hvězdokupa byla současně zkoumána Evropskou jižní observatoří a při výzkumu byly použity i snímky z digitální přehlídky oblohy DSS 2. Ukázalo se, že modré opozdilce z této hvězdokupy lze rozdělit do dvou skupin, jež se poněkud liší svými parametry. Jedna odpovídá modrým opozdilcům vzniklým přímými srážkami a druhá hvězdným kanibalismem. V této hvězdokupě tak byly v roce 2009 potvrzeny dva různé (byť příbuzné) mechanismy vzniku modrých opozdilců.

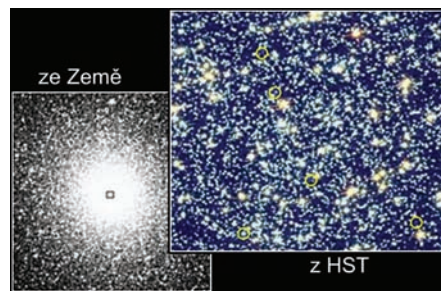
## Výzkum mechanismu vzniku opozdilců

Podrobný výzkum mechanismu vzniku modrých opozdilců provedli Aaron Geller a Robert Mathieu z madisonské Univerzity ve Wisconsinu pro kulovou hvězdokupu NGC 188 v souhvězdí Cefeje. Z korelací mezi množstvím dvojhvězd, hmotností jádra kulové hvězdokupy

**Asociace** – Nestabilní řídká seskupení mladých hvězd. Stáří  $10^6$  až  $10^7$  let. Nízká hustota hvězd. K nejznámějším patří OB asociace složené z mladých hvězd spektrální třídy O až B (tzv. asociace typu Orion). V Galaxii je jich asi 100. Dalším druhem jsou asociace typu T Tauri složené z velmi mladých hvězd spektrální třídy F až M. Menší hvězdy jsou schované v oblacích plynu a prachu, charakteristická je emise v infračerveném oboru a přítomnost erupčních proměnných. V Galaxii se nachází asi 1 000 exemplářů.

**Otevřená hvězdokupa** – fyzikálně příbuzná skupina hvězd, která drží pohromadě gravitační přitažlivostí a má společný původ. Většina hvězd se vytvořila ze stejné mlhoviny, a tak mají podobné počáteční chemické složení. Otevřená hvězdokupa může mít desítky až desítky tisíc jedinců. Na rozdíl od kulové hvězdokupy zpravidla nevykazuje otevřená hvězdokupa kulové prostorové uspořádání.

Modří opozdilci v jádře kulové hvězdokupy 47 Tucanae. Snímek byl pořízen kamerou WFPC 2 na Hubbleově vesmírném dalekohledu. Filtry byly nastaveny tak, aby červení obří byli oranžoví, hvězdy hlavní posloupnosti bílé až zelené a modří opozdilci se jevíli modře. Zdroj: HST.

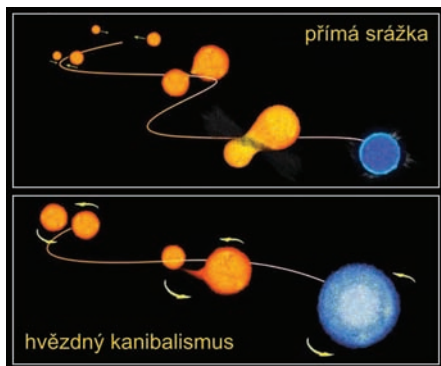






Modří opozdílci (zeleně zakroužkovani) v centrální výdutí naší Galaxie. Zdroj: NASA/ESA, HST/ACS/WFC.

Dva mechanismy vzniku modrých opozdílci v kulové hvězdokupě M30. Zdroj: NASA.



a radiální pozici modrých opozdílci zjistili, že dominantním mechanismem je hvězdný kanibalismus a přímé srážky jsou minoritním mechanismem. Přestože pozorování, analytické modely a numerické  $N$ -částicové simulace hovoří spíše ve prospěch hvězdných srážek, jejich výzkum modrých opozdílci vedl jednoznačně k mechanismu hvězdného kanibalismu. Podle této práce by ve většině případů měl být souputníkem modrého opozdílce bílý trpaslík o hmotnosti v úzkém intervalu kolem  $0,5 M_{\odot}$ . Aby situace nebyla zcela jednoduchá, objevil Hubblův dalekohled v roce 2011 modré

opozdílce dokonce v centrální výdutí naší Galaxie. Existence modrých opozdílci je tak potvrzena nejen v kulových hvězdokupách, ale přímo i v centrální části Galaxie. Zdá se proto, že modří opozdílci vznikají všude tam, kde je hvězdám „těsno“. Je pravděpodobné, že vznikají oběma zmíněnými mechanismy (přímou srážkou i hvězdným kanibalismem) a za různých podmínek dominuje ten či onen mechanismus vzniku.

■ Petr Kulhánek, 4. 11. 2011, AB 42/2011



## Pulzar obřím permanentním magnetem?

Když Jocelyn Bellová a Antony Hewish 28. listopadu 1967 pozorovali první pulzar, později nazvaný PSR B1919+21, bylo jim hned jasné, že objevili něco velmi záhadného. Od té doby lidstvo v poznání pulzarů pokročilo. Víme například, že pulzar v převážně v radiovém oboru pravidelně bliká kvůli skloněné ose svého magnetického dipólu vůči ose rotace. Přesto je tento druh neutronové hvězdy stále zahalen mnoha tajemstvími.

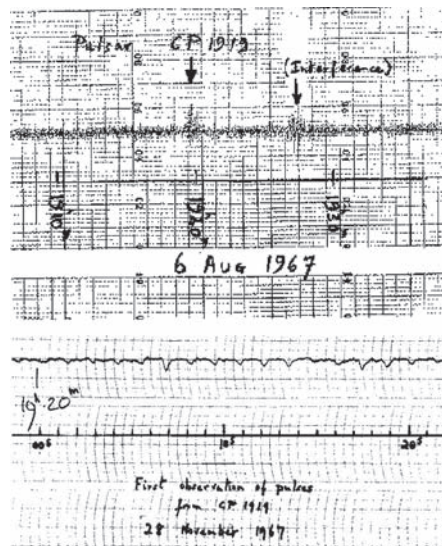
### Problémy současných teorií

Stávající představa pulzaru přináší některé obtížně vysvětlitelné jevy. Problémem je již vznik samotného magnetického pole pulzarů. Magnetické pole je vmrznuté do plazmatu hvězdy a při závěrečné explozi supernovy se vnitřní části vybuchlé hvězdy zhroutí na neutronovou hvězdu. Tím by mělo dojít k mnohonásobnému zesílení intenzity pole (siločáry se dostanou blíže k sobě). Takové vysvětlení má ale závažný nedostatek, protože výbuch spolu se značnou částí materiálu odnese i značnou část magnetického pole.

U magnetarů může být pole velmi silné, až  $10^{12}$  T. Teorii vzniku takového pole předložili v roce 1992 Robert Duncan z McDonaldivy observatoře a Christopher Thompson z Torontské univerzity. Pokud neutronová hvězda rotuje s frekvencí vyšší než 200 otáček za sekundu, vytvoří kombinace intenzivní rotace spolu s prouděním látky podmínky pro krátkodobý vznik tekutinového dynama. Vytvořená magnetická pole následně rotaci magnetaru přibrzdí, nicméně vzniklá pole mohou dosáhnout až hodnoty  $10^{12}$  T. Teorie ale neřeší chování neutronů samotných v podmínkách supratekutosti, která by měla dle dalších modelů v nitru neutronové hvězdy nastat.

Předpokládá se, že ať již magnetické pole pulzaru vzniklo jakkoli, je nadále udržováno díky pohybům elektricky nabitých částic uvnitř hvězdy. Protože se ale tyto nabitě částice chovají jako supratekutina, měly by se jejich pohyby časem uspořádat podél osy rotace pulzaru. To se u pozorovaných pulzarů neděje – snad proto, že pole je zamrzlé v povrchové kůře pulzaru tlusté přibližně 1 kilometr. Tato supratekutina by měla být také velmi nestabilní, což by se mělo projevat

**Neutronová hvězda** – těleso tvořené degenerovaným neutronovým plynem o hmotnosti menší než přibližně  $2 M_{\odot}$  (Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez). Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu desítek kilometrů, průměrná hustota  $10^{11}$  kg/m<sup>3</sup> dosahuje hodnot hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobřů doprovázeném výbuchem supernovy. Obrovský tlak způsobuje „vtlačení“ elektronů do protonů za vzniku neutronů a neutrin. Existence neutronových hvězd byla teoreticky předpovězena ve 30. letech dvacátého století.

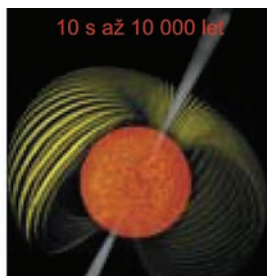
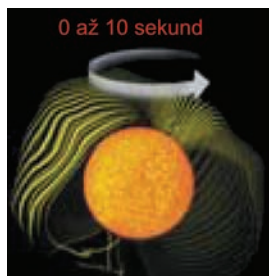


Záznamy prvního objeveného pulzaru ze srpna a listopadu 1967. Zdroj: NRAO.

**Pulzar** – neutronová hvězda, jejíž magnetická a rotační osa nemají shodný směr. Zářící oblasti v magnetických pólech hvězdy díky rotaci vytvářejí pro pozorovatele májákovým efektem pulzy, zpravidla radiové, výjimečně až rentgenové či gama. První pulzar byl objeven v roce 1967 Jocelynou Bellovou pod vedením Anthonyho Hewishe.

**Magnetar** – neutronová hvězda s mimořádně silným magnetickým polem až  $10^{12}$  T. Kůra je již nestabilní, praská, dochází k pravidelným magnetotřesením doprovázeným přepojením magnetických siločar a záblesky v měkkém gama oboru. První projevy magnetaru byly detekovány v roce 1979 jako opakované záblesky gama neboli SGR (Soft Gamma Repeaters). První magnetar detekovala v roce 1998 Chryssa Kouveliotou z Maršhallova kosmického letového centra v NASA. Výjimečně mohou opakující se záblesky magnetaru přejít v jeden mohutný, osamocený záblesk.

Podle stávající teorie se v prvních deseti sekundách v neutronové hvězdě s velkou počáteční rotací překrucují v nitru magnetické siločáry a zesilují se tekutinovým dynamem. Vznikne magnetar, který intenzivně září prvních 10 000 let svého života. Zdroj: R. Duncan, C. Thompson, *Scientific American*.



v náhlých změnách magnetického pole. Jenže pulzary jsou obdivuhodně stabilní zdroje záření. Stávající teorie původu a udržení magnetického pole pulzarů proto přináší mnohé nevyřešené otázky.

## Nová hypotéza

V roce 2010 publikoval profesor fyziky Lulečské technické univerzity Johan Hansson se svou studentkou Annou Pongovou hypotézu, že magnetické pole pulzarů není buzeno elektrickými proudy, ale uspořádáním magnetických polí neutronů hvězdy, podobně jako je tomu v permanentním magnetu. Toto uspořádání by mělo být samovolné, protože takový stav má nejnižší možnou energii jaderných sil mezi těmito částicemi. Uspořádaný stav by se měl objevit při poklesu teploty neutronové hvězdy pod Curieovu teplotu  $10^{10}$  K. Tu vypočetli z odhadu, že energie uvolněná při uspořádání složek odpovídá asi deseti procentům celkové vazebné jaderné energie. Vzniklý magnet, který Hansson a Pongová nazvali *neutromagnetem*, je pak vysoce stabilní. Prvotní orientaci by určilo magnetické pole původní hvězdy, jehož osa nemusí být shodná s osou rotace hvězdy.

Tato hypotéza má i jednoduchou testovatelnou předpověď. Hmotnost neutronových hvězd je shora omezena tzv. TOV mezí. Z této meze se dá vypočítat i jejich maximální indukce magnetického pole. Ta by měla dosahovat asi  $10^{12}$  T. To odpovídá současným pozorováním. Pokud by ale byl objeven pulzar se silnějším polem, hypotéza by byla vyvrácena. Prostý součet magnetických polí jednotlivých částic by na jeho vytvoření nestačil.

Hansson s Pongovou se ale po popsání mechanismu vzniku magnetického pole pulzarů nezastavili. Uvažují, že pozorované poruchy v rychlostech otáčení pulzarů by mohly být způsobeny vzájemnou vazbou spinu neutronů ( $S$ ) a orbitálního momentu hybnosti ( $L$ ) pulzaru. Obdobná vazba (tzv. LS vazba) je dobře známá u mikroskopických systémů. Ani to není vše. Pohrávají si dále s myšlenkou, že vznikající pulzar může být skutečnou hybnou silou expanze supernovy. Náhle vznikající dipólové magnetické pole může být příčinou, proč se

kolabující hvězda začne náhle rozpínat. Ve svých úvahách ukazují, že elektromagnetické síly by v takovém případě o mnoho řádů překonaly síly gravitační. Elektromagnetické síly by také mohly být příčinou vzniku nestabilit a pozorovaných asymetrií ve vybuchující supernově. Hansson s Pongovou zmiňují dokonce i možnost, že by se podobný mechanismus mohl podílet i na explozích jiných menších hvězd.

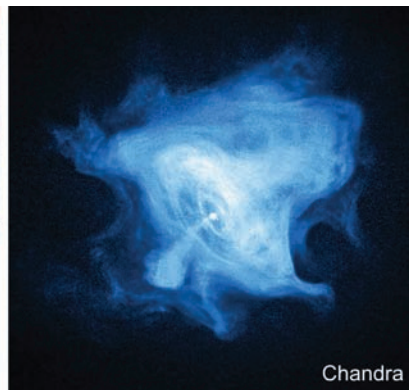
Možná ještě zajímavější je úvaha, že všechny neutronové hvězdy by po svém vzniku měly mít zhruba stejné magnetické pole, pokud by byly jednotlivé domény spinů orientovány shodně. Je to tím, že mají obdobnou hmotnost. O tom, zda bychom pozorovali obyčejnou neutronovou hvězdu, běžný pulzar, nebo dokonce magnetar by pak vedle periody rotace objektu rozhodovaly úhel sklonu osy magnetického dipólu vůči ose rotace a orientace vzniklých magnetických domén. Tato spekulativní hypotéza má pochopitelně i své problémy. Asi nejzásadnější námitkou, kterou uvádějí i Hansson a Pongová, je neznalost chování elementárních částic v extrémních podmínkách nitra neutronové hvězdy. Mnoho neutronů ve stejném stavu jako by porušovalo Pauliho vylučovací princip. Je zřejmé, že v takovém mnohačásticovém systému musí docházet k degeneraci stavů a za extrémních podmínek v nitru hvězdy se neutrony od sebe liší dalšími kvantovými čísly nebo vytvářejí bosonové páry.

Myšlenka prezentovaná Hanssonem a Pongovou není zcela nová, podobný nápad se již v minulosti objevil několikrát. Hansson a Pongová ale ukázali, jak elegantní takový přístup je, a co všechno by mohl vysvětlit při popisu chování neutronových hvězd. Na to, zda je tento přístup správný či nikoli, si budeme muset ještě počkat. Rozhodnout mohou jedině další pečlivá pozorování různých forem neutronových hvězd.

■ Jiří Hofman, 13. 4. 2012,  
AB 15/2012



HST



Chandra

**Neutron** – částice složená ze tří kvarků (ddu) se spinem  $1/2$ , hmotností  $1,675 \times 10^{-27}$  kg a nulovým elektrickým nábojem. Volné neutrony jsou nestabilní s poločasem rozpadu 886 s (15 minut). V roce 1930 Walthor Bothe a Herbert Becke ostřelovali lehké prvky částicemi alfa a objevili nový druh pronikavého záření. V roce 1932 zjistil James Chadwick, že je toto záření složeno z neutrálních částic přibližně velikosti protonu, a objevil tak neutron.

**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.

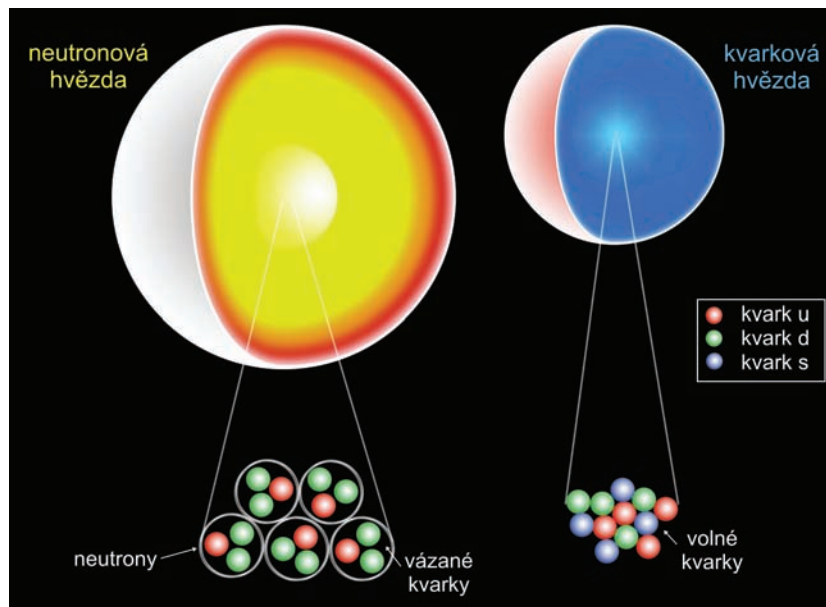
**TOV mez** – horní mez stability neutronové hvězdy. Tuto mez odvodili na základě prací Richarda Tolmana americký teoretik Robert Oppenheimer a kanadský fyzik George Volkoff v roce 1939. Její hodnota je přibližně 2 hmotnosti Slunce.

Pulzar v Krabi mlhovině je jedním z nejznámějších pulzarů vůbec. Nachází se ve vzdálenosti 6 000 ly a otočí se kolem své osy třicetkrát za sekundu. Fotografie pulzaru i s výtryskem byla pořízena ve viditelném oboru Hubblovým dalekohledem a v rentgenovém oboru observatoří Chandra. Zdroj: NASA/ESA.

## Zabrání elektroslabé hoření gravitačnímu kolapsu?

**Chandra** – družicová observatoř NASA zkoumající vesmír v rentgenovém oboru. 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 sousedících paraboloidně-hyperboloidních zrcadel o délce 0,85 m, se zorným polem o průměru 1,0° a s rozlišením 0,5".

Neutrony – částice tvořící neutronovou hvězdu – jsou vázané stavy kvarků d, d, u. Kvarková hvězda ve svých vnitřních vrstvách obsahuje nejen volné kvarky typu u a d, ale také kvarky s. Zdroj: Chandra.



Ve vesmíru nic netrvá věčně a ani život hvězd není neomezeně dlouhý. Jakmile hvězda spotřebuje své palivo, začne se pod vlivem gravitace hroutit sama do sebe. Pokud je hmotnost hvězdy menší než Chandrasekharova mez (1,4 hmotnosti Slunce), skončí hvězda jako bílý trpaslík, kde tlak degenerovaného elektronového plynu zastaví hroucení hvězdy. Elektronů však nedokážou zabránit gravitačnímu kolapsu, pokud je hmotnost hvězdy větší než Chandrasekharova mez. Závěrečným stádiem je pak neutronová hvězda, kde úlohu elektronů u bílého trpaslíka přeberou neutrony. Neutronová hvězda ale také nemůže mít libovolnou hmotnost. Horní mez hmotnosti neutronové hvězdy se nazývá Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez (přibližně 2 hmotnosti Slunce). Hmotnější objekty pravděpodobně končí svůj život jako černé díry. Pro tato tři závěrečná stádia hvězd máme k dispozici velké množství experimentálních dat, která podporují jejich existenci. Avšak teoretické modely, vypracované na základě zkušeností s vysokoenergetickými částicovými srážkami, předpovídají ještě existenci kvarkových hvězd a stabilních elektroslabých hvězd.

### Kvarkové hvězdy

Atomy, ze kterých se skládá hmota okolo nás, přestávají za vysokých tlaků existovat. V průběhu formování neutronové hvězdy jsou elektrony „vtlačeny“ do atomových jader, kde interagují s protony za produkce neutronů a neutrin. Tento proces se děje v jádře hvězdy při

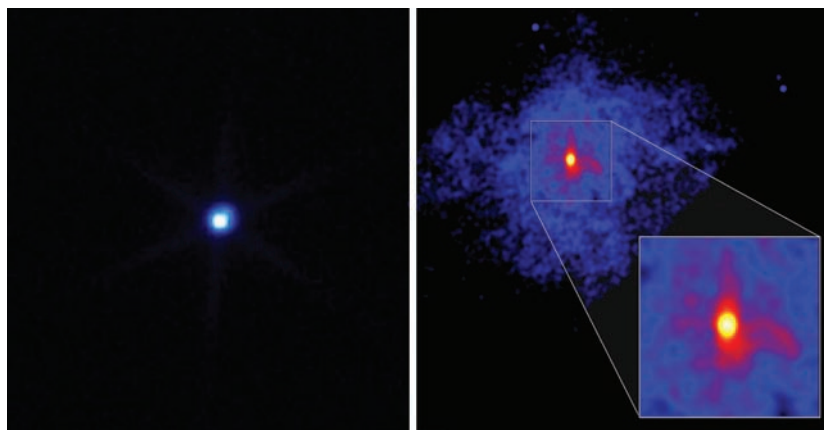


výbuchu supernovy. Výsledkem je hvězda složená převážně z neutronů. Jelikož ve vnějších vrstvách neutronové hvězdy je menší tlak než v jádře, mohou se zde vyskytovat kromě neutronů i protony a elektrony. Blíže k jádru roste podíl neutronů. V jádře neutronové hvězdy je tlak tak vysoký, že neutrony se k sobě dostanou na velmi krátkou vzdálenost, kde se uplatňuje i slabá a silná interakce. Pokud je počáteční hmotnost hvězdy dostatečná, může dojít k uvolnění kvarků z jejich vázaných stavů (baryonů a mezonů). Jádro této kvarkové hvězdy obsahuje volné kvarky up a down (kvarky, ze kterých jsou složeny protony a neutrony) a také těžší kvarky. Taková hvězda se pak nazývá *kvarková hvězda*.

Možným kandidátem na tuto hvězdu je objekt RXJ1856.5-3754. Rentgenové observatoře Chandra a XMM-Newton proměřovaly spektrum a povrchovou teplotu tohoto objektu. Z údajů bylo možné vypočítat, že poloměr objektu hmotného téměř jako Slunce je menší než 6 km. Díky extrémnímu zakřivení prostoru se vnějšímu pozorovateli jeví poloměr o 40 % větší. Objekt RXJ1856.5-3754 se zdá být příliš kompaktní na to, aby mohl být běžnou neutronovou hvězdou. Dalším zajímavým objektem je pulzar 3C58, jehož jádro je mnohem chladnější než u typické neutronové hvězdy.

## Elektroslabé hvězdy

Kvarková hvězda ale nemusí nutně znamenat závěrečné stádium života hvězdy. Pokud má kvarková hvězda dostatečnou hmotnost, pak i teplota v jejím nitru je enormní. Částice v jádře mohou dosáhnout energie větší než 100 GeV. Za těchto podmínek se ve hvězdě zažehnou procesy zcela odlišné od procesů jaderné syntézy, které ve hvězdě dominovaly, když ještě byla hvězdou hlavní posloupnosti. Při energii kolem 100 GeV dochází k elektroslabému fázovému přechodu, kdy se elektromagnetická a slabá interakce sjednotí v elektroslabou interakci. V jádře takové hvězdy dochází k „elektroslabému hoření“,



Rentgenové snímky objektů RXJ1856.5-3754 (vlevo) a 3C58 (vpravo) pořízené rentgenovou observatoří Chandra. Zdroj: Chandra.

**XMM-Newton** – X ray Multi Mirror, rentgenový dalekohled na oběžné dráze (Evropská rentgenová observatoř). Jeho hlavní součástí jsou tři systémy soustředěných pozlacených zrcadel o celkové ploše 120 m<sup>2</sup>. Evropská kosmická agentura (ESA) vypustila do vesmíru observatoř XMM-Newton 10. prosince 1999 z paluby rakety Ariane 5.

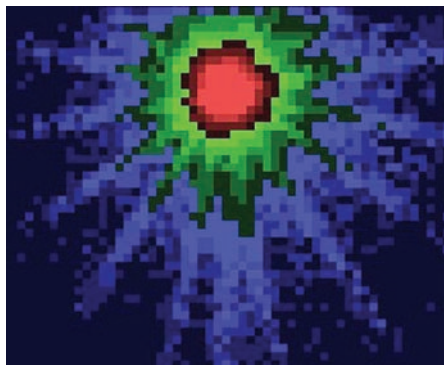
**Kvarky** – částice, ze kterých jsou tvořeny těžké částice s vnitřní strukturou (hadrony). Hadrony dělíme na baryony složené ze tří kvarků (například protony a neutrony) a na mezony tvořené kvarkem a antikvarkem (například piony). Kvarky se dělí do tří generací, první tvoří kvarky „d“ (down) a „u“ (up), druhou kvarky „s“ (strange) a „c“ (charm) a třetí kvarky „b“ (bottom nebo beauty) a „t“ (top nebo truth). Kvarky mají neceločíslné (třetinové a dvou-třetinové) elektrické náboje. Jsou také nositeli barevného náboje silné interakce.

**Baryonové číslo** – kvantové číslo, které charakterizuje baryony. Každý kvark má  $B = 1/3$ , antikvark  $B = -1/3$ . Výsledné baryonové číslo mezonů je proto 0, baryonů +1, antibaryonů -1.

**Leptonové číslo** – kvantové číslo, které charakterizuje leptony. Každý lepton má  $L = +1$ , antilepton  $L = -1$ .

**Baryony** – elementární částice složené ze tří kvarků s různým barevným nábojem. Výsledná barva je „bílá“. Baryony podléhají silné interakci a patří mezi hadrony (částice složené z kvarků). Baryony složené z kvarků první generace (d, u) dělíme na nukleony se spinem rovným 1/2 (proton a neutron) a delta baryony se spinem rovným 3/2 (4 částice s různým nábojem). Baryony obsahující s kvark nazýváme hyperony. Nejznámějším je lambda hyperon. Hyperony byly hojně zastoupené v raných vývojových fázích vesmíru, často hovoříme o hyperonovém plynu. Dnes vznikají interakcí kosmického záření s horními vrstvami atmosféry a umíme je vytvořit uměle na urychlovačích.

Fotografie objektu RX J1856.5-3754 pořízená rentgenovým dalekohledem XMM Newton. Zdroj: Andrea Tiengo, Sandro Mereghetti (INAF); ESA.



kteří probíhá ve velmi malé oblasti jádra (přibližně centimetry). Jádro přitom má hmotnost řádově stejnou jako Země. Při procesu elektroslabého hoření dochází k přeměně kvarků na leptony, nezachovává se tedy baryonové ( $B$ ) ani leptonové číslo ( $L$ ). Jak je to možné? Při nízkých energiích, kdy je slabá interakce skutečně slabá, lze při výpočtech efektivně uplatnit poruchovou teorii. Pohybové rovnice vykazují jisté symetrie, kterých lze při analýze interakčních procesů využít. Za zachování leptonového a baryonového čísla je zodpovědná tzv. symetrie  $U(1)$  vlnové funkce (vynásobení komplexní jednotkou nezmění pozorovatelné výsledky). Při vyšších energiích se začínají projevat nepřesnosti poruchové teorie. Již neplatí zákon zachování baryonového a leptonového čísla, ale rozdíl  $B - L$  zůstává zachován. Takové procesy jsou výrazně potlačeny při nízkých energiích, ale v nitru kvarkové hvězdy mohou hrát významnou roli. Příklady procesů, které mohou probíhat v jádře elektroslabé hvězdy:

$$udd \rightarrow \bar{\nu}_e$$

$$css \rightarrow \bar{\nu}_\mu$$

$$tbb \rightarrow \bar{\nu}_\tau$$

Takové reakce přeměňující kvarky na leptony mohou oddálit gravitační kolaps elektroslabé hvězdy o miliony let. Nejde ale o jediné možné reakce. Reakci se mohou účastnit i přítomné antikvarky – ovšem vždy takovým způsobem, aby byl zachován rozdíl  $B - L$ . Tento zdroj energie pomůže hvězdě odolávat gravitaci a prodloužit jí tak život i o několik milionů let, než dojde k nevyhnutelnému gravitačnímu kolapsu a hvězda skončí jako černá díra. Jak ale experimentálně ověřit existenci elektroslabých hvězd? Klíčem může být analýza (anti) neutrin. Je dobrým předpokladem uvažovat, že v centru takové hvězdy dominuje hmota nad antihmotou, proto v produktech elektroslabého hoření převládají antineutrína. Tato antineutrína produkovaná v jádru elektroslabé hvězdy mívají energii v řádu stovek GeV a poměrně snadno interagují s okolní velmi hustou hmotou a ztrácejí tak svoji kinetickou energii. Transport antineutrin k povrchu hvězdy tedy probíhá procesem difúze. Zdaleka největší úbytek kinetické energie neutrin ale nastává v důsledku gravitačního červeného posuvu. Antineutrína, která vidí vnější

pozorovatel, vznikla v hlubokém gravitačním potenciálovém minimu, na jehož opuštění byla potřeba značná část původní kinetické energie.

Experimentální určení přebytku antineutrin vyzařovaných elektroslabou hvězdou je velmi těžko proveditelné. Antineutrino totiž nevznikají pouze při elektroslabém hoření v kompaktním jádře, ale také v důsledku tepelných procesů ve značném objemu hvězdy. Energetická závislost tepelných neutrin na poloměru hvězdy je podobná energetické závislosti „červeně posunutých“ neutrin produkovaných při elektroslabém hoření. Užitečný signál je tedy skryt v šumu tepelných neutrin. Dalším problémem je, že oblasti vnějšího jádra nejsou úplně transparentní pro vysokoenergetická neutrina.

## Závěr

Přestože teoretické předpovědi ani experimentální pozorování zatím nepřinesly přesvědčivou odpověď na otázku položenou v názvu bulletinu, má smysl se touto problematikou dále zabývat. Kvarkové a elektroslabé hvězdy mohou představovat poslední stabilní závěrečná stádia hvězd, která jsou ještě schopna odolávat nemilosrdné gravitaci. Studium kvarkové hmoty nám rovněž může mnohé napovědět o dějích, které proběhly v raných fázích vesmíru. Narušení zachování baryonového čísla je dokonce jednou ze Sacharovových podmínek pro vznik vesmíru, ve kterém existuje asymetrie mezi množstvím hmoty a antihmoty.

■ Miroslav Havránek, 5. 3. 2010, AB 9/2010

**Leptony** – skupina částic, mezi které patří elektron, těžký elektron (mion) a supertěžký elektron (tauon) a jejich neutrina (elektronové, mionové a tauonové). Tyto částice nepodléhají silné interakci, ale jen slabé a elektromagnetické (pokud jsou nabitě).

**Mezony** – částice složené z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Název vznikl z toho, že první objevené mezony měly hmotnost „mezi“ hmotností elektronu a protonu. Pokud se kvarky složí s nesouhlasným spinem, vznikne skalární mezon (má nulový spin), pokud se souhlasným spinem, vznikne vektorový mezon (spin má roven jedné). Skalární mezony zkombinované z kvarků „d“ a „u“ nazýváme piony, vektorové nazýváme róony ( $\rho$  mezony). Pokud mezon obsahuje kvark „s“, nazývá se kaon.

**Sacharovovy podmínky** – podmínky pro to, aby se vesmír, v němž bylo na začátku stejně hmoty jako antihmoty, mohl vyvinout ve vesmír s výraznou nadvládou hmoty nad antihmotou. Sacharov ukázal v roce 1968, že k tomu může dojít, pokud: 1) proton je nestabilní, 2) existuje narušení CP symetrie, 3) vesmír prošel fází rychlé expanze.

**Elektromagnetická interakce** – interakce působící na všechny částice s elektrickým nábojem. Má nekonečný dosah, mezi malými 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).

**Slabá interakce** – interakce s konečným dosahem, který je přibližně  $10^{-18}$  m. Působí pouze na levotočivé kvarky a leptony a na pravotočivé antikvarky a antileptony. Polními částicemi jsou vektorové bosony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$  se spinem rovným jedné. Hmotnosti těchto částic jsou v rozmezí 80 až 90 GeV. Typickým slabým procesem je například beta rozpad neutronu. Teorie slabé interakce se nazývá kvantová flavourdynamika (QFD).

## Observatoř Swift odhaluje tajemství černých děr

**GRB** – Gamma Ray Bursts, záblesky gama. Tak označujeme náhlá vzplanutí různé povahy v oboru gama. Dnes je jasné, že bude existovat více mechanismů 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 mechanismy.

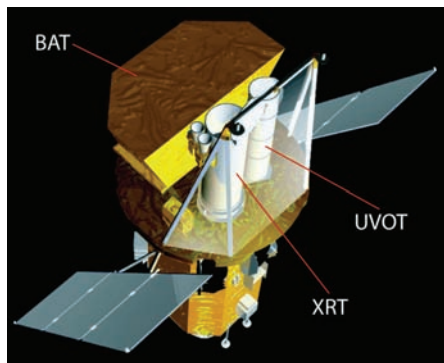
Swift je unikátní americká družicová observatoř pro sledování gama záblesků. Na nízké oběžné dráze kolem Země je od roku 2004. Systematicky vyhledává gama záblesky v optickém, ultrafialovém, rentgenovém a gama oboru. Po nalezení gama záblesku je do několika sekund jeho poloha dostupná na internetu a mohou se na něho zaměřit velké pozemské optické a případně i radiové přístroje. Obrovská rychlost předání souřadnic pozemským přístrojům je bezprecedentní výhodou družice Swift. Její název není žádnou zkratkou, anglické slovo *swift* znamená rychlý a u tohoto přístroje skutečně o rychlost jde. Druhý význam slova *swift* je rorýs – rychlý pták chytající potravu za letu, který se stal součástí loga této velmi úspěšné mise NASA.

### Swift

Observatoř Swift startovala 20. listopadu 2004 na palubě nosné rakety Delta II a byla navedena na nízkou dráhu ve výšce přibližně 600 kilometrů nad zemí. Po uvedení do činnosti se stala nejvýznamnějším přístrojem pro studium gama záblesků. Ročně je schopna lokalizovat přes sto gama záblesků, proměřit jejich polohu a urychleně ji předat pozemským stanicím prostřednictvím sítě GCN (*GRB Coordinate Network*), která ve finále informace ke koncovému uživateli šíří po internetu. Rychlé zaměření gama záblesku pozemskými přístroji umožňuje měření dosvitu a následné studium těchto zdrojů. Na vývoji observatoře se podílela řada zemí, k nejvýznamnějším patří: Spojené státy, Anglie, Itálie a Německo. Na palubě observatoře jsou tři přístroje, každý z nich je určen pro jeden obor spektra.

Prvním přístrojem je BAT (*Burst Alert Telescope*). Jde o základní detektor pro gama obor s rozsahem energií 15 až 150 keV. Detektor má 256 modulů po 128 CdZnTe elementech s celkovou sběrnou plochou 5200 cm<sup>2</sup>. Naráz zkoumá šestinu celé oblohy. Po detekci gama záblesku přístroj automaticky do oblasti natočí rentgenový detektor XRT a optický/UV detektor UVOT. Tyto přístroje zpřesní polohu záblesku a pořídí jeho spektra. Detektor BAT detekuje přes 100 gama záblesků ročně s úhlovým rozlišením 1' až 4'.

Umístění přístrojů na observatoři Swift. Zdroj: NASA.





Druhým přístrojem je rentgenový detektor XRT (*X-Ray Telescope*) pro rozsah energií 0,2 až 10 keV. Detektor má rozlišení 600×600 CCD pixelů s celkovou sběrnou plochou 135 cm<sup>2</sup>. Přesnost lokalizace zdroje je 3" až 5".

Posledním strojem na palubě je dalekohled UVOT (*UltraViolet/Optical Telescope*). Má průměr 30 cm pro optický a ultrafialový obor. Rozsah použitelných vlnových délek je od 170 nm do 650 nm. Detektor má v ohnisku CCD matici s 2048×2048 pixely. Lokalizace optického protějšku gama záblesku probíhá s přesností 0,3".

Observatoř Swift, i když se to na první pohled nezdá, je jakoby předurčena k výzkumu černých děr. Při kolapsu velmi hmotné hvězdy na černou díru vznikne jako doprovodný jev gama záblesk detekovatelný observatoří Swift. Jde o jeden z mechanismů, jak může ke gama záblesku dojít. Swift může ale detekovat i obří černé díry, které jsou v jádrech aktivních galaxií, protože vyzařují v rentgenovém i gama oboru. Detektor BAT od roku 2004 rutinně skenuje oblohu a vyhledává rentgenové zdroje. Přístroj je citlivý na aktivní galaktická jádra, která obsahují černé díry, až do vzdálenosti 650 milionů světelných roků. Věnujme se nyní čtyřem významným objevům, které se týkají právě černých děr.

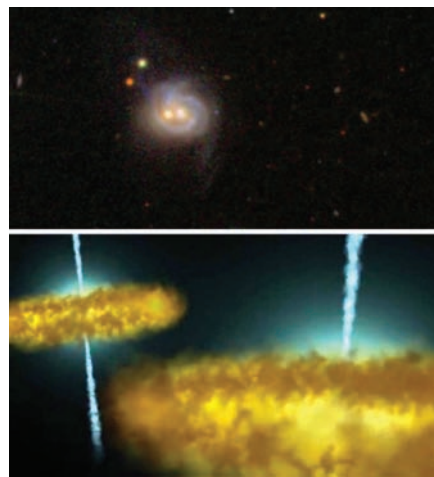
## Markarian 739 – galaxie s dvěma aktivními jádry a dvěma obřími děrami

Markarian 739 neboli NGC 3758 je relativně blízká galaxie, která se nachází ve vzdálenosti 425 milionů světelných roků. Již na první pohled nás zaujmou dvě jádra vzdálená od sebe asi 11 000 světelných roků. S nejvyšší pravděpodobností tato galaxie vznikla jako produkt srážky dvou galaxií. To je ve vesmíru relativně častý jev. Nepředstavujte si ale, že srážka galaxií je nějaký bouřlivý proces. Hvězdy jsou od sebe v průměru natolik daleko, že se srážející galaxie ve skutečnosti pouze prolínají, samotné hvězdy se nesráží. Jedna galaxie samozřejmě gravitačně ovlivňuje druhou a sráží se plyn a prach uvnitř galaxií. To je zpravidla počátečním impulzem k překotné tvorbě hvězd.

Uvnitř většiny galaxií sídlí velmi hmotné černé díry. Pokud je v jejich okolí dostatek plynu a prachu, který centrální díra požírá, může jít o tzv. aktivní jádro galaxie, v němž je okolí černé díry bohatým zdrojem energie. Většina galaxií má ale jádro již v latentním, neaktivním stavu. Při srážce dvou galaxií může dojít k „přepnutí“ jednoho

**Delta II** – nosná raketa využívaná NASA. Raketu původně navrhla společnost McDonnell Douglas, která později fúzovala se společností Boeing. Dnes má mnoho variant s výškou 38 až 39 metrů, průměrem 2,44 metru a hmotností 150 až 230 tun. Raketa se používá od roku 1989 a vynesla více než 100 významných vědeckých družic a sond. Jednou z nich je právě observatoř Swift.

Nahoře: Galaxie Markarian 739 v optickém oboru. Patrná jsou dvě jádra vzdálená přibližně 11 000 světelných roků. Zdroj: SDSS. Dole: Umělecká vize dvou černých děr v jádře galaxie Markarian 739. Zdroj: NASA GSFC.



**Elektronvolt** – jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením v potenciálovém rozdílu jeden volt,  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . V jaderné fyzice se používají spíše větší násobky této jednotky, kiloelektronvolt keV ( $10^3 \text{ eV}$ ), megaelektronvolt MeV ( $10^6 \text{ eV}$ ), gigaelektronvolt GeV ( $10^9 \text{ eV}$ ) nebo teraelektronvolt TeV ( $10^{12} \text{ eV}$ ). V těchto jednotkách se také vyjadřuje hmotnost ( $E=mc^2$ ), teplota ( $E=kT$ ) a další veličiny.

Umělecká vize pohlcení hvězdy obří černou dírou. Zdroj: University of Warwick, Mark A. Garlick.



nebo výjimečně obou jader do aktivního stavu. Východní jádro galaxie Markarian 739 bylo známo již delší dobu jako aktivní jádro, nicméně západní jádro nejevilo ve viditelném oboru žádné známky vyšší aktivity. Až v červnu 2011 odhalil přístroj BAT na observatoři Swift, že i západní jádro patří do skupiny aktivních galaktických jader. Jde o teprve druhý známý případ, kdy má galaxie dvě aktivní jádra. Objev potvrdila i měření z rentgenové observatoře Chandra a dnes je jasné, že v centru galaxie Markarian 739 jsou dvě aktivní černé díry.

### Pohltila velmi hmotná černá díra hvězdu?

Dne 28. března 2011 ve 12:57:45 UT zachytila observatoř Swift velmi podivný gama záblesk Sw 1644+57/GRB 110328 A. Počátek gama záblesku sice připomínal některé jiné gama záblesky, ale přístrojem BAT byl poté pozorován celých 40 hodin. V průběhu této doby různě měnil intenzitu. Pak následoval 40 dní dlouhý dosvit v rentgenovém oboru. Tak dlouhý dosvit nebyl dosud naměřen u žádného záblesku. Gama záblesky trvají normálně sekundy a jejich dosvit minuty, maximálně desítky minut. Vědci zkoušeli různé scénáře, ale žádný z nich plně nepopisoval pozorovaný jev. Až v červnu 2011 publikovala možný scénář skupina čínských astronomů z Observatoře na purpurové hoře (*Purple Mountain Observatory*) v Nanjingu. Zdá se, že jsme byli svědky události, při které velmi hmotná černá díra pohltila hvězdu o hmotnosti několik Sluncí.

Postupně ji roztrhala slapovými silami a přítomná magnetická pole formovala úzce směrovaný gama záblesk. K záblesku byl dohledán slabý optický zdroj s červeným kosmologickým posuvem 0,353 (Hubblovým vesmírným dalekohledem) a také rádiový zdroj. Jde o velmi slabou galaxii v souhvězdí Draka

vzdálenou 3,8 miliardy světelných roků. Měli jsme neuvěřitelné štěstí, že gama záblesk byl při pohlcení hvězdy namířen směrem k nám, a tak byl velmi dobře detekovatelný.

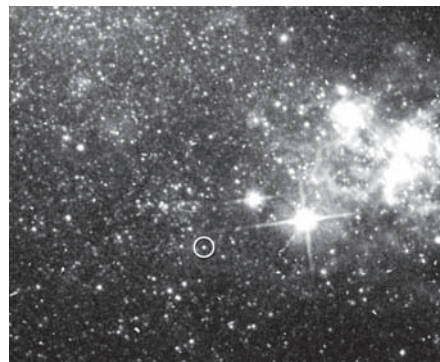
## Černá díra střední hmotnosti v trpasličí galaxii

Po mnoho desetiletí astronomové nacházejí na obloze černé díry dvojitěho typu. Buď jde o černé díry s hmotností několikanásobku hmotnosti Slunce, které vznikly jako závěrečné stádium vývoje velmi hmotných hvězd, nebo jde o obří černé díry s hmotností mnoha milionů až miliard Sluncí, které sídlí v centrech většiny galaxií. Jen zcela výjimečně jsou nacházeny černé díry o hmotnosti 100 až 10 000 Sluncí. V několika blízkých galaxiích se nacházejí jasné rentgenové objekty nazývané ULX (*Ultra Luminous X-ray source*). Do prostoru vyzařují výrazně více energie než hvězdy, ale méně než jádra aktivních galaxií. A právě u těchto objektů ULX je podezření, že by mohlo jít o černé díry středních hmotností. Jejich původ je naprosto nejasný. Jeden z těchto podivných zdrojů rentgenového záření leží v galaxii NGC 5408. Jde o nepravidelnou trpasličí galaxii v souhvězdí Kentaura, kterou objevil John Herschel (1792–1871) v roce 1834. Nachází se ve vzdálenosti 16 milionů světelných roků od nás.

Rentgenový zdroj ULX v této trpasličí galaxii se označuje jako NGC 5408 X-1. Opakovaně byl sledován evropskou rentgenovou observatoří XMM-Newton v letech 2006 až 2008. Ve zdroji byly nalezeny kvaziperiodické oscilace, které jsou s největší pravděpodobností způsobené plazmoidem (oblakem plazmatu) obíhajícím v akrečním disku kolem černé díry. Astrofyzikové Richard Mushotzky z Marylandské univerzity a Tod Strohmayer z Goddardova letového střediska NASA zjistili z chování kvaziperiodických oscilací, že hmotnost černé díry leží mezi 1 000 a 9 000 slunečními hmotnostmi, což znamená, že horizont černé díry může být veliký 6 000 km až 50 000 km a jde o vzácnou černou díru střední hmotnosti. Objekt byl sledován i observatoří Swift, která našla nepatrné změny rentgenového signálu s periodou 115,5 dne. Tak dlouhá periodičita již nemůže souviset se samotnou černou dírou. Zdá se, že kolem této atypické černé díry ještě obíhá hvězda s hmotností 3 až 5 Sluncí. Jde tedy o bizarní binární systém – černou díru střední hmotnosti doprovázenou relativně hmotnou hvězdou. Otevřenou otázkou je, zda i ostatní zdroje ULX by nemohly být černými děrami středních hmotností.

**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 postupně 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 povelům se konkrétní vědro posune o krok blíže k požáru. Časový průběh proudu vody vylitého do ohně odráží prostorové rozložení objemu vody ve vědrech.) Chlazené CCD senzory pracují se šumem odpovídajícím několika elektronům.

Poloha ULX zdroje NGC 5408 X-1 v trpasličí galaxii NGC 5408. Zdroj: NASA/ESA/HST.



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

## Nejvzdálenější objekt?

Velmi zajímavým zábleskem, který detekovala observatoř Swift, je záblesk GRB 090429 B z dubna 2009. Nová analýza nahrávek dosvitu záblesku vedla astronomy z Pensylvánské státní univerzity v roce 2011 k závěru, že jde o dosud nejvzdálenější zaznamenaný objekt vůbec. Leží ve vzdálenosti 13,14 miliardy světelných roků. K záblesku došlo, když byl vesmír starý pouhých 520 milionů let (4 % dnešního stáří) a měl 10 % současných rozměrů. Gama záblesk byl vyslán pravděpodobně jednou z úplně prvních galaxií ve vesmíru a mohl by souviset se vznikem černé díry z velmi hmotné hvězdy nulté generace. Tyto hvězdy vznikaly v období 400 až 500 milionů let po vzniku vesmíru a jejich hmotnosti dosahovaly stovek Sluncí. Životní dráha těchto hvězd byla velmi krátká, snad i méně než milion roků. Ve svých nitrech vytvořily těžké prvky a poté je v grandiózních explozích rozmetaly do okolí. V rázových vlnách pak vznikaly i prvky těžší než železo, například olovo a uran. Observatoři Swift se podařilo přiblížit až k samotnému počátku našeho vesmíru a sledovat jeden z prvních objektů v něm.

■ Petr Kulháněk, 24. 6. 2011, AB 25/2011



## Jak vypadá černá díra v centru Mléčné dráhy?

Obří černé díry (někdy jim říkáme veledíry) se nacházejí v centrech většiny galaxií a v naší Galaxii – Mléčné dráze – je tomu nejinak. V některých galaxiích je v okolí centrální díry ještě dostatek materiálu, který padá do díry, zahřívá se a intenzivně září. Jde o aktivní a velmi svítivé galaxie. V jiných už černá díra potravu ze svého okolí vyjedla a je klidná a tichá. To, že v centru naší Galaxie je černá díra, tušili astronomové a fyzikové již velmi dávno. V současnosti shromáždili řadu důkazů o její existenci a postupně poznávají její vlastnosti. Pojďme se nyní se srdcem a motorem naší Galaxie seznámit.

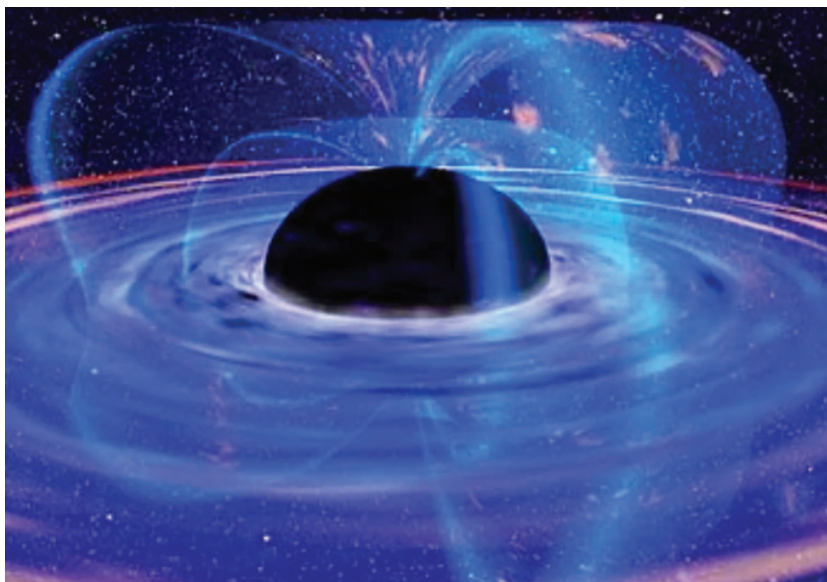
### Krátce z historie černých děr

Myšlenku existence tělesa, ze kterého by nemělo unikat světlo, poprvé zformuloval John Michell již v roce 1783 a hodnotu Schwarzschildova poloměru z newtonovské mechaniky odvodil Pierre Laplace v roce 1798. Skutečné řešení gravitačního pole v okolí sféricky symetrického tělesa našel až Karl Schwarzschild v roce 1916. Ukázalo se, že pokud jakékoli těleso stlačíme do malého objemu, stane se černou dírou, ze které do jejího okolí nemůže uniknout nejenom žádná hmota, ale ani světlo. Poloměr oblasti, do které se musí těleso dostat, se nazývá Schwarzschildův poloměr. Spočteme ho jednoduše ze vztahu  $R_g = 2GM/c^2$ , kde  $G$  je gravitační konstanta,  $M$  hmotnost tělesa a  $c$  rychlost šíření světla ve vakuu. Pro naše Slunce vychází Schwarzschildův poloměr 3 km a pro naši Zemi 9 mm. Je zřejmé, že obě tělesa mají k černým děrám hodně daleko.

Zajímavé je okolí černé díry. Na poloměru  $1,5 R_g$  se nachází

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

Černá díra v galaxii MCG-6-30-15. Silné magnetické pole zprostředkovává výměnu momentu hybnosti mezi rotující černou dírou a okolním plynem. Kresba ASA/ESA/XMM-Newton.



**Černá díra** – objekt, který kolem sebe zakříví čas a prostor natolik, že z něho nemůže uniknout ani světlo. Část z nich vzniká kolapsem hvězdy v závěrečných fázích vývoje, jiné, obří černé díry, sídlí 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.

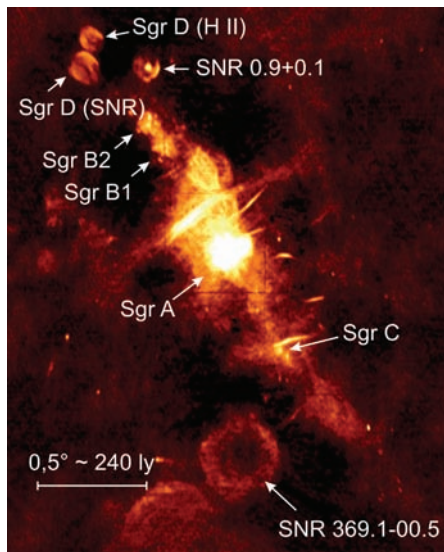
**Červený gravitační posuv** – závislost frekvence fotonů na vzdálenosti od tělesa. Fotony opouštějící těleso snižují svou frekvenci (červenají), naopak fotony přibližující se k tělesu zvyšují svou frekvenci (modrají). Jev je způsoben změnou rychlosti chodu hodin v blízkosti hmotných těles.

nestabilní kruhová orbita fotonů a na poloměru  $3 R_g$  poslední stabilní kruhová orbita částic. Většinu černých děr ale netvoří jednoduché Schwarzschildovy černé díry. Skutečné černé díry rotují. Řešení rovnic obecné relativity pro rotující černou díru našel Roy Kerr až v roce 1963. V roce 1967 John Archibald Wheeler poprvé pro tyto hypotetické objekty použil termín „černá díra“.

Podle současných představ by ve vesmíru měly být zastoupeny zejména dvě skupiny černých děr. První nazýváme hvězdné černé díry. Ty vznikají jako závěrečná stádia velmi hmotných hvězd, jejichž hmotnost je srovnatelná s desetinásobkem hmotnosti Slunce. Hvězdné černé díry mají enormní hustotu a jejich Schwarzschildův poloměr činí maximálně desítky kilometrů. Druhou skupinu tvoří tzv. galaktické černé díry, které sídlí v centrech galaxií a mají hmotnost milionů až miliard Sluncí a rozměry srovnatelné s rozměry dráhy Země či s velikostí sluneční soustavy. Takové velmi hmotné černé díry mají nízkou hustotu (pokud ji počítáme jako podíl hmotnosti černé díry a objemu oblasti dané Schwarzschildovým poloměrem). Okolní materiál dopadá po spirále do černé díry. Přitom získává energii z potenciální energie gravitačního pole, kterou třením účinně přeměňuje na záření. Pokud je v okolí dostatek látky, jsou galaktické černé díry významným zdrojem energie galaxie, stávají se jakýmsi hnacím motorem celé galaxie.

V roce 1971 byl družicí Uhuru zkoumán velmi silný rentgenový zdroj Cyg X1 ze souhvězdí Labutě (je znám od roku 1964). Družice našla fluktuaace intenzity rentgenového záření s periodou menší než jedna sekunda. Zdrojem záření musí být malý a velmi kompaktní objekt. Zdroj Cyg X1 se tak stal prvním vážným kandidátem na hvězdnou černou díru. Pozdější výzkum tuto domněnku podpořil. Ve skutečnosti jde o podvojný systém, jednou ze složek je proměnný veleobr HDE 226868, druhou je s největší pravděpodobností černá díra, která vznikla gravitačním kolapsem velmi hmotné hvězdy. K prvním kandidátům na galaktické černé díry patří objekt v centru eliptické galaxie NGC 4261. Na snímcích z HST z let 1992 a 1995 je patrný i rozsáhlý akreční disk kolem černé díry. Velmi silným argumentem ve prospěch existence galaktických černých děr je objekt v centru galaxie MCG-6-30-15, v jejímž spektru byl v roce 1994 u široké emisní čáry železa detekován mimořádný červený gravitační posuv odpovídající vyslání čáry z těsné blízkosti Schwarzschildova poloměru. Dnes známe mnoho objektů, o kterých jsme přesvědčeni, že jsou hvězdnými nebo galaktickými černými děrami.

Střed naší Galaxie v radiovém oboru. Zdroj: NRAO.



## Naše černá díra

Nejbližší velmi hmotná černá díra se nachází přímo ve středu naší Galaxie, v souhvězdí Střelce, ve vzdálenosti 26 000 ly. Celá oblast se projevuje především jako radiový zdroj Sgr A, který byl objeven v roce 1933 Karlem Guthem Janským. V roce 1974 Bruce Balick a Robert Brown zjistili pomocí radiové interferometrické sítě mezi Green Bankem a Huntersville (základna 35 km), že v oblasti existuje mj. bodový zdroj označovaný od té doby Sgr A\*. Kolem zdroje obíhá značné množství hvězd, Sgr A\* je vlastně středem hvězdokupy. Z přesného měření pohybu těchto hvězd dalekohledy VLT byla vypočtena hmotnost objektu jako  $4 \times 10^6$  hmotnosti Slunce, tomu odpovídá Schwarzschildův poloměr 0,08 au ( $12 \times 10^6$  km). Poznamenejme, že měření pohybu hvězd probíhalo a probíhá v blízkém infračerveném oboru, v jiných oborech jsou hvězdy v centrální oblasti Galaxie zakryty mračny plynu a prachu.

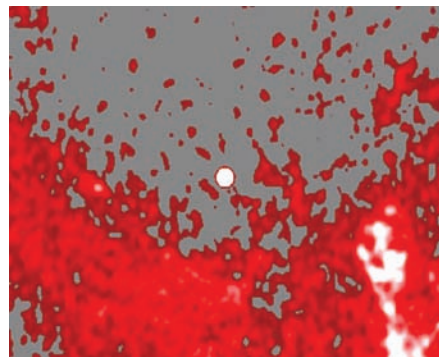
V roce 2005 byl proveden pokus o změření velikosti radiového zdroje Sgr A\* za pomoci interferometrické metody VLBI. K měření byla použita síť radioteleskopů VLBA s úhlovým rozlišením 0,001" na nejkratší množné vlnové délce 3 mm. Toto úhlové rozlišení umožnilo v oblasti zdroje sledovat detaily o rozměrech přibližně 1 au ( $150 \times 10^6$  km), tj. jen čtrnáctkrát větší, než je Schwarzschildův poloměr předpokládané černé díry. Z měření bylo zřejmé, že zdroj radiového záření je menší než 1 au. V roce 2008 byla provedena ještě přesnější měření (Andrea Ghezová, UCLA), která omezila velikost radiového zdroje Sgr A\* na pouhých  $50 \times 10^6$  km, tedy čtyřnásobek Schwarzschildova poloměru. Je zřejmé, že radiová emise přichází z těsné blízkosti horizontu černé díry.

Černá díra ve středu Galaxie je především zdrojem radiového záření, ale vysílá i v submilimetrové, infračervené a rentgenové oblasti spektra. Jak v infračerveném, tak v rentgenovém oboru vydává Sgr A\* záblesky trvající přibližně hodinu a nepravidelně se opakující po několika hodinách. V infračerveném oboru jde o synchrotronní záření elektronů s teplotou  $10^{11}$  K, malé procento elektronů je v průběhu záblesku zahřáté až na  $10^{12}$  K. V rentgenovém oboru je záření generováno inverzním Comptonovým rozptylem. Ve všech pozorovaných záblescích byla na VLT objevena v oboru 1,4 až 4  $\mu$ m kvaziperiodická složka se základní periodou 17 až 22 minut. Tato složka pravděpodobně souvisí s oběhem elektronů z vnitřní části akrečního disku kolem černé díry.

**VLT** – Very Large Telescope, čtveřice dalekohledů ESO postavená v Chile na Cerro Paranal (2 635 m). Dalekohledy mají celistvá zrcadla o průměru 8,2 metru (Antú – 1998; Kueyen – 1999; Melipal – 2000; Yepun – 2001). Názvy zrcadel znamenají v mapuštině Slunce, Měsíc, Jižní Kříž a Venuš. Sběrná plocha každého z velkých přístrojů je 53 metrů čtverečních. Dalekohledy jsou vybaveny systémy adaptivní a aktivní optiky. Další menší pomocné dalekohledy tvoří s hlavní čtveřicí výkonný interferometr o základně 200 m.

**UCLA** – University of California at Los Angeles. Univerzita, která byla založena jako jižní část Kalifornské univerzity v roce 1919.

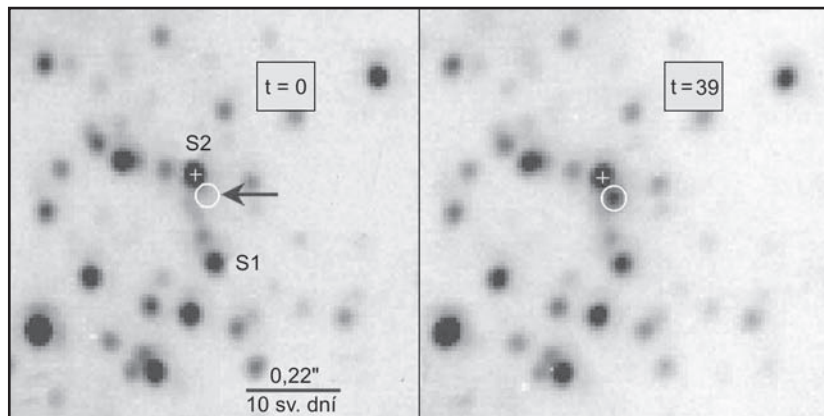
Na obrázku z radioteleskopické sítě VLA je dobře patrný bodový radiový zdroj Sgr A\*, který se nachází v centru Galaxie. Oblast na snímku má rozměr přibližně 1 ly. Zdroj: VLA/NRAO/AUI J.-H. Zhao, W. M. Goss.



**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 radiových zdrojů. Metoda spočívá v měření časových korelací zaznamenaných šumových signálů třemi a více radioteleskopy, umístěnými na zemském povrchu ve velké vzdálenosti od sebe. Nejcitlivější síť je evropská EVN, nejznámější americká VLBA – 10 radioteleskopů o základně 8 600 km). Pomocí této metody je definován souřadnicový systém ICRS.

Detekce jednoho ze záblesků v blízkém infračerveném oboru (na vlnové délce 1,65  $\mu\text{m}$ ). VLT/UT 4 (Yepun),  $t_0 = 6:59:24$  UT, 9. května 2003.



Poslední stabilní orbita pro Schwarzschildovu černou díru o hmotnosti  $4 \times 10^6 M_{\odot}$  má periodu přibližně 30 minut. Ze zhruba dvacetiminutové periody záblesků plyne, že musí jít o rotující (Kerrovu) černou díru, která kolem sebe svou rotací strhává časoprostor (Lenseův-Thirringův jev). Samotná geneze záblesků je nejasná, nejčastěji se uvažuje o přepojení magnetických siločar (vždy po několika hodinách), při kterém se uvolněná energie předává elektronům. Na světelné křivce záblesků tak lze najít jednotlivá maxima odpovídající rekonekcím (přepojení) a kvaziperiodickou složku odpovídající oběhu plazmatu kolem černé díry. Elektronů zahřáté při rekonekci poté předávají svou energii fotonům při inverzním Comptonově rozptylu, čímž vzniká rentgenová složka záblesků. Ze simultánního pozorování v infračerveném (VLT) i rentgenovém (XMM-Newton) oboru vyplynulo, že rozměry zdroje záblesků jsou cca 0,3 Schwarzschildova poloměru, což souhlasí s představou, že záblesky vznikají rekonekcí magnetických siločar v malé oblasti akrečního disku. Všechny záblesky mají stejnou, velmi výraznou rovinu polarizace a jedná se o stabilní zdroj. Rovina polarizace záblesků bude pravděpodobně dána silnou toroidální složkou magnetického pole v akrečním disku. Popsaný model odpovídá měřeným datům, nicméně zatím není s jistotou potvrzen. Alternativou může být teorie rotující anomálie v akrečním disku.

V roce 2008 vyplynulo z měření rentgenových družic Chandra, XMM-Newton, Suzaku a ASCA, že blízká oblast označovaná jako Sgr B2, měnila v průběhu posledních sedmi let výrazně svou jasnost.

Zpětným dopočtem se ukázalo, že jde o důsledek obřího záblesku z centrálního zdroje Sgr A\*, ke kterému došlo přibližně před 300 lety. V té době měla centrální černá díra krátkodobě milionkrát vyšší svítivost, než má dnes. Takový záblesk by odpovídal katastrofické (globální) rekonekci magnetických siločar.

V roce 2011 byl objeven oblak plynu G2 o hmotnosti  $3 M_{\oplus}$ , který začal v roce 2013 prolétat v těsném okolí centrální černé díry.



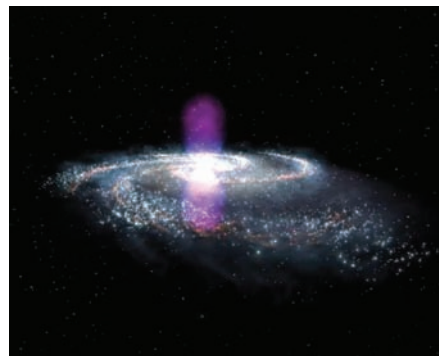
Jeho čelo získalo rychlost 500 km/s a oblak byl slapovými silami roztažen na 160 světelných hodin. Čelo oblaku je ionizované a prošlo pericentrem na počátku roku 2014. Tento mimořádný úkaz je sledován v rámci pozorovacích programů Velmi velkého dalekohledu VLT a Velkého atacamského milimetrového pole radioteleskopů ALMA, které bylo zprovozněno v roce 2012.

Pohyby hvězd v bezprostředním okolí centrální černé díry zjišťuje experiment GRAVITY na čtveřici dalekohledů VLT. Experiment využívá plně interferometrický režim všech dalekohledů pro blízký infračervený obor, včetně adaptivní optiky a systému sledování interferenčních proužků. Experiment umožňuje testování obecné relativity v limitě extrémně silných gravitačních polí a je vhodný i ke sledování velmi hmotných černých děr v aktivních jádrech několika desítek dalších galaxií.

Dalším krokem k poznání černé díry v centru Mléčné dráhy by mělo být propojení pozorování dalekohledů VLT s radioteleskopem APEX, prvním radioteleskopem sítě ALMA, a uvažuje se o propojení radioteleskopické sítě ALMA s americkou radioteleskopickou sítí VLBA. Potenciál takové obří sítě by měl umožnit spatřit i stín vrhaný centrální černou dírou a zčervenání paprsků vycházejících z akrečního disku. Mělo by být možné i přesně určit rotaci černé díry a sklon akrečního disku k rovině Galaxie. Proto se již nyní máme na co těšit.

■ Petr Kulhánek, 26. 2. 2010, AB 8/2010, aktualizováno

**APEX** – Atacama Pathfinder Experiment, dvacítimetrový radioteleskop ESO umístěný v Chile v Atacamské poušti ve výšce 5 080 metrů nad mořem. Do provozu byl uveden v roce 2007, stal se prvním radioteleskopem ze zamýšlené sítě 66 radioteleskopů ALMA.



Na konci roku 2010 byly objeveny rentgenovou a gama observatoří Fermi gama bubliny vycházející z Mléčné dráhy do vzdálenosti 50 000 světelných roků. Pravděpodobně jde o výtrysky z centrální černé díry. Zdroj: NASA.

## Kompaktní trpaslík M60–UCD1

Na konci devadesátých let minulého století byly objeveny a poprvé popsány velmi kompaktní a současně malé trpasličí galaxie, které dostaly označení UCD (*Ultra-Compact Dwarf galaxies*). Jde o eliptické galaxie, jejichž rozměry se pohybují v rozmezí od desítek do zhruba stovky parseků. Absolutní vizuální magnituda  $M_V$  takových objektů přitom dosahuje hodnot v rozsahu  $-9$  až  $-14$ . Mělo by tedy jít o objekty čítající miliony až stovky milionů hvězd. Tito kompaktní galaktičtí trpaslíci jsou obvykle gravitačně svázáni s obřimi galaxiemi v jejich bezprostřední blízkosti. Ve velkých galaktických kupách se pak pohybují jako jejich souputníci a mohou s nimi být propojeni i měřítkově odpovídajícími vlákny mezigalaktického plynu či jiné mezigalaktické

látky. Galaxie UCD byly nejdříve v hojném počtu objeveny při spektroskopických přehlídkách v galaktické kupě v Peci, v Panně a v mnoha jiných blízkých kupách.

### M60–UCD1

V blízkosti obřích eliptických galaxií M60 byl objeven prozatím nejhustší galaktický objekt, který je také klasifikován jako UCD. Tento galaktický trpaslík byl označen M60–UCD1 a jeho vzdálenost od nás byla určena na 54 milionů světelných roků, stejně jako sousední M60. Trpaslík M60–UCD1 je tvořen hmotou odpovídající 200 milionům Slunci. Polovina této hmotnosti je v prostoru ale natěsnána do objemu s poloměrem jen 80 světelných roků. Průměrná hustota galaktické látky je zde tedy cca  $15\,000\times$  vyšší než v okolí Slunce v místním

Obřích eliptická galaxie M60 (NGC 4649) ve vzdálenosti 54 milionů světelných roků je na snímku HST uprostřed. Vpravo nahoře, ve vzdálenosti 60 milionů světelných roků, je spirální galaxie NGC 4647. Kompaktní trpasličí galaxie M60–UCD1 je označena šipkou. Snímek je pořízen ve viditelné oblasti. Zdroj: NASA/ESA/HST.

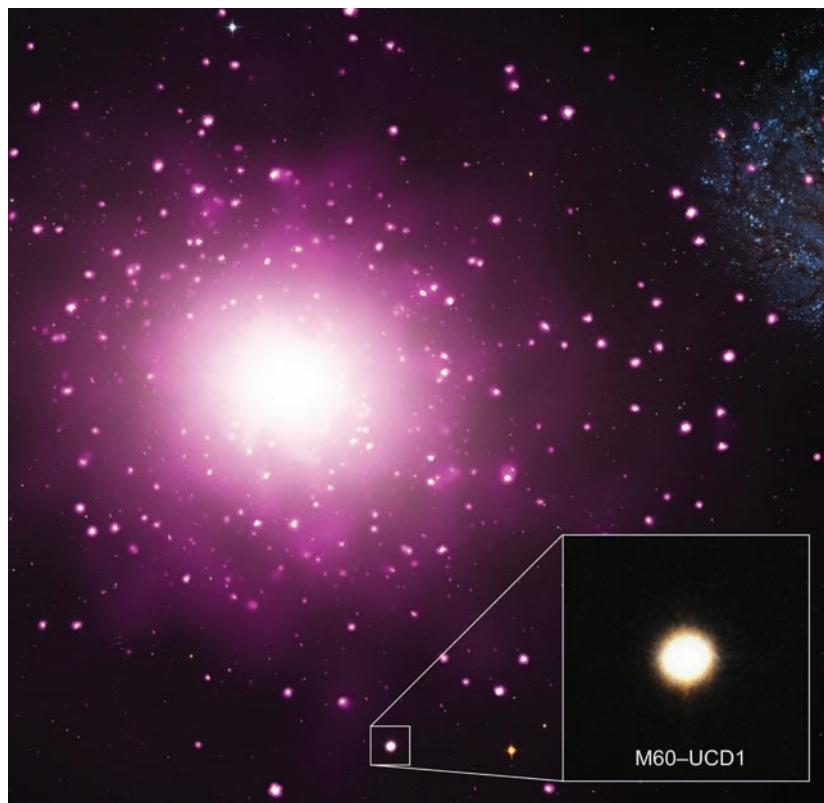


galaktickém rameni. Znamená to, že hvězdy tu mají k sobě průměrně 25× blíže než v okolí Slunce. M60–UCD1 byl studován pomocí HST, rentgenové observatoře Chandra a také pozemskými dalekohledy Keck na Havaji a MMT v Arizoně. Výsledky seriózní práce bývají ve vědeckém světě málokdy publikovány v článcích s tak emotivním názvem, jako se stalo v tomto případě. Článek je nadešán stroze, bez obvyklého označení pozorovaného objektu jménem nebo číslem: *The Densest Galaxy* (Nejhustší galaxie). Znamená to, že jde skutečně, i dle mínění autorů práce, o astronomický unikát.

Trpaslík byl objeven na snímcích z Hubblova dalekohledu v roce 2012 a promítá se do vzdálenosti 6,6 kpc od jádra M60. Hmotnost tak mohla být nezávisle odvozena jednak ze svítivosti prostřednictvím naměřených spekter a současně z vlastního pohybu vůči galaxii M60. Oběma metodami vychází jak svítivost, tak viriálová hmota ekvivalentní množství kolem 200 milionů Sluncí. Z naměřených spekter bylo zjištěno poměrně vysoké zastoupení kyslíku, uhlíku, dusíku, sodíku, hořčíku, křemíku, vápníku a titanu. Znamená to, že by v mezihvězdném materiálu mohl být dostatek látky na vytvoření planet kolem tamních hvězd. Současně byl trpaslík M60–UCD1 na snímcích observatoře Chandra odhalen jako silný a proměnný rentgenový zdroj, jehož svítivost odpovídá centrální galaktické černé díře o hmotnosti  $10^7$  Sluncí. Detailní spektrální analýza a prostorové proměření svítivosti tohoto zdroje a jeho okolí odpovídají nejstarším hvězdným populacím. Je tedy možné, že pozorovaná galaxie je jen reliktem dávného mnohem většího objektu, z něhož se dochovalo jen galaktické jádro.

**Parsek** – jednotka vzdálenosti, tzv. paralaktická sekunda. Jde o vzdálenost, ze které by velká poloosa dráhy Země kolem Slunce byla vidět pod úhlem jedné obloukové vteřiny. Číselně je  $1 \text{ pc} = 30 \times 10^{12} \text{ km}$ , což je zhruba 3,26 světelného roku. Často používanými násobky jsou kiloparsek (kpc) a megaparsek (Mpc).

Na pozadí je kombinovaný snímek oblasti v RTG a vizuálním oboru. Ve výřezu je fotografie kompaktního trpaslíka M60–UCD1 z Hubblova dalekohledu ve vizuálním oboru. Zdroj: NASA/ESA.



**Magnituda absolutní** – neboli absolutní hvězdná velikost je magnituda objektu, kterou by měl ve vzdálenosti 10 pc od nás. Závísí jen na skutečné svítivosti objektu. Zadáváme-li vzdálenost objektu v parsecích, platí mezi absolutní a relativní magnitudou jednoduchý vztah:  $M = m + 5 - 5 \log r$ .

Na horním obrázku je okolí M60 ve viditelném světle z HST, na dolním taťáž oblast v rentgenové oblasti z observatoře Chandra. Dolní snímek zobrazuje rentgenové zdroje s vysokou energií. Zdroj: HST/Chandra.



## Závěr

Je stále otázkou, o jaký objekt zde jde. Jsou známé podobně kompaktní kulové hvězdokupy, které ale nedosahují tak extrémních hmotností. Největší kulové hvězdokupy naší Galaxie obsahují jen miliony hvězd, ne stovky milionů. Tedy o dva řády méně, co se týče hmotnosti. Málokterá má ve svém jádru galaktickou černou díru a i centrální černá díra v jádru Mléčné dráhy dosahuje jen 4 milionů Sluncí. Tedy M60–UCD1 je v tomto srovnání skutečně něčím dosud nevídaným. Pokud se ale nepodaří odhalit minulost tohoto trpaslíka jen ze studia jeho samého, bude nutné hledat v galaktických kupách podobně extrémní objekty a doufat, že se jich podaří nalézt dostatečné množství, aby bylo možné rekonstruovat jejich historii pomocí statistických metod.

■ Ivan Havlíček, 11. 10. 2013, AB 31/2013





## Prstencové galaxie

Galaxie jsou hvězdné ostrovy čítající na stovky miliard hvězd a hmotností srovnatelné množství mezihvězdné látky. Od Hubblových dob, kdy byly galaxie rozpoznány jako samostatné soustavy srovnatelné s Mléčnou dráhou, byly tříděny a klasifikovány podle nejrůznějších kritérií. Prvním z nich byl pochopitelně jejich tvar. Vznikla tzv. Hubblova klasifikace, která je používána dodnes, a pro nejrůznější účely je toto základní rozřazení nejrůzněji rozšiřováno. Už na prvních fotografických palomarských přehlídkách oblohy bylo zachyceno mnoho galaxií, které neměly tvary natolik pravidelné, aby se daly jednoduše zařadit. Nepravidelné galaxie mají mnoho podob a mnohé z nich jsou nepravidelné jen ve viditelné oblasti světla. To však nemohlo být známo prvním průkopníkům galaktických klasifikací. Velké palomarské fotografické snímkování oblohy skončilo v roce 1956. Z něho vycházel katalog Haltona Arpa z roku 1966, který obsahuje 338 nepravidelných galaktických soustav. Je zde velmi podrobná tvarová klasifikace nejrůznějších galaktických roztodivností. V samostatné třídě jsou zde uvedeny celkem tři galaxie s přidruženým prstencem. Galaxie s koncentrickými prstenci jsou zde uvedeny v jiné skupině a Arpův katalog jich obsahuje pět. Tedy žádná velká sláva, galaxií s prstencem je na nebesích jako šafránu. Jde však o velmi zajímavé a dynamické objekty, které jsou galaktickými astronomy neustále vyhledávány a podrobně studovány.

### Dva příklady

Snad nejnámější prstencovou galaxií ve viditelném oboru je Hoagův objekt. Art Hoag jej objevil v roce 1950 a původně si myslel, že jde o planetární mlhovinu obklopující jasnou hvězdu. Teprve v průběhu sedmdesátých let se ukázalo, že jde o prstencovou galaxii. Původně jde snad o spirální galaxii. Náznak spirálních ramen je v prstenci ještě patrný. Ze souvislé galaxie ale dnes zůstalo jen osamocené jádro a okrajové oblasti disku, které s ním nejsou nijak zřetelně propojeny. V průhledu mezi prstencem a jádrem prosvítají i vzdálené galaxie. Vzdálenost objektu je 600 milionů světelných roků.

Objektem, který na první pohled na prstencovou galaxii nevypadá, je Sombrero v souhvězdí Panny. Flammarion tento objekt zařadil do Messierova katalogu pod číslem M104. Galaxie je známa amatérským

**SST (Spitzer Space Telescope)** – Spitzerův vesmírný dalekohled. Kosmická observatoř NASA pracující v infračerveném oboru, která byla vynesena na oběžnou dráhu v srpnu 2003 nosnou raketou Delta 7920H ELV. Zrcadlo má průměr 85 cm a je chlazené kapalným heliem na teplotu 5,5 K. Pozorovací spektrální rozsah je 3 až 180  $\mu\text{m}$ . Předpokládaná životnost byla 5 let, SST ale funguje dodnes.

**HST (Hubble Space Telescope)** – Hubbleův vesmírný dalekohled. Největší dalekohled na oběžné dráze kolem Země, kde byl v roce 1990 umístěn do výšky 614 km. Průměr primárního zrcadla je 2,4 m. Z hlediska kosmologie je zajímavý HST Key Project (klíčový projekt HST), který v roce 1999 posloužil k prvnímu přesnému určení Hubblových konstant. V lednu 2004 NASA zrušila servisní mise k tomuto unikátnímu přístroji, nicméně v roce 2006 bylo rozhodnuto o poslední servisní misi, která měla proběhnout v roce 2008. Mise byla kvůli závadě odložena a uskutečnila se v květnu 2009.

Hoagův objekt vyfotografovaný Hubbleovým dalekohledem. Zdroj: NASA/ESA.



GALEX (Galaxy Evolution Explorer) – observatoř NASA určená ke studiu galaxií v ultrafialovém oboru. GALEX pracuje od roku 2003. Hlavním přístrojem je Cassegrainův dalekohled o průměru primárního zrcadla 50 cm. Dalekohled zobrazí oblast o průměru  $1,2^\circ$ . Pracuje v FUV pásmu (135 až 175 nm) a NUV pásmu (175 až 280 nm) s rozlišením 6 až 8 úhlových sekund. Observatoř také pracuje v režimu s rozlišením 1 úhlové sekundy pro astrometrii a UV záření kosmického pozadí.

Kompozitní snímek prstencové galaxie Arp 147 ve Velrybě ve vzdálenosti  $440 \times 10^6$  ly. Napravo je postupně IR snímek z SST, viditelný snímek z HST, UV snímek z observatoře GALEX a RTG snímek z observatoře Chandra. Snímek vlevo je prolnutím všech čtyř záznamů. Levá galaxie byla původně eliptickou, pravá, z níž zůstal jen prsteneček, byla pravděpodobně spirální. Zdroj: Chandra.



astronomům, jelikož je viditelná už v sedmcentimetrovém dalekohledu. To, že jde ve skutečnosti o prstencovou galaxii, odhalil až Spitzerrův vesmírný dalekohled. Rovina disku je příliš sklopená, než aby bylo možné v přesvětlené střední části rozpoznat ve viditelném světle hvězd podrobnější velkorozměrovou strukturu. Teprve v infračerveném světle je patrný velmi zřetelně od jádra oddělený chladný prachový prsteneček. Vzdálenost galaxie je 28 milionů světelných roků.

## Mechanismus vzniku

V sedmdesátých letech byly hledány první scénáře vzniku prstencových galaxií. Díky výpočetní technice se podařilo Rogeru Lyndsovi a Alaru Toomrovi namodelovat vznik prstence při průniku pravidelné diskové soustavy menším objektem. Výsledek publikovali v roce 1976. Simulacemi se snažili vysvětlit podrobná pozorování prstencové soustavy galaxie II Hz 4. Nalezené dynamické scénáře docela dobře odpovídaly dnešnímu stavu soustavy a naměřeným rychlostem vzdalování a rozšiřování prstence.

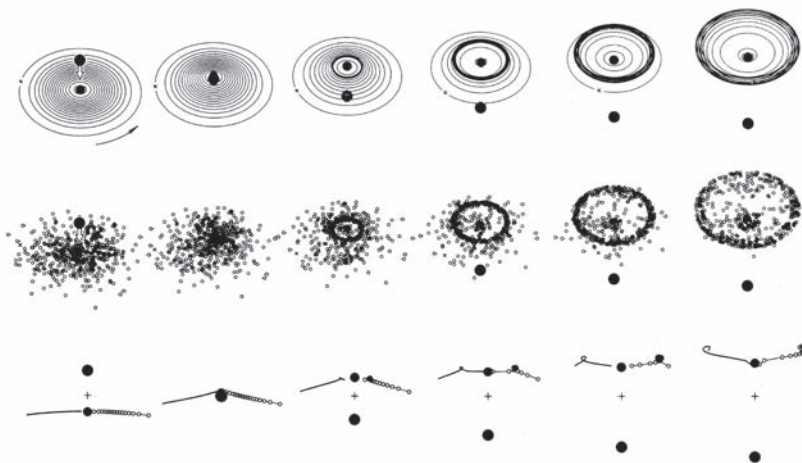
Dnes je známo mnoho desítek prstencových soustav, které potvrzují a zpřesňují naše představy o galaktickém prolínání a procesech, které přitom probíhají. Galaxie jsou obrovské soustavy, jejichž prolínání

zabere odpovídající množství času, i když probíhá pro nás nepředstavitelnými rychlostmi stovek až tisíců kilometrů za sekundu. I tak ale tyto procesy trvají stovky milionů roků. Cokoliv takového dnes u galaxií pozorujeme, je vlastně jen statickým obrazem probíhajících dějů. Do minulosti lze ale díky rozpínajícímu se vesmíru předpovídat podobné děje v mnohem četnějším měřítku (dříve byly galaxie k sobě blíže) a pokud se takové procesy podaří pozorovat, bude užitečné srovnat je s blízkými objekty. Takovým velmi vzdáleným galaktickým prstencem je zajímavý objekt 2MASX J06470249+4554022,

který byl přejmenován na Kolo ve Vozkovi (*Auriga Wheel*). Je od nás obrovsky vzdálen, jeho červený kosmologický posuv  $z = 0,111$ . Je tedy obdivuhodné štěstí, že se podařilo v takové vzdálenosti (cca 1,5 miliardy světelných roků) rozpoznat prstencovou galaxii. Pro srovnání – celooblohové galaktické přehledky končí zhruba na této vzdálenosti pro neprůniknutelnost prostoru přes blízké objekty a mezigalaktickou látku. Do větších vzdáleností je možné se dívat jen velmi úzkými průhledy v blízké materii. Objekty v těchto vzdálenostech už velmi obtížně dokážeme tvarově klasifikovat. V mnoha případech jde jen o svítící body a matné obrysy větších soustav.

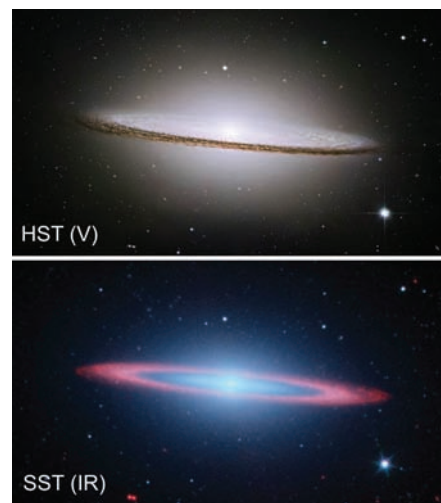
Zatím to vypadá, že při „té správné“ poloze a poměru vzájemných hmotností pronikajících se galaktických soustav vznikne prstencová struktura zákonitě. Je dokonce velmi pravděpodobné, že se tak dělo i v hluboké minulosti. Při takových galaktických pronikáních vznikají nové hvězdy v mnohem větším měřítku a na menším prostoru než při jiných známých procesech. Je proto možné, že se podaří pozorovat i vznik a zánik hvězd srovnatelných s prvními vesmírnými generacemi hvězd. Prozatím jen z nepřímých důkazů a pozorování odvozujeme, že první hvězdy, které ve vesmíru vznikly, byly o několik řádů hmotnější než dnešní pozorované objekty a žily díky tomu extrémně krátkou dobu. Při vzniku galaktických prstenců je pravděpodobné, že budou vznikat také extrémně velké hvězdy s krátkou životností. Prozrazují to snímky v rentgenovém oboru, na nichž je patrný horký plyn ohříváný okolím obřích černých děr, do kterých se velké hvězdy přetvořily.

■ Ivan Havlíček, 26. 9. 2011, AB 36/2011



Numerická simulace průniku kompaktní (2/3 hmoty galaxie) galaxií a vzniku prstence. Zdroj: Harvard.

Galaxie Sombrero. Zdroj: HST/SST.



## Když vybuchne supernova

Často se v médiích objevují „zaručené zprávy“ o konci světa a nezřídka jsou doprovázeny zmínkou o výbuchu supernovy, která svým zářením rozsvítí noční oblohu do denního jasu a připraví zemský povrch o vše živé. Je takový scénář možný? A co je to vlastně supernova? Pojďme se na téma supernov podívat podrobněji, zejména na některé mýty, jež toto téma obestírají.

K výbuchu supernovy dochází v závěrečném stádiu života velmi hmotných hvězd, alespoň  $8\times$  hmotnějších, než je naše Slunce. Život hvězdy – to je neustálý souboj gravitace, snažící se hvězdu smrštit do co nejmenšího objemu, a tlakového gradientu, který působí směrem opačným a hvězdu naopak „nafukuje“. Po většinu života jsou obě tyto síly v rovnováze, ale na jeho konci dojde k finálnímu souboji. V něm může být dočasně silnějším soupeřem tlakový gradient, který je zejména u hmotnějších hvězd podporován tlakem záření unikajícího z jádra, ale konečným vítězem je vždy gravitace, která hvězdu smrštití na setinu, nebo dokonce až stotisícinu původního poloměru. V prvním případě

je konečným stadiem bílý trpaslík, ve druhém pak neutronová hvězda. A právě druhý případ je doprovázen komplexním sledem událostí, jež souhrnně označujeme jako výbuch supernovy.

### Třídíme supernovy

Hlavním kritériem pro klasifikaci supernov je přítomnost čar vodíku v jejich spektru. Supernovy, v jejichž spektru přítomnost vodíku nezjistíme, zařazujeme do třídy I (SN I), tam, kde se spektrální čáry projeví, hovoříme o typu II (SN II). Supernovy SN I dále dělíme na podtypy Ia (přítomny spektrální čáry křemíku), Ib a Ic (dle obsahu helia). Supernovy typu Ia jsou nejsvitivější, supernovy typů

*Pozůstatek po explozi supernovy SN 1987A ve Velkém Magellanově oblaku. Jde o typickou supernovu typu II, která explodovala ve vzdálenosti 167 000 ly. Signál k nám doletěl v roce 1987. Prstence jsou zahřáté na teplotu 5 000 až 25 000 kelvinů. Centrální prstenec se vytvořil asi 30 000 roků před explozí hvězdy a je tedy fosilním záznamem závěrečných stadií hvězdného života v sousední galaxii. Zdroj: HST/WFPC2, 1997.*





Ib a Ic jsou několikrát méně svítivé, stejně jako supernovy typu II, jejichž jasnost však dosti kolísá.

Daleko důležitější je pro nás ale fakt, že zatímco supernovy typu Ia nacházíme ve všech typech galaxií, supernovy typů Ib, Ic a II pozorujeme pouze v galaxiích nepravidelných nebo spirálních (zejména v oblasti spirálních ramen). Protože spirální a nepravidelné galaxie obsahují velké množství mezihvězdné látky a jsou tudíž místem intenzivní tvorby hvězd, domníváme se, že progenitory (vývojovými předchůdci) supernov typu II, Ib a Ic jsou právě mladé hmotné hvězdy, které se zde zrodily před pouhými několika miliony let.

Naopak supernovy typu Ia nacházíme i v eliptických galaxiích, které jsou na mezihvězdnou hmotu velmi chudé a prakticky žádné nové hvězdy se zde nevyskytují. To znamená, že supernovy Ia musejí vznikat ze starších a tedy méně hmotných hvězd než supernovy výše uvedených typů, a také mechanismus jejich vzniku je odlišný.

## Kolabující jádra hvězd

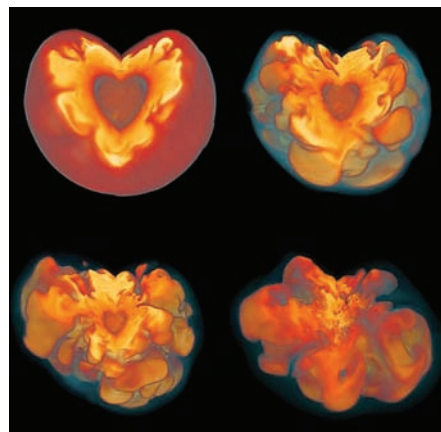
Supernovy typu Ib, Ic a II vznikají v důsledku gravitačního kolapsu jádra hmotných osamocených hvězd. Vývoj vnitřních částí hvězdy je vlastně jedním dlouhotrvajícím gravitačním kolapsem. Hvězda kolabuje takovou rychlostí, s jakou dochází ke ztrátám energie vyzařované do jejího okolí. Kvůli nim je termonukleární reaktor v nitru hvězdy nucen energii doplňovat, aby udržela dostatečný tlakový gradient odlaňující tíže okolních vrstev.

Jádro hvězdy, ve kterém dochází k termonukleární syntéze jader lehčích prvků na těžší, je zároveň skladištěm „vyhořelého“ paliva, které se ukládá v jeho centru. Kromě těžších prvků jsou produktem termonukleárních reakcí také neutrina a pozitrony. Vzhledem k postupnému zahušťování jádra a zvyšování teploty se ale produkty předchozích reakcí stávají novým palivem a dochází k syntéze těžších a těžších prvků. Pro hmotné hvězdy v závěrečném stadiu vývoje je proto typická slupkovitá struktura nitra, v jehož jednotlivých vrstvách dochází směrem k centru k produkci stále těžších prvků.

Jádro hvězdy zpočátku kolabuje velmi pomalu, neboť výkon termojaderných reakcí je dostatečný k tomu, aby poskytoval stejnou energii, jakou hvězda pozbývá díky záření a odlétávajícím neutrinům. Pokaždé, když v nitru dojde příslušné palivo, jádro se smrští, zahřeje a nastartuje se nová jaderná reakce. Po spálení helia jsou následující

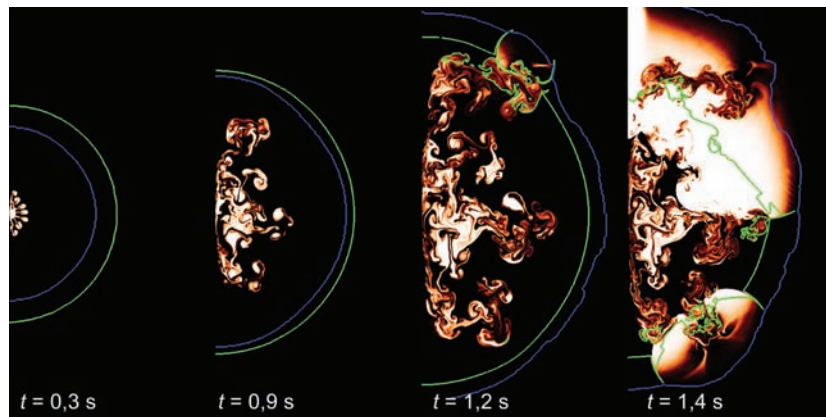
**Supernova – rozmetání podstatné části hvězdy, při kterém vznikne extrémně jasný objekt, jehož svítivost se o více než 4 řády zvýší. Minimálně 10 % hmotnosti původní hvězdy se přemění na energii exploze. Svítivost posléze klesá v průběhu týdnu či měsíců. K tomuto konci vedou dvě možné cesty: buďto se jedná o velmi hmotnou hvězdu, která ve svém jádře vyčerpala zásoby paliva a začala se hroutit pod silou své vlastní gravitace na neutronovou hvězdu, nebo o bílého trpaslíka, který nahromadil materiál od svého hvězdného průvodce, dosáhl Chandrasekharovy meze a prodělal objemovou termonukleární explozi.**

Numerická simulace časového vývoje rozpínající se bubliny, která vytváří na svém vnějším okraji rázovou vlnu. Zdroj: K. Kifonidis a kol., Max Planck Institut.



**Supernova typu Ia** – závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy. Tvoří-li dvojhvězdu bílý trpaslík a obr (veleobr) nebo hvězda hlavní posloupnosti, může docházet k přenosu látky na bílého trpaslíka, který tak zvětšuje svoji hmotnost. Po překročení Chandrasekharovy meze ( $1,4 M_{\odot}$ ) se bílý trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy, dojde k explozivnímu termonukleárnímu hoření C a O na  $^{56}\text{Ni}$  v celém objemu trpaslíka a uvolněná potenciální energie se projeví jako výbuch supernovy typu Ia. Množství energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze identifikovat podle tvaru jejího spektra, ve kterém chybí čáry vodíku a jsou přítomné čáry křemíku.

Časový vývoj deflagrační vlny, která se podzvukovou rychlostí šíří do chvíle, kdy materiál dosáhne kritické hustoty (vyznačeno zeleně). V té chvíli přechází v detonaci. Modře je označena hranice původního konvektivního jádra. Zdroj: Aaron Jackson, Laboratory for Computational Physics and Fluid Dynamics, Washington.



reakce obrovsky urychleny díky skokovému navýšení ztrát energie odnášené neutriny. Při teplotě kolem jedné miliardy kelvinů dojde v nitru k rovnováze mezi počtem volných elektronů a pozitronů vznikajících při jaderných reakcích. Při vzájemné anihilaci těchto částic se může vytvořit pár neutrino-antineutrino, který díky malému účinnému průřezu interakce s hmotou opouští hvězdné nitro a energetické ztráty hvězdy se tak zněkolikanásobují. Zatímco hoření vodíku probíhá v nitrech velmi hmotných hvězd miliony let (u hvězd hmotnosti Slunce miliardy let), hoření uhlíku probíhá již jen tisíce let a hoření křemíku pouhé 2 týdny!

Cyklus zážehu nových termonukleárních reakcí končí u prvků skupiny železa, které vykazují maximální hodnotu vazebné energie na nukleon. Další syntézou těchto prvků by jádro energii potřebnou k zastavení kolapsu nezískalo. Hvězda však nadále ztrácí energii prostřednictvím neutrin, jejichž tok v tu chvíli převyšuje tok neutrin ze Slunce o 15 řádů. Jádro je o cennou energii navíc okrádáno dvěma dalšími procesy. Při hustotách blízkých  $10^{10} \text{ g/cm}^3$  dochází ke „vtlačování“ elektronů do protonů v jádrech, čímž dochází k zvyšování neutronového čísla. A protože volné elektrony jsou v elektronově degenerovaném jádře hlavním zdrojem tlaku, je jejich úbytek dalším důvodem k vychýlení rovnováhy ve prospěch gravitace.

Železné jádro, zbavené možnosti bránit se drtivé síle gravitace, se počíná hroutit volným pádem, jehož rychlost dosáhne až čtvrtiny rychlosti světla. Původní jádro o velikosti Země se v řádu sekund smrští do tzv. protoneutronové hvězdy o poloměru kolem 30 km. Tento útvar je důsledkem ustavení krátkodobé rovnováhy mezi gravitací a repulzivní složkou jaderných sil, které se uplatní při hustotě přibližně  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  (díky působící gravitaci je to dvojnásobek hustoty atomového jádra). Důsledkem ustavení krátkodobé rovnováhy ve vnitřní části kolabujícího jádra je vznik mohutné rázové vlny, která vznikne při pádu vnějších vrstev na protoneutronovou hvězdu. Dříve jsme

měli zato, že právě tato rázová vlna je zodpovědná za „výbuch“ supernovy, tj. rozmetání veškeré hmoty nad hranici proton-neutronové hvězdy. Tento mechanismus výbuchu supernovy při kolapsu jádra na neutronovou hvězdu poprvé nastílnili Fritz Zwicky a Walter Baade roku 1939.

Ve skutečnosti se ale rázová vlna během několika tisícín sekundy rozpadne, a to díky obrovským ztrátám energie odlétávajícími neutrinami a jadernou fotodisintegrací železa. Následně pokračuje akrece hmoty na neutronovou hvězdu v jádře, a to rychlostí několika desetin hmotnosti Slunce za sekundu! V případě supernovy však akrece trvá jen zlomek sekundy, jedna sekunda je čas postačující ke vzniku černé díry. Během následujících několika sekund vyzáří proton-neutronová hvězda pomocí unikajících neutrin až 10 % své klidové hmotnosti. Na úkor vyzářené energie se smrští do koule o typickém průměru 10 km – vznikne neutronová hvězda.

Obálka obklopující jádro hvězdy je následně rozmetána do okolního vesmíru. Ačkoli je tento „výbuch“ způsoben unikajícími neutrinami, nejedná se o přímočarý proces. Tento problém zaměstnával astrofyziky po několik desítek let a rozřešen byl až po rozvoji výpočetní techniky, kdy mohly být provedeny vícerozměrné simulace kontrakce proton-neutronové hvězdy a transformace energie neutrin do jejího bezprostředního okolí. Ta se ukládá do horké nafukující se „bubliny“ naplněné fotony vzniklými při anihilaci neutrin a také elektron-pozitronovými páry. Rozpínající se bublina vytváří na svém vnějším okraji rázovou vlnu, která je zodpovědná za pozorovaný „výbuch“. Atmosféra neutronové hvězdy, složená ze záření, elektron-pozitronových párů, neutrin a volných protonů a neutronů, připomíná složení našeho vesmíru jen několik minut po jeho vzniku! Opět se zde projevuje fakt, že cesta ke studiu počátečních fází vesmíru vede k vysokým energiím.

### Těžší než železo

Je všeobecně známo, že prvky s atomovým číslem vyšším, než má železo, vznikají pouze při výbuších

**Supernova typu Ib** – velmi hmotná hvězda v závěrečném stádiu, která se zbavila obálky z vodíku. Zůstala jí však obálka z helia, která tvoří výraznou absorpční čáru na vlnové délce 570 nm. Spektrum dále obsahuje typické čáry O I, Ca II, Mg II, zcela chybí čáry vodíku. Příkladem může být objekt SN 2008D v galaxii NGC 2770 v souhvězdí Rysa ve vzdálenosti  $88 \times 10^6$  světelných roků.

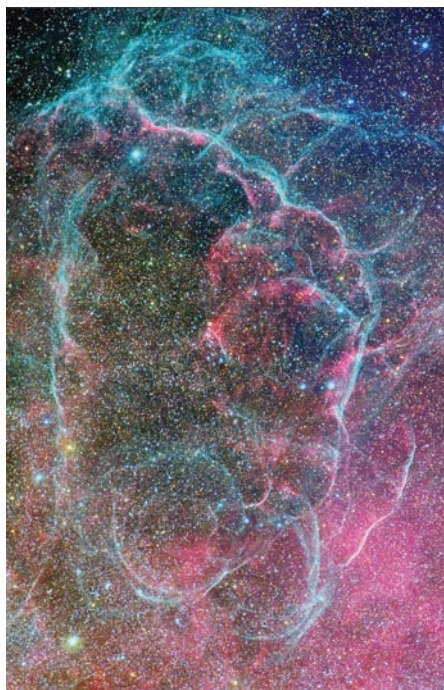
Supernovu SN 2011fe, která vybuchla v roce 2011 v galaxii Větrník (Pinwheel Galaxy), se podařilo vyfotografovat pouhých 11 hodin po výbuchu. Srovnáním snímků před explozí a po explozi byl identifikován průvodce (nepozorovaného) uhlíko-kyslíkového trpaslíka. Jednalo se o hvězdu hlavní posloupnosti. Zdroj: NASA/ESA/HST.





**Supernova typu Ic** – velmi hmotná hvězda v závěrečném stádiu, která se zbavila obálky z vodíku a helia. Mohla ji odhodit nebo ji odsál souputník. Ve směru osy rotace se vytvářejí obálkou netlumené výtrysky, které díky brzdění okolním prostředím září krátkodobě v rentgenovém a gama oboru. Zbylé železné jádro s uhlíkovíkovou vnější vrstvou kolabuje na černou díru. Ve spektru chybí jak vodíkové, tak heliové čáry. Při kolapsu dojde k prudkému zrychlení rotace a vytvoření tlustého akrečního disku. Příkladem může být objekt SN 2003yd v souhvězdí Vodnáře, který je vzdálen  $270 \times 10^6$  světelných roků. Osa výtrysků nemíří k Zemi.

Malá část pozůstatku po explozi supernovy v souhvězdí Plachet. Supernova explodovala velmi dávno, přibližně před 12 000 lety. Zdroj: Paolo Peggì.



supernov. Jejich vznik však není zdaleka tak přímočarý, jak se často tvrdí. Hnacím motorem nukleosyntézy je v tomto případě tzv. r-proces (r z anglického „rapid“, což znamená „rychlý“). Jedná se o proces zachytu neutronů, který probíhá dostatečně rychle v porovnání s paralelně probíhajícím beta rozpadem. K tomu jsou zapotřebí teploty řádu  $10^9$  K a koncentrace neutronů alespoň  $10^{20}$  částic v jednom  $\text{cm}^3$ . Takové podmínky existují pouze v těsném okolí kolabujícího jádra, kde intenzivní tok neutronů z ochlazujícího se jádra vytvoří náraz „neutronového větru“ o délce trvání pouhých 10 s, což znamená, že k syntéze prvků r-procesem dochází ve chvíli, kdy je neutronová hvězda jen několik sekund stará. Jeho studium je proto pro astrofyziky nesmírně důležité.

V počátečních fázích je tok neutrin a antineutrin z jádra neutronové hvězdy vyrovnaný, ale protože neutrony, které jádro vytvářejí, reagují s neutrinami za vzniku protonů a elektronů, začne tok antineutrin převažovat. Jinými slovy: antineutrína procházejí z jádra neutronové hvězdy snadněji než neutrina. Antineutrína posléze reagují s protony v atmosféře a celkově je tedy vítr z neutronové hvězdy významně obohacen o neutrony na úkor protonů. Ty spolu s poklesem teploty pod  $10^{10}$  K začnou reagovat za vzniku částic alfa, jader helia. Protože neutronů je ve větru přebytek, vytvoří se nad atmosférou neutronové hvězdy vrstva obsahující alfa částice a neutrony. Při dalším poklesu teploty pod  $5 \times 10^9$  K se začnou heliová jádra slučovat do jader prvků skupiny železa.

V této vrstvě se tedy nachází částice alfa, volné neutrony a těžké prvky, které jsou základními kondenzačními jádry pro nastartování r-procesu. Ten začne probíhat ve chvíli, kdy teplota poklesne pod  $10^9$  K. Volné neutrony se začnou na jádrech těžších prvků zachytávat a vytvářet tak popsáním procesem prvky těžší než železo. Výsledkem je, že supernova rozmetá do svého okolí celkem  $10^{-5} M_{\odot}$  hvězdného materiálu, obsahujícího 10 až 20 % těžkých prvků, syntetizovaných r-procesem, zbytek připadá na helium. Shrme-li tedy proces syntézy těžkých prvků v supernově, zjistíme, že supernova nejdříve všechna jádra těžkých prvků rozloží při fotodisintegraci, a teprve poté vytvoří postupným slučováním nukleonů jádra helia, posléze jádra těžších prvků skupiny železa a následně jejich bombardováním neutrony prvky ještě těžší. Jakoby se proces vzniku prvků na počátku vesmíru rychle během deseti sekund zopakoval a protáhl do pozdních fází nukleosyntézy.



## Dosvit

Výše uvedený scénář výbuchu supernovy podrobně popisoval vznik neutronové hvězdy a uvolnění obrovského množství energie, z níž asi 99 % odnášejí neutrina vznikající neutronizací hmoty, 1 % je uloženo v kinetické energii rozpínající se obálky a jen 0,01 % uniká ve formě záření. Přestože se jedná o proces trvající řádově sekundy, supernovu coby svítící bod můžeme na obloze sledovat výrazně déle. Během prvních 100 dní po výbuchu poklesne její jasnost přibližně stokrát, během roku asi tisíckrát. Tvar světelné křivky prozrazuje, že v rozpínající se obálce dochází po výbuchu k radioaktivnímu rozpadu nestabilních izotopů niklu a kobaltu. Pozůstatky po výbuchu supernovy však můžeme ve vesmíru pozorovat i stovky tisíc let. Jedná se jak o vizuálně pozorované řasové mlhoviny, jejichž tvar určuje interakce rozpínající se obálky s rázovými vlnami vniklými při výbuchu, tak o rentgenové záření, které při této interakci vzniká. Uvnitř těchto mlhovin pozorujeme neutronovou hvězdu – žhavý pozůstatek po fenomenálním zániku jedné hmotné hvězdy.

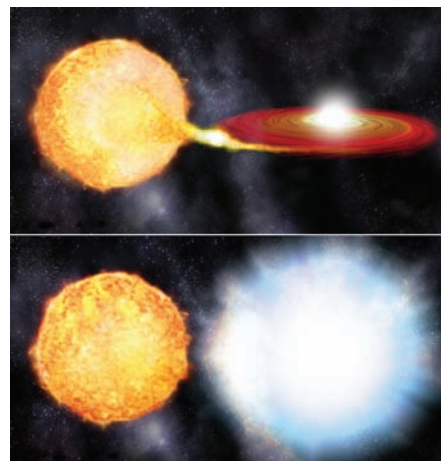
## Supernovy Ia

Nepřítomnost vodíku ve spektru těchto supernov, spolu s čarami křemíku a profilem světelné křivky, v jejímž dosvitu pozorujeme čáry niklu – to vše svědčí pro hypotézu, že předchůdci těchto supernov jsou uhlíko-kyslíkoví bílí trpaslíci, akreující hmotu coby složka dvojhvězdy. Bohužel, žádný z takových progenitorů nebyl doposud pozorován, jedním z možných kandidátů jsou velmi měkké rentgenové zdroje (SSXS). V našich výzkumech jsme proto zatím vázáni pouze na fyzikální modely a numerické simulace.

Typického předchůdce supernovy Ia si představujeme jako dvojhvězdu, jejíž jednou složkou je C-O trpaslík, tedy finální stádium hvězd, jež svůj vývoj započaly jako hvězdy s hmotností našeho Slunce. Tato hmotnost je dostatečná k tomu, aby došlo k zažehnutí heliových reakcí, spalujících helium na uhlík a kyslík, ale nestačí na to, aby reakce pokračovaly k těžším prvkům. Druhou složkou dvojhvězdy je zpravidla červený obr, který díky svým rozměrům zcela vyplnil tzv. Rocheův lalok, oblast ohraničenou ekvipotenciální plochou, jež se v jednom bodě dotýká Rocheova laloku bílého trpaslíka. Přes tento bod dochází k přenosu látky (vodíku a helia) z obra na trpaslíka. Díky rotaci soustavy nepadá hmota na trpaslíka přímo, ale je momentem hybnosti

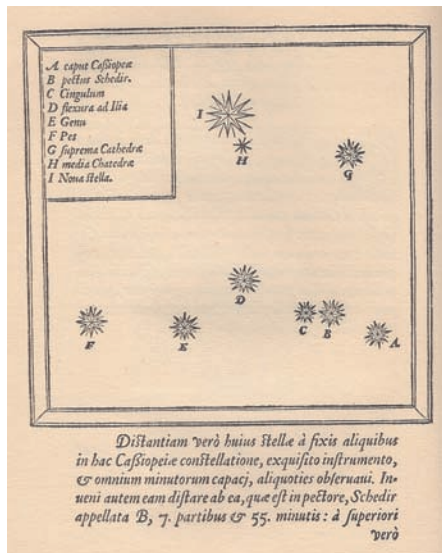
**Supernova typu II** – velmi hmotná, hroutící se hvězda po období termonukleární syntézy, pozůstatkem je neutronová hvězda nebo černá díra, zbytek se rozmetá do okolí. Supernovy typu II mají ve spektru přítomné vodíkové čáry. Tyto supernovy dále dělíme podle dosvitu na dvě skupiny II L s lineárním poklesem jasnosti a II P, u kterých má dosvit platit s malým poklesem jasnosti. Typickým příkladem typu II P je velmi známá supernova SN 1987A ve Velkém Magellanově oblaku ve vzdálenosti  $167 \times 10^3$  světelných roků.

Princip exploze supernovy typu Ia. Zdroj: NASA/Chandra.



**Rocheův lalok** – prostorové ohraničení ekvipotenciální plochy systému dvou těles, například hvězd. Tato plocha se stejnou potenciální energií má tvar osmičky složené ze dvou kapkovitých útvarů – Rocheových laloků. Pokud hvězda zcela vyplní prostor svého Rocheova laloku, dojde k přetoku látky na druhou složku. V případě planety a měsíce dojde při průchodu měsíce Rocheovou plochou k nestabilní situaci, kdy měsíc začne padat na planetu a bude roztrhán slapovými silami.

Stránka ze spisu Tychona Brahe „De nova stella“ z roku 1573 ukazuje polohu exploze supernovy, vzplanuvší v roce 1572 (supernova označena písmenem I, další hvězdy náležejí do souhvězdí Kasiopeji).



stáčena do akrečního disku, ze kterého se teprve usazuje na povrchu trpasličí hvězdy. Poznamenejme, že tento proces nemusí být plynulý. Při nahromadění dostatečného množství látky kroužící v akrečním disku dojde k rozvoji turbulence, která hmotu zbrzdí, a teprve poté dojde k jejímu pádu na trpaslíka. Náhlá akrece většího množství hmoty z disku je doprovázena náhlým uvolněním gravitační potenciální energie, což se projeví krátkodobým zjasněním, označovaným jako vzplanutí trpasličí novy.

Při vhodné rychlosti akrece může časem dojít k dosažení mezní hmotnosti bílého trpaslíka, Chandrasekharovy meze, po níž následuje kontrakce doprovázená zažehnutím termonukleárních reakcí, jež hvězdu rozmetají. Právě fakt, že hvězda vybuchuje vždy při překročení dané hmotnosti, činí ze supernov typu Ia neocenitelné standardní svíčky, pomocí nichž můžeme určit vzdálenost mateřské galaxie této supernovy. Detailní studium procesů, které jejich výbuch provázejí, je tedy důležité nejen pro astronomy zabývající se závěrečnými stadii hvězdného vývoje, ale i pro kosmology.

Zmínili jsme, že pro překročení Chandrasekharovy hmotnosti bílého trpaslíka je nutná vhodná rychlost akrece hmoty. Pokud je totiž tato hmotnost příliš malá, dojde časem k explozivnímu vznícení vrstvy vodíku, ukládajícího se na povrchu degenerovaného uhlíko-kyslíkového jádra. Tento děj označujeme jako vzplanutí klasické novy a může k němu docházet opakovaně (pak hovoříme o rekurentních novách).

Pokud by byla naopak rychlost akrece příliš velká, vytvořila by se ještě před vlastním zážehem C-O reakcí vodíková atmosféra hvězdy, jejíž přítomnost by se musela nutně projevit ve spektru, což však nepozorujeme. Rychlost akrece proto musí být „tak akorát“. Modely ukazují, že vhodná rychlost akrece je v případě dvojice červený obr – bílý trpaslík přibližně  $10^{-7} M_{\odot}$  za rok.

Důležitým rozdílem mezi supernovami Ia a supernovami ostatních typů je fakt, že supernovy Ia jsou při vzplanutí výbuchem zcela dezintegrovány, zatímco pozůstatkem supernov typu II, Ib a Ic je neutronová hvězda (ev. černá díra). Z numerických simulací se ukazuje, že při výbuchu supernov Ia hrají důležitou roli turbulentní jevy. Alternativním scénářem exploze supernovy Ia je také spojení dvou bílých trpaslíků, tj. akrece C-O plynu přetékajícího z jednoho bílého trpaslíka na druhého. Základním předpokladem tohoto scénáře je dostatečně pomalá akrece látky.

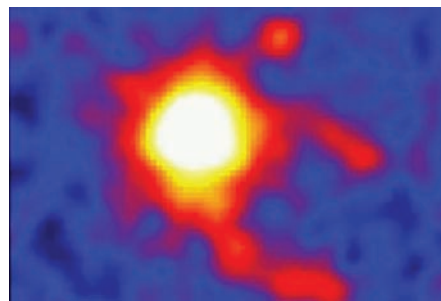
## Zbytky po supernovách

Výbuch supernovy je dramatickou událostí, která významně poznamená své okolí do vzdálenosti mnoha stovek světelných roků. Rázová vlna, vznikající šířením vyvrženého materiálu rychlostmi až tisíckrát většími, než je rychlost zvuku v daném prostředí, ohřívá mezihvězdný plyn a prach na teploty řádu  $10^5$  až  $10^6$  K. Díky těmto vysokým teplotám je zbytek po supernově dobře pozorovatelný nejprve v rentgenovém oboru spektra, posléze i v optickém oboru (díky rekombinaci ionizovaných atomů) jako obálka o tloušťce několika málo světelných roků a s typické hustotě 10 atomů/cm<sup>3</sup> (běžná hustota horké mezihvězdné hmoty je přibližně o dva řády nižší). Tvar rozpínající se obálky je zpočátku zpravidla kulový, následně však může být deformován dalšími vlivy, mezi něž patří zejména přítomnost a povaha makroskopických magnetických polí, z nich plynoucí přítomnost sekundárních rázových vln a také přítomnost či absence neutronové hvězdy (pulzaru), respektive hvězdného větru z ní vanoucího.

## Slavné supernovy

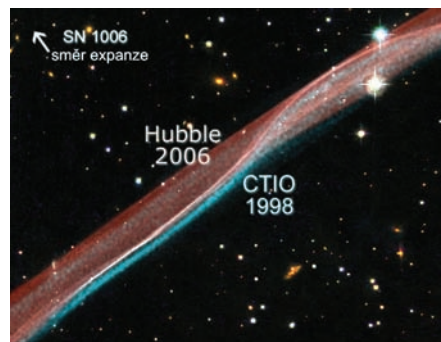
**Geminga** (zkratka z *Gemini Gamma-ray source*) byla objevena roku 1972 družicí SAS-2 jako intenzivní zdroj záření gama. Jeho optický protějšek se však dlouho nedařilo nalézt, což je mj. zakódováno v názvu – „geminga“ totiž v milánském dialektu znamená něco jako „houby s octem“, tj. „zde nic není“. Teprve roku 1984 se pomocí dalekohledu CFHT na Havajských ostrovech o průměru 3,5 metru podařilo tento zdroj nalézt jako extrémně slabou hvězdu 25. magnitudy. Fyzikální povahu objektu odhalila až družice ROSAT, která v roce 1992 prokázala existenci pulzů rentgenového záření o periodě cca 0,3 s. Jedná se tedy o pulzar, neutronovou hvězdu, která je pozůstatkem výbuchu supernovy typu II. Analýzy změn pulzů a radiální rychlosti hvězdy pomohly určit, že k výbuchu došlo před přibližně 340 000 lety, a to ve vzdálenosti méně než 100 světelných roků od Země.

**SN 1006** je patrně nejjasnější pozorovaná supernova, která vybuchla pravděpodobně v noci z 30. dubna na 1. května 1006 v souhvězdí Vlka. Její jasnost přesáhla  $-7$  mag. Záznamy o ní pořídili evropští, arabští i čínští pozorovatelé, podle některých interpretací je tato událost zaznamenána i na indiánském petroglyfu, nalezeném v Hohokamu (Kalifornie, USA). Pozůstatek po supernově se podařilo nalézt v roce 1965, kdy byl ztotožněn s radiovým zdrojem v blízkosti hvězdy  $\beta$  Lupi.



Neutronová hvězda Geminga vyfotografovaná přístrojem EPIC na palubě rentgenové družice XMM-Newton. Dva výrazné výběžky jsou tvořeny nabitými částicemi, které jsou vyvrhovány silným magnetickým polem hvězdy. Jejich hybnost se následně vyrovnává s prostředím, kterým hvězda prolétává, čímž odhalují i směr jejího putování. Zdroj: ESA.

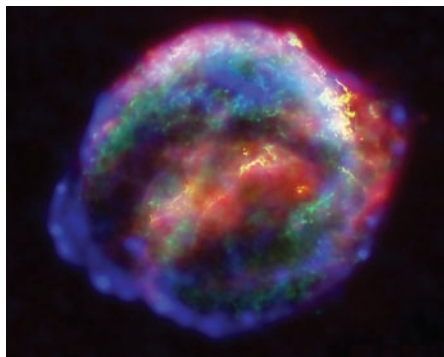
Rozpínající se obálka po výbuchu supernovy SN 1006. Modře je vyznačena v roce 1998, červeně o 8 let později. Zdroj: ESA/STScI.





Pozůstatek po SN 1054 (Krabí mlhovina). Na fotografii jsou patrné projevy Rayleighovy-Taylorovy nestability v expandující obálce. Zdroj: ESO/VLT.

Zbytek po Keplerově supernově, která vzplála roku 1604. Snímek vznikl kompozicí záznamů observatoří Chandra (pásma 0,2 až 0,3 nm a 0,9 až 4 nm), HST (optický obor) a Spitzer (infračervený obor). Krátkovlnné rentgenové záření pochází z oblastí, kterými prochází rázová vlna (modře), měkkí rentgenové záření (zeleně) ukazuje pozůstatky po explodující hvězdě. Optický obor (žlutě) odhaluje oblasti, kde se rázová vlna setkala s mezihvězdnou látkou a ohřála ji na teplotu 10 000 K. V infračerveném pásmu (červeně) jsou patrné částice prachu, ohřáté a unášené rázovou vlnou. Zdroj: ESA/NASA.



Rozpínající se obálka leží ve vzdálenosti přes 7 000 světelných roků od Země a má úhlový průměr 0,5°. Z toho vyplývá, že její skutečný průměr činí úctyhodných 60 světelných roků. Progenitora supernovy se doposud nepodařilo nalézt, proto předpokládáme, že se jednalo o supernovu typu Ia.

**SN 1054** byla na obloze pozorována 4. července 1054, o jejím pozorování byly učiněny mnohé záznamy, především čínské a japonské, ale také korejské, arabské, evropské a severoamerické. Pozůstatek po supernově objevil jako první anglický lékař a astronom John Bevis roku 1731. Roku 1758 jej francouzský astronom Charles Messier mylně považoval za Halleyovu kometu. Když poznal svůj omyl, začal sestavovat katalog objektů, které vypadají v malém dalekohledu jako mlhavé obláčky. Právě pozůstatek po supernově z roku 1054 nese v Messierově katalogu označení M1. Krabí mlhovina, jak tento objekt nazýváme, leží ve vzdálenosti 6 500 světelných roků. V jejím centru se nachází neutronová hvězda, kterou v roce 1942 objevil Rudolf Minkowski. Tato hvězda se v roce 1968 ukázala být pulzarem, jednalo se o první pulzar, který byl ztotožněn se zbytkem po supernově.

**SN 1572** (Tycho Braheova supernova) vzplála dne 11. listopadu 1572, kdy ji spatřil Tycho Brahe jako jasnou hvězdu v souhvězdí Kasiopeji, která zde předtím nebyla pozorována. Svoji jasností předčila planetu Venuši a na denní obloze byla pozorována po dobu dvou týdnů. Z oblohy zcela zmizela v březnu 1574, 16 měsíců po svém výbuchu. Zrod této „nové hvězdy“ definitivně pohřbil téměř dva tisíce let staré aristotelovské paradigma o neměnnosti nebeské sféry a jeho studium přispělo k vybudování základů, na nichž stojí moderní astrofyzika. V roce 2008 se týmům astronomů z Institutu Maxe Plancka a Subaru Telescope (8,2 m) podařilo získat spektrum světelné ozvěny Tychovy supernovy, která se odrazila od oblaku mezihvězdné hmoty tak, že světlo záblesku k nám na Zemi doletělo se zpožděním 436 let. Jedná se zatím o (časově) nejvzdálenější supernovu, jejíž světelné echo bylo pozorováno. Rozbor spektra prokázal nepřítomnost čar vodíku a přítomnost čar křemíku, což ukazuje na skutečnost, že Tycho Brahe pozoroval supernovu typu Ia.

**SN 1604** (Keplerova supernova) byla poprvé pozorovaná 9. října 1604 v severní Itálii. Od 17. října 1604 ji sledoval z Prahy Johannes Kepler. Pozůstatek po supernově leží ve vzdálenosti 20 000 světelných roků. Podobně jako Tycho Brahe, i Kepler zřejmě pozoroval supernovu



typu Ia. Za zmínku stojí fakt, že se jednalo o poslední supernovu, která byla v naší Galaxii do dnešního dne pozorována! Zatímco v první polovině druhého tisíciletí byla supernova na obloze pozorována v průměru každých sto let, od dob Keplera se žádná další na obloze neobjevila.

**Cassiopea A** je nejjasnější rádiový zdroj na noční obloze. Jedná se o zbytek po supernově ležící ve vzdálenosti přibližně 11 000 světelných roků od Země. Vybuchla patrně někdy před 300 lety, nemáme však spolehlivá svědectví o tom, že byla pozorována. Možnou příčinou je oblak mezihvězdné hmoty, který utlumil její svit v optickém oboru. Rozborem spektra světelné ozvěny se podařilo určit, že se jednalo o supernovu typu II. Pozůstatek po supernově dnes pozorujeme ve tvaru rozpínající se obálky o průměru 10 světelných roků, která září zejména v rádiovém a rentgenovém oboru. V jejím středu se nachází neutronová hvězda.

**SN 1987a** je nejznámější novodobá supernova. Byla objevena 24. února 1987. Vybuchla ve Velkém Magellanově oblaku ve vzdálenosti 168 000 světelných roků. Proslavilo ji celkem 24 neutrin (!), která zachytily detektory Kamiokande, IMB a Baksan. Ačkoli se dle všech indicií jednalo o supernovu typu II, u níž se s největší pravděpodobností podařilo zpětně dohledat i progenitora, modrého veleobra označovaného jako Sanduleak -69° 202, žádnou neutronovou hvězdu jsme v jejích pozůstatcích dosud nenalezli. Teorií, popisujících důvody, proč neutronová hvězda uniká našemu pátrání, je několik, žádná však není dostatečně uspokojivá.

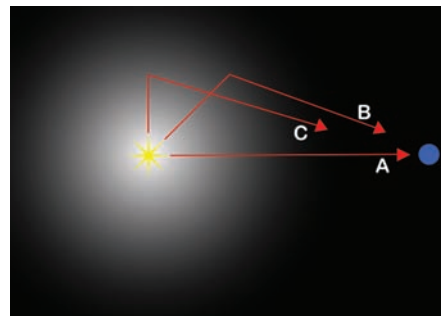
## Mýty a fakta o nebezpečí supernov

*Výbuch supernovy rozzáří oblohu tak, že nebude rozdíl mezi dnem a nocí.* Toto tvrzení je mýtus. Předpokládejme, že supernova vybuchne na noční obloze. Absolutní magnituda supernov v okamžiku vzplanutí dosahuje hodnoty cca  $-19$  mag, což znamená, že supernova ve vzdálenosti cca 32 světelných roků od Země bude více než  $300\times$  jasnější než Měsíc v úplňku, zatímco Slunce by v téže vzdálenosti zářilo jen o něco více než nejslabší hvězdy pozorovatelné na obloze pouhým okem. Jak blízko by ale supernova musela být, aby byla jasnější než Slunce ve skutečné vzdálenosti? To lze snadno vypočítat: vyjde vzdálenost kratší než světelný rok, tedy blíže než vzdálenost vnějších oblastí sluneční soustavy. Pravděpodobnost, že se nějaká hvězda dostane tak blízko ke Slunci, je v následujících sto milionech let prakticky nulová.



*Cassiopea A, nejjasnější zbytek po supernově (v rádiovém oboru). Snímek je kombinací vizuálního (HST), infračerveného (SST) a rentgenového (Chandra) oboru. Zdroj: NASA/ESA.*

*Princip světelné ozvěny umožnil pozorovat spektrum supernovy, která vybuchla v souhvězdí Kasiopeji někdy kolem roku 1680. Zatímco přímočarému šíření záblesku (paprsek A) překáží oblak mezihvězdné hmoty, ležící mezi supernovou a Zemí, paprsky odražené od mezihvězdné hmoty (B, C) umožňují se s pozděním pozorovat. Zdroj: Wikipedia.*

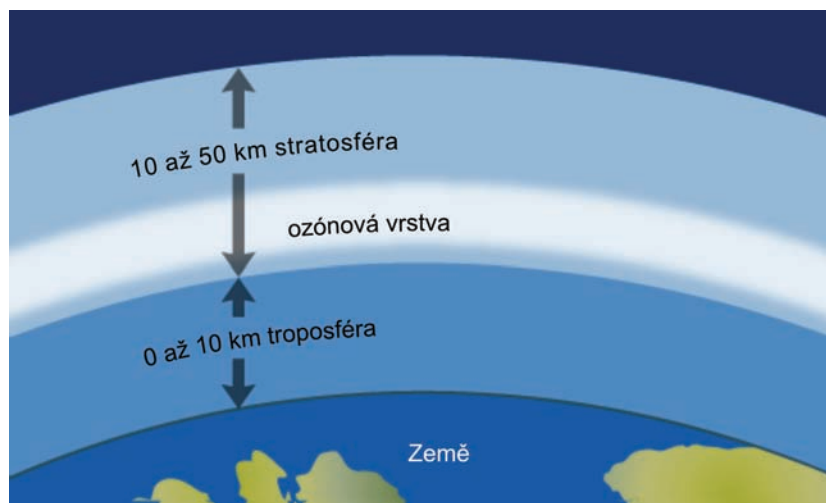


**Bílý trpaslík** – jedna z možných závěrečných fází vývoje hvězd. Hvězda, ve které degenerovaný elektronový plyn vyvíjí gradient tlaku (způsobený Pauliho vylučovacím principem), který odolává gravitaci. Poloměr je 1 000 km až 30 000 km, hustota řádově  $10^3 \text{ kg/cm}^3$ , maximální hmotnost  $1,4 M_{\odot}$ . Hmotnější bílí trpaslíci jsou nestabilní, explodují jako supernovy typu Ia.

*Blízká supernova nás při svém výbuchu ozáří smrtelnou dávkou záření.* Toto tvrzení je částečně pravdivé. Při výbuchu známé supernovy SN 1987 A byl celkový tok energie v rentgenovém oboru odhadnut na  $10^{-12} \text{ J/m}^2\text{s}$ , přitom tok rentgenového záření uvolněného při velké sluneční erupci dosahuje hodnoty asi třicettisíckrát větší. Aby byl registrován na Zemi stejný tok rentgenového záření, jako je ten uvolněný při sluneční erupci, musela by se supernova nacházet ve vzdálenosti asi šest světelných roků. Ovšem mnohem mohutnější supernova, jež vybuchla v roce 1993 v galaxii M81, by stejný tok poskytovala již ze vzdálenosti  $10\times$  větší, tedy 60 světelných roků, a supernova 2001em dokonce ze vzdálenosti 150 světelných roků. Zatímco sluneční erupce je děj krátkodobý, rentgenové záření supernovy může trvat i několik let. Je toto záření pro člověka nebezpečné? Smrtelná dávka záření je přibližně 6 Sv, což odpovídá množství rentgenového záření o energii 420 J, absorbovaného tělem člověka o hmotnosti 70 kg. Výkon supernovy v rentgenovém oboru dosahuje v maximu řádu  $10^{35} \text{ W}$ , což znamená, že vybuchla-li by taková supernova ve vzdálenosti 10 světelných roků, obdrží člověk smrtelnou dávku záření během 10 s, ze vzdálenosti 30 světelných roků za více než minutu a ze vzdálenosti 100 světelných roků za 15 minut. Tyto drastické hodnoty by však platily pro osobu nechráněnou stíněním zemské atmosféry, která je naštěstí

v rentgenovém a gama oboru prakticky nepropustná. Živočichům na zemském povrchu tedy žádné nebezpečí z ozáření nehrozí. Jinak by na tom byly ale posádky orbitálních stanic. Kdyby vybuchl dosud nejbližší známý předchůdce supernovy, hvězda IK Pegasa (150 ly), museli by se kosmonauté z oběžné dráhy během několika minut evakuovat, smrtelnou dávku záření by patrně obdrželi do 30 minut.

*Výbuch supernovy zničí ozonovou vrstvu.* Toto tvrzení může být pravdivé. Kosmické záření, tedy proud vysoce energetických nabitých částic, vyvržených při



výbuchu supernovy, bude při dosažení zemské atmosféry způsobovat disociaci molekul dusíku. Vznikají tak vysoce reaktivní atomy dusíku, reagující s kyslíkem za vzniku oxidů, jež katalyticky rozkládají ozon. Výpočty ukazují, že supernova vzplanuvší ve vzdálenosti pod 30 světelných roků by byla sto zlikvidovat kosmickým zářením přibližně polovinu ozónové vrstvy. Dávka krátkovlnného záření, dopadajícího na povrch Země, by se tak zdvojnásobila, což by patrně, zejména pro vyšší organizmy, znamenalo závažný problém. Vzhledem k tomu, že kosmické záření se pohybuje pomaleji než světlo, ochránila by nás ozonoféra před nejničivějším gama zářením, které supernova vyzařuje přibližně dva roky. Nejnovější modely ozonosféry ukazují, že tato vrstva má samoobnovovací schopnost a ze svého poškození intenzivním kosmickým zářením je schopna zregenerovat v době přibližně za jeden až dva roky. Uvážíme-li, že supernova je intenzivním zdrojem kosmického záření po dobu několika desítek let, měla by přítomnost supernovy bližší než 25 až 30 světelných roků pro život na Zemi patrně fatální následky. Pravděpodobnost takové události odhadují astronomové na 1 supernovu za miliardu let.

## Závěr

Co říci závěrem? Supernovy jsou nepochybně fascinujícími ději, které stojí zato zkoumat. Jsou svědectvím o obrovských množstvích energie ukrytých ve hmotě a ukazují nám křehkost života na Zemi i vzdálených planetách. Přesto si přeje, abychom takovou (dostatečně vzdálenou) supernovu mohli na vlastní oči spatřit. Vždyť na to čekáme již 400 let.

■ **Jakub Rozehnal, 16. 3. 2012, AB 11/2012, aktualizováno**



*Snímek supernovy, která vzplanula v galaxii M82 v souhvězdí Velké medvědice dne 23. ledna 2014. Na dolním snímku je fotografie téže galaxie ze dne 5. ledna 2014, tedy před explozí. Zdroj: Emmanuel Marchal.*





# III. KOSMOLOGIE





## Atomární látka

**Kvarkové-gluonové plazma** – zárodečná polévka z kvarků a gluonů, ze které ve vesmíru vznikaly složené částice. Nacházejí-li se kvarky ve vzdálenosti menší než  $10^{-15}$  m, chovají se jako volné (nevázané) částice a právě tuto fázi nazýváme kvarkové-gluonové plazma. Na větších vzdálenostech vytvářejí vázané celky, zpravidla mezony a baryony. Poprvé byla tato fáze látky připravena na urychlovači SPS ve středisku CERN v roce 2000. Ve vesmíru existovalo kvarkové-gluonové plazma v období do 10 mikrosekund po jeho vzniku.

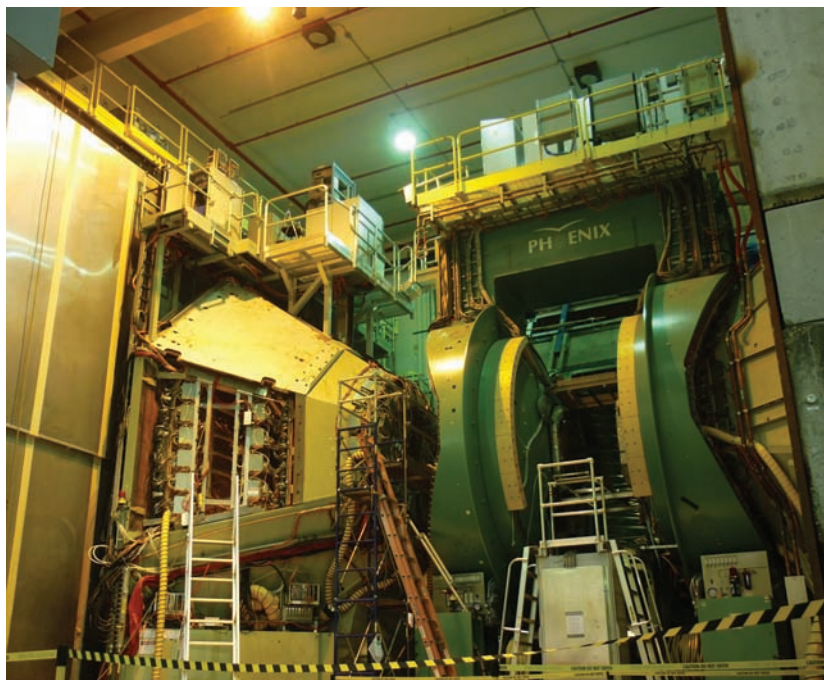
Detektor Phoenix v Brookhavenské národní laboratoři. V tomto detektoru se při srážkách urychlených jader zlata vytváří kvarkové-gluonové plazma, zárodečná polévka, ze které vznikal vesmír. Zdroj: AGA.

Když se v noci podíváme na oblohu, uvidíme především hvězdy a planety. Při pohledu dalekohledem nám neuniknou hvězdokupy, galaxie a mlhoviny roztočivých tvarů. To vše je ale pouhým zlomkem celkového obsahu našeho vesmíru. Dnes odhadujeme, že svítící látka tvoří jediné procento hmoty a energie ve vesmíru. Je jistě poněkud frustrující si uvědomit, že náš svět složený z atomů není ve vesmíru tím nejdůležitějším a má pramalý vliv na jeho vývoj a budoucí osud.

Atomární látka vznikala v několika fázích. Nejprve se ze zárodečné polévky rodily v desítkách mikrosekund po počátku světa neutrony a protony. V několika minutách z nich vznikala lehká atomová jádra a 400 000 let po počátku se vytvořily i atomární obaly. Těžké prvky vznikaly až mnohem později v nitru prvních hvězd. Většina z nich explodovala jako supernovy a vyvržená látka obohatila okolní prostředí o těžké prvky. Naše tělo je tak složeno z materiálu bývalých supernov.

### Atomární látka

Odhaduje se, že ve vesmíru je přibližně 5 % atomární látky, z toho čtyři díly nesvítící a jeden díl svítící. Jádra atomů jsou tvořena protony a neutrony. Obě dvě částice jsou dále složené ze tří kvarků a patří k tzv. baryonům. Můžeme tedy říci, že jádro atomu je tvořené výhradně baryony. V atomárních obalech se nacházejí elektrony, jejichž hmotnost je o tři řády menší než hmotnost neutronu nebo protonu – celková hmotnost atomu je tak dána především hmotností baryonového jádra, a proto o atomární látce hovoříme často jako o baryonové látce. K té patří ještě osamocené baryony (například protony slunečního větru nebo kosmického záření). Volné neutro-



ny se ve vesmíru nevyskytují, jsou nestabilní a jejich poločas rozpadu je 886 sekund (14,8 minuty).

Jak vypadá atomární látka? Když stojíme na podlaze, máme pocit, že je podlaha velmi pevná a neproniknutelná. Kdybychom si ale zvětšili atomy v podlaze tak, aby atomové jádro bylo veliké jako pomeranč, byl by první elektron atomárního obalu přibližně v pětikilometrové vzdálenosti. A mezi jádrem a obalem je zdánlivě pusto a prázdno. Ve skutečnosti se v tomto prostoru nacházejí fotony, polní částice elektromagnetické interakce, které udržují elektrony ve správné vzdálenosti od jádra. Naše tělo je také složené z elektronů a naše elektrony prostřednictvím dalších fotonů interagují s atomárními obaly a tím vzniká dojem „pevné půdy pod nohama“. Existují ale částice, které neinteragují elektromagneticky a atomární obaly jsou pro ně zcela průhledné. Některé částice dokonce neinteragují ani silnou interakcí a jsou pro ně z valné většiny průhledná i atomová jádra. Patří k nim například neutрино, které může prolétnout celou Zemí, aniž by jí bylo zachyceno. Jen zcela výjimečně interaguje s jádrem, které se mu postavilo do cesty, slabou interakcí. Pro některé částice je tak atomární látka zcela neproniknutelná, pro jiné se naopak chová jako síto s obrovskými děrami, kterým částice bez problémů procházejí.

## Vznik neutronů a protonů

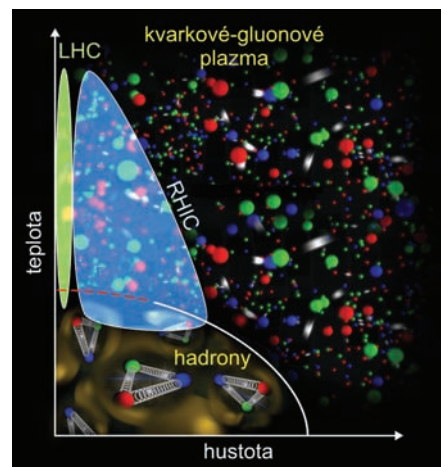
A jak atomární látka ve vesmíru vznikala? První neutrony a protony se pospojovaly ze zárodečné kvarkové-gluonové polévky přibližně 10 mikrosekund po vzniku vesmíru. Dnes tento proces umíme uměle napodobit v laboratoři.

Zárodečnou kvarkovou-gluonovou polévku umíme připravit na obřích urychlovačích. Poprvé se to podařilo ve středisku evropského jaderného výzkumu CERN v roce 2000 na urychlovači SPS (*Super Proton Synchrotron*). Bylo to po šesti letech dlouhých a vyčerpávajících experimentů. Urychlené jádro olova bylo nastřeleno na statické jádro. Po srážce se látka zahřála na teplotu  $10^{12}$  K, což je stotisíckrát vyšší teplota než v nitru Slunce, a stlačila na dvacetinásobek hustoty atomového jádra. Ze vzniklé kvarkové-gluonové polévky posléze vznikaly protony, neutrony a další částice. Jde o jakýsi Malý třesk v laboratoři. V současnosti se kvarkové-gluonové plazma připravuje na urychlovači LHC (v detektoru ALICE) v evropském komplexu CERN a v americké Brookhavenské národní laboratoři na Long Island, na urychlovači

**Plazma** – kvazineutrální soubor nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. To znamená, že se v dané látce nachází alespoň malé množství elektricky nabitých částic, které jsou v celém 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 a v mlhovinách. Přes 99 % atomární látky ve vesmíru je v plazmatickém skupenství.

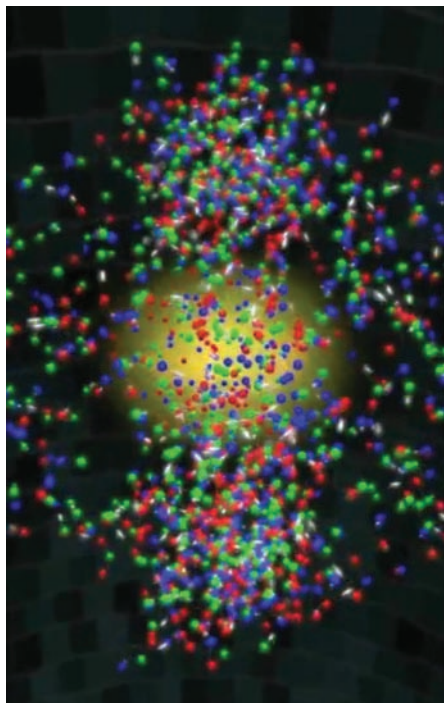
**Atom** – základní strukturální jednotka hmoty, jádro je složeno z neutronů a protonů, obaly z elektronů. Rozměry atomu jsou  $10^{-10}$  m, rozměry jádra  $10^{-14}$  m, hustota atomu je  $10^{11}$  g/cm<sup>3</sup>, hustota jádra  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>.

Fázový diagram, patrný je přechod mezi kvarkovým-gluonovým plazmatem a hadrony (částicemi složenými z kvarků). Barevně jsou vyznačeny oblasti dosažitelné na urychlovačích LHC a RHIC. Zdroj: BNL.



**Neutrino** – částice patří spolu s elektrony do rodiny leptonů. Nemají elektrický náboj. Neinteragují ani silně ani elektromagneticky, proto látkou většinou procházejí. Neutrino známe ve třech provedeních – elektronová, mionová a tauonová. Alespoň jedno z neutrín má nenulovou klidovou hmotnost a proto dochází k tzv. oscilacím neutrín, samovolné přeměně mezi jednotlivými typy. Reliktní neutrino se ve vesmíru oddělilo od látky přibližně v jedné sekundě. Dnes vznikají neutrino ve hvězdách, ve Slunci, v supernovách, při interakci kosmického záření s atmosférou, v nitru Země při radioaktivním rozpadu, v urychlovačích i jinde.

Kvarková-gluonová polévka je směsicí kvarků a gluonů. Ve vesmíru byla v časech kratších než 10 mikrosekund. Zdroj: Brookhavenská národní laboratoř.



RHIC (v detektorech Phoenix a Star). V těchto experimentech se stýká kosmologie (nauka o vesmíru jako celku) s částicovou fyzikou zabývající se mikrosvětlem. V posledních letech se ukázalo, že se kvarkové-gluonové plazma příliš nepodobá plynu, jak jsme si představovali, ale spíše kapalině. Jednotlivé kvarky jsou i za těchto extrémně vysokých teplot k sobě poněkud vázány.

## Vznik lehkých atomových jader

Do přibližně jedné sekundy od vzniku vesmíru neutrino intenzivně interagovala s látkou. Na rozdíl od dnešní doby byla tenkrát látka pro neutrino neprůhledná. K dramatickému obratu došlo v jedné sekundě, kdy poklesla průměrná hodnota energie částic pod prahovou hodnotu potřebnou pro termodynamickou rovnováhu neutrín s okolním plazmatem. Látka začala být pro neutrino jako mávnutím proutku průhledná. Neutrino, která s v této době oddělila od látky, nazýváme reliktní neutrino. Jsou všudypřítomná, ale mají natolik nízkou energii, že je naše detektory nejsou schopné zatím zachytit.

Oddělení neutrín od látky mělo za následek faktický nástup slabé interakce, a tím nestabilitu volného neutronu. Neutrony se začaly rozpadat a jejich počet se snižoval. Protonů naopak přibývalo. Začal zápas neutronů o přežití. Jen ten neutron, který si chytil svůj proton, se stal stabilním. Toto období nazýváme primární nukleosyntézou. Vznikají lehká atomová jádra (deuterium, helium, lithium...). Z poměrného zastoupení lehkých jader v současnosti se dozvídáme důležité informace o raném vesmíru. Podmínky pro tvorbu jader byly vhodné přibližně od tří do pěti minut. Dříve se vázaná jádra díky nárazům energetických částic opět rozpadala, později již byly srážky částic v expandujícím vesmíru málo pravděpodobné a navíc neutronů valem ubývalo.

## Vznik atomů

Přibližně 400 000 let po začátku se z volných elektronů formují kolem lehkých jader atomární obaly. Končí Velký třesk, počáteční horké plazmatické prostředí se postupně mění v neutrální svět atomů. V této fázi se vesmír stává průhledným pro záření, jež se odděluje od atomární látky. Dnes toto záření pozorujeme jako tzv. *reliktní záření* a je pro nás němým svědkem éry končícího Velkého třesku. V jeho obrazu jsou patrné fluktuace (nejčastěji mají úhlový rozměr přibližně  $1^\circ$ ), které jsou



zárodky budoucích galaxií a kup galaxií. Není bez zajímavosti, že když reliktní záření opouštělo horkou plazmatickou látku, šlo o obyčejné světlo. Dnes, po 14 miliardách let, se díky expanzi vesmíru jeho vlnová délka prodloužila přibližně na jeden milimetr. Proto pozorujeme reliktní záření v mikrovlnné oblasti.

Z frekvenční analýzy reliktního záření lze získat řadu parametrů našeho vesmíru (křivost, stáří, zastoupení jednotlivých složek atd.). Poprvé byla tato analýza provedena z měření americké sondy WMAP v roce 2003. Dnes máme k dispozici přesnější měření z evropské sondy Planck, která uskutečnila 4 kompletní přehlídky oblohy v mikrovlnném oboru. Ze dvou byla frekvenční analýza dokončena v roce 2013, kompletní analýza bude hotová v druhé polovině roku 2014. K výsledkům ze sondy Planck se budeme v této kapitole ještě několikrát vracet.

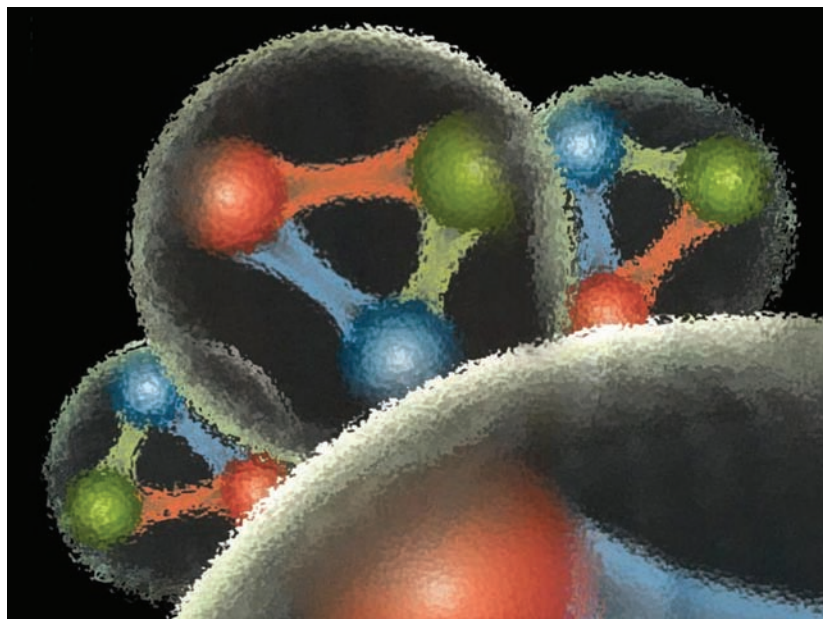
### Vznik těžkých prvků

Zhruba 400 milionů let po začátku vznikají první obří hvězdy a v jejich nitru se termojadernou syntézou vytvářejí i těžká atomová jádra až po jádro železa, které je nejstabilnější. První hvězdy nežily dlouho, jejich materiál byl rozmetán do okolního vesmíru v podobě gigantických explozí, tzv. hypernov. Při těchto explozích vznikaly i prvky s většími jádry, než má železo. Přetváření lehkých jader na těžká v nitrech hvězd probíhá dodnes. Hmotnější hvězdy končí svůj život jako supernovy a těžkými jádry zásobují okolní prostor. Většina materiálu, z něhož jsme stvořeni, se do vesmíru dostala při gigantických explozích hypernov a supernov.

I v naší sluneční soustavě jsou těžké prvky a bez nich by nemohly vzniknout ani planety, ani život. Odhaduje se, že původcem této látky byla exploze supernovy, která nastala přibližně před 7 miliardami let. Z její látky před pěti miliardami

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

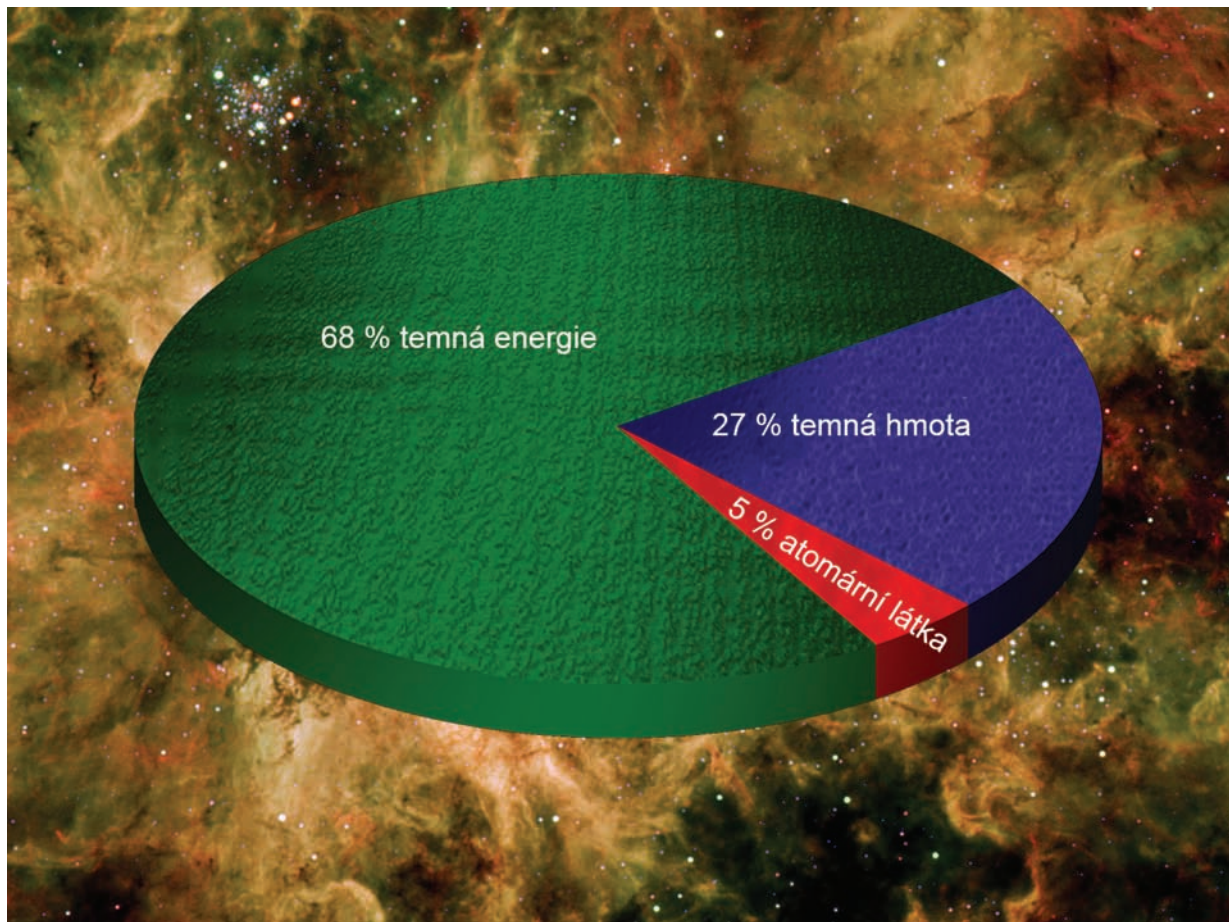
Částice atomového jádra, neutrony a protony, jsou složeny ze tří kvarků. Zdroj: Josip Kleczek / Toulky Vesmírem.



**Hypernova** – zhroutil extrémně hmotné hvězdy (tzv. hyperobra) přímo na černou díru, doprovázené zábleskem gama a mohutnou explozí, která je ještě výraznější než u supernovy. Svítivost objektu je srovnatelná s celou galaxií. Nejménějším kandidátem na hypernovu v našem okolí je v budoucnosti hyperobrů hvězda Éta Carinae z naší Galaxie, která je na jižní obloze v souhvězdí Lodního kýlu.

let vznikala naše sluneční soustava. Není ale jasné, zda jsme uhnětení z materiálu jediné supernovy, nebo zda takových supernov bylo více. V každém případě platí, že lehké prvky, z nichž jsme my lidé vytvořeni, mají původ v několika minutách po vzniku vesmíru, zatímco těžší prvky jsou pozůstatkem explozí supernov, které v naší části vesmíru žily před námi.

■ Petr Kulhánek, 6. 8. 2010, AB 28/2010, aktualizováno



KOSMOLOGIE

## (Elektro)slabá interakcia a Higgsov bozón

Slabá interakcia je jednou zo štyroch známych interakcií. Jej skúmanie prinieslo nejedno neočakávané prekvapenie vo svete častíc. Je odlišná od čisto elektromagnetickej a silnej interakcie, nezachováva paritu a ani CP symetriu. Podarilo sa ju zjednotiť s elektromagnetizmom do tzv. elektroslabej teórie, ktorá je veľmi úspešná v mikrosvete. Táto teória má v predpovediach zakomponovanú existenciu Higgsovho bozónu, ktorý bol objavený na detektoroch urýchľovača LHC.

### Higgsov bozón a elektroslabá interakcia

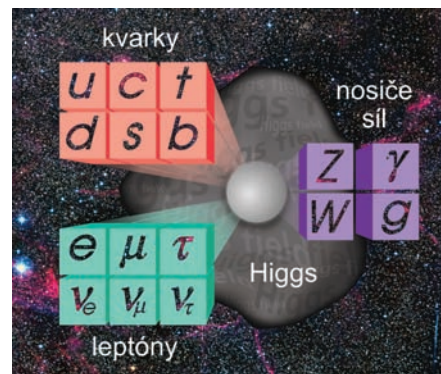
Higgsov bozón je pomenovaný po Peterovi Higgsovi, ktorý navrhol v roku 1964 mechanizmus spontánneho narušenia symetrie, čo je proces, ktorým je možné vygenerovať v teórii hmotnosť poľných (kalibračných) bozónov bez explicitného narušenia symetrie teórie. Higgs nebol jediný autor tohto mechanizmu, na podobných témach pracovali súčasne 3 fyzikálne teamy. Takže celým menom BEHHGK (Brout, Englert, Higgs, Hagen, Guralnik, Kibble) mechanizmus spontánneho narušenia symetrie (SSB) bol zásadný krok k teórii zjednotenia slabej a elektromagnetickej interakcie. Hľadanie Higgsovho poľa prebieha na experimentálnych aparátúrach už dekády. Štandardný Model (SM) očakáva existenciu skalárneho Higgsovho poľa, ktorého priamou manifestáciou je Higgsov bozón, ktorý je možné vytvoriť zrážkou dostatočne energetickej častíc.

V roku 1967 bol vytvorený tzv. GWS (Glashow, Weinberg, Salam) model elektroslabého zjednotenia. V teórii sa mimo fermiónov vyskytujú 3 vektorové bozóny slabej interakcie  $W^\pm$ ,  $Z^0$  a fotón. Higgsov mechanizmus hrá dôležitú úlohu, vďaka nemu je možné z teórie odvodiť hmotnosti poľných bozónov  $W^\pm$  a  $Z^0$  a ich vzájomnú závislosť. Higgsovo pole je reprezentované komplexným dubletom, ktorý má 4 stupne voľnosti a je manifestačne symetrický v  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ .  $SU(2)_L$  reprezentuje zložku slabého izospinu a  $U(1)_Y$  slabý hypernáboj. Po spontánnom narušení symetrie ( $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$ ) a upadnutí do degenerovaného minima Higgsovho potenciálu mexického klobúka sa 3 stupne voľnosti komplexného Higgsovho dubletu pretransformujú

**P symetrie** – symetrie vzhľadom k záměně levého a pravého směru. O symetrii hovoříme, pokud by se přístroj vytvořený podle zrcadlového obrazu choval shodně s původním přístrojem. Z této symetrie plyne existence zachovávající se veličiny, kterou nazýváme parita (odsud písmenko P, paritní symetrie). Pokud by symetrie platila, parita by se zachovávala. Narušení levoprávé symetrie prokázala čínská fyzikarka C. S. Wu z Kolumbijské univerzity v roce 1957 v experimentu s rozpadem kobaltu 60.

**CP symetrie** – levoprává 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.

Štandardný model elementárnych častíc.

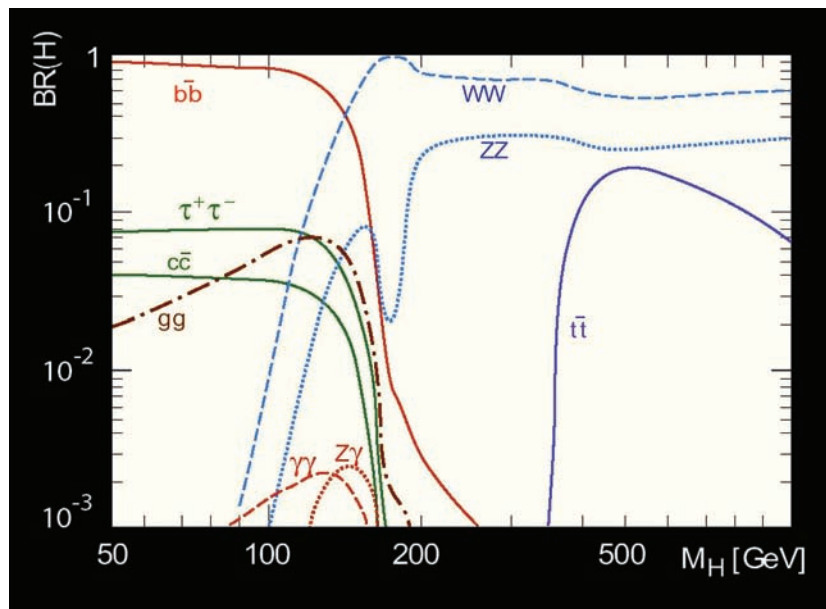




**Spin (S)** – vlastní (vnitřní) rotační moment částice související s Lorentzovou symetrií. Pro částici v centrálním poli se přirozeným způsobem skládá s momentem hybnosti. Částice s nenulovým spinem se mohou chovat jako elementární magnetické dipóly  $\mu$ , aniž by měly elektrický náboj. Takové částice reagují na vnější magnetická pole. Existuje  $2S+1$  různých projekcí spinu.

**Izospin (I)** – Veličina, kterou v roce 1937 zavedl Eugene Wigner k popisu multipletů příbuzných částic. Všechny částice multipletu mají stejnou velikost izospinu a liší se projekcí této veličiny do libovolné osy. Izospin byl zaveden jako analogie ke spinovým stavům částice. Počet částic multipletu je  $2I+1$ , stejně jako počet možných projekcí.

Rozpadové kanály Higgsovo bozónu a ich vetviace pomery ako funkcia jeho hmotnosti.



do pozdĺžnych komponent  $W^\pm$  a  $Z^0$ , a tým im generujú hmotnosť. Jeden stupeň voľnosti zostane neabsorbovaný a vytvorí hľadané Higgsovo pole. GWS teória je vnútorne konzistentná a renormalizovateľná. Predpoveďou tejto teórie bola napríklad existencia neutrálneho  $Z^0$  bozónu, ktorého prejavy boli pozorované ako tzv. neutrálne prúdy v roku 1973 na experimente s bublinovou komorou Gargamelle. Fyzické bozóny  $W^\pm$  a  $Z^0$  boli pozorované o 10 rokov neskôr, na detektoroch UA1 a UA2 na urýchľovači SppS v CERNe. Autori dostali Nobelovu cenu za fyziku roku 1979.

Higgsovo pole priamo generuje hmotnosť slabých bozónov, u ostatných elementárnych častíc je to zložitejšie. Higgsov bozón sa viaže na (interaguje s) každú hmotnú časticu štandardného modelu a sila väzby (interakcie) zodpovedá hmotnosti častice. Takýto spôsob funguje len pre elementárne častice, ktoré prostredníctvom tzv. Yukawovej interakcie a spontánneho narušenia symetrie získajú hmotnosť. Higgsovo pole však je zodpovedné iba za malú časť hmotnosti viditeľnej hmoty vo vesmíre. Kompozitné častice – hadróny majú hmotnosti, ktoré sú z podstatnej časti dynamicky generované procesmi kvantovej chromodynamiky (QCD).

## Hľadánie Higgsova bozónu

Samotnú hmotnosť Higgsovo bozónu teória nepredpovedá a musí sa zmerať experimentálne. Požiadavky na tzv. perturbatívnu unitaritu pri rozptyloch ťažkých vektorových bozónov obmedzili hmotnosť tejto častice na  $M_H < 600$  GeV. Jeho hmotnosť je obmedzená aj zospodu, a to tzv. medzou stability vákua asi na 80 GeV. Priame hľadania na urýchľovači LEP určili  $M_H > 114,4$  GeV. Existujú ďalšie spôsoby, pomocou ktorých je možné nepriamo vymedziť rozsah  $M_H$  z hľadiska teórie, napríklad prostredníctvom tzv. *loop korekcií*, kde  $M_H$  závisí na hmotnosti top kvarku



a hmotnosti elektroslabých bozónov. Fyzikálne skupiny detektorov D0 a CDF na urýchľovači Tevatron v laboratóriu Fermilab vykonali presné merania účinného prierezu produkcie, hmotnosti, rozpadovej šírky a polarizácie intermediálnych bozónov elektroslabej interakcie  $W^\pm$  a  $Z^0$  a top kvarku, ktoré doplnili precízne merania z LEPu. Tieto merania, publikovaná začiatkom roku 2012, pomohli spresniť nepriamo limity hmotnosti Higgsovho bozónu. Fyzikálne skupiny na CDF a D0 sa podieľali aj na priamom hľadaní v relevantných rozpadových kanáloch a vymedzili pásmo invariálnych hmotností, kde sa Higgsov bozón nenachádza. Začiatkom marca 2012 fyzikálne skupiny D0 a CDF ohlásili prebytok pozorovaných udalostí v oblasti 115 až 135 GeV, ktorý je konzistentný s pozorovaniami experimentov ATLAS a CMS ohlásených v decembri 2011. Signifikancia signálu však nebola dostatočná na objav. Pre hľadanie Higgsovej častice v laboratóriu CERN na detektoroch ATLAS a CMS bola použitá kombinácia nazbieraných dát z rokov 2011 a 2012. V roku 2011 bežal LHC v režime s ťažkovou energiou zrážok 7 TeV a pre analýzu bola použitá akumulovaná štatistika  $4,9 \text{ fb}^{-1}$ . Tento rok operuje LHC v režime s ťažkovou energiou 8 TeV a  $5,9 \text{ fb}^{-1}$  bolo použitých pre analýzu v detektore ATLAS. Podobné čísla nájdeme u CMS.

Higgsov bozón má nulový spin (je tzv. skalárna častica), nemá elektrický a ani farebný náboj. Jeho priame pozorovanie je obtiažne, pretože pravdepodobnosť jeho produkcie pri protono-protónovej zrážke je veľmi malá (asi o 2 rády nižšia než u top kvarku), má dobu života kratšiu než  $10^{-20}$  s a vďaka svojej veľkej hmotnosti sa rozpadá na častice, ktoré nie je jednoduché zrekonštruovať.

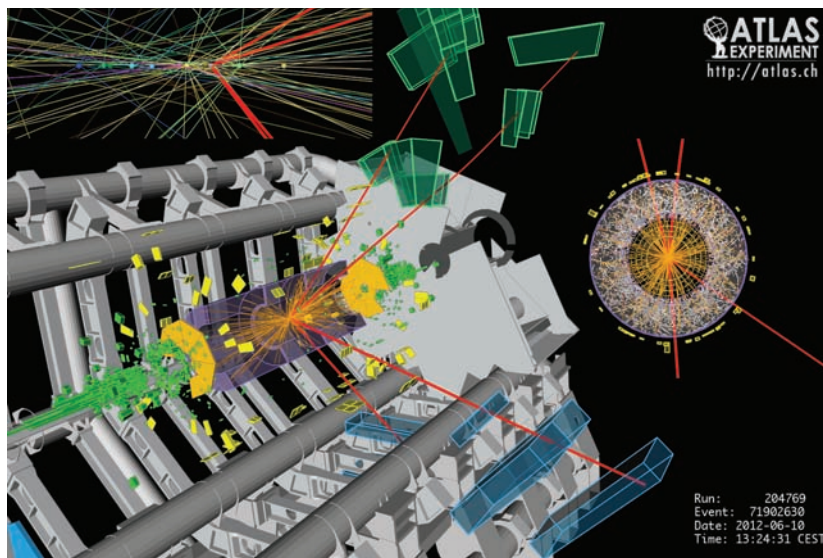
Pre hmotnosti okolo 130 GeV (oblasť signálu) sa Higgsov bozón rozpadá s najväčšou pravdepodobnosťou na páry kvarkov  $bb$  a  $cc$ , pár gluónov alebo  $\tau$  leptónov. Potom nasleduje rozpad na  $WW^*$

**Femtobarn (fm)** – jednotka plochy odvodená z barnu ( $10^{-28} \text{ m}^2$ ), ve ktorých sa meria účinný prierez srážek. Inverzní femtobarn ( $\text{fb}^{-1}$ ) je mrou počtu srážek na femtobarn cilového účinného prierezu, jde o jednotku tzv. luminosity.

**ATLAS** – A Toroidal LHC Apparatus, detektor pro urychlovač LHC s hmotností 7 000 tun umístěný 100 metrů pod zemí. Jde o multifunkční detektor, který by měl být schopen detekovat mimo jiné Higgsovy bosony. Délka zařízení je 44 metrů, magnetické pole cívků vychylující nabitě částice 2 T.

**CMS** – Compact Muon Solenoid. V laboratořích CERN budovaný víceúčelový detektor pro urychlovač LHC, vážící 12 500 tun, který by měl být schopen detekovat Higgsovy částice, pokud je jejich hmotnost v rozmezí 100 GeV až 1000 GeV, jak předpokládá stávající teorie elektroslabé interakce. Dosavadní hledání na urychlovači LEP s detekcí do 100 GeV nepřineslo kýžený výsledek.

Udalost, kde sa kandidát na H rozpadol na 2 Z bozóny, ktoré sa rozpadli na páry  $\mu^+\mu^-$ .



**Tevatron** – synchrotron postavený v americkém komplexu urychlovačů Fermilab, v Batávii, ve státě Illinois. Do zprovoznění LHC v evropském středisku jaderného výzkumu CERN šlo o největší urychlovač tohoto typu na světě, protony a antiprotony byl schopen v prstenci o obvodu 6,3 km urychlit až na energii 1 TeV. Šlo o kolider, jehož vstřícné svazky měly v těžišťové soustavě energii 1,96 TeV. Tevatron byl dostavěn v roce 1983 a stál 120 milionů USD. Další velkou investicí byl hlavní injektor za 290 milionů USD přidaný v letech 1994 až 1999. Provoz Tevatronu byl ukončen v roce 2011.

**D-Zero** – D0, DØ, DZERO, jeden ze dvou velkých detektorů na urychlovači Tevatron. D0 pracoval již od roku 1992 a zaměstnával přibližně 550 vědců z osmnácti zemí světa. Detektor měl rozměry 9×9×15 m a vážil kolem 5 000 tun. Mezi největší objevy patří objev „b“ (bottom) kvarku, „t“ (top) kvarku a exotických baryonů  $\Xi_b$  a  $\Omega_b$ . Jedním z posledních dobíhajících projektů je studium narušení CP symetrie a hledání Higgsova bosonu. Pomocí dat z D0 byl výrazně omezen rozsah možných hmotností této částice.

**CDF** – Collider Detector at Fermilab, jeden ze dvou velkých detektorů na urychlovači Tevatron. CDF měl tvar krychle o hraně 12 m a vážil 6 000 t. Více než 500 fyziků pracovalo na detektoru, kde byly objeveny kvarky „b“ (bottom) a „t“ (top). Dobíhajícím projektem je intenzivní hledání Higgsova bosonu v již nasbíraných datech. Brzy ho ale v množství nasbíraných dat předběhnou experimenty na urychlovači LHC.

a  $ZZ^*$  bozóny. Rekonštrukcia Higgosa v týchto kanáloch je náročná, pretože kvarky produkujú výtrysky, W bozóny a  $\tau$  leptón, ktoré sa rozpadajú taktiež na kvarkové výtrysky alebo leptón a neutríno, ktoré je v detektore skoro nedeteovateľné mimo chýbajúcu transverzálnu hybnosť, ktorú zo sebou unáša. Existujú však takzvané „zlaté kanály“

$$\begin{aligned} H &\rightarrow \gamma\gamma, \\ H &\rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-, \end{aligned}$$

ktoré síce majú malú pravdepodobnosť vetvenia, ale je možné ich relatívne jednoducho rekonštruovať a poskytujú dobré rozlíšenie hmotnosti. Dňa 4. júla bol opatrne ohlásený objav novej častice konzistentnej svojimi vlastnosťami s Higgsovým bozónom. Nová častica bola pozorovaná zároveň na detektoroch ATLAS a CMS. Experiment CMS zmeral hmotnosť  $125,3 \pm 0,6$  GeV so štatistickou významnosťou  $4,9 \sigma$  (odchýliek od pozadia bez Higgsovho bozónu) a ATLAS zmeral najpravdepodobnejšiu hmotnosť 126,5 GeV s lokálnou významnosťou  $5 \sigma$ . V časticovej fyzike sa považuje za hranicu objavu štatistická významnosť  $5 \sigma$ , takže pozorovanie rovnakej častice na oboch detektoroch zároveň je viac než dostatočné potvrdenie jej existencie.

Je to však iba začiatok cesty a nastáva doba skúmania vlastností kandidátov na Higgsov bozón (spin, vetviace pomery rozpadových kanálov, presné meranie hmotnosti) a jeho väzieb na iné častice Štandardného Modelu. Na radu príde aj otázka: a kým že to je. Štandardný Model častíc a interakcií obsahuje jeden skalárny Higgsov bozón. Iné teórie, napríklad minimálne supersymetrické rozšírenie SM, tzv. MSSM model, predpovedá existenciu 5 Higgsových bozónov, jeden z nich má vlastnosti podobné Higgsovmu bozónu zo SM. Očakáva sa, že v blízkej budúcnosti budeme vedieť odpovedať na položené otázky.

■ Michal Marčišovský, 20. 7. 2012, AB 28/2012

## Temná hmota

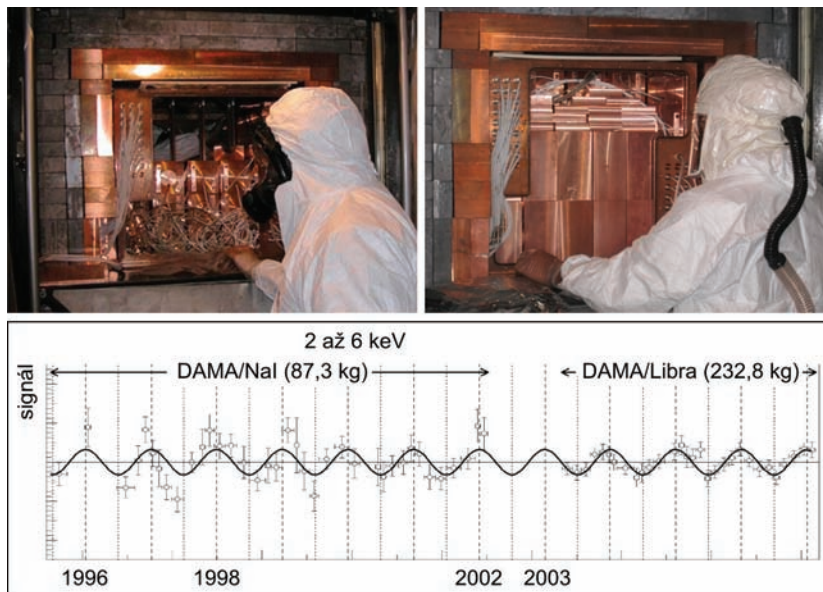
O temné hmotě se diskutuje ve vědeckém světě i v médiích již mnoho desítek let. Vždyť koho by netrápilo, že podstatnou část vesmíru nevidíme. Z dynamiky hvězd v galaxiích a i z pohybu galaxií samotných se zdá, že viditelná látka tvoří jen malou část těchto objektů. Až šestinásobek viditelné látky ve vesmíru by měl existovat v podobě temné hmoty – látky částicové povahy, která interaguje s okolím jen gravitačně a snad slabou interakcí. Gravitační interakce umožňuje její mapování. Dnes víme, že temná hmota vytváří ve vesmíru složité vláknité struktury, které fungují jako základní předitivo vesmíru. Do hmotnějších uzlíků temné hmoty je stahována běžná atomární látka, která v nich tvoří pozorovatelné struktury. Částice temné hmoty se snaží polapit několik desítek sofistikovaných detektorů po celém světě. Zpravidla jsou umístěny hluboko v podzemí, kde je odstíněn nežádoucí signál sekundárních spršek kosmického záření. Většina těchto detektorů se pokouší hledat tzv. *wimpy*, nejnadějnější kandidáty na částice temné hmoty.

### Trocha historie

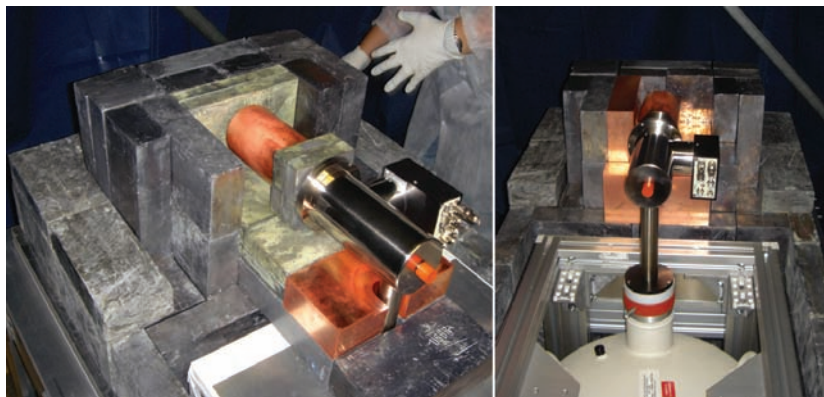
Poprvé na existenci temné hmoty upozornil Fritz Zwicky v roce 1933, když statisticky zkoumal pohyby galaxií v Kupě ve Vlasech Bereniky. Množství pohybu bylo větší, než by odpovídalo gravitačnímu zákonu aplikovanému na viditelnou látku. V šedesátých letech 20. století zjistila Vera Rubinová, že hvězdy a molekulární mračna na periferiích galaxií se také pohybují rychleji, než by odpovídalo gravitačnímu zákonu. Závěr je stejný. Galaxie obsahují až 90 % látky, kterou nevidíme. Jednak jde o nesvítilící baryonovou látku, jednak o částice temné hmoty. Právě gravitační interakce nám dnes umožňuje kvalitní mapování rozložení temné hmoty. Temná

**Baryonová látka** – látka složená 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 jen velmi málo. Odhaduje se, že baryonová složka tvoří 5 % celkové hmoty a energie ve vesmíru.

Experiment DAMA/Libra. Nalevo je dřívější konfigurace, napravo současná konfigurace, dole měřený signál. Zdroj: Gran Sasso National Laboratory.

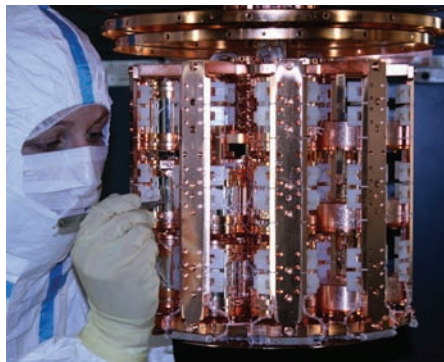






Experiment CoGeNT v americkém Soudanu, napravo je patrná nádoba s dusíkem. Zdroj: Pacific Northwest National Laboratory.

Záběr z instalace experimentu CRESST. Zdroj: Gran Sasso National Laboratory.



hmota ovlivňuje šíření světla galaxií ve velkých kupách a ze statistického zpracování způsobu deformace obrazů mnoha galaxií lze dopočíst rozložení temné hmoty uvnitř kupy. Ze světových projektů rekonstrukce rozložení temné hmoty na základě gravitační deformace obrazu uvedme například COSMOS. U nás se touto problematikou zabývá David Heyrovský z MFF UK. Výsledky výpočtů jsou v shodě s numerickými simulacemi vývoje hmoty ve

vesmíru, z nichž nejznámější je simulace tisíciletí (*Millennium Simulation*, konsorcium VIRGO, 2005), ve které byla sledována gravitační interakce více než deseti miliard částic („částice“ v simulaci reprezentují oblast o hmotnosti cca jedné miliardy Slunci). Výsledek simulace poskytl 25 TB dat s informacemi o rozložení a vývoji hmoty (atomární i temné) ve vesmíru. Simulace byla prováděna na superpočítači v Institutu Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova a trvala přes měsíc. V roce 2009 proběhla obdobná simulace Millennium II. V současnosti je největší obdobnou simulací projekt Illustris z roku 2014, v němž bylo použito 18 miliard „částic“ složených do 40 000 galaxií nejrůznějších typů. Existence temné hmoty byla nezávisle potvrzena v roce 2013 z měření sondy Planck, která prokázala gravitační vliv temné hmoty na reliktní záření.

### Kandidáti na částice temné hmoty

V průběhu let se objevily desítky kandidátů na částice temné hmoty. Mezi nejznámější patří neutrina. Ukázalo se ale, že těch je málo a navíc jsou příliš rychlá (jsou součástí tzv. horké temné hmoty), což by vedlo k desintegraci zárodečných struktur pozorovaných na konci Velkého třesku. Temnou hmotu tvoří zejména chladná složka, jejíž částice jsou v porovnání s rychlostí světla velmi pomalé. K chladné temné hmotě patří dvě hlavní skupiny kandidátů. První jsou *axiony* a *chameleony*, se kterými pracují některé varianty teorie silné interakce. Přestože existuje řada detektorů těchto částic (největší je detektor ADMX ve Washingtonu), bylo pátrání po nich zcela neúspěšné. Do druhé skupiny patří wimpy, slabě interagující hmotné částice, jejichž



existenci předpokládají *supersymetrické* teorie. Zde vypadá situace s detekcí mnohem nadějněji, proto se v dalším textu budeme věnovat pátrání po wimpech.

## DAMA/Libra

Mnoho let byl jediným úspěšným zařízením při hledání částic temné hmoty detektor DAMA v italské národní laboratoři pod horou Gran Sasso, který poskytoval jakýsi signál již od roku 1996, kdy byl uveden do provozu. Jde o scintilační detektor, jehož základem jsou krystaly NaI, které by při slabé interakci atomových jader aktivní látky s wimpy měly dát záblesk zachytitelný fotonásobičem. Okolí detektoru vypadá jako hranatá cibule. Prvním obalem je měď, pak následuje olovo, další vrstva je z polyetylénu a vosku, následuje atmosféra z velmi čistého dusíku, která zamezuje kontaminaci radonem, poslední vrstvu tvoří metr tlustý betonový kontejner. V první fázi (1996 až 2002) byl detektor provozován s 87 kilogramy scintilační látky.

Od roku 1998 byla v signálu rozpoznána relativně slabá roční variace. Ta by mohla být způsobena tím, jak Země při svém oběhu kolem Slunce letí v určité části roku ve směru toku wimpů interagujících gravitačně s Galaxií a v jiné fázi roku ve směru proti toku wimpů. Od roku 2003 pracuje detektor pod názvem Libra s 233 kg scintilační látky NaI/Th a v získávaném signálu jsou roční variace velmi výrazné. Nicméně, jak se říká, jeden experiment není žádný experiment a nelze ho považovat za důkaz existence jevu. Signál by mohl být způsoben jinými částicemi a roční variace jinými jevy, třeba pravidelně tajícím sněhem, který může do podzemní laboratoře splavovat s podzemní vodou radioaktivní látky.

## Další experimenty

V roce 2011 byl nalezen obdobný sezónně proměnný signál na experimentu CoGeNT (*COherent GERmanium Neutrino Technology*) v americkém dole Soudan v Minnesotě. Aktivní látkou je mimořádně čistý krystal germania o hmotnosti 440 gramů, který je chlazen na teplotu kapalného dusíku. Kolem je stínění ze tří vrstev olova  $^{210}\text{Pb}$ , polyetylénu s borem, hliníku a 20 cm tlustého plastu. Detektor začal sbírat data v prosinci 2009. Data obsahovala v době publikace údaje z 442 dnů pozorování s několika sty záblesky, roční periodicitu signálu byla dobře patrná. K obdobnému výsledku dospěl také experiment CRESST (*Cryogenic*

**Temná hmota** – hmota ve vesmíru 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 na základě pozorování existuje ve vesmíru 27 % temné hmoty. Existuje několik hypotetických částic, které jsou vhodnými kandidáty na částice temné hmoty, dosud však nebyly objeveny.

*Umělecká vize rentgenové a gama observatoře Fermi.*  
Zdroj: NASA.



**Wimp** – kandidát na částice temné hmoty. Jde o zkratku z anglického „Weakly Interacting Massive Particle“. Wimpy by měly s běžnou látkou interagovat gravitační a slabou interakcí. Mohlo by jít o reliktní superpartnery z období po Velkém třesku, kterým fyzikální zákony zabránily v následném rozpadu. Samy sobě by měly být antičásticemi. Při vzájemném setkání anihilují na pár fotonů, leptonů nebo polních bosonů slabé interakce.

Detektor AMS 2 umístěný na rameni Mezinárodní kosmické stanice. Zdroj: CERN.

*Rare Event Search with Superconducting Thermometers*), který je, stejně jako DAMA/Libra, umístěn pod italskou horou Gran Sasso. Skládá se ze 17 modulů obsahujících scintilační látku  $\text{CaWO}_4$ , jenž pracují za extrémně nízké teploty 15 mK. Při této teplotě lze detekovat zahřátí modulu způsobené interakcí s wimpem. Detektor tedy pracuje jako mimořádně citlivý kalorimetr. Na detektoru CRESST bylo v roce 2011 nalezeno 67 signálů, které odpovídaly interakci wimpů s detekční látkou a nelze je vysvětlit žádným jiným známým způsobem. Data ze všech tří experimentů (DAMA, CoGeNT, CRESST) sice nejsou v dokonalé shodě, ale umožnila horní odhad energie wimpů na cca 10 GeV.

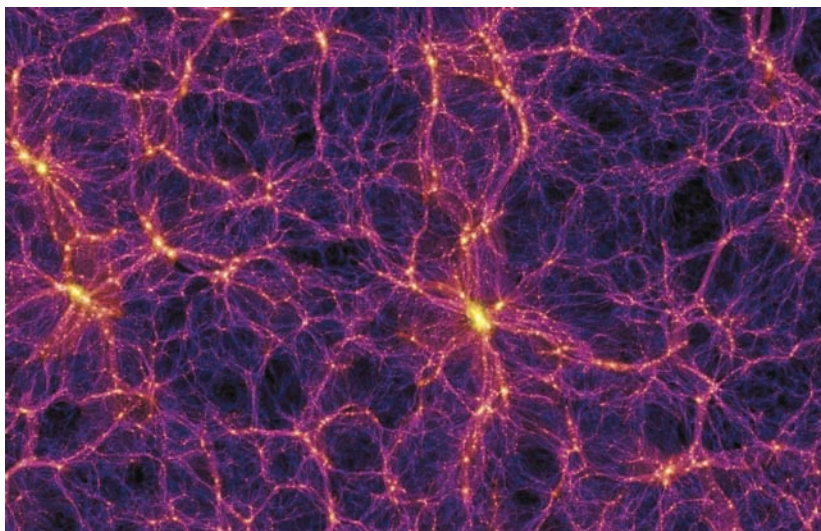
Na první pohled by se zdálo, že je tedy existence wimpů po dlouhé době tápání potvrzena, a to hned ze tří experimentů. Problém je ale



v tom, že nízkenergetické wimpy s energií do 10 GeV by měly také produkovat rentgenový a gama signál způsobený vzájemnou anihilací při náhodných srážkách. Hned dvě skupiny se pokusily tento signál najít dvěma různými způsoby za pomoci rentgenové observatoře Fermi, bohužel tehdy (v roce 2011) neúspěšně. Po třech letech, 28. března 2014 byla ve věstníku CERN Courier oznámena detekce neobvyklého gama signálu ze středu naší Galaxie, který by svým spektrem mohl odpovídat anihilaci temné hmoty.

Do rýsující se skládanky by mohla přispět i data naměřená téměř sedmitunovým částicovým spektrometrem AMS 2, který byl umístěn na rameni Mezinárodní kosmické stanice v roce 2011. V roce 2013 byl v měřeném signálu nalezen nadbytek pozitronů s vysokou energií. Vysvětlení může být dvojí. Pozitrony buď pocházejí z vysoce energetických procesů probíhajících v blízkosti pulzarů, nebo, jak navrhuje Samuele Ting (jeden z objevitelů částice  $J/\psi$ ), pocházejí z anihilace wimpů. Modely interakce wimpů jsou prozatím značně nejasné, v současnosti nebyla existence wimpů ani potvrzena, ani vyvrácena, ale přesto je z řady experimentů znát, že cíli jsme velmi blízko.

■ Petr Kulhánek, 24. 12. 2011, 49/2011, aktualizováno



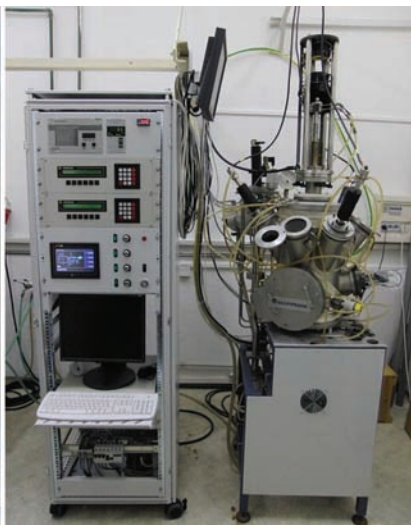
*Millennium Simulation. Fialově jsou znázorněna vlákna temné hmoty, žluté jsou struktury (galaxie) tvořené atomární látkou. Zdroj: MPI.*



## Od roztržitého chemika k detektorům temné hmoty

**Krystaly** – látky charakteristické pravidelným uspořádáním částic (atomů, molekul nebo iontů), z nichž jsou složeny. Rozlišujeme monokrystalické a polykrystalické látky. Polykrystaly se skládají z drobných monokrystalů – náhodně orientovaných zrn o velikosti od desítek mikrometrů až po milimetry, monokrystaly se uspořádávají dalekosahově (s nenulovou korelací orientace i ve velké vzdálenosti). Vlastnosti polykrystalů jsou izotropní (tj. mají ve všech směrech uvnitř krystalu stejné vlastnosti), monokrystalické látky vykazují naopak anizotropii, která je objektem výzkumu a lze ji využít v mnoha technických aplikacích.

Na levém obrázku je monokrystal křemíku o průměru 20 cm určený k výrobě čipů. Zdroj: Smithsonian. Na pravém obrázku vidíte trojbloukovou pec na přípravu monokrystalů Czochralského metodou. Zdroj: Sylvester Czochralski.



Na počátku příběhu, který nás provede od počátků výroby krystalů až k současným metodám detekce temné hmoty, byla roztržitost. V roce 1916 mladý polský chemik a metalurg Jan Czochralski omylem namočil psací pero nikoli do kalamáře, ale do kelímku s tekutým cínem, který zapomněl na svém pracovním stole. Rychle pero vytáhl a s překvapením zjistil, že na hrotu pera viselo tenké vlákno ztuhlého kovu. Nahradil tedy pero vláknem, pokus zopakoval a následnou analýzou kovu zjistil, že jde o monokrystal cínu. Tímto způsobem se mu časem podařilo produkovat monokrystaly o průměru okolo 1 mm a délce až 150 cm. Metoda byla původně určena ke studiu rychlosti krystalizace kovů, jako jsou cín, zinek a olovo, ale její skutečný potenciál se ukázal později, během 50. let 20. století, kdy byla využívána v rámci polovodičové techniky k přípravě monokrystalů germania. V dnešní době je Czochralského růst krystalů rutinní metodou v průmyslu (právě za účelem produkce precizně orientovaných křemíkových čipů), ale i při přípravě zcela nových materiálů v rámci fyziky pevných látek – oboru, který se zabývá magnetismem, nekonvenční supravodivostí a dalšími

neobvyklými jevy. Nás ovšem zajímá zcela specifická aplikace, a to použití monokrystalů jako detektorů určených pro odhalení nových elementárních částic.

### Průběh přípravy

Jak tedy celá příprava monokrystalů probíhá v praxi? Má leccos společného s prvotním Czochralského omylem – základem je zárodek upevněný na tyčce, nejlépe krystalek dříve připraveného monokrystalu, který se ponoří do taveniny materiálu, z něhož poroste krystal. Poté se tyčka velmi pomalu zvedá (podle materiálu rychlostí desetin



milimetrů až několik desítek milimetrů za hodinu) a zároveň otáčí. Na jejím konci se přitom začíná nořit z taveniny monokrystal. Nejprve se zformuje úzký krček a posléze se začne vznikající ingot rozšiřovat do požadovaných rozměrů, které se regulují jednak rychlostí tažení, a jednak intenzitou ohřevu taveniny. Při dosažení požadovaných rozměrů se začne opět monokrystal zužovat, až se nakonec oddělí od původní taveniny. Celý proces trvá obvykle několik hodin. Při tomto kroku se zvláště vyplatí opatrnost, protože rychlé oddělení krystalu od taveniny znamená prudké zchlazení, které může indukovat strukturální poruchy. Ty by se na kvalitě krystalu podepsaly natolik, že by ho už nebylo možné použít k výrobě detektorů.

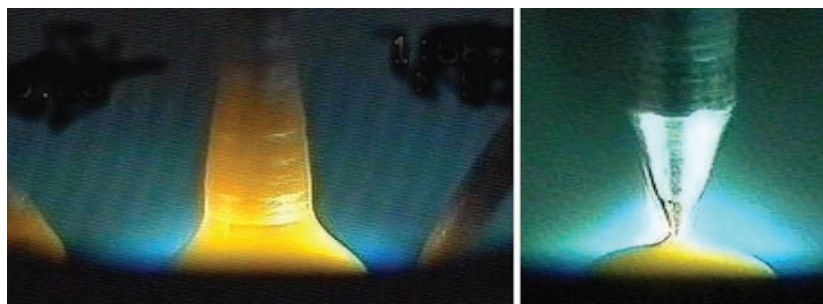
Zaměřme se nyní podrobněji na přípravu monokrystalů určených přímo do detektorů částic temné hmoty. V současné době mají detektory v rámci experimentu CRESST-II válcovitý tvar o průměru 40 mm a výšce 40 mm, s hmotností přibližně 300 g. To znamená, že ingoty monokrystalů musí kvůli válcovitému tvaru mírně přesáhnout průměr 40 mm. Do kelímku z čistého rhodia se umístí přibližně 1,6 kg  $\text{CaWO}_4$  připraveného reakcí  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{WO}_3$ . Jako zárodek je použit již dříve připravený monokrystal  $\text{CaWO}_4$ , orientovaný do definovaného krystalografického směru s přesností 2 stupně. To zajistí, aby i výsledný krystal rostl v takto definovaném směru. Kelímek se nejprve zahřeje ve vysokofrekvenční peci až na téměř 1 700 °C, aby se prášek zcela rozpustil. Celý proces se odehrává v kyslíkové atmosféře při nízkém tlaku 10 mbar. Nepříjemným problémem při přípravě monokrystalů je jejich značná ochota štípat se v určitých směrech daných jejich anizotropními vlastnostmi. Při jisté velikosti může dojít vlivem vnitřních pnutí, daných deformací vlastní vahou, k uštípnutí části krystalu. Řešením je nechat vyrůst krystaly s velmi dlouhými „rameny“, která minimalizují radiální mechanické síly vedoucí k prasknutí krystalu. Předpokládá se, že na projekt EURECA bude potřeba 500 kg  $\text{CaWO}_4$  krystalů.

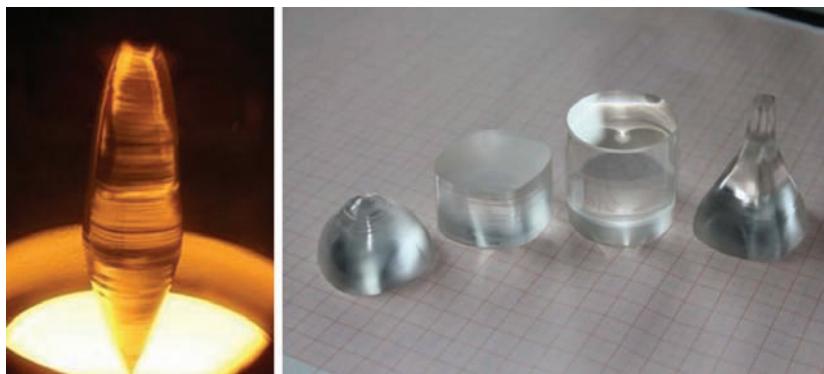
### Vlastní detekce

Jak vlastně probíhá samotná detekce částice temné hmoty, tzv. wimpů, v krystalu? Očekává se, že při velmi vzácné události, kdy se

**EURECA** – *European Underground Rare Event Calorimeter Array*, projekt, který by měl navázat na předchozí projekty *EDELWEISS* (italská Modana) a *CRESST* (umístěný pod italskou horou Gran Sasso), si klade za cíl úspěšnou detekci částic temné hmoty (tzv. wimpů) až do účinného průřezu  $10^{-10}$  pb (pikobarn je  $10^{-40}$  m<sup>2</sup>, barn je přibližně plocha jádra uranu). Pro předchozí projekty tato hodnota dosahovala  $10^{-8}$  pb, ale předpověď supersymetrických modelů ohledně účinného průřezu se pohybuje právě kolem hodnot o dva řády nižších. Cílem je vybudovat kryogenní detektory zchlazené na milikelvinové teploty s celkovou absorpční hmotností 1 tuna, což při celkovém účinném průřezu bude představovat pouze několik událostí ročně.

Nalevo: Formování ingotu před vlastním růstem. Napravo: Ukončování růstu zužováním ingotu. Zdroj: KFKL.





Nalevo: Monokrystal  $\text{CaWO}_4$  při přípravě ve vysoko-frekvenční peci. Napravo: Nařezané a vyleštěné kusy  $\text{CaWO}_4$  krystalu; zleva doprava: koncová část krystalu, zbytek válce, krystal určený k výrobě detektoru, ramena a krček. Zdroj: CrystEngComm/TUM.

**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. Stav fotonu zahrnuje také jeden ze dvou módů polarizace, protože jde o příčné vlnění.

**Fonon** – kvazičástice vibrací krystalové mříže, vibrační kvantum šířící se krystalovou mříží. Pomocí fononů lze popisovat šíření zvukových vln v pevných látkách. Samotný název fonon vznikl jako analogie k fotonu. Foton je částicí elektromagnetického pole, fonon je kvazičásticí netlumeného zvukového pole v pevné látce.

wimp v krystalu elasticky rozptýlí na těžkém atomovém jádře wolframu a vyvolá zpětný ráz s energií řádově několik keV. energii zpětného rázu lze zaznamenat několika způsoby, buď ve formě světla (scintilační detektory), nebo jako ionizaci (polovodičové detektory), či ve formě fononů (kryogenní detektory). Přitom je nutné rozlišit, zdali se jedná o zpětný ráz elektronový (vyvolaný částicemi  $\beta$  a  $\gamma$ ) či

jaderný (vyvolaný částicemi temné hmoty), který produkuje mnohem méně scintilačního světla. Kryogenní detektory představují v tomto směru významnou výhodu, protože disponují energetickým rozlišením, které dokáže oddělit události rázů elektronových a jaderných. Zatím není jasně stanoveno, jaké typy detektorů budou vybrány právě pro projekt EURECA, ale pravděpodobně se použije kombinace více typů.

V současnosti dávají nenulový signál nejasného původu detektory DAMA/Libra, CRESST a CoGeNT. Doufejme, že projekt EURECA, který umožní sledovat procesy s až o dva řády nižším účinným průřezem, určí zdroj tohoto signálu, ať již půjde opravdu o záchyt wimpů, čímž by projekt přispěl k odhalení původu temné hmoty, nebo o jiný fyzikální jev, který sám o sobě nepochybně také nebude nezajímavý.

■ Marie Kratochvílová, 7. 2. 2014, AB 6/2014

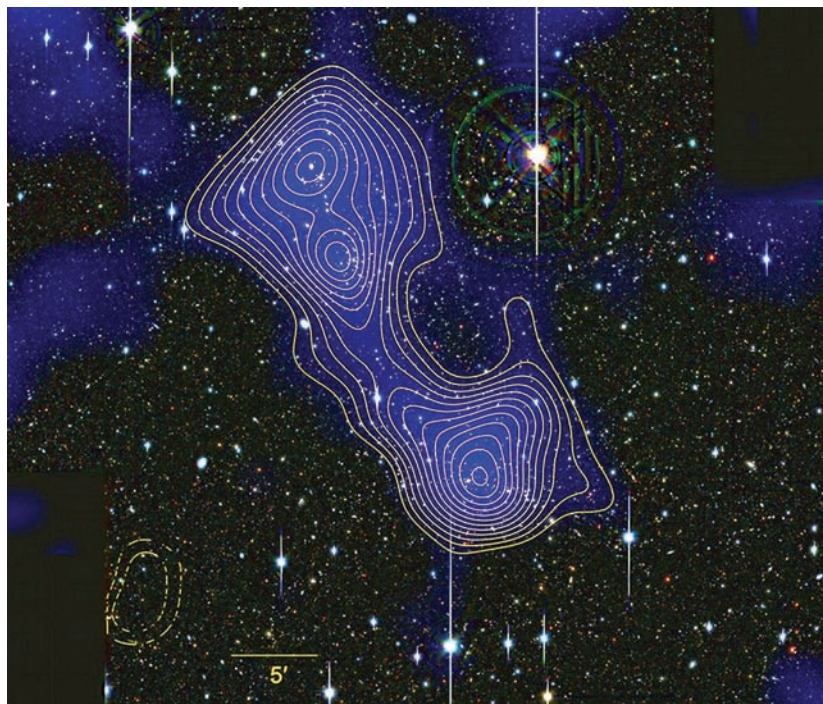
## Most temné hmoty mezi dvěma galaktickými kupami

Současné kosmologické modely předpokládají, že temná hmota tvoří základní strukturu vesmíru, jakousi podivnou pavučinovou síť z neviditelných vláken. V jejich kříženích je větší koncentrace temné hmoty a do těchto oblastí je gravitačně vtahována atomární látka. Právě v těchto kříženích vznikají galaxie a kupy galaxií. Tato představa byla doposud podpořena jen numerickými simulacemi v největších výpočetních střediscích světa. V roce 2012 bylo poprvé experimentálně objeveno v souhvězdí Velryby vlákno složené převážně z temné hmoty, které spojuje dvě blízké kupy galaxií. Pravděpodobně jde o první detekovanou nitku rozsáhlé sítě vláken temné hmoty, která je základním předivem našeho vesmíru.

### Objev temného mostu

Po desítky let jsou ve vesmíru pozorovány lineární struktury složené z řetězců mnoha galaxií a horkých plynů. Část astronomů vyslovila domněnku, že by za tyto struktury mohla být zodpovědná vlákna temné hmoty, na která se v jejich zhuštění či kříženích nabaluje atomární látka. Základním stavebním prvkem vesmíru by měla být síť vláken temné hmoty, kterou v některých místech kopíruje „menšinová“ atomární látka. O objev prvního z těchto vláken se postarala skupina vědců vedená Jörgem Dietrichem z Mnichovské univerzitní observatoře. Dietrich je současně zaměstnancem

Temně modrou barvou je zobrazena hustota hmoty, která byla vypočtena z deformace obrazu vzdálenějších galaxií. Na pozadí je snímek z japonského dalekohledu Subaru (je postaven na Havajských ostrovech na vrcholu Mauna Kea) v optickém oboru. Žluté „vrstevnice“ odpovídají oblastem se stejnou hustotou. Dole uprostřed je dobře patrná kupa A 222 a dvojice kup A 223 v levé horní části. Mezi jižní částí A 223 a kupou A 222 je patrný most hmoty. Ostrov vlevo dole (zakreslený přerušovanou žlutou linkou) je naopak oblast, ve které je nižší koncentrace hmoty než v okolí. Zdroj: MUO.





**Kupy galaxií** – obří gravitačně vázané objekty ve vesmíru tvořené třemi hlavními složkami: stovkami galaxií obsahujícími hvězdy, plyn a prach; obrovskými oblaky horkých plynů a temnou hmotou zatím neznámé povahy. Galaxie v kupách se liší tvarem, vyzařovaným výkonem a zejména hmotností, která je v miliardách až stovkách miliard hmotností Slunce. Kupy tvoří nadkupy, vlákna a stěny.

Michiganského centra teoretické fyziky při Michiganské univerzitě. Ve vědeckém týmu byli zastoupeni také pracovníci ze špičkových univerzit ve Stanfordu, Ohiu, Edinburgu a Oxfordu.

Vědecká skupina se zaměřila na mapování rozložení hmoty v relativně blízkých kupách galaxií Abell 222 a Abell 223. Jde o dvě kupy ze známého Abelova katalogu, který dnes obsahuje 4 073 kup galaxií. Katalog publikoval americký astronom George Abell v roce 1958, tehdy obsahoval „pouze“ 2 712 kup. Přestože mají sledované kupy v katalogu pouze dvě čísla, jde ve skutečnosti o kupy tři. Kupa A 223 je těsná dvojkupa, severní složka se označuje A 223N a jižní A 223S. Tato dvojkupa je od kupy A222 na obloze vzdálena jen 14 obloukových minut. Červené kosmologické posuvy všech tří kup jsou přibližně  $z = 0,21$ . Rozdíl posuvů mezi A 222 a A 223 je  $\Delta z = 0,07$ . Pokud je tento rozdíl způsoben různou úrovní Hubbleovy expanze, musí být objekty od sebe ve směru od nás vzdálené přibližně 18 Mpc, což znamená, že je vidíme téměř v zákrytu. Všechny tři kupy představují výrazné nahuštění hmoty oproti okolí a způsobují deformaci obrazu vzdálenějších galaxií. Za tyto deformace je zodpovědné gravitační čočkování (kupy ohýbají paprsky vzdálenějších galaxií) a lze z nich rekonstruovat rozložení hmoty v kupách. Skupina k tomu využila veřejně dostupná data z japonského dalekohledu Subaru, který je umístěn na hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech v nadmořské výšce 4 100 metrů. Průměr zrcadla má 8,2 metru a sběrnou plochu 53 m<sup>2</sup>. Data jsou volně stažitelná z datového archivu SMOKA (jde o zkratku z anglického *Subaru Mitaka Okayama Kiso Archive*). Tento rozsáhlý archiv obsahuje pouze vědecká data, jeho součástí nejsou žádné fotografie. Skupina k rekonstrukci rozložení hmoty v trojici kup A 222, A 223 využila deformace obrazů 40 341 vzdálenějších galaxií! Výsledek byl

Japonský dalekohled Subaru. Zdroj: UKIRT.





překvapivý. Mezi jižní složkou A 223 a kupou A 222 je most hmoty spojující obě kupy.

### Vlastnosti temného mostu

Vědci vyloučili, že by šlo o překrývající se haló kup A 222 a A 223. V mostě spojujícím obě kupy je zvýšená koncentrace galaxií oproti okolí a na datech z rentgenového dalekohledu XMM-Newton je patrný horký plyn zářící v rentgenovém oboru. Z intenzity signálu byla odhadnuta horní mez hmotnosti horkého plynu a ukázalo se, že tvoří maximálně 9 % hmotnosti celé struktury. Podstatná část nalezeného mostu mezi kupami (cca 90 %) je z nesvítící látky, která byla objevena jedině díky gravitačnímu čočkování. Podle všeho jde o první objevené vlákno temné hmoty, které je součástí základní sítě vláken temné hmoty určující vlastnosti celého vesmíru. Nasvědčují tomu i řetízky galaxií a horký plyn kopírující tvar mostu. Odhad rozměru mostu dává průměr přibližně 1 Mpc a délku kolem 20 Mpc.

Uveďme na závěr hmotnosti jednotlivých komponent soustavy, které vycházejí z gravitačního čočkování, rentgenových snímků a numerických modelů:

STRUKTURA	HMOTNOST ( $M_{\odot}$ )
A 222	$(2,7 \pm 0,8) \times 10^{14}$
A 223	$(3,4 \pm 1,3) \times 10^{14}$
celková hmotnost mostu	$(6,5 \text{ až } 10) \times 10^{13}$
horký plyn v mostu (svítí v RTG)	méně než $5,8 \times 10^{12}$

■ Petr Kulhánek, 27. 7. 2012, AB 29/2012

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

**Subaru** – japonský dalekohled s celistvým zrcadlem o průměru 8,2 metru. Dalekohled je umístěn v nadmořské výšce 4 139 m na hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech. Japonské slovo „subaru“ znamená v překladu otevřenou hvězdokupu Plejády. Japonským dalekohledem Subaru prošlo první světlo v roce 2005.

**NAOJ** – Japonská národní astronomická observatoř (National Astronomical Observatory of Japan). Astronomická výzkumná organizace, která provozuje několik zařízení v Japonsku a observatoř na Havajských ostrovech. Organizace byla založena v roce 1988 fúzí tří vědeckých institucí. Největším dalekohledem je osmimetrový Subaru na hoře Mauna Kea. K dalším zařízením patří radioteleskop Minamimaki v Naganu, který má průměr 45 metrů. NAOJ také provozuje detektor gravitačních vln TAMA s délkou ramen 300 metrů.

**Hubblova expanze** – expanze, při které je rychlost vzdalování objektů přímo úměrná jejich vzdálenosti. Takový typ expanze nemá žádný střed, expanze probíhá ze všech míst vesmíru stejným způsobem a každý pozorovatel uvidí totéž (tzv. kosmologický princip).

## Přehlídkový projekt CLASH

**ACS** – *Advanced Camera for Surveys*, přístroj umístěný na HST při třetí servisní misi v březnu 2002 namísto starší kamery FOC. ACS má ostřejší obraz, širší zorné pole ( $202'' \times 202''$ ) a větší vlnový rozsah (blízké IR, V, celé UV) než původní kamera FOC.. Přístroj je složen z širokoúhlé kamery, kamery s vysokým rozlišením a z kamery pro pozorování Slunce. V roce 2007 kamera selhala. Opravena byla při poslední servisní misi v roce 2009.

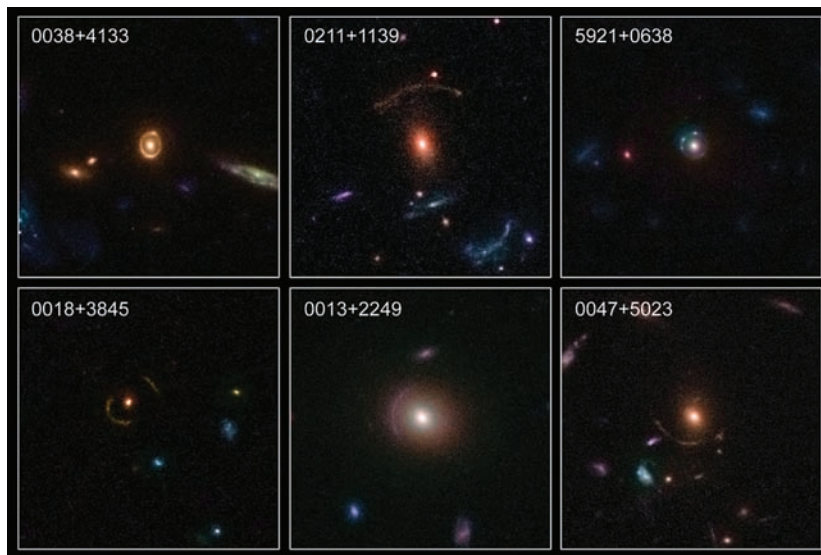
Existence temné hmoty ve vesmíru je dnes všeobecně uznávanou kosmologickou skutečností. Jde o entitu, kterou činíme odpovědnou za soudržnost galaktických kup a srovnatelně velkých nadgalaktických struktur. V měřítku sluneční soustavy se prakticky neprojevuje nebo se astronomům prozatím nepodařilo měřitelné projevy odhalit. Temné hmoty je ale ve vesmírném prostoru zhruba šestkrát více než hmoty baryonové, ze které jsou veškerá viditelná tělesa, hvězdy a mezihvězdná látka. Jde tedy o velmi významnou složku vesmírné kompozice.

### Gravitační čočkování a temná hmota

Jedním ze způsobů, jak odhalit temnou hmotu, je využití jejího vlivu na světlo. Velmi hmotné struktury způsobí zkreslení obrazu vzdálených viditelných objektů, jestliže stojí v cestě mezi nimi a pozorovatelem. Jde o známý jev gravitačního čočkování, který byl již mnohokrát pozorován a popsán a je vysvětlitelný pomocí obecné teorie relativity. Ponejprv se při předpovědi gravitačního čočkování astronomové a fyzikové domnívali, že půjde o velmi řídké případy, které snad ani nebudou moci být využity. Pozorovat gravitační čočku se s technikou

první poloviny minulého století zdálo nepravděpodobné. Po vypuštění Hubblova vesmírného dalekohledu se ale situace radikálně změnila. Dnes jsou známy stovky případů pozorovaných zkreslených obrazů vzdálených objektů, jejichž příčinou je gravitační čočkování a které lze využít pro systematický výzkum vzdálených oblastí vesmíru. Pilotním projektem mapování temné hmoty v úzké části oblohy byl v roce 2007 projekt COSMOS (*Cosmic Evolution Survey*), který zmapoval oblast  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$  do hloubky 6,5 miliardy světelných roků. Ze získaných časoprostorových řezů svítících struktur se

Gravitační čočkování vzdálenými galaxiemi ještě vzdálenějších objektů. Jde o šest vybraných exemplářů ze 67 velmi silně čočkujících galaxií zachycených při projektu COSMOS. Zdroj: HST/NASA/ESA.

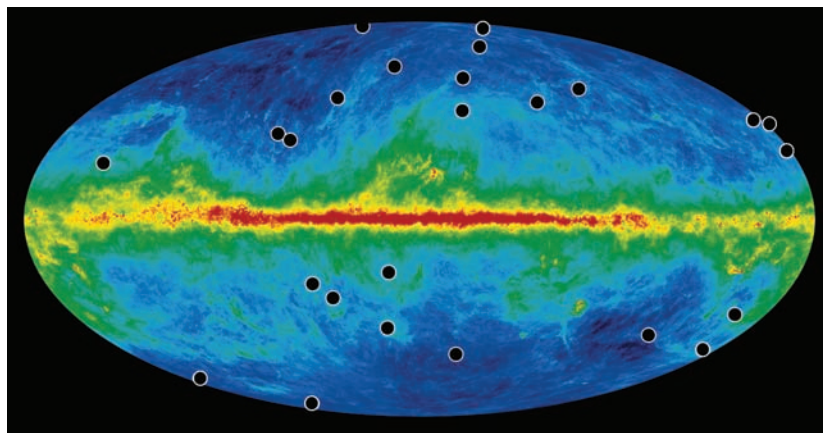


pak podařilo na malé části oblohy dopočítat historicky první časoprostorovou mapu temné hmoty.

### CLASH (2010–2013)

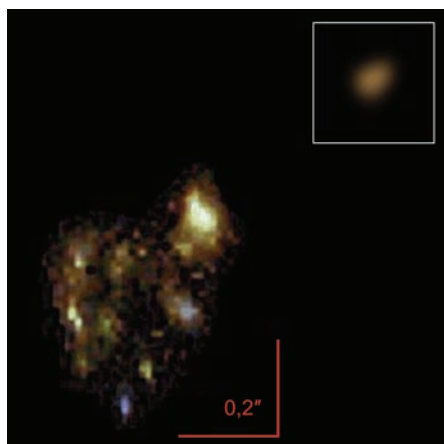
Projekt CLASH (*Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble*) je dosud nejrozsáhlejší dokončený přehlídkový projekt, jehož cílem bylo snímkování hlubokých výseků vesmíru na hranicích dostupnosti pomocí Hubbleova dalekohledu. Poprvé šlo o celooblohovou přehlídku. Jelikož je nemožné v takovém rozsahu s požadovanou přesností zmapovat ve velmi vysokém rozlišení celou oblohu, bylo vybráno ve všech směrech jen 25 galaktických kup ve velkých vzdálenostech, které byly vytipovány na základě předchozích přehlídek. Tyto kupy byly postupně snímkovány dlouhými expozicemi pokrývajícími celé spektrum, ve kterém Hubbleův dalekohled pracuje. Jedním z cílů programu bylo vyhodnocení gravitačních deformací světla a dopočet rozložení temné hmoty. Jako první (oblast) byla snímána kupa Abell 383 v Eridanu a jako poslední byla zkoumána kupa MACS J1311-0310 v Panně.

Galaktické kupy byly vybrány ve vzdálenostech odpovídajících intervalu červených kosmologických posuvů  $0,15 < z < 0,9$ . Druhým kritériem pro zařazení do programu byla míra čočkování vyjádřená jako tzv. Einsteinův poloměr. Jde o úhlový poloměr zobrazených čočkovaných oblouků vzdáleného objektu, které se vytvářejí kolem čočkující galaxie nebo galaktické kupy. Čím jsou oblouky od čočkujícího jádra kupy ve větší zdánlivé vzdálenosti, tím silnější gravitační čočku pozorujeme. Poloměr se dá přímo změřit na pořízeném snímku v úhlové míře. Dvacet ze sledovaných kup má Einsteinův poloměr v hodnotách  $15''$  až  $30''$ . Pět kup sem bylo zařazeno právě kvůli extrémně vysoké hodnotě Einsteinova poloměru. Jeho hodnoty se pohybují v intervalu  $35''$  až  $55''$ . Každá kupa byla pozorována v celkem šestnácti vybraných pásmech pomocí kamer ACS a WFC 3. Jelikož jde o velmi vzdálené, a tedy i velmi slabé světelné zdroje, snímání pro každý jednotlivý filtr zabralo od jednoho do dvou oběhů Hubbleova dalekohledu. Vzdálené



Rozmístění galaktických kup zařazených do projektu CLASH na obloze. Celoooblohové zobrazení je podloženo mapou prachoplynné struktury Mléčné dráhy v galaktických souřadnicích. Zdroj: STSL.

**WFC 3** – nejnovější CCD kamera instalovaná při čtvrté servisní misi (v roce 2009) na HST. Obsahuje CCD matici  $1024 \times 1024$  pro infračervený obor (vlnové délky 800 až 1700 nm) a další dvě CCD matice  $2048 \times 4096$  pro vizuální a ultrafialový obor (200 až 1000 nm). Jde o nejdokonalejší přístroj instalovaný na HST.

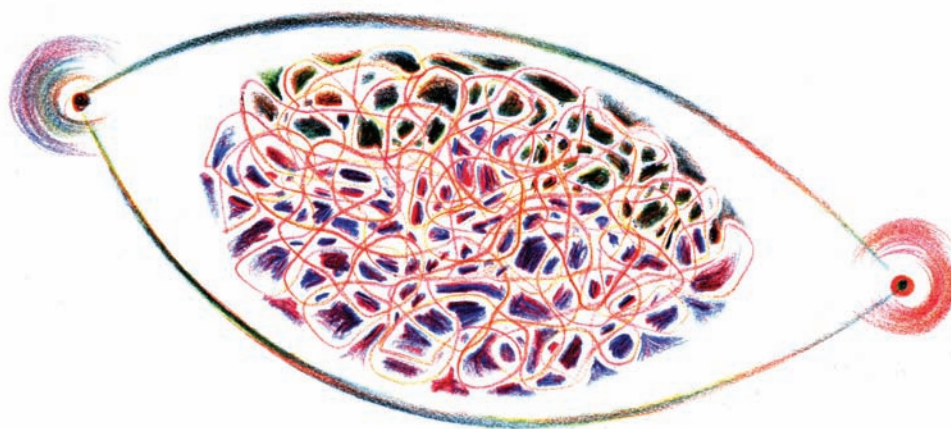


Objekt deformovaný gravitačním čočkováním. V bílém čtverci je rekonstrukce objektu do podoby, v jaké bychom ho pozorovali, kdyby nebyl zesílen a zkreslen gravitační čočkou. Objekt má červený kosmologický posuv  $z = 4,92$ . Zdroj: Adi Zitrin a kol.

objekty zobrazené gravitační čočkou ve tvaru oblouků svítí v rozsahu magnitud 25 až 28. Pro přesné fotometrické vyhodnocení záznamu se využívalo řady úzkopásmových filtrů. Srovnáním získaných záznamů tak bylo možné s dostatečnou přesností určit nejen obrazové zkreslení, ale zejména červený posuv čočkováného objektu a tedy stanovit jeho časoprostorovou polohu. Snímkování probíhalo tři roky a bylo mu věnováno celkem 524 oběhů Hubbleova dalekohledu.

Projekt CLASH si kladl za cíl zjistit rozložení temné hmoty ve velkých vzdálenostech na úrovni galaktických kup za pomoci gravitačního čočkování s přesností, která nebyla dosažena v žádném jiném projektu. CLASH umožnil nalézt a také proměřit několik supernov typu Ia, které posloužily ke kalibraci vzdálenosti a nezávisle potvrdily zrychlenou expanzi vesmíru. Světlo některých z nich bylo zesíleno efektem gravitační čočky, za kterou posloužila mezilehlá kupa galaxií. Data z projektu se intenzivně zpracovávají. Jen v prvních pěti měsících roku 2014 bylo publikováno 9 článků v prestižních časopisech. Projekt CLASH se stal první úspěšnou přehlídkou, která zmapovala stejným způsobem poměrně rovnoměrně vybraná místa ve všech směrech okolního vesmíru.

■ Ivan Havlíček, 21. 10. 2011, AB 40/2011, aktualizováno





## Temná energie

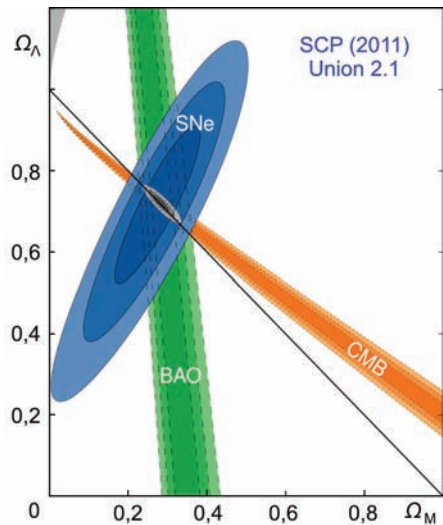
Od roku 1998 víme, že se vesmír rozpíná zrychlenou expanzí. Takový druh expanze nemůže být podle našich znalostí způsoben gravitační interakcí. Ta je přitažlivá a mohla by expanzi jen brzdit. Nejpříjímavějším názorem je, že za zrychlenou expanzi je zodpovědná nová entita, která dostala pracovní název temná energie. Podle současných měření by měla tvořit přibližně 68 % hmoty a energie ve vesmíru a neměla by mít žádné struktury – jde o jakési fluidum rovnoměrně vyplňující celý vesmír. Zdá se, že ani s časem se hustota temné energie příliš nemění, pokud vůbec. Vzhledem k tomu, že hustota záření klesá s expanzí se čtvrtou mocninou rozměrů, hustota látky se třetí mocninou a hustota temné energie klesá zanedbatelně nebo vůbec, je jasné, že ve vesmíru nejprve dominovalo záření, poté látka a nakonec temná energie. Dnes tedy žijeme v éře temné energie, která započala přibližně pět až sedm miliard let po vzniku vesmíru. Vliv temné energie v éře záření a látky byl mnohem menší, než je dnes, a vesmír expandoval brzděnou expanzí známou z řešení rovnic obecné relativity.

### Trocha historie

Jak byla temná energie objevena? Na konci 20. století se začal využívat nový způsob měření vzdálenosti galaxií za pomoci supernov typu Ia, které slouží jako jakési standardní svíčky. V běžných galaxiích exploduje jedna až dvě za století, což při počtu galaxií umožňuje tu a tam nalézt ty, v nichž právě k explozi došlo. Při výpočtu vzdálenosti se samozřejmě bere v úvahu změna jasnosti způsobená prostorovou odlehlostí a expanzí vesmíru. Ze spektra mateřské galaxie lze zjistit červený kosmologický posuv vlnové délky světla způsobený expanzí vesmíru. Porovnáváním obou údajů byla téměř současně objevena dvěma nezávislými skupinami zrychlená expanze vesmíru. První skupina byla vedená Adamem Riessem z institutu STSI v Baltimoru a objev zrychlené expanze ohlásila v listopadu 1998. Druhou skupinu vedl Saul Perlmutter z Lawrenceovy laboratoře LBNL v Berkeley. Tato skupina objev ohlásila na počátku roku 1999. Za objev zrychlené expanze získali Saul Perlmutter, Adam Riess a Brian Schmidt Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2011. Nejvzdálenější supernova použitelná pro měření expanze vesmíru byla objevena 9. ledna 2013 v datech z Hubblova dalekohledu pořízených v roce 2004. Tato supernova nese označení

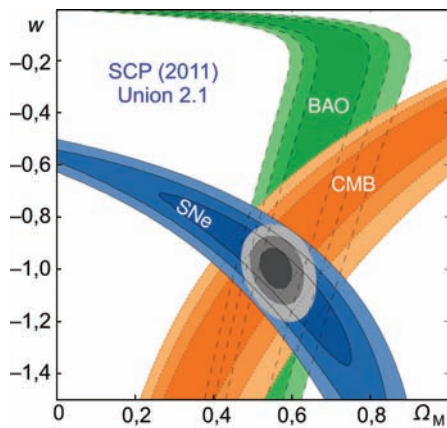
**Temná energie** – entita zodpovědná za zrychlenou expanzi vesmíru, která byla objevena na konci roku 1998 (Saul Perlmutter, Adam Riess). Temná energie tvoří 68 % hmoty a energie ve vesmíru. Hustota temné energie je velmi málo proměnná v čase i v prostoru, pokud vůbec. Nejnadějnějším kandidátem na temnou energii je energie vakua.

Na svislé ose je procentuální zastoupení temné energie, na vodorovné ose látka (baryonové + temné). Na grafu jsou znázorněny oblasti přípustných parametrů z analýzy fluktuací reliktního záření (CMB), z analýzy velkorozměrových struktur (BAO) a z analýzy zrychlené expanze provedené za pomoci supernov Ia (SNe). Zdroj: SCP.



Expanzní funkce – funkce času  $R(t)$  udávající, jakým způsobem se s časem mění vzdálenosti v rozpínajícím se vesmíru. Můžeme si ji představit jako poměr vzdálenosti libovolných dvou vzdálených objektů ve vesmíru dnes a v minulosti. Mezi expanzní funkcí a kosmologickým červeným posuvem existuje jednoduchý vztah  $z = (R - R_0)/R_0$ , kde  $R_0$  charakterizuje lineární rozměry vesmíru v době vyslání paprsku a  $R$  lineární rozměry vesmíru v době jeho zachycení. Z naměřeného kosmologického červeného posuvu můžeme snadno vypočítat, jak se změnily rozměry vesmíru od doby, kdy byl vyslán dnes pozorovaný světelný paprsek. Pokud by expanzní funkce byla rovná 1, znamenalo by to, že se vzdálenosti ve vesmíru nemění.

Na svislé ose je parametr  $w$ , na vodorovné procentuální zastoupení hmoty. Na grafu jsou znázorněny oblasti přípustných parametrů z analýzy fluktuací reliktního záření (CMB), z analýzy velkorozměrových struktur (BAO) a z analýzy zrychlené expanze provedené za pomoci supernov Ia (SNe). Zdroj: SCP.



SN SCP-0401 a je ve vzdálenosti 10 miliard světelných roků.

Není bez zajímavosti, že Perlmutterova skupina pokračuje v analýze veškerých dostupných dat ze supernov typu Ia dodnes. Perlmutter je šéfem projektu SCP (*Supernova Cosmology Project*), který v období od roku 2008 do roku 2011 shromáždil z nejrůznějších zdrojů data o 833 explozích supernov typu Ia, 580 z nich bylo použitelných pro další zpracování. Poslední zpracovaný soubor supernov z roku 2011 nese jméno Union 2.1.

Dnes o zrychlené expanzi víme nezávisle také z tvaru velkorozměrových struktur ve vesmíru, které se vyvinuly z prvopočátečních baryonových akustických oscilací (BAO) přítomných na konci Velkého třesku. Dalším zdrojem cenných informací je analýza fluktuací reliktního záření z dat pořízených sondou Planck v letech 2009 až 2011. Balíček výsledků týkající se kosmologie, a tím i temné energie, byl zveřejněn v únoru 2013, poslední data by měla být zpracována v druhé polovině roku 2014. Souhlas dosavadních výsledků z natolik rozdílných částí astronomie je skutečně úžasný – posuďte sami z přiložených diagramů.

## Co znamenají procenta zastoupení?

Často se uvádí procentuální zastoupení atomární látky, temné hmoty a temné energie. Co ale tato procenta ve skutečnosti znamenají? Zjednodušeně řečeno jde o podíl hustoty energie či hmoty (ty jsou převoditelné,  $E = mc^2$ ) dané entity vůči tzv. kritické hustotě vesmíru (hustota, kterou by měl plochý vesmír). Expanze vesmíru se popisuje tzv. expanzní funkcí, která určuje nárůst či pokles vzdáleností ve vesmíru. Tato expanzní funkce splňuje Einsteinovu-Fridmanovu rovnici a z ní plyne jednoduchý a snadno interpretovatelný vztah:

$$\Omega_R + \Omega_M - \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1,$$

ve kterém je  $\Omega_R$  je podíl hustoty energie záření ku kritické hustotě,  $\Omega_M$  je podíl látky (ať baryonové či temné) vůči kritické hustotě,  $\Omega_k$  je příspěvek od křivosti vesmíru (může být kladný, nulový nebo záporný) a  $\Omega_\Lambda$  je člen daný temnou energií, která je v rovnicích zastoupena kosmologickou konstantou  $\Lambda$ . Členy na levé straně jsou seřazeny tak, jak reagují na expanzi. Hustota záření klesá se čtvrtou mocninou rozměrů, hustota látky se třetí, člen křivosti se druhou a kosmologický

člen s nulovou mocninou (neklesá vůbec). Pokud je vesmír plochý (a ze všech měření se zdá, že ano), je třetí člen nulový a součet parametrů  $\Omega$  pro záření, látku a temnou energii dá přesně 1. V tomto případě můžeme tedy hovořit o procentuálním zastoupení entit vůči celku, respektive vůči kritické hustotě hmoty/energie, která je pro plochý vesmír i jeho skutečnou hustotou. V dnešním vesmíru je podíl záření velmi malý, a tak má rovnice pro plochý vesmír jednoduchý tvar

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1.$$

### Kde se bere temná energie?

Nejdůležitější a dosud nerozřešenou otázkou je původ temné energie. Jako nejpravděpodobnější se zdá, že jde o projevy vakua. Podle kvantové teorie musí mít vakuum netriviální vlastnosti a nikdy nemůže být úplně prázdné. Vždy se v něm nacházejí fluktuace nejružnějších polí a jakoby z ničeho se tvoří páry částice a antičástice, které v divokém reji fluktuací opět zanikají. Kvantové vakuum má nenulovou energii, mělo by být v celém vesmíru rovnoměrně rozprostřeno a hustota jeho energie by měla být při expanzi konstantní. Navíc střední hodnota energie těchto kvantových fluktuací dá příspěvek k hustotě energie vesmíru, který má stejný tvar jako slavná kosmologická konstanta v Einsteinových rovnicích obecné relativity. Je proto možné, že kruh se uzavírá a původ kosmologického členu v obecné relativitě je v kvantových procesech ve vakuu. Vše má ale jeden háček. Hustota energie vakua je o mnoho řádů větší než je hustota pozorované temné energie. Možná je náš svět mnohorozměrný a tato nadbytečná energie je deponována v extradimenzích, které nevnímáme. Možná je temná energie projevem jen určité části energie vakua. Možná jsme na špatné stopě a temná energie nesouvisí s energií vakua a je projevem další dosud nepoznané interakce, tzv. páté esence neboli *kvintesence*. A možná je vše úplně jinak a gravitace se na velkých měřítcích projevuje jen jiným způsobem, než si myslíme.

Klíčem k pochopení podstaty temné energie by měla být tzv. stavová rovnice temné energie, která dává do souvislosti tlak s hustotou energie. Mezi těmito veličinami by měla platit přímá úměrnost, tedy tlak, kterým temná energie působí na okolí, by měl být přímo úměrný hustotě energie této entity. Koeficient úměrnosti se označuje písmenkem  $w$  a říká se mu parametr  $w$ . Vše se odvíjí od hodnoty tohoto

**Parametr  $\Omega$**  – podíl hustoty vesmíru ku kritické hustotě, v našem vesmíru je přibližně roven jedné, tj. vesmír je téměř plochý.

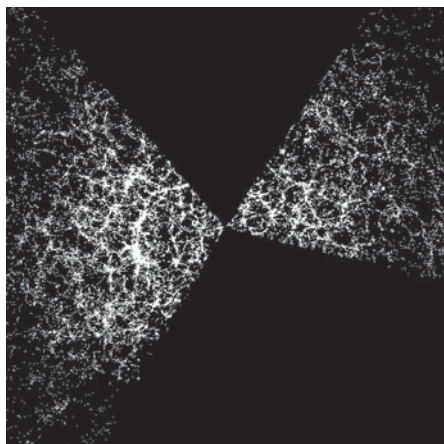
**Parametr  $w$**  – zavádí se jako koeficient úměrnosti mezi tlakem a hustotou energie,  $p = wp$ .

**STSI** – Space Telescope Science Institute. Vědecký ústav pro přípravu programu a zpracování dat z Hubblova dalekohledu a v budoucnosti z dalekohledu Jamese Webba. Ústav byl založen v roce 1981.

**LBNL** – Lawrence Berkeley National Laboratory. Jedna z nejproslulejších světových laboratoří založená v roce 1931 Ernestem Orlando Lawrencem, nositelem Nobelovy ceny za fyziku pro rok 1939 za vynález cyklotronu. Laboratoř je řízena Kalifornskou univerzitou a dodnes v ní pracovalo 11 nositelů Nobelovy ceny.

Umělecká představa fluktuací vakua.  
Zdroj: Lactamme Polytechnique.



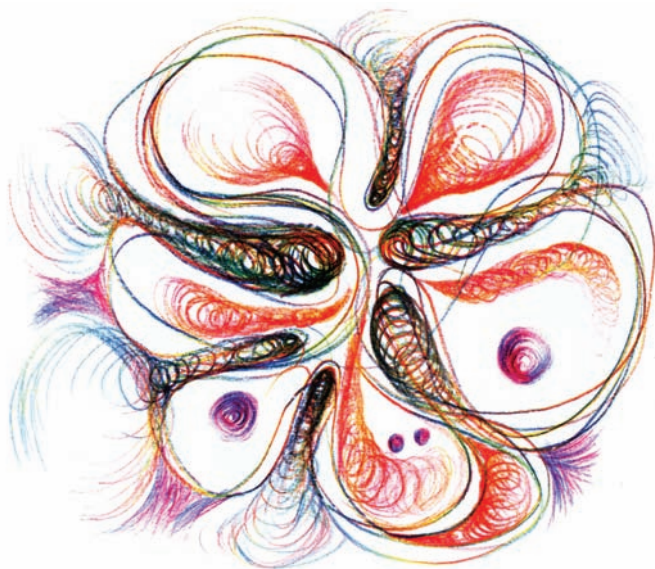


Rozložení galaxií je na velkých škálách mapováno v úzkých výřezech celooblohovými přehlídkami. Na obrázku je mapa velkorozměrových struktur. Zdroj: přehlídka SDSS (Sloan Digital Sky Survey).

parametru. Pokud je jeho hodnota menší než  $-1/3$ , ve vesmíru probíhá *zrychlená expanze*. Hodnota  $-1$  by korespondovala s kvantovými projevy vakua, a tedy s kosmologickou konstantou. Hodnota menší než  $-1$ , která by znamenala v budoucnosti tzv. *velké rozervání* vedoucí na dezintegraci základních stavebních prvků hmoty, se zdá být experimentálně vyloučena. Velkou nadějí na relativně přesné určení hodnoty parametru  $w$  má zpracování dat ze sondy Planck zkoumající fluktuace reliktního záření. Poslední data by měla být zpracována v závěru roku 2014. O kvantových vlastnostech vakua bychom se mnohé mohli dozvědět z experimentů na největším urychlovači světa LHC. Temnou energii a její projevy zkoumá i řada dalších projektů.

To, že data ze supernov typu Ia, data z pozorování velkorozměrových struktur a analýza fluktuací reliktního záření dávají přibližně shodné výsledky, je fascinující. Znamená to, že současná fyzika je na správné cestě k pochopení podstaty temné energie a temné hmoty. Přípravované experimenty mohou vnést světlo do původu těchto mysteriózních složek. O jejich množství již ale v tuto chvíli není pochyb.

■ Petr Kulhánek, 5. 6. 2014, AB 28/2010, aktualizováno





## Kvazar, který je nejdál

Čím je něco dál, tím je to obtížněji pozorovatelné. A v astronomii je vzdálenost jednou z klíčových charakteristik všech pozorovaných objektů. Se vzdáleností ubývá světla, které k nám může od svítícího objektu doputovat. Úbytek světla je způsoben několika mechanismy.

### Úbytek světla

První mechanismus je svázán s rozptýlením světla zdroje do narůstající plochy povrchu koule, jejíž poloměr je přesně stejný, jako je vzdálenost objektu. Množství světla je nepřímo úměrné ploše, tedy čtverci vzdálenosti od zdroje. Není to ale jediný důvod, proč se vzrůstající vzdáleností světlo svítících objektů slábne.

Vesmírný prostor není úplně pustý a prázdný, a proto také není pro světlo úplně průhledný beze ztrát. Mezi zářícími galaxiemi a jinými vesmírnými objekty, které jsou poměrně dobře zaznamenatelnými zdroji světla, je řídká látka, která jejich světlo pohlcuje a tím na velkých vzdálenostech způsobuje jeho další zeslabování. Úbytek světla způsobený jeho pohlcováním mezihvězdným nebo mezigalaktickým prostředím, označovaný také jako *extinkce*, je mimo jiné závislý na vzdálenosti, která nás dělí od zdroje, ale jediné díky extinkci se můžeme dozvědět mnohé o vlastnostech samotného pohlcujícího prostředí.

Z velmi vzdálených zdrojů se tak můžeme dozvědět mnoho nejen o nich samotných, ale také o vlastnostech prostředí, které se nachází na cestě mezi zdrojem světla a námi.

Třetí nezanedbatelnou změnou, která postihne světlo pocházející z velmi vzdálených zdrojů, je jeho *dopplerovský posuv* způsobený pohybem zdroje. Na velkých vzdálenostech je tento posuv vysvětlován vlastnostmi samotného vesmírného časoprostoru. Věříme, že rychlost vzdalování způsobená rozpínáním časoprostoru je neporovnatelně větší

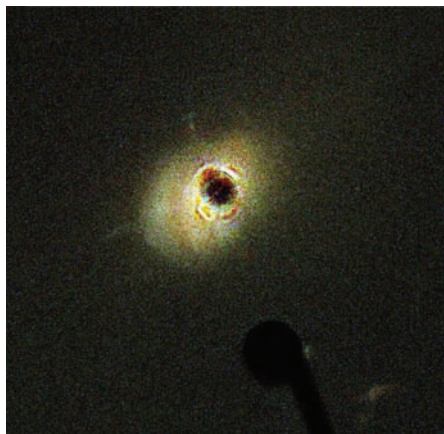
**Kvazary** – objekty objevené v roce 1963, mají malé úhlové rozměry (<1") a obrovský zářivý výkon v celém spektru ( $10^{35}$  až  $10^{40}$  W). Kvazary se nacházejí ve velkých kosmologických vzdálenostech, jejich světlo je poznamenáno rozpínáním vesmíru a jejich spektrum je výrazně posunuté k červenému konci. Energetická bilance odpovídá vyzařování celých galaxií. Jde o zárodky budoucích galaxií, v jejichž středu se nachází obří černá díra s charakteristickým výtryskem hmoty.

Nejvzdálenější kvazar ULAS J1120+0641 podle představy astronomického ilustrátora. Zdroj: ESO.



**Extinkce** – zeslabení světla vzdálených hvězd. Je způsobena pohlcováním světla mezihvězdnou látkou. V galaktické rovině v bezprostředním okolí Slunce jde o průměrné zeslabení o 1,9 mag na 1 kpc. Mezihvězdná látka ale není v Galaxii rozmístěna rovnoměrně a na větších vzdálenostech může nabývat i velmi rozdílných hodnot. Velikost extinkce je zhruba nepřímo úměrná vlnové délce světla. Z velkých vzdáleností tedy lépe prochází mezihvězdným prostředím červené světlo a vzdálenější hvězdy se proto jeví červeně. Extinkce je způsobena rozptylem a pohlcováním fotonů na částicích prostředí. Z charakteristik extinkce lze tak přímo zjistit vlastnosti mezihvězdného prostředí, které nás dělí od zdroje světla.

Jeden z nejbližších kvazarů 3C 273 v souhvězdí Panny leží ve vzdálenosti 2,44 miliardy světelných roků, přičemž dosahuje jasnosti 12,9 magnitudy. Je díky tomu docela dobře pozorovatelný i amatérskými dalekohledy. Na snímku je centrální oblast kvazaru zaznamenaná pomocí Hubblova vesmírného dalekohledu. Zdroj: HST.



než jakákoliv rychlost vlastního pohybu zdroje vůči okolním srovnatelně vzdáleným strukturám. Jelikož se vesmír rozpíná a tímto rozpínáním se zvětšuje, vzdálené zdroje jsou rozpínajícím se časoprostorem unášeny tím rychleji od nás, čím jsou vzdálenější. Rychlost tohoto časoprostorového vzdalování se promítá do vlastností námi pozorovaného světla velmi vzdálených světelných zdrojů a je docela dobře měřitelná ve spektru. Světlo velmi vzdálených zdrojů tak pozorujeme v nižších energiích, než v jakých bylo vyzařeno. Projevuje se to prodlužováním vlnové délky pozorovaného světla, charakteristické spektrální čáry se přesouvají od fialových k červeným, a celému jevu se proto říká kosmologický červený posuv.

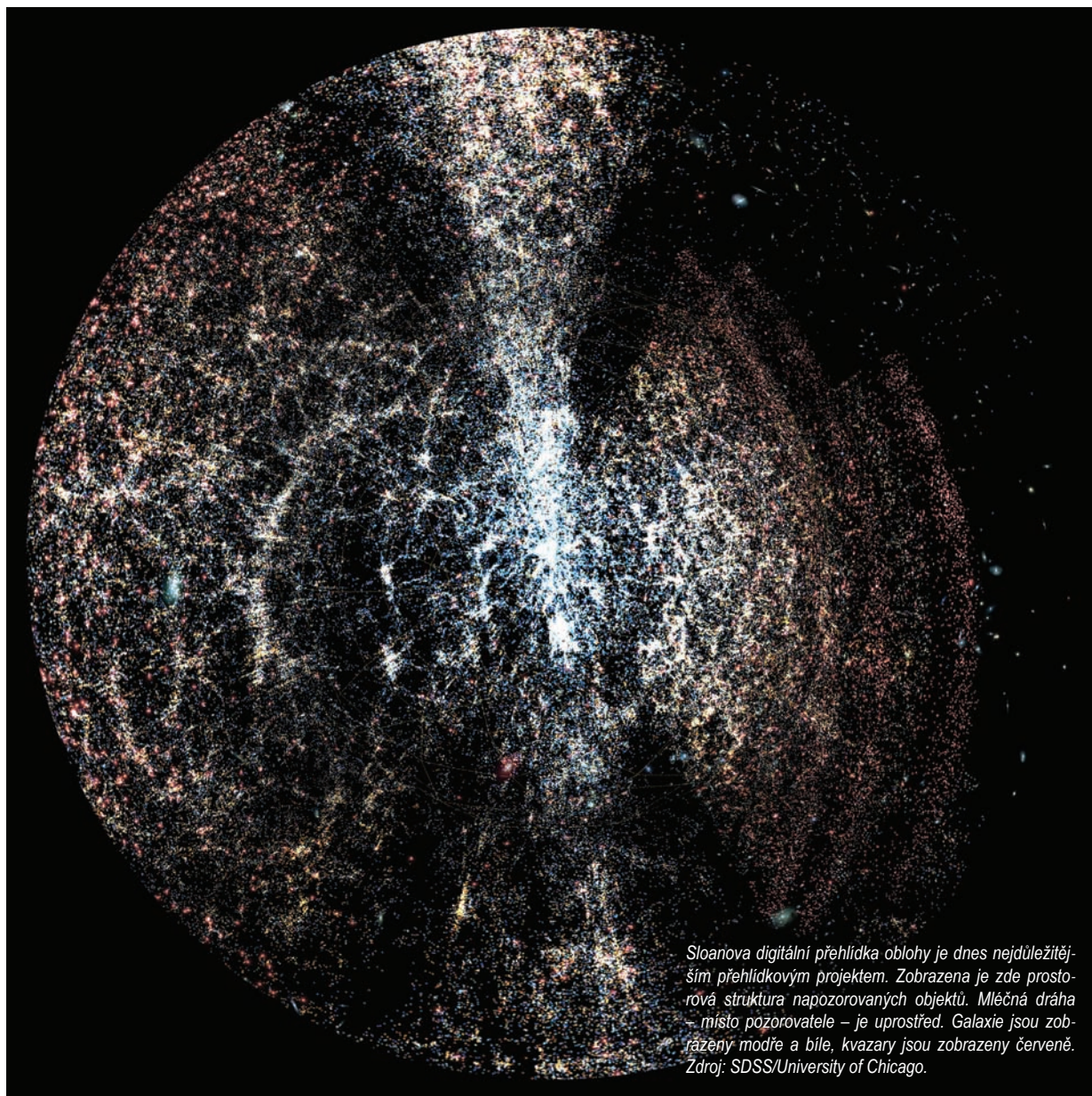
Pro velmi vzdálené světelné zdroje z toho vyplývá, že pokud je chceme zaznamenat, musí být se vzrůstající vzdáleností čím dál tím jasnější a zářivější. Měli bychom je, se vzrůstající vzdáleností, hledat na delších vlnových délkách, jejich původně krátkovlnné nebo viditelné světlo může být posunuto do infračervené nebo i mikrovlnné oblasti spektra. Pro strukturované velké objekty, jako jsou galaxie, pak existuje určitá vzdálenost, ze které už nebudeme schopni jakoukoliv jejich strukturu rozeznat, a takový zdroj se bude, pokud je dostatečně jasný, jevit jako bodový objekt podobný hvězdám.

## Kvazary

V šedesátých letech minulého století byly pozorovány první rádiové zdroje, jejichž optické protějšky byly podobné hvězdám až na to, že jejich spektrum jeví výrazný červený posuv. Než se situace vyjasnila, byly první gravitačně čočkované obrazy takových objektů dokonce interpretovány jako objekty vzdalující se vzájemně nadsvětelnými rychlostmi. Pokud by červený posuv byl způsoben kosmologickým rozpínáním, muselo by jít o extrémně zářivé zdroje srovnatelné s galaxiemi. Byly nazvány *Quasistellar Radio Sources*, což znamená *hvězdám podobné rádiové zdroje*. Později bylo sousloví zkráceno na dnes užívané pojmenování *quasar*. V české transkripci píšeme *kvazary*. Jsou to nejspíše aktivní galaktická jádra, která vyzařují díky dějům probíhajícím v bezprostředním okolí centrálních galaktických černých veleděr s hmotnostmi srovnatelnými až s několika miliardami Slunci.

Kvazarů je dnes známo více než 200 000, jejich červený kosmologický posuv se pohybuje v intervalu 0,056 až 7,085. Co se týče jejich vzdálenosti, nejvíce je jich zaznamenáno a popsáno zejména díky





*Sloanova digitální přehlídka oblohy je dnes nejdůležitějším přehlídkovým projektem. Zobrazena je zde prostorová struktura napozorovaných objektů. Mléčná dráha – místo pozorovatele – je uprostřed. Galaxie jsou zobrazeny modře a bíle, kvazary jsou zobrazeny červeně. Zdroj: SDSS/University of Chicago.*

**SDSS** – Sloan Digital Sky Survey, ambiciózní projekt přehlídky oblohy podporovaný nadací Alfreda Pritcharda Sloana, která byla založena v roce 1934. Alfred P. Sloan (1875–1976) byl americký obchodník a výkonný ředitel společnosti General Motors po více než dvacet let. Sloanova nadace podporuje také vědu a školství. Projekt katalogizuje všechny galaxie s mezí jasností do 23. magnitudy na čtvrtině severní oblohy. Přehlídka zahrnuje asi 500 milionů galaxií a ještě více hvězd. U každé galaxie je určena pozice, jasnost a barva. Pro asi milion galaxií a 120 000 kvazarů jsou pořízena spektra. Stanice SDSS je postavena v Novém Mexiku v Sacramento Mountains na observatoři Apache Point. Hlavním přístrojem projektu SDSS je dalekohled o průměru primárního zrcadla 2,5 m.

Kvazar ULAS J1120+0641 s červeným kosmologickým posuvem  $z = 7,085$ , který je kandidátem na nejvzdálenější aktivní galaktické jádro v nám známém vesmíru. Kvazar je červená tečička uprostřed. Snímek ESO.



přehlídkovému projektu SDSS (cca 120 000 kvazarů nacházejících se ve vzdálenosti od 600 milionů do téměř 3 miliard světelných roků). Spodní hranice je dána schopností pozorovat bližší objekty v náznamech jejich struktury, nejsou proto zařazovány do kategorie hvězdám podobných objektů. Současně v blízkém okolí pozorujeme nejstarší hvězdné struktury. Oproti tomu aktivní galaktická jádra očekáváme uvnitř mladších struktur a předpokládáme, že čím mladší galaktická soustava je, tím by mohla být aktivnější její centrální oblast. Vzdálenější hranici pak určuje neprostupnost mezigalaktického prostředí pro možnost celoblohového sledování vesmírných objektů. Ze vzdálenějších oblastí k nám proniká světlo jen skrze hustou strukturu blízkého a zastiňujícího prostředí, které již do vzdálenosti kolem dvou miliard světelných roků vytváří velmi souvislou a nepropustnou vrstvu omezující pozorování vzdálenějších objektů. Extrémně svítivé zdroje, které pozorujeme ve větších vzdálenostech, můžeme uvidět jen úzkými výseky, průhlednými komíny, které nejsou zastíněny blízkými galaktickými strukturami. Uvidíme jich proto mnohem méně, než těch blízkých, i kdybychom předpokládali rovnoměrné rozmístění galaxií po celém představitelném vesmírném časoprostoru.

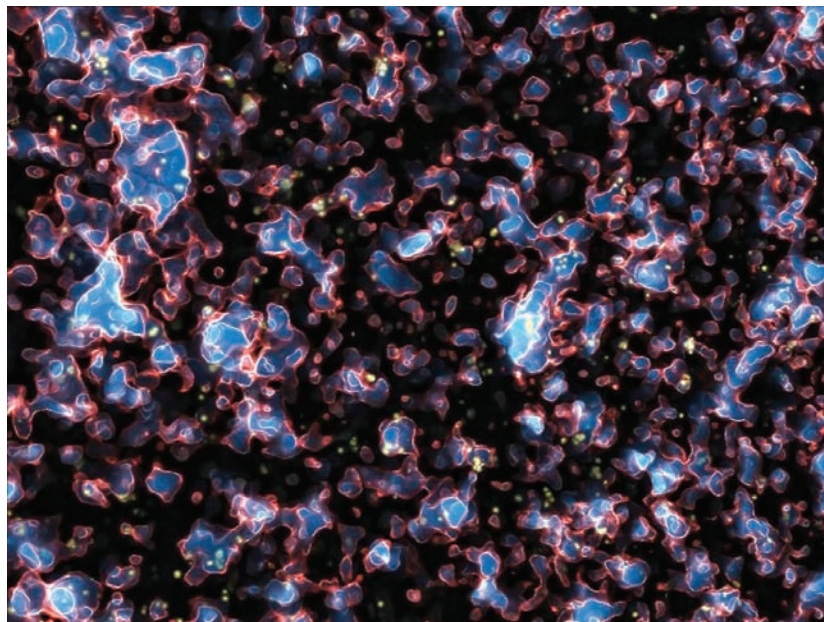
Protože se při pohledu do vzrůstajících vzdáleností díváme na mladší a mladší struktury, sledujeme tak kvazary v jejich dřívějších vývojových fázích. Současně lze při pohledu do vzdálené minulosti celou situaci interpretovat také tak, že se vlastně díváme do mnohem menšího vesmíru, než je ten náš současný a zrychleně se rozpínající časoprostor. Pokud dřívější a mladší vesmír obsahoval stejné množství látky jako ten dnešní, měl by být ve svých raných fázích vyplněn látkou hustěji. Okolní mezigalaktické prostředí, kterým k nám proniká světlo extrémně vzdálených objektů, by mělo být díky extinkci v tomto světle zapsáno mnohem čitelněji než řídké prostředí současného starého vesmíru v naší blízkosti. Pokud se tedy objeví kvazar ve velké vzdálenosti, je účelné z jeho svitu vydobýt nejen obraz jeho vlastní struktury, ale také charakteristiku prostředí v jeho bezprostřední blízkosti.

### Nejvzdálenější kvazar

Tým evropských astronomů objevil pomocí Velmi velkého dalekohledu (VLT) nejvzdálenější dosud známý kvazar. Objekt byl pojmenován ULAS J1120+0641, jeho červený kosmologický posuv činí  $z = 7,085$ , což lze interpretovat jako časové umístění do doby, kdy byl vesmír sta-



rý jen 770 milionů roků. Díváme se tak na světlo, které bylo vyzářeno před 13 miliardami roky. Svítivost kvazaru odpovídá  $6,3 \times 10^{13}$  svítivosti Slunce, což je zhruba o dva řády víc než svítivost celé naší Galaxie. Uvnitř kvazaru je usazená černá galaktická veledíra s hmotností odpovídající dvěma miliardám Sluncí. V porovnání s jinými nejvzdálenějšími objekty, které byly dosud pozorovány, jde o výjimečný kousek, který by mohl doplnit galerii dalekého astrofyzikálního zvěřince. Nejvzdálenější dosud pozorovanou a potvrzenou galaxií je objekt z8\_GND\_5296 s červeným posuvem  $z = 7,51$ , což by odpovídalo stáří vesmíru 700 milionů roků. Tato galaxie byla

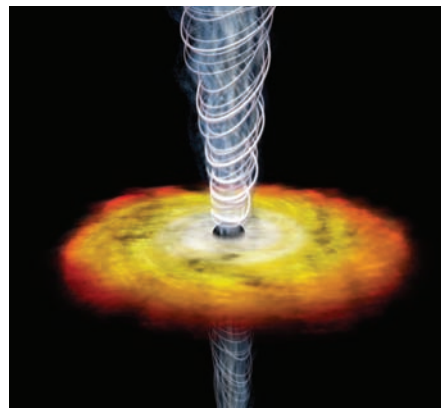


objevena Hubbleovým dalekohledem v říjnu 2013. Existuje ale několik dalších objektů, které mají červený kosmologický posuv přes 10 a u kterých není dosud potvrzeno, zda jde o galaxii, protogalaxii, nebo jiný objekt. Nejvzdálenější dosud pozorovaný gama záblesk GRB 090429B byl zaznamenán 27. května 2011 se  $z = 9,4$ , což odpovídá stáří vesmíru 620 milionů roků. Tyto události nebo objekty se v prostoročase nacházejí zhruba v období, kdy byl vesmír velký jen dvacetinu své dnešní velikosti. Pozorovaný kvazar ULAS J1120+0641 vyzařuje několikasetnásobně více než nejvzdálenější pozorovaná galaxie. Bude proto možné studovat podrobněji také okolní látku, kterou se k nám světlo vyzářované kvazarem prodírá. V době, kdy bylo vyzářeno, bylo vesmírné prostředí opětovně ionizováno prvními vznikajícími hvězdami a galaxiemi. Původní plazma se totiž na konci Velkého třesku (v období přibližně 400 000 roků) stalo dočasně neutrálním plynem.

Předpokládáme, že většina látky by v této době měla být ještě stále poměrně rovnoměrně rozprostřena v časoprostoru a že reionizace do chladnějších neutrálních velkostruktur ještě stále neskončila. Tato reionizace mohla, dle dnešních předpokladů, probíhat zhruba do

*Galaxie vznikající v období reionizace vesmíru někdy v první miliardě roků jeho stáří. Počítačová simulace. Zdroj: ESO.*

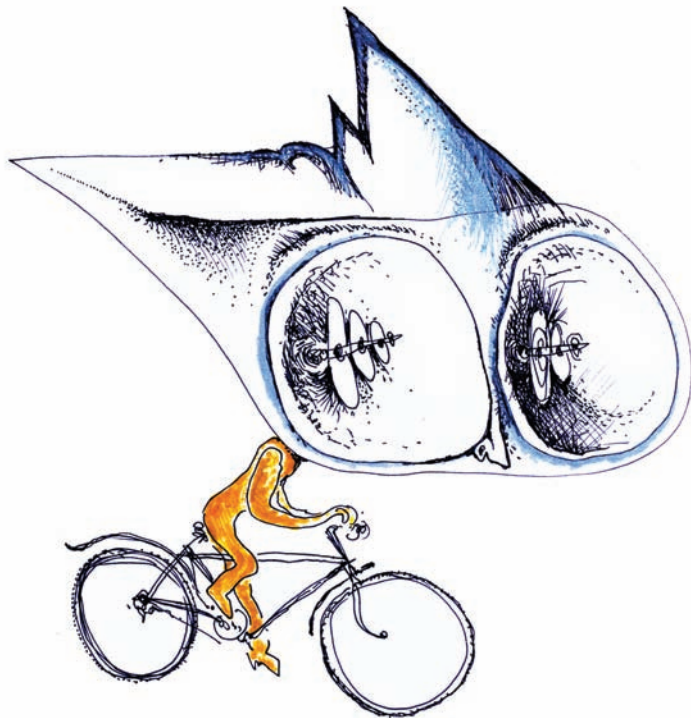
*Umělecká vize výtrysku z kvazaru., Zdroj: Chandra*



**Reionizace** – opětovná ionizace vesmíru, která proběhla v období vzniku prvních hvězd a galaxií. Pronikavé ultrafialové světlo z těchto objektů slabě ionizovalo okolní prostředí. Původní plazma ve vesmíru zaniklo na konci Velkého třesku, když se plazmatické skupenství změnilo na plynné.

období 800 milionů roků po ukončení Velkého třesku. Vesmírné prostředí mělo tedy vlastnosti v mnohém velmi odlišné od všeho, co dnes umíme pozorovat v blízkých vzdálenostech. Vše pozorovatelné zde je totiž mnohem starší a veškeré pozdější struktury již za sebou mají vývoj, v jehož průběhu se postupně přetvořily do celkově neutrálního stavu. V době, kdy byl vesmír starý jen 600 milionů roků, ale pozorujeme objekty, které jsou velmi pravděpodobně ve fázi, kdy je reionizace vesmíru v plném proudu. Obdobných objektů by dle autorů projektu mohlo být současnou technikou napozorováno nanejvýš kolem stovky. Podrobným studiem těchto extrémně vzdálených objektů bude možné přímo ověřit, do jaké míry se naše dosavadní představy o počátcích vesmíru shodují se skutečností.

■ Ivan Havlíček, 16. 11. 2012, AB 43/2012, aktualizováno

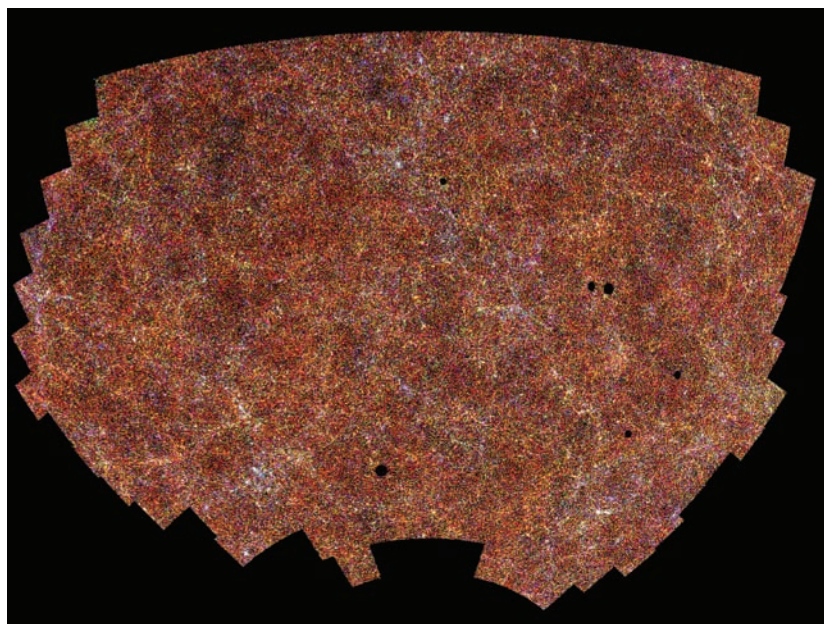


## Žijeme ve vesmírné bublině?

Pokud bychom měli charakterizovat vesmír několika přívlastky, pak je vesmír obrovský, chladný, rozpínající se, téměř homogenní a izotropní. Stáří vesmíru je přibližně 13,8 miliardy let. Poznatky o téměř rovnoměrném rozložení hmoty na kosmologických vzdálenostech byly získány mapováním oblohy na různých vlnových délkách. Příkladem může být detekce rádiových zdrojů (rádiový interferometr VLA), snímání oblohy ve viditelné oblasti (přehlídka SDSS, hluboké snímky z Hubblova vesmírného dalekohledu a mnoho dalších) nebo studium rozložení aktivních galaktických jader, které jsou zdrojem rentgenového záření (kosmická rentgenová observatoř XMM-Newton). Ještě mocnějším nástrojem pro studium vesmíru je analýza reliktního záření. Reliktní záření je rovněž nesmírně homogenní a izotropní. Střední hodnota fluktuací reliktního záření dosahuje pouze několika stotisícin kelvinu, bez ohledu na to, kterým směrem se díváme. Další zajímavou skutečností je fakt, že jsme vůbec schopni pozorovat vzdálené galaxie. Podle standardního kosmologického modelu hustota hmoty ve vesmíru reguluje rychlost jeho expanze. Pokud by hustota na počátku byla nepatrně větší, než je dnes, vesmír by velmi rychle zkolaboval vlastní gravitací. Naproti tomu vesmír s nižší hustotou hmoty by expandoval mnohem rychleji a většina hmoty by se snadno kauzálně oddělila, takže by ji nebylo možno pozorovat. Počáteční množství hmoty ve vesmíru bylo nastaveno blízko kritické hustotě, a to tak, že gravitace kompenzuje rozpínání vesmíru s vysokou přesností (až 59 platných číslic). Buď se smíříme s tím, že byl na počátku

**Atraktor** – množina, ke které se s rostoucím časem blíží řešení diferenciální rovnice s počátečními podmínkami nacházejícími se v okolí této množiny. Množina musí splňovat i některé další podmínky (invariantnost, uzavřenost a musí existovat řešení, které ji hustě pokrýje).

APM Galaxy Survey – přehlídka oblohy čítající více než 2 miliony galaxií. Černé oblasti představují odečtený signál z blízkých hvězd. Mozaika ze 185 fotografií pokrývá přibližně desetinu oblohy a ukazuje na homogenitu rozložení hmoty ve vesmíru. Zdroj: NASA, Steve Maddox.

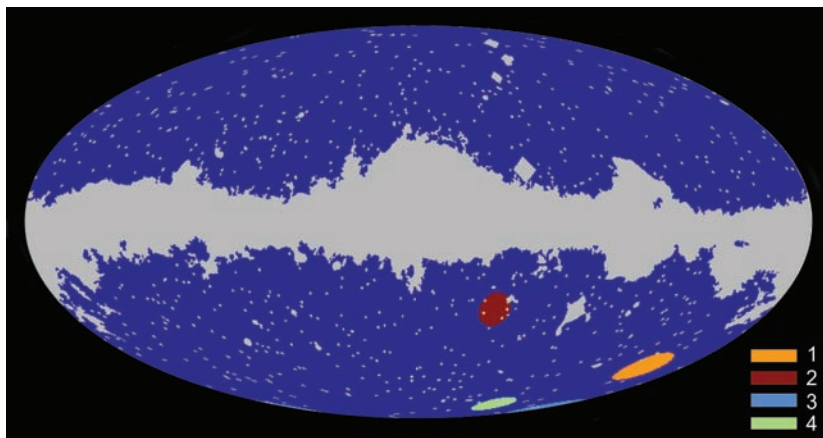




**Inflace** – prudké (exponenciální) zvětšení rozměrů raného vesmíru. Zpravidla se dává do souvislosti s oddělením silné interakce v čase  $10^{-35}$  s po Velkém třesku. V průběhu inflace dojde k zvýšení entropie faktorem  $10^{90}$  až  $10^{120}$  a k zvětšení rozměrů faktorem  $10^{30}$  až  $10^{50}$ . Uvolněná energie způsobí opětovné ohřátí vesmíru. Některé modely kladou inflaci do ještě ranějších fází vývoje vesmíru.

**Chaotická inflace** – jeden ze scénářů inflace, který nejlépe vysvětluje vlastnosti našeho vesmíru. Chaotická inflace zahrnuje kvantové fluktuace inflatonového pole v pre-inflační fázi vesmíru. Potenciální energie inflatonového pole  $\phi$  je úměrná  $\phi^4$  a neobsahuje lokální minima (falešná vakua). Chaotickou inflaci navrhl ruský fyzik Andrei Linde v roce 1986 a také dokázal, že za určitých podmínek může být chaotická inflace věčná.

Mapa výskytu čtyř oblastí, které jsou považovány za nejnadějnější kandidáty na pozůstatky kolize vesmírů. Data pocházejí ze sondy WMAP. Zdroj: S. Feenay.



vesmír takto prapodivně nastaven, nebo si musíme položit otázku: Jaké procesy umožnily vznik vesmíru s takto podivnými vlastnostmi?

## Inflační model

Zatímco představa přesného nastavení počátečních podmínek vesmíru svádí k antropickému principu, americký fyzik Alan Guth přišel v roce 1980 s racionálnějším vysvětlením pomocí inflačního modelu. Ve velmi raných fázích vesmíru, kdy docházelo ke kvantovým fluktuacím polí i samotného časoprostoru, prošel vesmír rapidní expanzí a zvětšil tak své rozměry o desítky řádů. Podle inflačního modelu je náš (pozorovatelný) vesmír tedy jen nepatrný zlomek z původně fluktuujícího vesmíru „nafouknutý“ do dnešních rozměrů. Tímto způsobem vznikl homogenní a izotropní vesmír. Proces inflace také „automaticky“ nastaví hustotu hmoty ve vesmíru blízko kritické hustotě. V inflačních modelech je vesmír s kritickou hustotou atraktorem, ke kterému se vesmír vyvine ze širokého spektra počátečních podmínek. Inflační model rovněž řeší i problém nepřítomnosti topologických defektů jako jsou kosmické struny nebo magnetické monopóly.

## Rozpad falešného vakua a věčná inflace

Jednou z představ je, že za inflaci zodpovídá tzv. *inflatonové pole* (skalární pole, jehož částice mají nulový spin). V průběhu vývoje vesmíru se snižuje potenciální energie inflatonového pole a vesmír se tak může ocitnout v metastabilním stavu, který nazýváme falešným vakuem.

Postupným přechodem vesmíru do globálního energetického minima (reálného vakua) dochází k inflaci. Vědci Paul Steinhardt a Alexander Vilenkin však dokázali, že falešné vakuum je nestabilní a rozpadá se. Poločas rozpadu falešného vakua je mnohem delší než doba inflace. Tato dílčí falešná vakua jsou zárodky dalších vesmírů, které se exponenciálně nafouknou podobně jako bubliny. Jakmile jednou inflace započne, probíhá věčně (směrem do budoucnosti). Podle teorie věčné



inlace má svět fraktální strukturu složenou z mnoha a mnoha vesmírů a náš vesmír je jedním z nich. Věčná inflace může nastat i v pokročilejších inflačních modelech, jakým je například chaotická inflace.

## Experimentální testy věčné inflace

Pokud skutečně existuje mnoho „bublinových“ vesmírů, mohlo v minulosti docházet k četným kolizím těchto bublin. Jestliže se vesmíry srážely v oblastech, které nám jsou kauzálně dostupné, pak by mělo být možné pozorovat kruhové „otisky“ kolizí v reliktním záření. Právě touto analýzou kosmického mikrovlnného pozadí se zabývá skupina vědců z *Imperial College* v Londýně. Srážka našeho vesmíru s jiným vesmírem by se měla projevit jako kruhová struktura v reliktním záření. Hledání těchto struktur znesnadňují teplotní fluktuační reliktního záření. Příklad počítačově simulovaného čistého signálu vesmírné kolize a signálu s přidávanými teplotními fluktuacemi je na doprovodném obrázku.

Pro testování vyhledávacích algoritmů slouží data nasbíraná za sedm let sondou WMAP a za tři roky sondou Planck. Analýza reliktního záření je založena na tzv. *waveletové* transformaci (přesněji *needletové* transformaci, protože mapa oblohy je rozvíjena do funkcí tvaru mexického klobouku definovaných na sféře) mikrovlnné mapy oblohy, poskytující informace o poloze a úhlovém rozměru struktur v reliktním záření. Takto se vybere několik oblastí, které jsou kandidáty na signál z kolize dvou vesmírů. Dalším krokem je použití Cannyho algoritmu pro detekci hran a určení středu kruhové struktury. Případné nalezené struktury mohou být ale pouze výsledkem náhodných teplotních fluktuací. Hodnověrnost hypotézy o nalezení kruhové struktury se odhaduje na základě analýzy

**Waveletová transformace** – nástroj pro analýzu signálů v časově-frekvenční oblasti. Transformace byla představena na počátku 80. let 20. století Morletem, který ji použil pro vyhodnocení seismických dat. Waveletová transformace provádí rozklad funkce (signálu) do tzv. waveletů – funkcí impulsního charakteru.

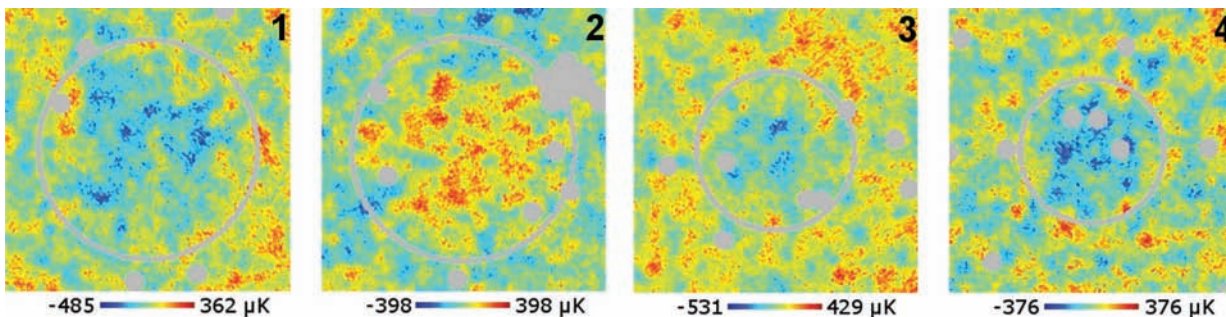
**Cannyho algoritmus** – numerický algoritmus na detekci hran v dvojrozměrném diskretním obraze.

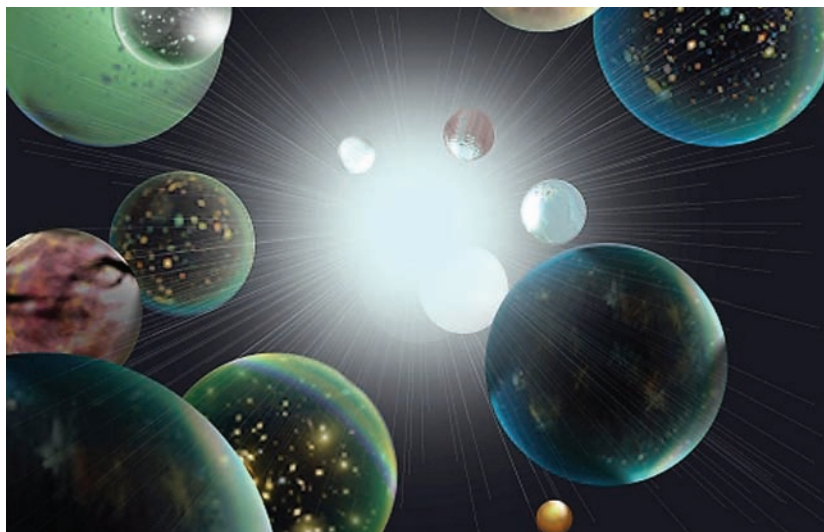
**Kosmické struny** – hypotetické lineární gravitační objekty, které by měly vznikat v raných fázích vesmíru jako topologické defekty při narušení symetrie.

**Magnetický monopol** – neexistující analogie elektrického náboje v magnetickém poli. Dodnes není zcela jasné, proč se magnetické monopóly v přírodě nevyskytují.

**Fraktál** – donekonečna se opakující struktura na různých prostorových úrovních. Dimenze fraktální struktury je vždy větší než topologická dimenze a může být neceločíselná.

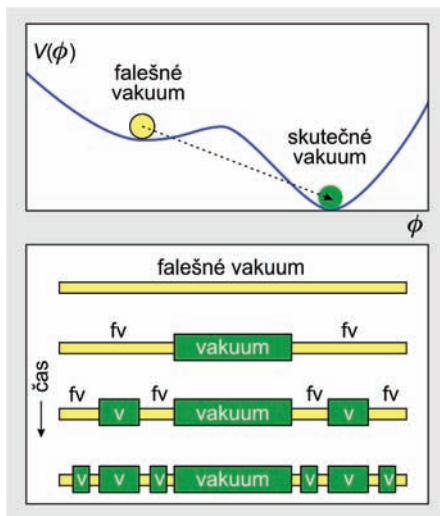
Detailní pohled na struktury v reliktním záření, které mohou být „otiskem“ srážek našeho vesmíru s jinými vesmíry. Poloha těchto oblastí na obloze je znázorněna na předcházejícím obrázku. Zdroj: S. Feenay.





Umělecká vize mnoha vesmírů. Zdroj: YouTube.

Jeden z možných tvarů potenciální energie inflatonového pole. Při rozpadu falešného vakua vzniká mnoho expandujících vesmírů. Zdroj: Alan Guth.



simulovaných dat obsahující užitečný signál se známými parametry. V datech se sondy WMAP zatím byly identifikovány čtyři kruhové struktury, které by mohly být kandidáty na pozůstatky po kolizích našeho vesmíru s jinými vesmíry. V blízké budoucnosti se počítá s použitím těchto algoritmů na data ze sondy Planck, která poskytla zatím nejpřesnější mapu reliktního záření. Bez ohledu na to, zda Planck potvrdí či vyvrátí hypotézu o kruhových strukturách, skutečnost, že můžeme experimentálně prokázat existenci jiného vesmíru, ukazuje, jak důležitou roli hraje reliktní záření pro moderní kosmologii.

■ Miroslav Havránek,  
16. 9. 2011, AB 35/2011

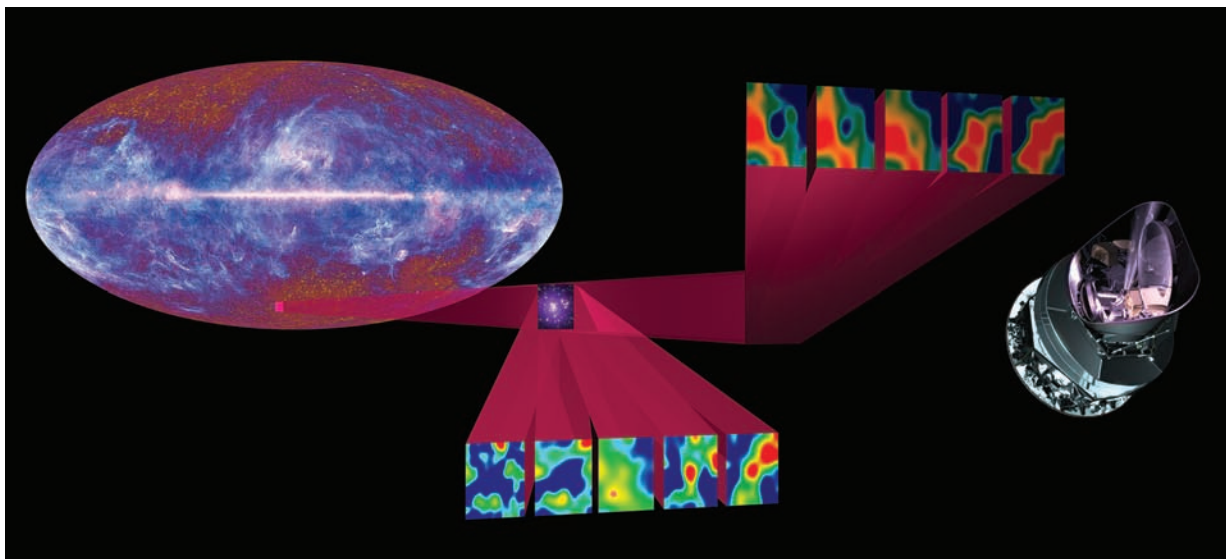


## Hledání vzdálených kup pomocí SZ jevu

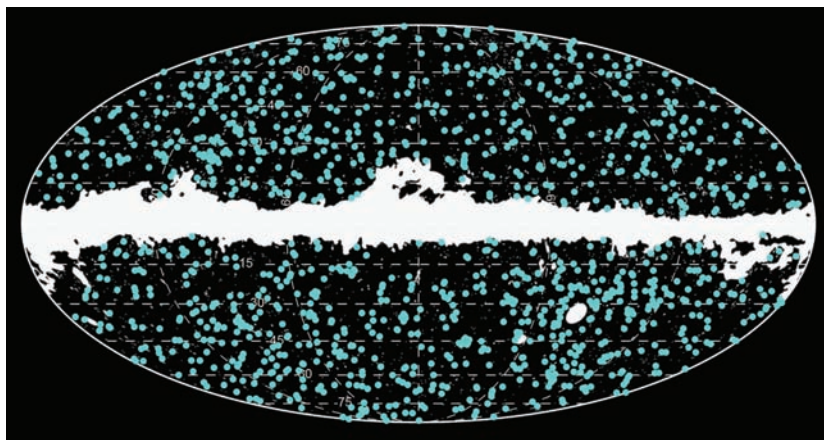
Světelným obzorem viditelného vesmíru je reliktní záření kosmického pozadí, které je od nás pozorovatelné ve všech směrech. Proti tomuto obzoru (někdy se nazývá sféra posledního rozptylu) se promítají veškeré bližší struktury, kterými je vesmír vyplněn a které můžeme prostřednictvím elektromagnetického záření pozorovat. Záření kosmického pozadí musí být nutně na cestě k nám těmito strukturami ovlivněno. U blízkých objektů, u nichž rozeznáme jednotlivé galaxie nebo dokonce hvězdy, může být reliktní záření světlem blízké struktury překryto. Chceme-li pak zkoumat blízký objekt, nic se neděje, protože ten přeci přímo vidíme. Chceme-li ale v takovém místě pozorovat strukturu reliktního záření, je potřeba světlo blízkých objektů z napozorovaného obrazu odečíst. Ne všude je ale výhled do vesmírných dálav zakryt nějakým blízkým a pak se může stát, že kombinace reliktního záření a světla ze vzdálené galaktické kupy splývá. Velkorozměrová struktura je tak daleko, že z ní vidíme jen záření horkého mezagalaktického plynu a žádné jiné podrobnosti zde neumíme rozlišit.

**Sunajevův-Zeldovičův jev** – výsledek vzájemného ovlivnění vysoce energetických elektronů s fotony reliktního záření prostřednictvím inverzního Comptonova rozptylu. Nízkoenergetické mikrovlnné fotony reliktního záření získávají energii při průletu horkým mezagalaktickým plynem v kupě a tuto změnu lze rozpoznat ve spektru.

Princip Sunajevova-Zeldovičova jevu. Reliktní mikrovlnné záření nepatrně zvýší svou teplotu při průchodu vzdálenou kupou galaxií, která obsahuje plyn s horkými elektrony. Na obrázku jsou dvě sady mikrovlnného signálu na frekvencích 100, 143, 217, 353 a 545 GHz. Horní sada představuje nezpracovaná data včetně signálu z prachu v naší Galaxii a z dalších zdrojů. V dolní sadě jsou odečteny parazitní signály. Zůstalo jen reliktní záření ovlivněné SZ jevem. Zdroj: ESA.

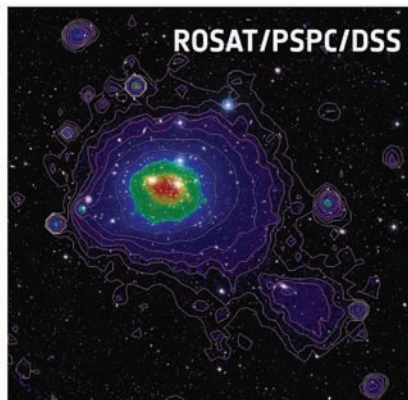
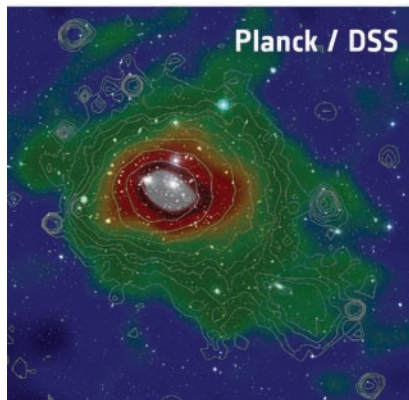






Mapa 1227 Sunjajevových-Zeldovičových objektů nalezených sondou Planck. Jde o kandidáty na extrémně vzdálené kupy galaxií. Bílou barvou jsou maskována Magellanova mračna a rovina Mléčné dráhy. V těchto směrech nebylo možné SZ jev pozorovat. Zdroj: ESA.

Testování metody na známé Kupě ve Vlasech Bereniky. Na levém obrázku je podezřelá teplejší skvrna v reliktním záření, čáry představují místa konstantní intenzity. Na pravém snímku je tatáž oblast vyfotografovaná rentgenovou observatoří ROSAT. Koincidence záření horkých elektronů (napravo) a teplejší skvrny v reliktním záření (nalevo) je zjevná. Na pozadí jsou členy kupy z digitální přehlídky oblohy DSS. Zdroj: ESA.



## Sunjajevův-Zeldovičův jev

Fotony reliktního záření se od prvopočátečního plazmatu uvolnily na konci Velkého třesku. V té době se formovaly atomární obaly, plazma se stalo neutrálním plynem a ve vesmíru zmizely volné elektrony, na kterých se v průběhu Velkého třesku rozptylovaly fotony.

Fotony reliktního záření putují vesmírem a postupně chladnou. Někdy se ale na své cestě mohou potkat s horkým prostředím nějaké kupy galaxií a interagovat s hor-

kými elektrony, jejichž energie je několik kiloelektronvoltů. Energie samotných fotonů je přitom jen několik desetin milielektronvoltů. Při takové interakci dojde k inverznímu Comptonovu rozptylu fotonů na elektronech a k jejich ohřevu. Na mapě reliktního záření se ve směru kupy objeví oblast s nepatrně vyšší teplotou. Jev poprvé předpověděli v roce 1972 Rašid Sunjajev a Jakov Zeldovič z Moskevského institutu aplikované matematiky.

Jev, který je po nich obou pojmenován (často jeho název zkracujeme na jednoduché SZ jev), se stal v moderní kosmologii základním nástrojem mapování na největších vzdálenostech. Prozatím předpokládáme, že se zde nacházejí obdobné struktury jako v bližším kosmu, kde ještě

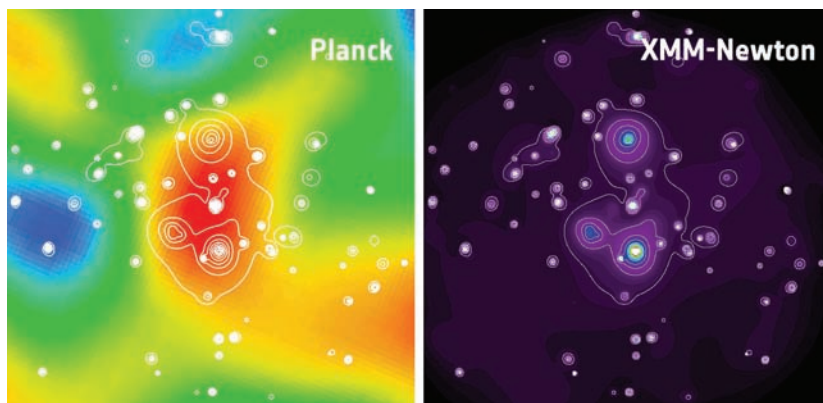
rozeznáme jednotlivé galaxie. Tyto útvary by snad mohly být podobně velké, jde ale o struktury tak vzdálené, že je dnes zatím neumíme rozlišit nijak jinak, než jen podle toho, jak ovlivňují všesměrové reliktní záření. Jde vlastně o běžně známou zkušenost: čím je něco dál, tím menší se to zdá a tím méně podrobností na tom můžeme vidět. Existuje pak ale určitá mez, za níž už velmi obtížně rozlišujeme základní charakteristiky pozorovaného objektu.



## Hledání kup

Sunjajevův-Zeldovičův jev lze využít k vyhledávání velmi vzdálených kup galaxií. Najdeme-li v reliktním záření charakteristickou oblast s nepatrně zvýšenou teplotou, je možné, že jde o důsledek průchodu fotonů horkým prostředím kupy. Jak to ale nezávisle ověřit? Samotné horké elektrony v kupě září v rentgenovém oboru. Pokud doplníme mikrovlnné pozorování reliktního záření pozorováním v rentgenovém oboru a nalezneme strukturu stejného tvaru, je vyhráno. V rentgenovém oboru září horké elektrony kupy a v mikrovlnném oboru fotony reliktního záření, které se o tyto elektrony ohřály. Metoda byla nejprve úspěšně vyzkoušena na známé kupě galaxií ve Vlasech Bereniky a teprve poté aplikována na objevování nových kup galaxií.

Dne 15. září 2010 byla touto metodou objevena první nová nadkupa galaxií složená ze tří kup. V lednu 2011, kdy byl zveřejněn první balíček výsledků ze sondy Planck, bylo již známo 189 SZ objektů (ohřátých skvrn v reliktním záření), 169 z nich korespondovalo se známými kupami galaxií, 20 objektů byly nově objevené kupy galaxií. V druhém balíčku výsledků z března 2013 bylo publikováno již 1227 objektů. Není bez zajímavosti, že z charakteru skvrny je dokonce možné zjistit, zda se ohřála od tepelného pohybu elektronů nebo od jejich uspořádaného proudění. Vědci tak dostali k dispozici zcela nový a účinný nástroj k objevování těch nejvzdálenějších kup galaxií, a tím k mapování struktur velmi raného vesmíru.



*Snímek první galaktické nadkupy objevené observatoří Planck pomocí SZ jevu. Levý snímek je mikrovlnný (Planck), pravý rentgenový (XMM-Newton). Izofoty kopírují koncentraci horkého plynu. Nadkupu tvoří tři kupy. Úhlová vzdálenost mezi horní kupou a spodními dvěma je 7,5'. Rentgenová emise odpovídá energii v rozmezí 300 až 2 000 eV, což na teplotní stupnici značí hodnoty 3,5 až 23 milionů K. Strana snímku je velká 15'. Zdroj: ESA.*

■ Petr Kulhánek, Ivan Havlíček,  
AB 36/2010, AB 43/2012,  
aktualizováno

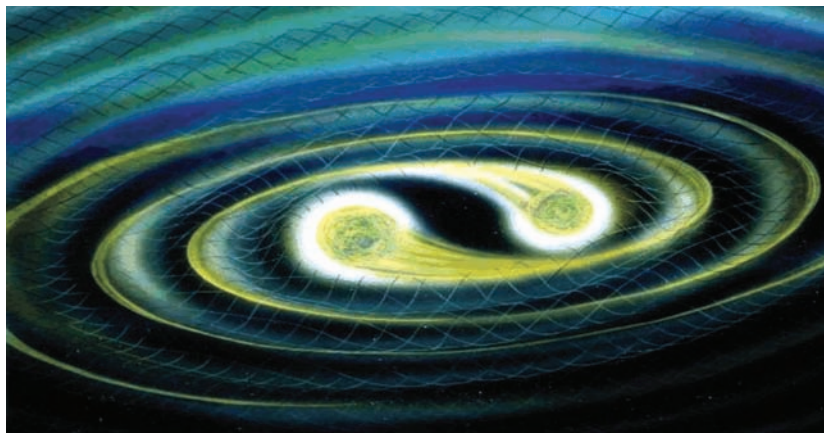
**Comptonův rozptyl – rozptyl fotonů (zpravidla rentgenového nebo gama záření) na volných elektronech. Při tomto rozptylu se snižuje energie fotonů. Na horkých elektronech v prostředí kup galaxií probíhá inverzní Comptonův rozptyl, při kterém chladné fotony reliktního záření naopak získávají energii. K inverznímu Comptonovu rozptylu také dochází v akrečních discích černých děr, kde se viditelné světlo mění až na rentgenové nebo gama fotony.**

## Byly objeveny reliktní gravitační vlny?

**Lenseův-Thirringův jev** – strhávání lokálního souřadnicového systému rotujícím tělesem (anglicky *frame dragging*). Jev si lze představit jako strhávání viskózní kapaliny v blízkosti rotujícího tělesa. Jev odvodili z rovnic obecné relativity Joseph Lense a Hans Thirring v roce 1918. V okolí Země byl pozorován družicemi LAGEOS 1 a 2 v 90. letech 20. století.

**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.

Umělecká představa gravitačních vln vznikajících kolem těsné dvojhvězdy. Jde o zobrazení čtyřrozměrného časoprostoru na dvourozměrnou plochu, takzvaný diagram „vnoření“. Zobrazené souřadnicové čáry prezentují prostor i čas. Zdroj: LIGO.



Když Albert Einstein publikoval v roce 1916 obecnou relativitu, novou a revoluční teorii gravitace, nemohl tušit, jaké důsledky jeho teorie bude mít. Experimentální důkazy o správnosti koncepce pokriveného času a prostoru v blízkosti hmotných těles přicházely jeden za druhým. Museli jsme se smířit s existencí natolik extravagantních objektů, jako jsou gravitační čůčky nebo černé díry a s jevy, které jsou na hranici naší představivosti – se strháváním časoprostoru rotujícím tělesem či gravitačními vlnami – záhyby v předivu času a prostoru, šířícími se hlubinami vesmíru rychlostí světla. V březnu 2014 byl publikován další významný objev. V reliktním záření pocházejícím z konce Velkého třesku (z období 400 000 roků) byl pravděpodobně nalezen otisk reliktních gravitačních vln z období zlomků sekundy ( $10^{-35}$  s) po vzniku světa. Pohádka, která se před našimi zraky stává skutečností. Začíná se snad naplňovat dávná touha člověka po poznání a pochopení vzniku vesmíru, počátku veškerého času a prostoru, a počátku světa, ve kterém žijeme?

### Gravitační vlny

Pokud vhodíte do vody kámen, budou se od místa dopadu šířit na vodní hladině kruhové vlny. Na nich se budou pohupovat listy i další nečistoty plující na hladině. Gravitační vlny si můžete představit podobně. Jde o pravidelné záhyby v čase a v prostoru, na nichž se pohupuje vše, s čím se setkají. Je zde ale mnoho rozdílů. Na rybníku se vlny šíří vodou, u gravitačních vln jde o rozvlnění samotného časoprostoru. Také rychlost je odlišná. Vlny na vodě se pohybují pomalu a jejich rychlost je dána tíží a elastickými vlastnostmi kapaliny. Gravitační vlny se podle obecné relativity šíří rychlostí světla, což

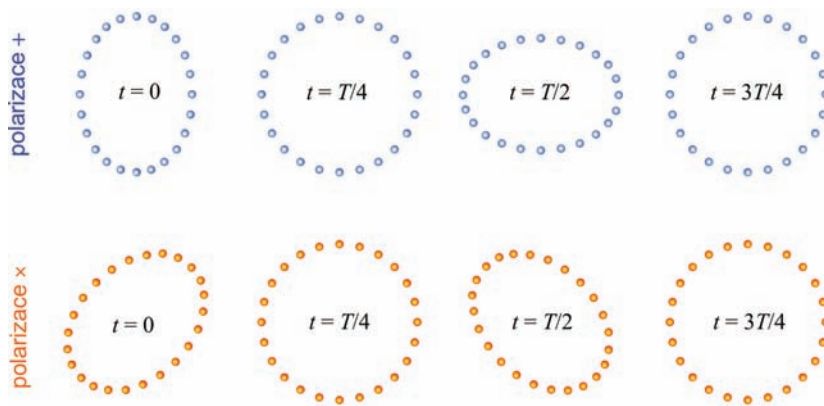
je nejvyšší možná rychlost šíření informace. Dalším rozdílem je způsob vzniku. Do rybníka můžete vhodit kulatý kámen a vlny se nepochybně vytvoří. Gravitační vlny ale nevzniknou za pomoci sféricky symetrického tělesa, ani kdyby rotovalo. K vytvoření gravitačních vln nepostačí dokonce ani dipólová nesymetrie (například elipsoid rotující podél hlavní osy), která je dostatečná ke genuzi elektromagnetických vln. Pro vytvoření gravitačních vln musí mít rozložení hmoty tzv. kvadrupólovou nesymetrii – tj. nesymetrii ve dvou nezávislých směrech. Nejjednodušším příkladem jsou dvě hvězdy obíhající kolem společného těžiště.

Elektromagnetické vlny mohou mít dvě různé, navzájem kolmé polarizace. Tím se rozumí, že elektrické pole může nezávisle kmitat ve dvou navzájem kolmých rovinách. Gravitační vlny také mohou mít dvě nezávislé polarizace, ale jejich roviny jsou skloněné pod úhlem  $45^\circ$ . To je pro gravitační vlny typické, a pokud si představíme kroužek hmotných bodů, přes který se prožene gravitační vlna, budou jeho body reagovat na tyto polarizace různě. Dobře je to patrné z doprovodného obrázku. První z polarizací označujeme znakem  $+$ , druhou  $\times$ .

Snaha o přímou detekci gravitačních vln zatím nepřinesla žádné výsledky. První pokusy konal Joseph Weber v 60. letech 20. století za pomoci rezonančních válců. Dnešní měření probíhají interferometricky. Obří interferometry mají dvě kolmá ramena, na jejichž koncích jsou zavěšena odrazná zrcadla. Jejich poloha se sleduje laserovými paprsky pocházejícími z jednoho zdroje. Oba paprsky se po odrazu ze zrcadel setkají v interferometru a z posuvu proužků se vyhodnocuje vzájemný pohyb zrcadel. Nejdelší ramena má systém LIGO ve Spojených státech (4 km), v Itálii je jen o málo menší interferometr VIRGO (3 km). Žádný signál ale zachycen nebyl, tato zařízení jsou na hranici citlivosti pro přímou detekci gravitačních vln. Oba velké interferometry procházejí rekonstrukcí, která bude u zařízení LIGO dokončena v roce 2014, a u VIRGO v roce 2015. Existují i směle plány na obří

**Polarizace světla** – jde o vlastnost, pomocí níž popisujeme určitou chaotičnost světla. Elektromagnetické záření je příčným vlněním, které lze popsat kmity vektorů  $E$  a  $B$  kolmými na sebe a 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 roviny kmitů elektrického vektoru. Při kruhové polarizaci opisuje konec elektrického vektoru v prostoru kružnici. Příkladem polarizovaného záření je záření odražené od rovinného zrcadla.

Dvě nezávislé polarizace gravitační vlny (označujeme je symboly  $+$  a  $\times$ ). Gravitační vlna přichází ve vodorovném směru. Kresba autor.

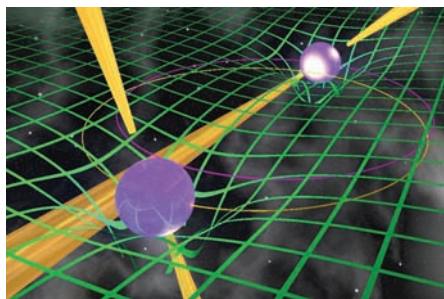


**Statistické zpracování dat** – soubor naměřených hodnot má zpravidla tzv. normální (Gaussovo rozdělení). Hodnoty se kumulují v okolí střední hodnoty  $E(x)$  a jejich rozptyl je charakterizován směrodatnou odchylkou

$$\sigma = [E(x^2) - E(x)^2]^{1/2}.$$

Směrodatná odchylka určuje šířku rozdělení. Data se  $\sigma = 50$  jsou kolem střední hodnoty velmi rozptýlená, naopak data se  $\sigma = 1$  se kolem střední hodnoty vysoce koncentrují. Do vzdálenosti  $1\sigma$  od průměrné hodnoty je 68 % veškerých dat, do vzdálenosti  $3\sigma$  leží přes 99 % všech dat. Pomocí směrodatné odchylky se zapisuje statistická významnost naměřeného výsledku (zda nemohl vzniknout v daném souboru dat jen náhodně). Statistická významnost  $n\sigma$  znamená hodnotu  $2(1-D(n))$ , kde  $D$  je kumulativní distribuční funkce rozdělení.

Podvojný pulzar PSR J0737-3039A je ideální relativistickou laboratoří. Pulzary obletí společně těžiště za 144 minut. Soustava se nachází ve vzdálenosti 2 000 ly v souhvězdí Lodní zádi. Objevena byla radioteleskopem v Jodrell Bank. Pozorována je celá řada relativistických jevů včetně změny oběžné periody způsobené vyzařováním gravitačních vln. Zdroj: University of Manchester.



interferometry ve vesmíru. K největším patřila LISA – trojice sond ve vzájemné vzdálenosti 5 milionů kilometrů. Poloha testovacího tělíska na každé sondě měla být sledována pomocí laserů z ostatních sond. Z ambiciózního plánu NASA a ESA nakonec sešlo. Evropská kosmická agentura ale stále uvažuje o úspornějším uspořádání tzv. Nové gravitační observatoře NGO, kde by vzdálenost mezi sondami měla být „jen“ milion kilometrů. Realizace před rokem 2025 bohužel nepřichází z finančních důvodů v úvahu.

Gravitační vlny byly dosud zachyceny jen nepřímo, a to u podvojně neutronové hvězdy (jeden z členů je pulzarem) PSR 1913+16. Soustava byla objevena radioteleskopem Arecibo v roce 1974. Dvě neutronové hvězdy, které kolem sebe obíhají, ztrácejí energii vyzařováním gravitačních vln. Tím se nepatrně, ale měřitelně, mění perioda oběhu složek. Za průzkum tohoto unikátního systému získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1993 Russel Hulse a Joseph Taylor. Později byly nalezeny podvojně pulzary s ještě lepšími vlastnostmi. Podvojný pulzar PSR J0737-3039A (objevený Lovellovým radioteleskopem v Jodrell Bank v roce 2003) je téměř ideální relativistickou laboratoří k ověřování jevů obecné relativity a samozřejmě i k nepřímé detekci gravitačních vln.

## Inflační model

Standardní kosmologický model je založen na obecné relativitě a na Hubblově pozorování expanze vesmíru z roku 1929. Pokud vesmír expanduje, byl kdysi velmi hustý a horký a nacházel se v plazmatickém skupenství. Toto prvopočáteční období nazýváme Velký třesk. Standardní model dobře popisuje expanzi vesmíru v závěrečných fázích Velkého třesku a po něm. Přináší ale také řadu nevyřešených problémů, z nichž nejvýznamnější jsou následující tři:

**Počáteční singularita.** Pokud jdeme v čase zpátky, z extrapolace vychází, že by vesmír měl mít na počátku nekonečnou teplotu a hustotu, což znamená selhání modelu, kterým vesmír popisujeme.

**Problém plochosti.** Pokud by se vesmír v prvních fázích Velkého třesku jen nepatrně odchyloval od plochého vesmíru, tak by se v průběhu následujících miliard let tato odchylka natolik zvětšila, že by dnes měl vesmír buď výrazně zápornou, nebo výrazně kladnou křivost. Nic takového se ovšem nepozoruje, což znamená, že vesmír buď musel vzniknout téměř přesně s kritickou hustotou (hustotou plochého ves-



míru), a nebo ve vesmíru musely existovat nějaké procesy, které ho plochým učinily.

**Problém horizontu.** Pokud jdeme do minulosti pozorovatelného vesmíru, musel se kdysi skládat z mnoha kauzálně nepojených oblastí, které spolu nemohly komunikovat (světlo nemělo dostatek času dolétnout z jedné části do druhé). Přesto je dnes pozorovatelný vesmír všude přibližně stejný, což znamená, že by měly existovat procesy, které umožnily v minulosti komunikaci jeho jednotlivých částí.

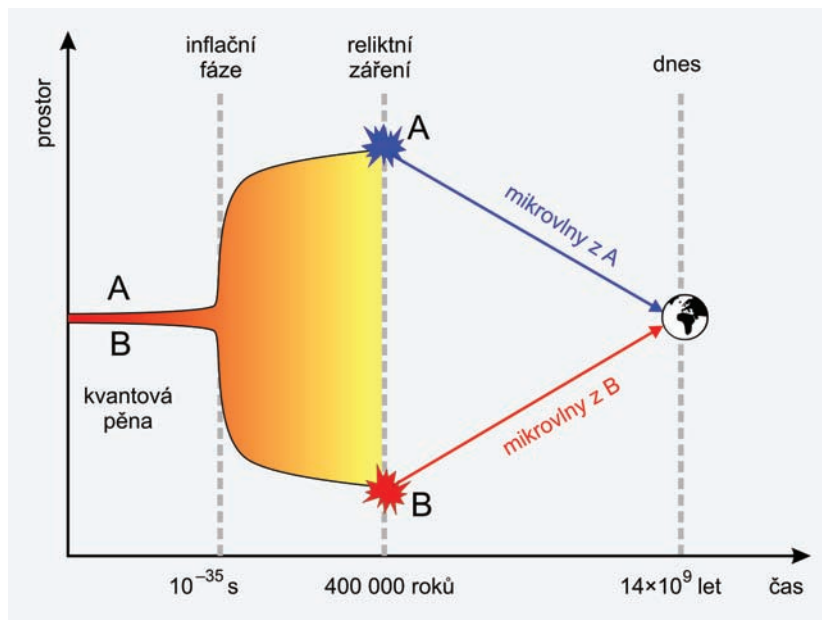
Se zajímavým řešením přišel v roce 1980 americký teoretik Alan Guth. Navrhl, že pokud by v minulosti existovalo velmi krátké období nesmírně prudké expanze (nazýváme ji inflace), mnohé problémy standardního kosmologického modelu by to vyřešilo. V průběhu této fáze by byl vesmír ovládnán především kvantovými procesy a singularita získaná jako limita obecné relativity by nebyla nutná. Vyřešil by se i problém plochosti vesmíru, neboť v průběhu prudké expanze by došlo k lokálnímu vyhlazení vesmíru (pokud nafouknete malou kuličku na obří rozměry, bude se původním obyvatelům jejich svět zdát ploché). A vyřešil by se i problém horizontu, neboť jednotlivé oblasti spolu mohly komunikovat před inflační fází.

Samotný Alan Guth navrhnul první inflační scénář, který předpokládal, že po vzniku vesmíru nebylo vakuum ve stavu s nejnižší možnou energií (tzv. falešné vakuum) a později vesmír do stavu s minimální energií vakua přešel. Takový fázový přechod s sebou nesl právě ono prudké rozepnutí rozměrů, které mohlo vyřešit problémy standardního modelu. Alan Guth pro matematický popis fázového přechodu použil potenciál Higgsova pole s dvěma minimy.

Inflační hypotéza s sebou ale okamžitě přinesla problémy nové. Fázový přechod by nemohl proběhnout v celém vesmíru naráz,

**COBE** – *Cosmic Background Explorer*, družice NASA vypuštěná v roce 1989. Pomocí družice bylo zjištěno, že reliktní záření má teplotu 2,73 K a že jde s vysokou přesností o záření absolutně černého tělesa. V roce 1992 družice objevila fluktuační reliktního záření a jeho anizotropii způsobenou naším vlastním pohybem. Rozlišovací schopnost družice COBE byla 7°.

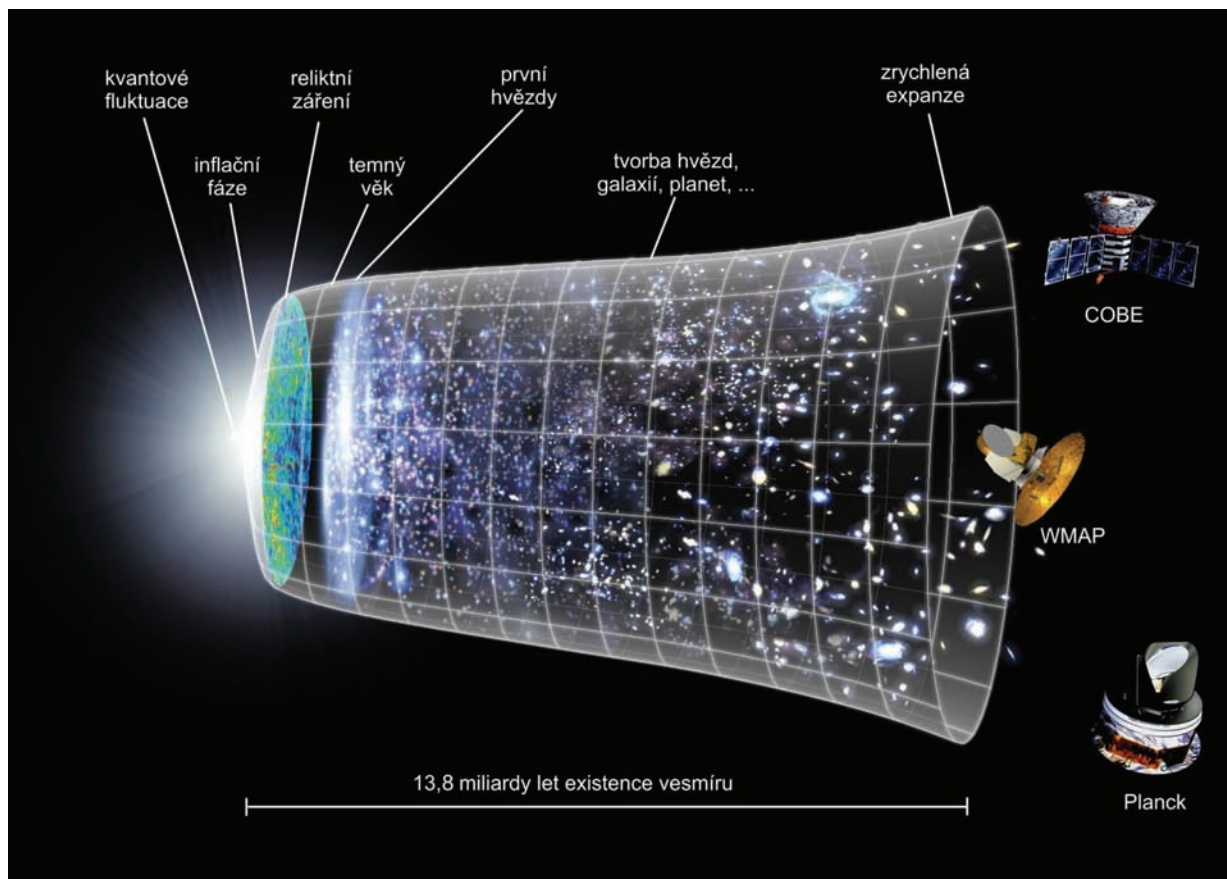
*Inflační fáze řeší nejen problém plochosti, ale i problém horizontu. Dvě velmi vzdálené oblasti A a B, které pozorujeme v různých směrech, by spolu nemohly v minulosti nikdy komunikovat, pokud by neexistovala inflační fáze. Signál z konce Velkého třesku je dnes v mikrovlnném oboru. Kresba autor.*



WMAP – *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, sonda z roku 2001, která pořídila podrobnou mapu fluktuační reliktního záření s úhlovým rozlišením kolem  $15'$  a citlivostí  $20 \mu\text{K}$ . Zrcadlo sondy mělo rozměry  $1,4 \times 1,6 \text{ m}$  a teplota chlazené části byla nižší než  $95 \text{ K}$ . Data sondy jsou důležitým zdrojem informací o raných fázích vývoje vesmíru, většinou se

Jednotlivé fáze vývoje vesmíru. Z hlediska našeho příběhu jsou nejdůležitější inflace a období vzniku reliktního záření. Zdroj: NASA/ESA.

a tak by se v něm tvořily oddělené oblasti nové fáze, jakési bubliny dceřiných vesmírů. Inflační hypotéza procházela řadou úprav až do dnešní podoby, jejímiž otci jsou především americký teoretik ruského původu Andrej Linde (\*1948) a americký teoretik Paul Steinhardt (\*1952). Inflační fáze je dnes vkládána do období  $10^{-35} \text{ s}$ , kdy se od prvotní prairinterakce podle našich představ oddělovala silná interakce. Právě to mělo podle nového inflačního scénáře za následek prudký fázový přechod, kdy se kvantové fluktuační pocházející z prvotní kvantové pěny zvětšily v průběhu  $10^{-37} \text{ s}$  na makroskopické rozměry. Doba trvání inflace i její časové zařazení se model od modelu liší, stejně tak



jako přítomná pole ovlivňující inflaci i tvar jejich potenciální energie. Odhaduje se, že v průběhu inflace došlo k nafouknutí vesmíru faktorem  $10^{30}$  až  $10^{50}$ . Při tak prudkém ději, jakým je inflace, by mělo dojít k rozvlnění časoprostorového předěva a měly by vzniknout tzv. *primordiální* neboli *reliktní gravitační vlny*, jejichž amplituda je úměrná druhé mocnině energie uvolněné při inflaci. Dosud ve prospěch inflační hypotézy hovořila jedině plochost a homogenita vesmíru, reliktní gravitační vlny jsou ovšem další experimentální výzvou.

## Reliktní záření

Velký třesk končí v období 400 000 let po vzniku vesmíru. Počáteční žhavé plazma se mění na neutrální plyn, do tehdy volné elektrony se stávají součástí atomárních obalů. Elektromagnetické záření, které bylo vázáno na látku, se uvolňuje. Neutrální plyn je pro něj průhledný. Jak už jsme se zmínili dříve, toto záření dnes nazýváme reliktní mikrovlnné záření pozadí. Tehdy šlo o světelné záření. V průběhu 14 miliard let, kdy záření letělo vesmírem do našich přístrojů, se jeho vlnová délka díky expanzi vesmíru prodloužila na přibližně 1 mm, takže ho dnes pozorujeme v oblasti mikrovln. Proto se reliktnímu záření někdy říká mikrovlnné záření pozadí. Je to nejvzdálenější zachytitelný elektromagnetický signál. Období Velkého třesku je neprůhledné a pro nás elektromagneticky nepozorovatelné. O období uvolnění reliktního záření někdy také hovoříme jako o sféře posledního rozptylu. Reliktní záření je nejcennějším zdrojem informací o raném vesmíru.

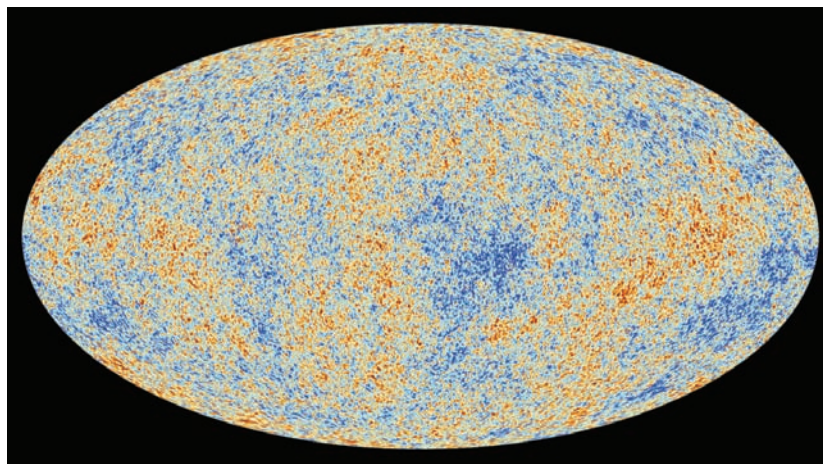
Existenci reliktního záření předpověděli George Gamow, Ralph Alpher a Robert Herman v roce 1948. Záření bylo objeveno v roce 1965 Arno Penziasem a Robertem Wilsonem pomocí antény Bellových telefonních laboratoří. K jeho následujícímu výzkumu nejvíce přispěly družice COBE (1989) a sondy WMAP (2001) a Planck (2009).

K největším objevům družice COBE patřila detekce fluktuací

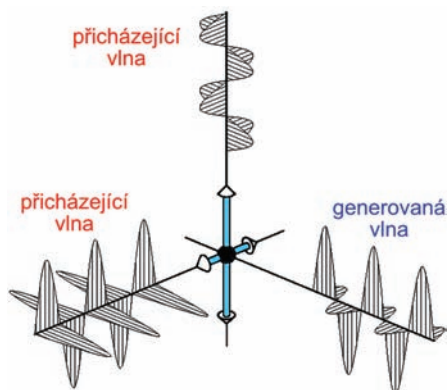
*kombinují s daty z pozemských zařízení jako je CBI a ACBAR a s daty z novější sondy Planck. Sonda byla umístěna do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, kde pracovala do 28. října 2010.*

**Planck** – mikrovlnná observatoř evropské kosmické agentury ESA, která byla vynesena do vesmíru 14. května 2009. Byla určena k výzkumu fluktuací reliktního záření a monitorování vesmíru v mikrovlnné oblasti. Měla úhlovou rozlišovací schopnost 5' a teplotní citlivost 2  $\mu$ K. Oblohu snímkovala v devíti frekvenčních pásmech od 30 do 857 GHz (0,2 až 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 říjnu 2013.

*Mapa teplotních fluktuací reliktního záření pořízená evropskou sondou Planck. Teplota záření je 2,73 K, teplejší a chladnější oblasti se v teplotě liší až na pátém desetinném místě. Zdroj: ESA/Planck.*







Thomsonův rozptyl. Pokud k elektronu přicházejí ze dvou směrů vlny různých frekvencí, je výsledkem rozptylu polarizovaná vlna. Zdroj: BICEP2.

Alan Guth, zakladatel inflační hypotézy.



reliktního záření v roce 1992. Drobné flíčky v signálu znamenají nehomogenity v tehdejší látce a jsou obrazem makroskopických zárodků, z nichž později vznikaly galaxie a kupy galaxií. Družice COBE měla bohužel úhlové rozlišení pouze  $7^\circ$ , což neumožnilo provedení frekvenční analýzy fluktuací (nalezení poměrného zastoupení jednotlivých úhlových rozměrů ve fluktuacích). To se povedlo až sondě WMAP, která měla úhlové rozlišení  $15'$ . Z polohy jednotlivých maxim pak bylo možné poprvé stanovit přesně stáří vesmíru, dobu trvání Velkého třesku a procentuální zastoupení jednotlivých složek ve vesmíru. Výsledky byly zveřejněny na slavnostní tiskové konferenci, která se konala dne 11. února 2003.

Nejpřesnějším přístrojem doposud sledujícím celooblohově reliktní záření byla evropská sonda Planck z roku 2009. Měla teplotní rozlišení  $2 \mu\text{K}$  (desetkrát lepší než WMAP) a úhlové rozlišení  $5'$  (tříkrát lepší než WMAP). Sonda Planck provedla celkem 4 kompletní přehlídky oblohy v mikrovlnné oblasti na devíti vlnových délkách (od  $0,2 \text{ mm}$  do  $10 \text{ mm}$ ). Signál z radiometrů (antének v ohnisku) byl rozdělen do dvou kolmých směrů a veden ke zpracování dvěma vlnovody, což umožnilo měření polarizace reliktního záření. Dosud byla provedena frekvenční analýza z prvních dvou přehlídek. Výsledky ze všech čtyř pořizovaných přehlídek včetně měření polarizace reliktního záření se očekávají v druhé polovině roku 2014.

## Polarizace reliktního záření

K polarizaci reliktního záření mohlo dojít už v době jeho vzniku. Před koncem Velkého třesku byly ve vesmíru poslední volné elektrony, které intenzivně interagovaly s elektromagnetickým zářením. Každá přicházející elektromagnetická vlna způsobila rozkmitání elektronu. Ten převzal energii vlny a sám začal zářit. Tomuto procesu říkáme *Thomsonův rozptyl*. Pokud k elektronu z nějakých důvodů ze dvou různých směrů dorazily vlny různých frekvencí, rozkmital se elektron současně ve dvou směrech a sám začal vyzařovat polarizovanou vlnu. Reliktní záření má tedy nenulovou polarizaci způsobenou tím, že k posledním elektronům přicházely z různých oblastí elektromagnetické vlny různých frekvencí. K tomu mohlo dojít například různou teplotou zárodečného plazmatu nebo přítomností gravitačních vln, které v některé oblasti elektromagnetické záření stlačily a v jiné zředily. Obecně dělíme poruchy, které vedou na polarizaci reliktního záření do tří skupin:



**Skalární poruchy.** Fotony přicházejí z oblastí různé hustoty a teploty plazmatu, kterým je vyplněn vesmír na konci Velkého třesku.

**Vektorové poruchy.** Přicházející fotony jsou ovlivněny topologickými defekty a kosmickými strunami (lineárními gravitačními objekty, které by měly vznikat v raných fázích vesmíru).

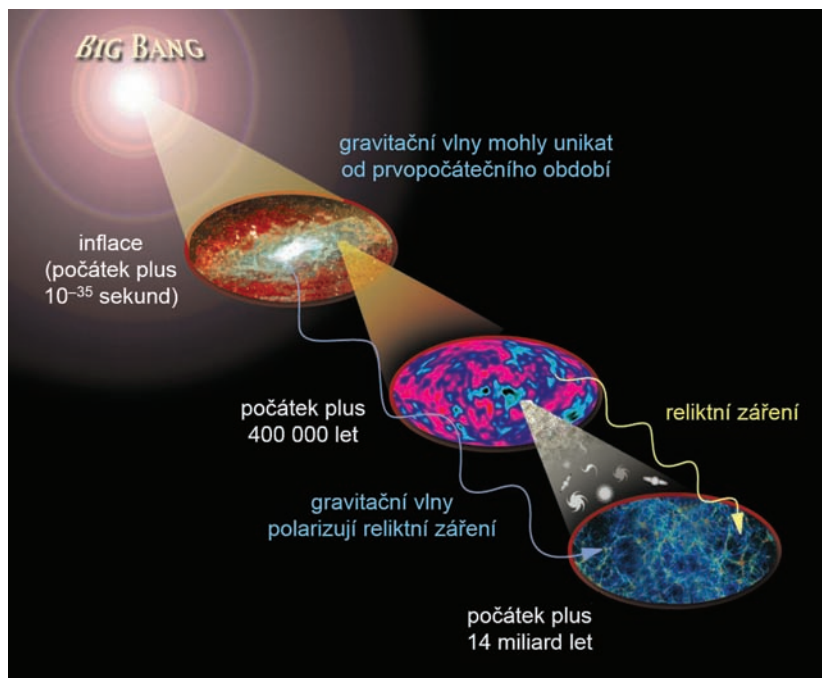
**Tenzorové poruchy.** Přicházející fotony mají změněnou frekvenci průchodem přes gravitační vlny, které by měly vznikat v průběhu inflační fáze (prudké expanze).

Skalárních poruch bylo na konci Velkého třesku značné množství, o čemž svědčí fluktuace objevené v reliktním záření. Vektorové poruchy by podle teorie měly být relativně rychle utlumeny. Tenzorové

poruchy souvisí se stlačováním elektromagnetických vln gravitačními vlnami. Obrázec polarizace by měl být v daném směru oblohy zhruba stejný, oblasti shodné polarizace by měly tvořit významné úhlové obrazce, neboť zdroje anizotropií jsou dostatečně úhlově veliké.

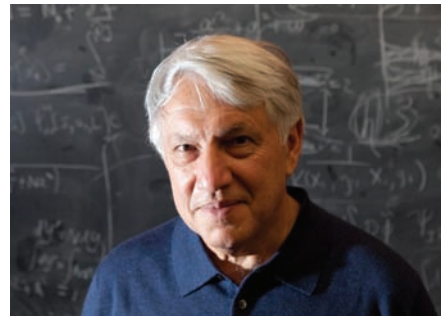
Lze ale nějak odlišit polarizaci reliktního záření způsobenou skalárními a tenzorovými poruchami? Odpověď je kladná. Nejprve je třeba provést rozklad polarizačního obrazce na tzv. E a B módy. E mód je ta část polarizace, která nemá preferovanou točivost (tzv. gradientní pole) a B mód je ta část polarizace, která má nenulovou točivost (kladně či záporně orientovanou). Názvy obou módů jsou převzaty ze statických elektrických a magnetických polí, která mají podobné vlastnosti. Typické směry polarizace E a B módu v okolí minima a maxima intenzity poruchy jsou ukázány na obrázku na další straně.

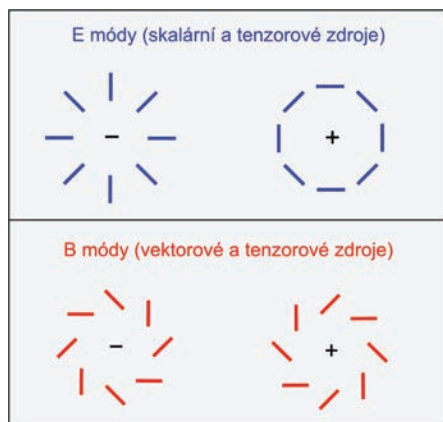
Zdrojem E módu jsou výhradně skalární a tenzorové fluktuace. Proto nelze v E módu oddělit signál z hustotních fluktuací od signálu pocházejícího z gravitačních vln. Zdrojem B módu jsou vektorové



Vznikající reliktní záření mohlo být polarizováno reliktními gravitačními vlnami. Zdroj: BNU.

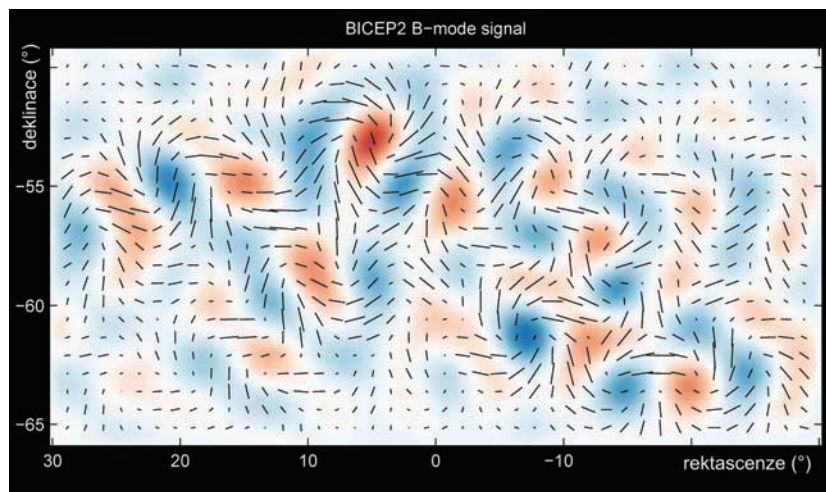
Andrej Linde, autor modelu chaotické inflace.





Typické směry rovin polarizace pro E a B módy v okolí minima a maxima poruchy. E mód nemá žádný preferovaný směr otáčení kolem středu poruchy. B mód může být levotočivý a pravotočivý. Kresba autor.

Nenulový signál B módu by mohl znamenat nepřímou detekci reliktních gravitačních vln a potvrzení inflační hypotézy. Zdroj: SPT/BICEP2.



a tenzorové fluktuače. Přítomnost B polarizačního módu v reliktním záření tak znamená buď přítomnost gravitačních vln, nebo topologických defektů. A oboje je fyzikálně mimořádně zajímavé. Signál z vektorových fluktuačí by měl být ale velmi silně tlumen a nepřepokládá se, že by byl nalezen.

O měření polarizace reliktního záření se pokouší celá řada přístrojů. Vždy je to v místech, kde nevadí vodní páry, tj. ve vesmíru, vysoko v horách, na gondolách balónů nebo na jižním pólu, kde je vzhledem k extrémně nízkým teplotám relativně sucho. Pozemské přístroje mají zpravidla lepší parametry než sondy, ale nemohou provádět celoblohová měření.

První zmínka o detekci B módu byla publikována dne 17. března 2014. O senzaci se postaral přístroj BICEP2 (*Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization*, jde o druhou verzi přístroje) hledající B mód několik set metrů od jižního pólu. Samotný přístroj má aperturu 26 cm a je chlazen kapalným heliem na teplotu 4 K. Kolem přístroje je osmimetrová mísa stínící zařízení od pozemských signálů. Bolometrické pole má celkem 512 senzorů, které měří polarizaci reliktního záření na frekvencích 90 GHz a 150 GHz (zveřejněné výsledky byly na frekvenci 150 GHz). Přístroj denně chrlí 4 GB dat. Po třech letech sledování reliktního záření jsou autoři experimentu přesvědčeni, že našli B mód souvisící s otiskem reliktních gravitačních vln. Statistická významnost nenulovosti B módu vychází přes  $5\sigma$ . Současně byl odhadnut poměr tenzorových a skalárních zdrojů polarizace 0,2 se statistickou významností  $3\sigma$ . To znamená, že nulovost tenzorové složky byla vyloučena se statistickou významností  $7\sigma$ . Jeden z členů týmu (Clem Pryke) to komentoval slovy: „Hledali jsme jehlu v kupce sena a našli páčidlo.“

### Naděje a pochyby

Po zveřejnění výsledků se objevily první pochybnosti. Podezřelá je zejména nečekaně velká intenzita

signálu. Některé konkurenční skupiny navrhují, že by obdobný signál mohl být způsoben „popředím“, tedy prachovými zrny v naší Galaxii, která obsahují železo a mají magnetické vlastnosti. Taková zrna mohou také způsobit polarizační B mód, ale jen na jedné frekvenci souvisící s rotací zrn. Proto bude třeba ohlášený objev nezávisle potvrdit i na jiných frekvencích, než měřil BICEP2. Vynikající jsou pro tento účel měření polarizace ze sondy Planck (ta měřila v devíti frekvenčních pásmech). Data ale nejsou bohužel ještě v době psaní této knihy zpracována. Další nezávislá měření mohou být provede-

na v Atacamské poušti Atacamským kosmickým dalekohledem ACT o průměru 6 metrů a radioteleskopickou sítí ALMA.

Pokud bude objev nezávisle potvrzen, otevírá se další pomyslné okno do vesmíru. Okno reliktních gravitačních vln, které posouvají možnosti sledování vesmíru mnohem blíže jeho počátku, než tomu bylo doposud. Poprvé můžeme nahlédnout do samotné kuchyně Velkého třesku, a už neplatí, že pozorování procesů v průběhu Velkého třesku je našimi přístroji nemožné. Uzavírá se jedna kapitola kosmologie a otevírá zcela nová, jejíž výsledky mohou předčít všechny dosa-  
 vadní fantazie o vzniku světa.

■ Petr Kulhánek, 28. 3. 2014, AB 13/2014



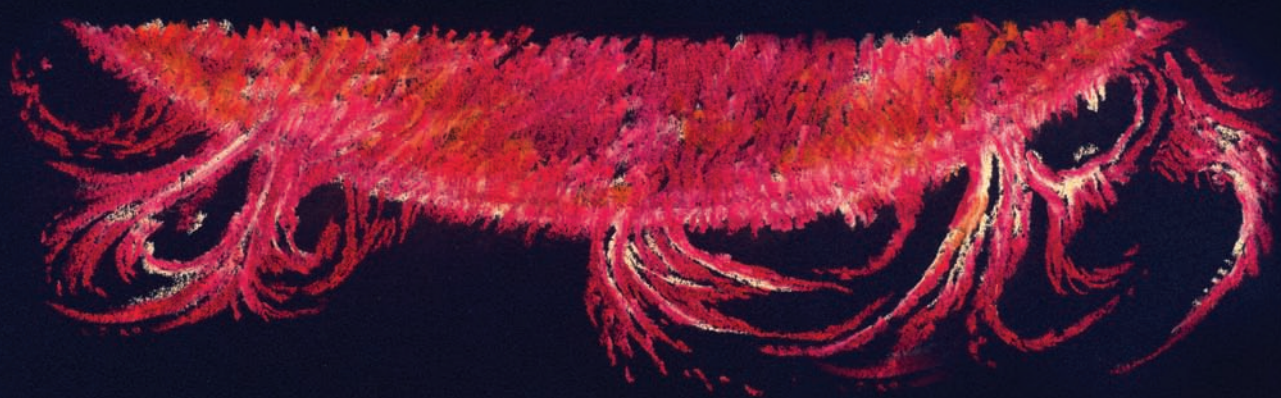
*Pohled na horní část přístroje BICEP2 (v popředí) v době západu Slunce. Hlavní zařízení je v budově pod stínicí mísou. Zdroj: SPT/BICEP2.*

*Přístroj BICEP2 na jižním pólu, který možná potvrdil inflační hypotézu a nepřímo objevil reliktní gravitační vlny. Vlevo vzadu se tyčí desetimetrový radioteleskop SPT. Zdroj: SPT/BICEP2.*

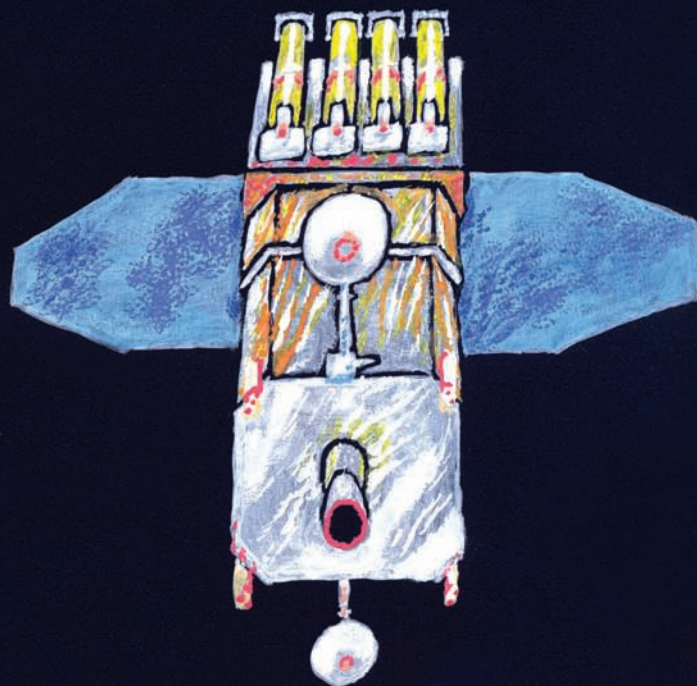








## IV. PŘÍSTROJE A SONDY



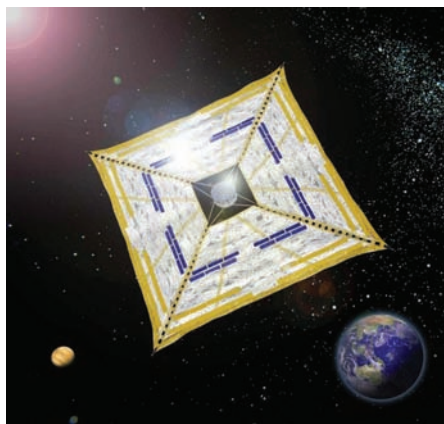
## IKAROS – Japonci už plachtí

**Sluneční záření** – elektromagnetické záření širokého spektra, od dlouhovlnného rádiového záření až po rentgenové, které vyzařuje Slunce. U Země tok energie slunečního záření činí přibližně  $1,4 \text{ kW/m}^2$ .

**Tlak elektromagnetického záření** – tlak, který vyvolává dopadající elektromagnetické záření. V případě, že se záření na povrchu tělesa pohlcuje, změna hybnosti tělesa po dopadu jednoho fotonu je rovna hybnosti tohoto fotonu. Pokud se foton odrazí, je změna hybnosti dvojnásobná. Tlak slunečního záření je roven jedné třetině hustoty jeho energie.

**Sluneční plachetnice** – kosmická loď, která ke svému pohonu využívá tlaku elektromagnetického záření Slunce. Po řadě nezdarů bylo první takové plavidlo (plachetnice IKAROS) otestováno japonskou kosmickou agenturou JAXA v polovině roku 2010.

Umělecká vize experimentální plachetnice IKAROS. Úhlopříčný rozměr plachty je 20 metrů a sonda je k plachtě připevněna lanky. Žluté obdélníčky na okraji plachty jsou LCD odražeče, modré obdélníčky ve středu plachty jsou sluneční panely. Zdroj: JAXA.



V roce 1865 Jules Verne ve svém románu *Ze Země na Měsíc* při popisu projektilu, který měl být vystřelen až na Měsíc, o něm napsal: „...nikdy nepřekročí rychlost 29 700 mil za hodinu... Není zřejmé, že tato rychlost bude jednou překonána ještě vyššími rychlostmi, které dosáhneme spíš pomocí světla nebo elektriny než mechaniky?“ Verne tak prokázal svůj obdivuhodný přehled nad nejnovějšími poznatky vědy. James Clerk Maxwell totiž nedlouho před tím objevil tlak elektromagnetického záření. Tento tlak je ve většině případů jen velmi slabý. Když máme ale zdroj, který výkonně září po dlouhou dobu, můžeme postavit zařízení, které tento tlak využije, podobně jako námořní plachetnice využívají vítr. Takovým zdrojem je bezesporu naše Slunce.

### Historie slunečního plachtění

Ačkoli prvními úvahami o slunečním plachtění se zabýval už Konstantin Ciolkovskij, sluneční plachetnice se dostaly do podvědomí mnoha lidí až se známou povídkou Arthura C. Clarka z roku 1964 *„The Lady Who Sailed The Soul“*, která popisovala závod slunečních jachtařů od Země k Měsíci. V té době už ale existovaly první vědecké studie pohonu na sluneční záření a jak američtí, tak sovětské raketové inženýři o této možnosti věděli. Nicméně priority výzkumů na obou stranách železné opony byly tehdy trochu jiné.

V době nejhlubší fáze studené války, kdy prezident Ronald Reagan častoval Sovětský Svaz nálepkou „Říše zla“, se v Moskvě sešli zástupci americké soukromé Planetární společnosti Carl Sagan a Louis Friedman s ruským plazmovým fyzikem a šéfem Ústavu kosmického výzkumu Roaldem Sagdějevem, aby si domluvili spolupráci mezi vědci obou táborů založenou spíše na osobních než státních vztazích. Tady jim Sagdějev představil pozdější klíčovou postavu slunečního plachtění, Vjačeslava Linkina. Friedman s Linkinem začali postupně úzce spolupracovat na několika projektech, včetně vozítka Marsochodu. Na přelomu tisíciletí se obě strany pustily do nového projektu, na který si „velká věda“ stále ještě nenašla čas – sluneční plachetnice.

### Fyzika slunečního plachtění

Celý princip slunečního plachtění je založen na jednoduchém principu akce a reakce. Sluneční fotony dopadající na fólii se odrážejí a předá-



vají tak plachetnici energii a hybnost. Odrážející se fotony díky zákonu zachování hybnosti předávají dvojnásobek svého původního momentu hybnosti. Největší výhodou plachetnice tak je, že nepotřebuje žádné palivo.

Je nutno zdůraznit, že sluneční plachetnici nepohání sluneční vítr! Ten tvoří částice, kterých je na účinný pohon plachetnice příliš málo. I když část zrychlení lze připsat i slunečnímu větru, jeho podíl je více než stonásobně menší než podíl slunečního světelného záření.

Sluneční plachetnice, která odstartovala ze Země, přebírá oběžný pohyb Země kolem Slunce. Při manévrování se sluneční plachetnici nelze uskutečnit přímý let k cíli. Na to je tlak slunečního záření příliš malý. Využívá se toho, že plachetnice vykonává oběžný pohyb kolem Slunce a vhodným natočením plachty se tento pohyb zbrzdí nebo urychlí, a tím se plachetnice přemístí na vzdálenější nebo bližší orbitu. Proto může být plachetnice použita i pro mise, které se mají vrátit zpátky na Zemi.

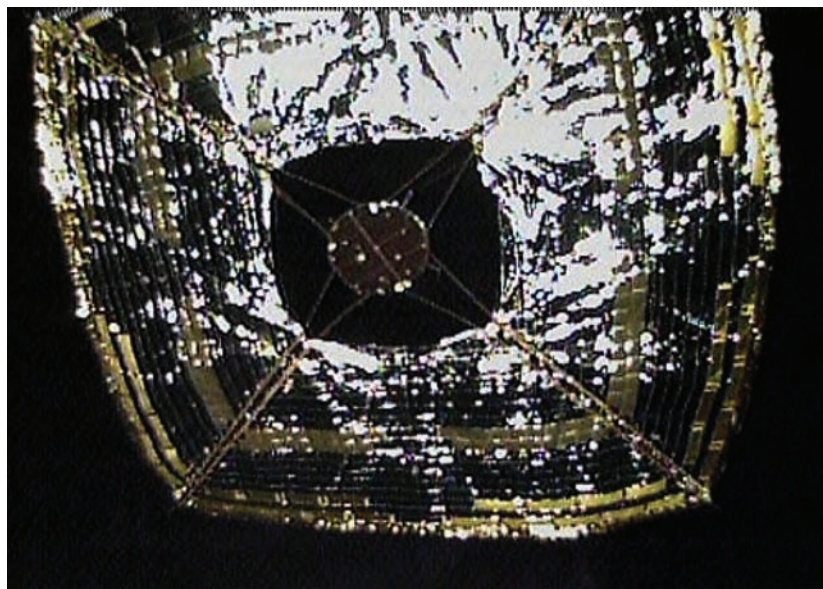
I když je zrychlení plachetnice velmi malé, trvá dlouhou dobu, a tak je možné dosáhnout velmi vysokých rychlostí. Pokud by plachty měly plochu  $600 \text{ m}^2$ , činilo by zrychlení  $0,0005 \text{ m/s}^2$ . Za jeden den by se tak rychlost plachetnice zvýšila o  $160 \text{ km/h}$ , za sto dní by dosáhla rychlosti  $16\,000 \text{ km/h}$  a za tři roky  $170\,000 \text{ km/h}$ . Při této rychlosti by dorazila k Plutu za pět let. Pro porovnání, mise New Horizons s využitím chemického motoru a gravitace Jupiteru stejného cíle dosáhne za devět let. Tato rychlost je ale stále jen  $0,16 \%$  rychlosti světla.

Bohužel, jakmile se plachetnice dostane za oběžnou dráhu Jupiteru, sluneční záření je pro plachtění slabé. Na plachty dále od Slunce můžeme ale zaměřit vysoce výkonné lasery a pohánět tak plachetnici zářením, které se vzdáleností prakticky neslábne. V budoucnosti by nám takovýto laserový pohon mohl

**JAXA** – Japan Aerospace eXploration Agency, japonská kosmická agentura, která vznikla v roce 2003 sloučením tří institucí: ISAS (Institute of Space and Astronautical Science), NAL (National Aerospace Laboratory of Japan) a NASDA (National Space Development Agency of Japan). Ke svým letům agentura využívá kosmodrom USC (Uchinoura Space Center). V současnosti používá JAXA nosnou raketu H-IIA. JAXA využívá Tanegašimské kosmické středisko.

**Tanegašimské kosmické středisko** – kosmické středisko japonské kosmické agentury JAXA. Leží na ostrově Tanegašima, 115 km jižně od ostrova Kjúšú.

Unikátní záběr z kamery DCAM2 při testu panelů s tekutými krystaly. Na snímku je vidět, jak je na každé čtvrtině plachty vždy polovina panelů vypnuta (světlejší) a polovina zapnuta (tmavší). Zdroj: JAXA.



**Tekuté krystaly** – hmota na přechodu mezi kapalným a pevným skupenstvím. Ačkoli je tekutá, její molekuly jsou orientovány jako v krystalu, což se projevuje doménami různě otáčejícími a propouštějícími rovinu polarizace světla. Některé takové krystaly lze natáčet pomocí elektrického pole, čehož se využívá hlavně v zobrazovacích jednotkách, například displejích.

**Polyimidy** – polymery z imidových monomerů. Jsou teplotně a chemicky vysoce stabilní s výbornými mechanickými vlastnostmi. Mají charakteristickou žlutou až oranžovou barvu.

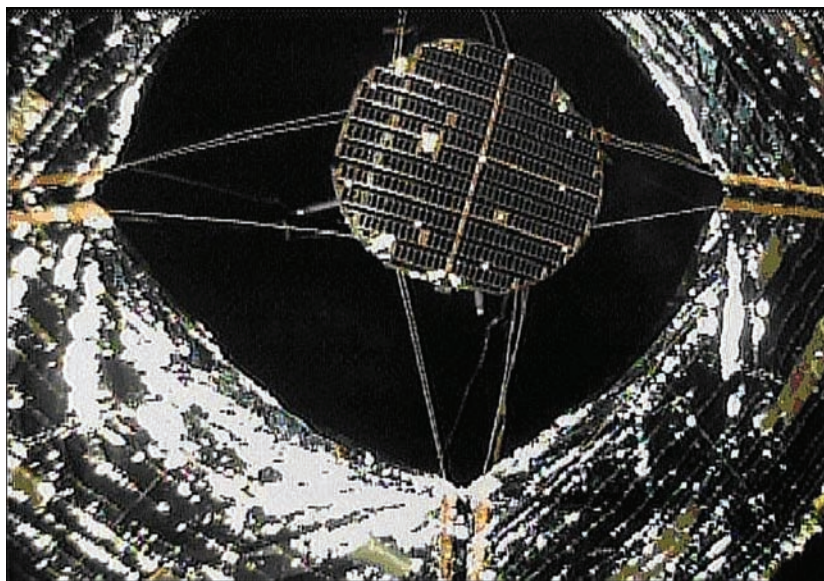
umožnit cestu k jiným hvězdám. Někteří vědci si myslí, že toto bude možné už za několik desetiletí.

## První pokusy

Počátky slunečního plachtění provázal jeden neúspěch za druhým. První plachetnici měla do vesmíru dopravit ruská raketa Volna. Při startu v roce 2001, který uskutečnila v Rusku Planetární společnost založená v roce 1980 Carlem Saganem, selhal třetí stupeň a plachetnice zůstala uzavřená v raketě. Při druhém pokusu v roce 2005 se první stupeň neoddělil od zbytku rakety a palubní počítač let po 160 sekundách ukončil.

Japonská kosmická agentura (anglicky *Japan Aerospace Exploration Agency*, JAXA) mezitím víceméně v tichosti připravovala svůj plachetnicový program. Příprava vyvrcholila 21. května 2010, kdy z Tanegašimského kosmického střediska vzlétla raketa H-IIA, která kromě sondy Akacuki (známé též jako *Venus Climate Orbiter*, VCO) vyslala na cestu k Venuši i experimentální plachetnici IKAROS (akronym pro *Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun*, volně přeloženo Meziplanetární drakolet urychlovaný slunečním zářením).

Další autoportrét plachetnice, na kterém je patrné uchycení sondy. Zdroj: JAXA.



## Drakolet na scéně

V japonské kosmické agentuře JAXA si určili za laťku minimálního úspěchu rozvinutí polyimidové plachty o průměru přibližně 20 metrů. Po uvolnění čtyř půl-kilogramových závaží, která celou plachtu měla vytáhnout ven, následovalo roztočení celé sondy pomocí motoru až na 25 otáček za minutu. Jakmile závaží díky odstředivým silám dosáhla svých konečných poloh, sonda se vrátila zpět k původním otáčkám (pětkrát za minutu). Následně byla uvolněna samotná plachta, která se opět díky odstředivým silám plně rozvinula, přesně podle plánu. Plachta



byla úspěšně rozvinuta 9. června 2010. Tou dobou už sonda byla sedm milionů kilometrů od Země.

Za zcela úspěšnou začali odborníci v kosmické agentuře JAXA misi považovat, když se potvrdilo, že sonda může díky plachtě zrychlovat a přitom je možno ji i řídit. Zrychlení bylo po důkladném měření potvrzeno 9. července 2010. Na sondu díky plachtě působilo sluneční záření silou 1,12 mN. O necelé dva týdny později pak bylo oznámeno, že dne 13. července 2010 bylo úspěšně otestováno i řízení plachetnice. Experimentální „Drakolet“ IKAROS se tak stal prvním zařízením, které v meziplanetárním prostoru zdárně předvedlo sluneční plachtění.

Obecně platí, že plachetnici lze řídit pomocí natáčení plachty vůči Slunci. Sonda tak může zrychlovat i zpomalovat. Natáčení plachet ale obvykle vyžaduje nějaký pohon. Tak tomu je i na sondě IKAROS. Kromě toho ale IKAROS zkouší i úplně netradiční řešení natáčení své plachty. U obvodu je totiž plachta pokryta dvěma řadami panelů s tekutými krystaly, jejichž zapínáním a vypínáním lze ovlivnit, jakým způsobem odrážejí světlo. Zapnutý panel odráží záření podobně jako zrcadlo, takže je jeho účinnost nejvyšší. Naopak vypnutý panel odráží světlo rozptýleně, což účinnost plachty v tomto místě snižuje. Postupným zapínáním a vypínáním těchto panelů lze dosáhnout natáčení plachty. Sonda přitom rotuje v ose kolmé na osu natáčení.

Protože součásti plachty byly také tenké sluneční články o tloušťce pouhých 25  $\mu\text{m}$ , šlo natáčet plachtu a řídit tak celou plachetnici pouze za pomoci slunečního záření. Nebyl k tomu tedy potřeba žádný další zdroj energie.

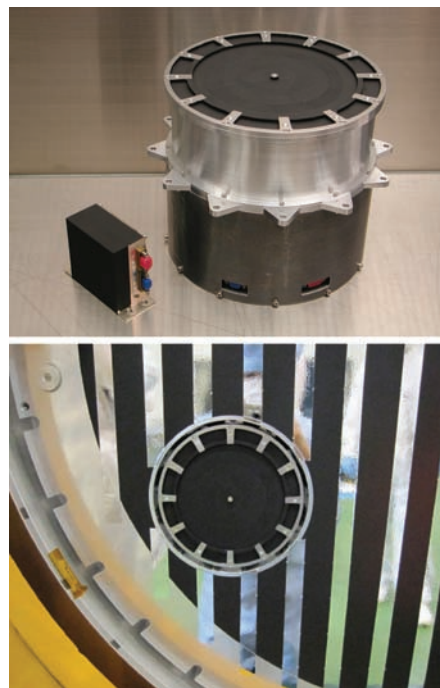
Plachta samotná byla vyrobena z 7,5  $\mu\text{m}$  tenké polyimidové fólie. Úhlopříčka celé plachty měřila asi 20 m. Kromě zmíněných panelů s tekutými krystaly a slunečními články na ní byly také umístěny piezoelektrické čítače prachových částic.

Na sondě samotné byl umístěn detektor GAP (*GAMMA-ray burst Polarized light detector*) polarizovaného světla gama záblesků o hmotnosti 3,8 kg a průměru 17 cm. Detektor byl prvním zařízením schopným měřit polarizaci gama záblesků v rozsahu energií 50 až 300 keV. Detektor svůj první záblesk zaznamenal již 7. července 2010. Bohužel ale přišel ze směru, ve kterém nebylo možno provést jeho analýzu. Mění se rovinu polarizace v průběhu detekce se podařilo podle publikace z roku 2012 prokazatelně nahrát až u gama záblesků GRB 100826A, GRB 110301A a GRB 110721A.

**Piezoelektrický jev** – vznik napětí při deformaci určitých druhů krystalů. Piezoelektrický jev se využívá ke konstrukci různých snímačů vibrací. V domácnosti ho známe z piezoelektrického zapalovače plynu, ve kterém deformace krystalu způsobí přeskocení elektrické jiskry.

**Akacuki** – japonská sonda pro výzkum Venuše, známá také jako Venus Climate Orbiter nebo Planet-C. Odstartovala pomocí nosné rakety H-IIA dne 21. května 2010 z Tanegašimského kosmického střediska. Spolu s ní letěla plachetnice IKAROS.

Detektor GAP polarizovaného světla gama záblesků. Vlevo nahoře je zdroj napájení, dole je umístění na straně sondy mířící od Slunce. Zdroj: JAXA.





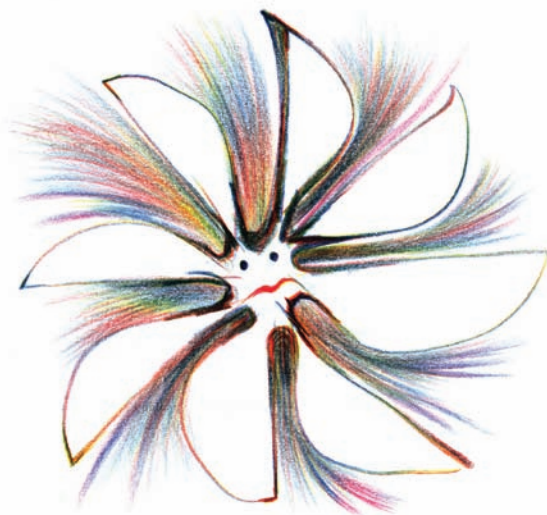
Transport japonské nosné rakety H-IIA na kosmodrom.  
Zdroj: JAXA.

Na sondu samotnou byly také umístěny dva válečky o průměru a výšce přibližně 6 cm, které byly v potřebných chvílích katapultovány pružinou mimo oblast sondy. Obsahovaly miniaturní kamery (DCAM1 a DCAM2), které zdokumentovaly rozvinutí a funkčnost plachty. Nasnímané obrázky byly předávány bezdrátově zpět sondě, která je odvyšlala na Zemi. Válečky se k sondě nevrátily a staly se tak miniaturními oběžnicemi Slunce. I v tomto případě jde o unikát. Nikdy předtím nebyla žádná sonda z vnějšku podobně snímkována.

IKAROS proletěl dne 8. prosince 2010 kolem Venuše, a splnil tak základní cíl mise. Další osud plachetnice nebyl agenturou JAXA nijak komentován.

Se slunečními plachetnicemi má japonská kosmická agentura JAXA velké plány. Koncem druhého desetiletí 21. století chce za pomoci plachty o průměru až 50 m zkoumat Jupiter a Trojany. Na této misi by ale chtěla plachetnici doplnit iontovým motorem poháněným energií ze slunečních článků umístěných na plachtě.

■ Jiří Hofman, 26. 11. 2010, AB 43/2010, aktualizováno



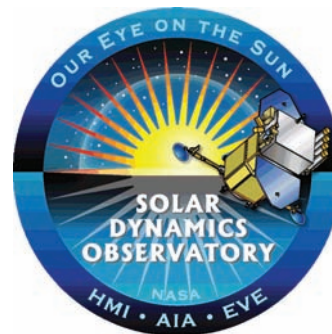
## SDO – nejcitlivější vesmírná observatoř pro výzkum Slunce

Od 11. února 2010 létá nad našimi hlavami nová sluneční observatoř americké NASA s názvem SDO (*Solar Dynamics Observatory*). První pořízené snímky a videa astronomům doslova vyrazily dech. Každému je jasné, že jde o stroj nové generace, který posune sluneční fyziku značně kupředu. Srdcem observatoře je čtveřice stejných dalekohledů o průměru 20 cm s velkým množstvím filtrů. Současně se tak pořizuje obraz ve čtyřech různých vlnových délkách od hranice měkkého rentgenového



záření až po vizuální obor. Některé vlnové délky jsou zcela nové, nepozorovaly v nich předchozí observatoře SOHO ani TRACE. Nová observatoř je dvakrát citlivější než dvojice sond STEREO a čtyřikrát citlivější než SOHO. Jsou zde i další rozdíly. Observatoř SOHO je schopna pořídit jeden snímek za 12 minut, STEREO za 3 minuty a SDO za pouhých 10 sekund. Observatoř SDO létá na geosynchronní dráze se sklonem  $28,5^\circ$  k rovině rovníku, což zajišťuje téměř trvalou viditelnost družice z pozemské stanice *White Sands*, která data z SDO přijímá nepřetržitě. Odpadá tak nahrávání pořizovaných dat na pomocné médium a na Zemi vidíme Slunce doslova v přímém přenosu. Dosud žádný přístroj nebyl schopen chrlit snímky s takovou frekvencí. Těsně po sobě jdoucí záběry umožňují vytvářet videosekvence časového vývoje nejružnějších útvarů při povrchu Slunce se zcela mimořádným rozlišením. Můžeme sledovat vývoj protuberancí, erupcí, koronálních výronů látky i dalších rychlých dějů. Tok dat je obrovský – 130 megabitů za každou sekundu, což činí 1,4 terabajtů dat denně. Rozlišení

Umělecká vize observatoře SDO. V horní části je patrná čtveřice dalekohledů. Zdroj: NASA.

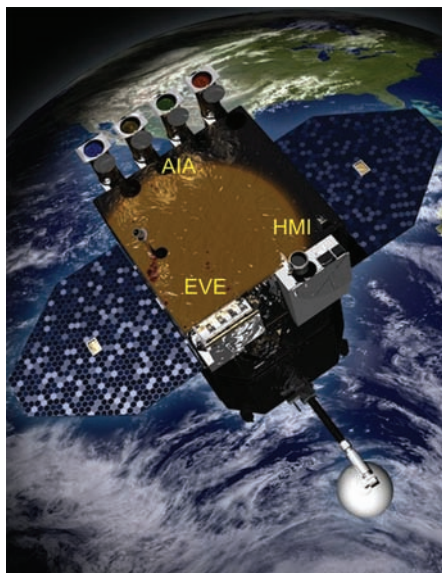




**Geosynchronní dráha** – dráha, na které je perioda oběhu družice kolem Země (vzhledem ke hvězdám) stejná jako rotační perioda Země. Družice se pro pozorovatele na určitém místě zeměkoule bude vracet na stejné místo na obloze vždy ve stejný čas (odsud pochází název geosynchronní). Její dráha na obloze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

**HD televize** – High Definition TV neboli standard HDTV s rozlišením 1920×1080 pixelů.

Pohled na přední část observatoře s přístroji AIA, HMI a EVE. Zdroj: NASA.



jednotlivých snímků je desetkrát vyšší než u HD televize. Na webových stránkách projektu se za každý rok činnosti objeví dvouminutové video s názvem „To nejlepší z SDO“. Shlednutí těchto videí rozhodně stojí za to. Sebelepší fotografie nenahradí sugestivní záběry proudícího plazmatu, rostoucí a zanikající skupiny slunečních skvrn, vystřikující koronální výrony hmoty, erupce nebo měnící se koronální díry. Při pohledu na tato videa si člověk uvědomí, že Slunce je dynamický a neustále se měnící organizmus.

## Parametry observatoře a přístroje

Základním dalekohledem observatoře je přístroj AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*). Jde o čtveřici dalekohledů, z nichž každý má průměr 20 cm. Optický systém je *Ritchey-Chrétien* s ohniskovou vzdáleností 4,125 metru. Takový systém má v primárním zrcadle otvor, kterým procházejí paprsky odražené od sekundárního zrcadla do ohniska. Obě zrcadla mají hyperbolický tvar, což odstraňuje řadu optických vad. V ohnisku je CCD matice o rozměrech 4096×4096 pixelů, každý pixel má velikost pouhých 12 mikrometrů a rozlišení 0,6". Zorné pole dalekohledu je 41'. Přečtení dat z CCD matice trvá 2,5 sekundy. K dispozici je deset filtrů s vlnovými délkami: 9,4 nm (Fe XVIII); 13,1 nm (Fe VIII/XX); 17,1 nm (Fe IX); 19,3 nm (Fe XII/XXIV); 21,1 nm (Fe XIV); 30,4 nm (He II); 33,5 nm (Fe XVI); 155 nm (C IV); 160 nm (kontinuum) a 450 nm (bílé světlo). U tří dalekohledů jsou k dispozici dva různé filtry, u jednoho čtyři filtry.

Druhým přístrojem je helioseismometr a magnetometr HMI (*Helioseismic and Magnetic Imager*). Přístroj zkoumá podpovrchové vrstvy pomocí plazmových vln přicházejících ze Slunce a zobrazuje povrchová magnetická pole. Hlavním úkolem je výzkum slunečního dynama, které je zdrojem magnetického pole Slunce. Přístroj je obdobou detektoru MDI (*Michelson-Doppler Interferometer*) na observatoři SOHO. Snímkování probíhá v okolí spektrální čáry Fe I s vlnovou délkou 617,3 nm a vyhodnocuje se Dopplerův posuv této čáry. Obdobně jako pozorujeme uvnitř Země odrazy seismických vln od různých rozhraní, lze přístrojem HMI pozorovat například rozhraní zářivé a konvektivní zóny. Pořízené magnetogramy fotosféry zobrazují černou a bílou barvou různé polarity magnetického pole.

Posledním přístrojem je EVE (*EUV Variability Experiment*). Jeho základní úlohou je monitorování fluktuací extrémního ultrafialového

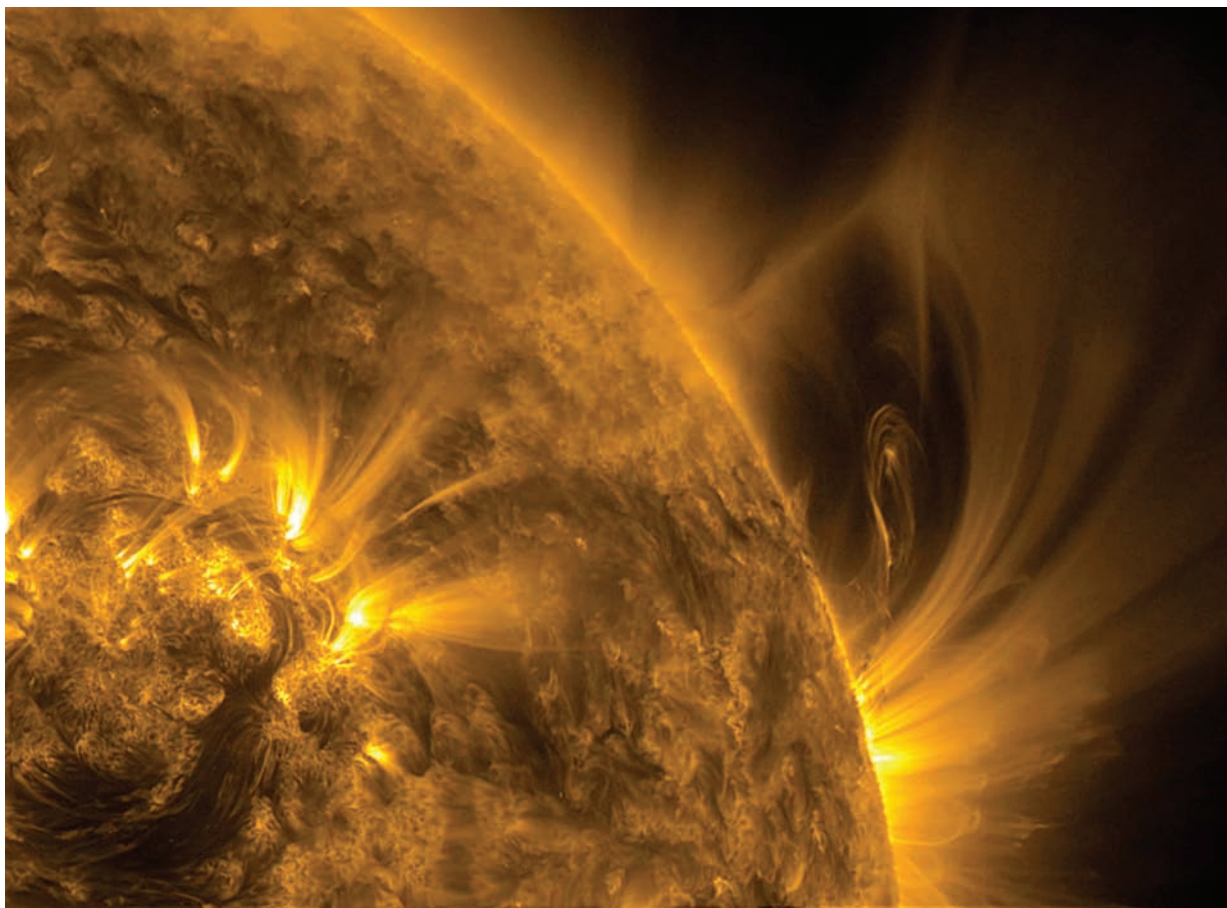


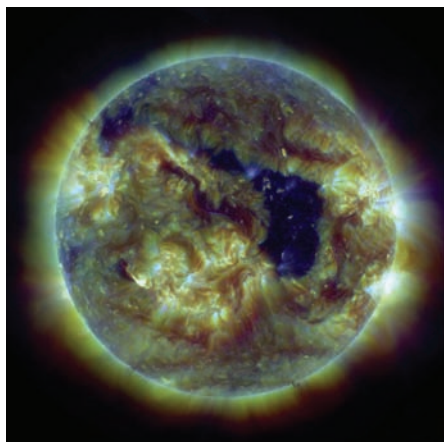
záření dopadajícího ze Slunce na Zemi. Právě tato část záření nejvíce ovlivňuje horní vrstvy atmosféry, zahřívá je, ionizuje atomy a disociuje molekuly.

## Činnost SDO

Již první snímky Slunce z SDO nám odkryly fascinující svět pohybujícího se slunečního plazmatu a jeho propojení s magnetickým polem. Při přepojování magnetických siločar dochází k uvolnění energie, zahřátí plazmatu a rychlým změnám tvaru a vyzařování jednotlivých útvarů.

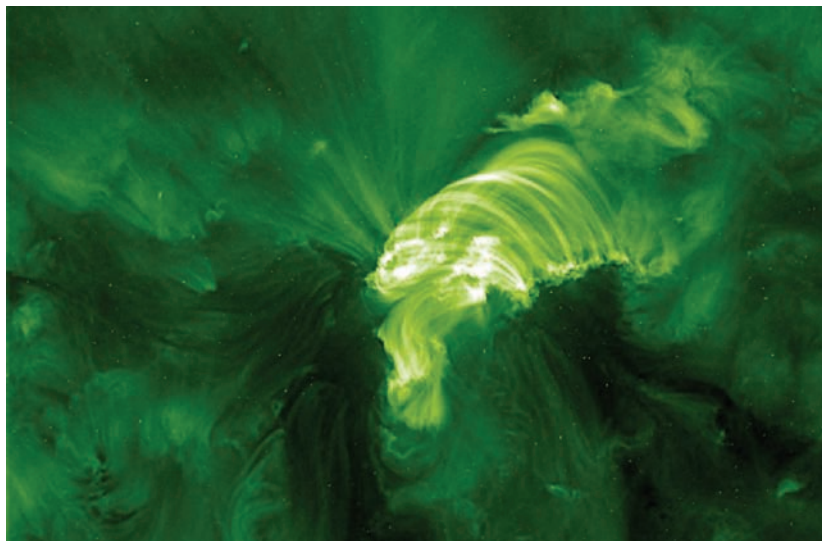
*Magnetické síly vytáhly a zkroutily oblak plazmatu které nakonec opustilo Slunce. Snímek byl pořízen v extrémním ultrafialovém oboru. Celá událost trvala přes pět hodin. Zdroj: SDO/NASA, 26. března 2014.*





Koronální díra, kterou proudí rychlý sluneční vítr. Pozorována byla tři dny. Zdroj: SDO/NASA, 28. května 2013.

Na snímku je patrný detail tmavých plazmových vláken, jejichž délka se odhaduje na 60 průměrů Země, a světlých oblastí plazmatu proudícího podél magnetických siločar. Zdroj: NASA/SDO, 18. května 2010.



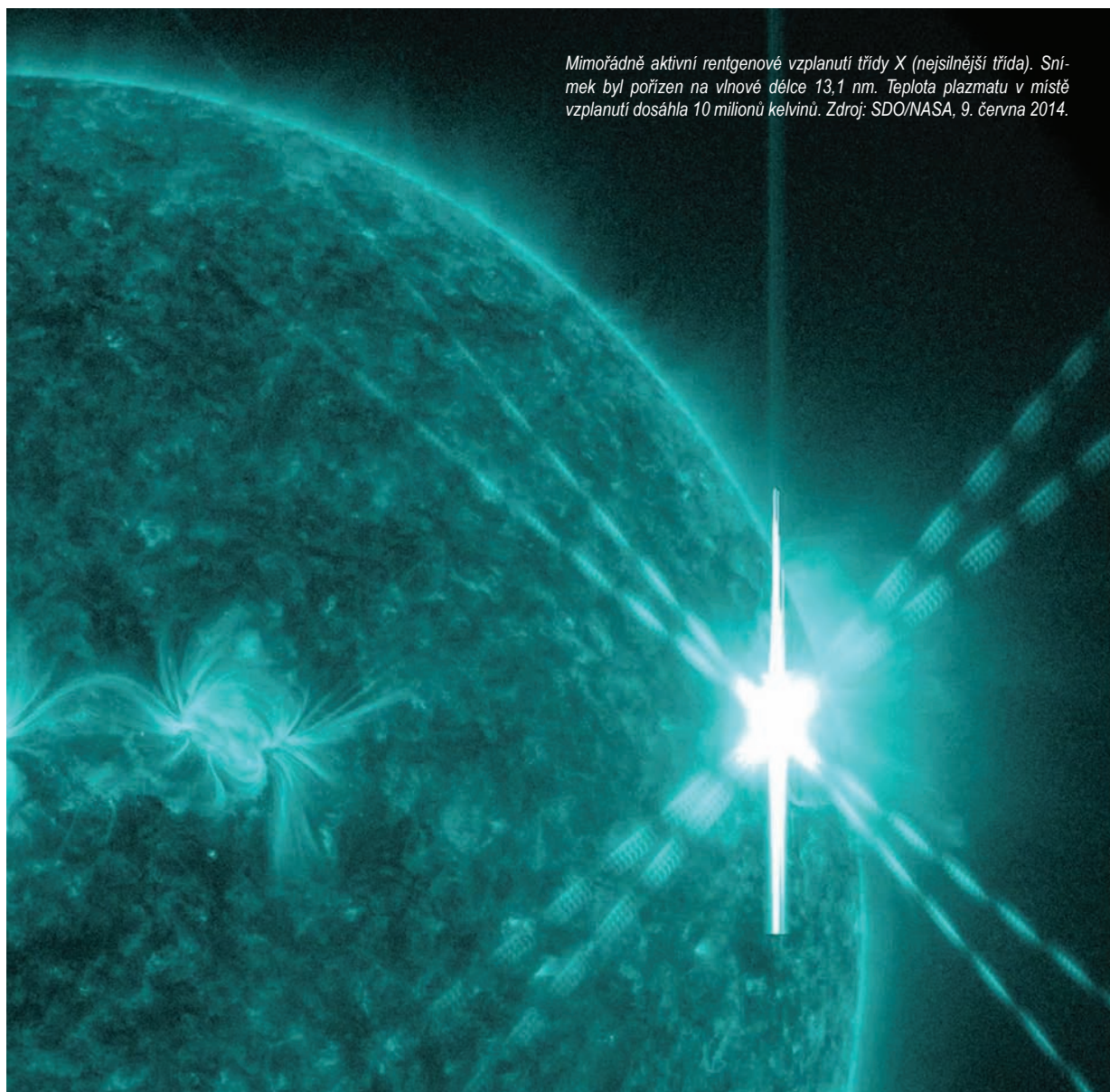
Za čtyři roky zaznamenala observatoř SDO přes 2 000 událostí na povrchu Slunce. Jde o různé erupce, vzplanutí, protuberance, výrony koronální hmoty atd. Observatoř pořizuje strhující snímky sluneční látky divoce se zmitající ve sluneční atmosféře. Můžeme si prohlížet rentgenová vzplanutí, spojování a růst aktivních oblastí i další zajímavé jevy. Sledování útvarů v různých vlnových délkách umožňuje monitorovat oblasti s různou teplotou plazmatu.

Observatoř SDO snímkuje celé Slunce, a proto je možné spatřit, jak jsou magneticky provázány i velmi vzdálené oblasti sluneční látky. Elektrony kroužící kolem siločar magnetického pole září v ultrafialovém oboru. Ultrafialové snímky proto umožňují studium topologie magnetických siločar včetně jejich rozvlnění Alfvénovými vlnami. Alfvénovy vlny se projevují jako vlající zprohýbané siločary magnetického pole podobné trávě vlnící se ve větru. Právě tyto vlny odnášejí energii z podpovrchových vrstev Slunce a zahřívají sluneční koronu na několik milionů stupňů Celsia.

Přístroj EVE, který je určený pro sledování fluktuací ultrafialového záření Slunce, detekuje u šestiny z pozorovaných erupcí dosvit v ultrafialové oblasti, o jehož existenci se dosud nevědělo. K analýze pořízených magnetogramů byla vyvinuta zcela nová technika jejich zpracování, která umožňuje vytvořit vektorový magnetogram (nese informaci nejenom o polaritě polí, ale i o jejich směru). Ukázalo se, že v době vzniku erupce se v okolí vířících skvrn prudce mění vodorovná složka magnetického pole.

V roce 2011 observatoř SDO jako první pozorovala vypaření komety v atmosféře Slunce. Další prvenství zaznamenala observatoř SDO téhož roku: dne 25. září 2011 zaznamenala obří vír slunečního plazmatu, který rotoval nad povrchem Slunce. Rychlost víru v periferní oblasti dosahovala 300 000 km/h. Vír připomínal obří tornádo, jehož teplota byla kolem

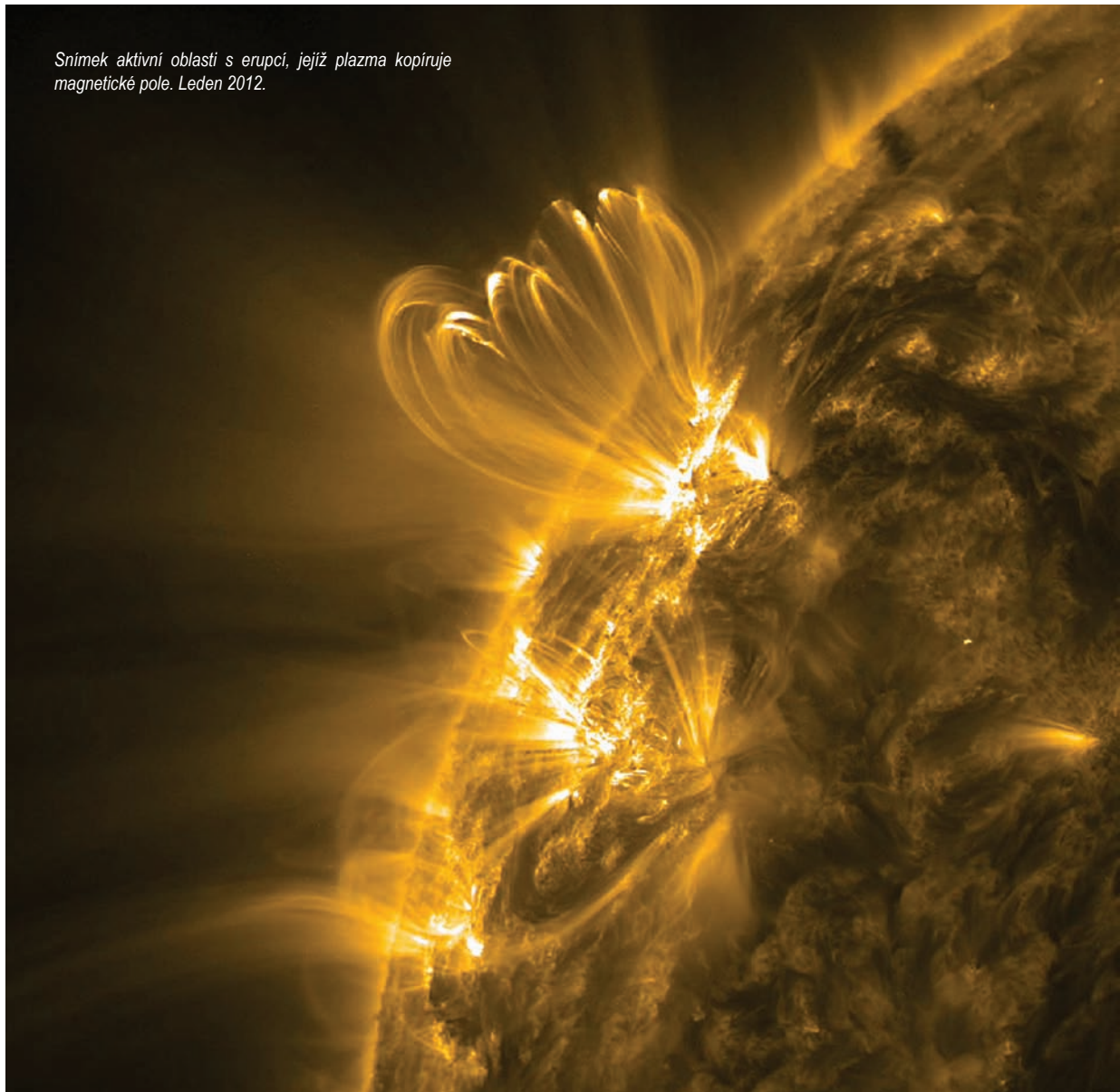




*Mimořádně aktivní rentgenové vzplanutí třídy X (nejsilnější třída). Snímek byl pořízen na vlnové délce 13,1 nm. Teplota plazmatu v místě vzplanutí dosáhla 10 milionů kelvinů. Zdroj: SDO/NASA, 9. června 2014.*

PŘÍSTROJE A SONDY

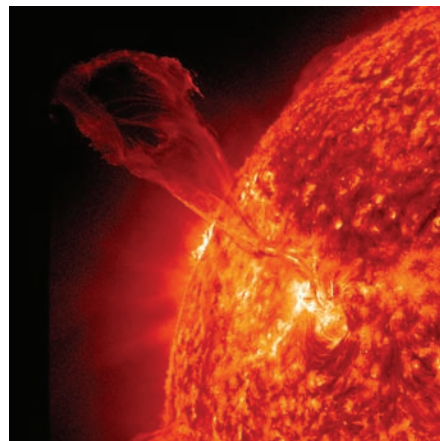
*Snímek aktivní oblasti s erupcí, jejíž plazma kopíruje magnetické pole. Leden 2012.*





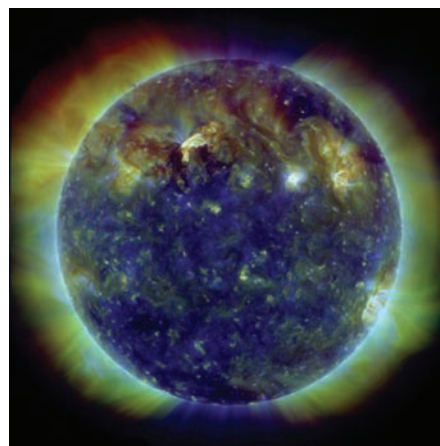
2 milionů stupňů Celsia. Vír vznikl z protuberance a po spirálovité dráze se zdvihl do výšky 200 000 kilometrů nad sluneční povrch. Jeho proudění bylo výrazně ovlivněno silným lokálním magnetickým polem. Je možné, že sluneční víry mohou být spouštěcím mechanismem pro koronální výrony hmoty, při kterých Slunce opustí shluk plazmatu a vydá se na cestu sluneční soustavou. Pokud zasáhne letící plazmoid Zemi, může způsobit poruchy rozvodných a komunikačních sítí včetně výpadků polohovacího systému GPS. Tou příjemnější částí je vznik velkolepých polárních září. Observatoř SDO se stala vynikajícím pomocníkem slunečních fyziků a umožňuje lepší pochopení dějů probíhajících na naší nejbližší hvězdě – Slunci.

■ Petr Kulhánek, 4. 5. 2012, AB 18/2012, aktualizováno



Plazmové vlákno ve tvaru dráčka vyfotografované v ultrafialovém oboru na vlnové délce 30,4 nm. Aktivita trvala šest hodin. Zdroj: SDO/NASA, 31. ledna 2013.

Obraz Slunce vytvořený složením tří snímků na vlnových délkách 21,1 nm (červená), 19,3 nm (zelená) a 17,1 nm (modrá). Snímek byl pořízen soustavou dalekohledů AIA. Zdroj: SDO/NASA, 8. dubna 2010.



## První rozumné vysvětlení anomálie pohybu sond Pioneer

**Radioizotopový termoelektrický generátor** – zdroj energie využívaný pro mise sond do nejvzdálenějších částí sluneční soustavy, kde jsou klasické solární panely neúčinné. Základem generátoru je kapsle z radioaktivního materiálu, zpravidla plutonia. Při rozpadu se uvolňuje velké množství tepla, které se v termočláncích konvertuje na elektrinu. Odpadní teplo je vyzařováno do okolního prostoru. Radioizotopové články mohou dodávat energii přístrojům několik desítek let.

Umělecká vize sondy Pioneer u Jupiteru. Na obrázku jsou dobře patrné radioizotopové generátory (1), magnetometr (2), hlavní anténa (3) a pomocná anténa (4). Zdroj: NASA.



Sondy Pioneer 10 a 11 jsou vůbec nejstarší misí člověka ke vzdáleným planetám. Sonda Pioneer 10 startovala v roce 1972. Sonda Pioneer 11 opustila Zemi o rok později. Pioneer 10 pořídil první blízké snímky planety Jupiter, zmapoval silné radiační pásy a zjistil, že Jupiter je převážně kapalný. V prosinci 1973 proletěl kolem Jupiteru ve vzdálenosti 130 354 km. Druhá sonda, Pioneer 11, minula Jupiter v prosinci 1974 ve výšce 43 000 km nad oblačným příkrovem a byla jeho gravitačním polem urychlena na 173 000 km/h směrem k Saturnu. Sonda Pioneer 11 získala snímky velké červené skvrny, poprvé fotografovala polární oblasti planety a určila hmotnost měsíce Callisto. K Saturnu se sonda přiblížila na pouhých 10 000 km, pořídila snímky planety a prstenců, objevila dva nové měsíce, sledovala Saturnovu magnetosféru a měsíc Titan. Obě sondy byly bohatě vybaveny mnoha přístroji pro výzkum slunečního větru a po průzkumu velkých planet se vydaly do vnějších částí sluneční soustavy. Sonda Pioneer 10 míří ke hvězdě Aldebaran.

Dolétne k ní ale až za 2 miliony let. Obě sondy jsou vybaveny plaketou, která je připevněna k operám hlavní antény a nese základní informace o naší civilizaci. Poselství případným nálezcům sond navrhnul americký astronom Carl Sagan.

### Sondy Pioneer

Ve své době byly sondy Pioneer vybaveny nejmodernějšími přístroji a technologiemi. Velikost sond je 2,7×2,9 m a každá z nich má hmotnost 260 kg. Sondy byly rotačně stabilizovány – pět otáček za minutu vzhledem k ose hlavní (vy-

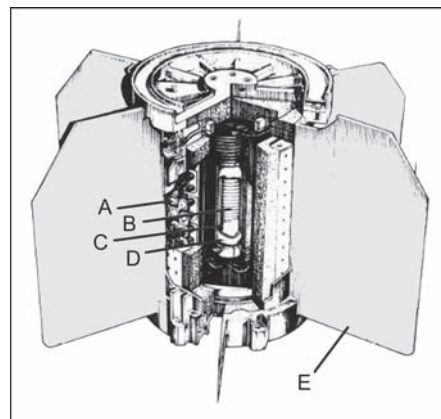
sokoziskové) antény udržovalo tuto anténu trvale namířenou směrem k Zemi. Kromě hlavní antény využívaly sondy ještě dvě další antény – anténu se středním ziskem a malou anténu s nízkým ziskem. Na první pohled zaujme mísa hlavní radiové antény. Z přístrojové části vybíhají ze sondy tři větší ramena. Na nejdelším je umístěn vektorový magnetometr a na dvou kratších čtveřice radioizotopových generátorů, která poháněla sondu. Generátory jsou zdrojem tepla, a proto byly umístěny mimo sondu, kde bylo nadbytečné teplo vyzařováno do prostoru. Z přístrojové části vychází ještě dvě menší konstrukce. Na jedné je připevněn sluneční senzor, na druhé čidlo pro detekci planetek a meteoroidů. Přímou na plášti přístrojové části je umístěna řada čidel: infračervený radiometr, ultrafialový fotometr, plazmový analyzátor, detektor nabitých částic, detektor kosmického záření, Geigerův-Müllerův čítač (navrhoval ho americký fyzik James van Allen), zobrazovací ftopolarimetr a Čerenkovův detektor zachycených částic. Vybavení sondy bylo i na dnešní dobu zcela mimořádné. Sondy poskytovaly kvalitní data přes 20 let. Postupně přestávaly pracovat některé přístroje a izotopové generátory dodávaly stále méně energie. Se sondou Pioneer 11 bylo ztraceno spojení na konci roku 1995. Pioneer 11 byl do 17. února 1998 nejvzdálenějším tělesem vyslaným člověkem do vesmíru. Tehdy se do větší vzdálenosti dostala sonda Voyager 1 s vyšší rychlostí. Voyager ale míří na opačnou stranu od Slunce. Komunikace se sondou Pioneer 10 byla ztracena v lednu 2003 – tato sonda fungovala neuvěřitelných 30 roků. V červnu 2014 je Pioneer 10 vzdálený od Slunce 110,7 au a opouští sluneční soustavu rychlostí 2,54 au za rok. O něco pomalejší Pioneer 11 je vzdálený 88,6 au a má rychlost 2 au za rok.

## Zdroj energie

Zdrojem energie sond byly 4 radioizotopové termoelektrické generátory uspořádané do dvou dvojic umístěných volně v prostoru na dvou menších ramenech. Spolu s magnetometrem dotvářely obraz sondy jako třínohého pavouka. Jádrem generátoru byl palivový článek z radioaktivního plutonia s poločasem rozpadu 88 let. Článek se skládal ze sloupce radioaktivních pelet, kolem něhož byly rozmístěny termoelektrické články převádějící uvolněné teplo na elektřinu. Zbytkové teplo bylo za pomoci žebra tepelného radiátoru vyzařováno do okolí. Každý generátor dodával zpočátku přibližně 40 wattů a celkový dodávaný výkon byl zhruba 160 wattů. Elektřina byla vedena do nitra sondy ke

**Plutonium** – šestý člen z řady aktinoidů, druhý transuran, silně radioaktivní toxický kovový prvek, připravovaný uměle v jaderných reaktorech především pro výrobu atomových bomb. Plutonium má poločas rozpadu přibližně 88 roků. Je využitelné rovněž jako palivo pro jaderné reaktory a jako zdroj energie pro radioizotopový termoelektrický generátor. Plutonium bylo poprvé připraveno roku 1940 dvěma vědeckými týmy bombardováním uranu 238 neutrony. V Berkeley jej připravili Edwin M. McMillan a Philip Abelson a v britské Cambridge Norman Feather a Egon Bertscher. Plutonium je pojmenováno po trpasličí planetě Pluto.

Radioizotopový termoelektrický generátor. Na schématu jsou označeny termoelektrické články (A), radioaktivní pelety (B), stínění před zpětným tepelným tokem (C), palivový článek (D) a žebra tepelného radiátoru, který vyzařuje odpadní teplo (E). Zdroj: Hans Mark, NASA.



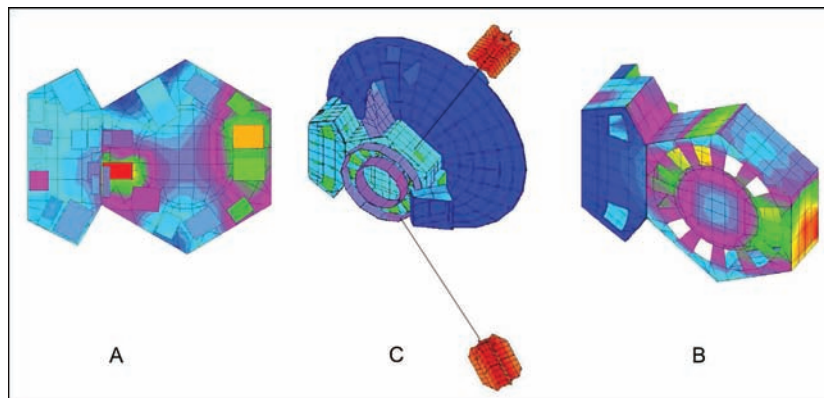
**Charakteristická časová konstanta** – konstanta pro exponenciálně probíhající děj, která vyjadřuje, za jakou dobu se sledovaná veličina změní e násobně, kde e je Eulerovo číslo (základ přirozených logaritmů).

**Geigerův-Müllerův čítač** – jednoduchý detektor radioaktivního záření. Částice (elektron, proton, alfa částice nebo foton) způsobí v trubici s inertním plynem, na jejichž koncích je přiloženo napětí, ionizační lavinu. Výsledkem průletu částice je snadno detekovatelný ionizační proud. Princip objevil německý fyzik Hans Geiger již v roce 1908, první zařízení (trubicu) zkonstruoval v roce 1928 německý fyzik Walther Müller.

Tepelná mapa sondy Voyager simulovaná metodou konečných prvků pro vzdálenost od Slunce 40 au.

A – vnitřek sondy (modrá  $-16$  °C, červená  $+10$  °C);  
 B – vnějšek sondy (modrá  $-155$  °C, červená  $-108$  °C);  
 C – celá sonda (modrá  $-213$  °C, červená  $+136$  °C).

Zdroj: Slava Turyshev, NASA JPL.



konečnému místu spotřeby, k subsystémům a přístrojům. Právě exponenciálně slábnoucí výkon generátorů byl příčinou nemožnosti další komunikace se sondami. Po vypnutí všech vnitřních i vnějších vědeckých přístrojů a čidel sonda Pioneer 10 k základnímu životu a komunikaci se Zemí ještě potřebovala 20 W na subsystémy, pro nevědecká elektrická zařízení 17,5 W, pro zesilovač 21 W a pro vysílač 7 W, tedy celkem 65,5 W. Tento výkon byly generátory na sondě Pioneer 10 schopné dodávat jen do vzdálenosti necelých 70 au.

## Anomálie pohybu sond

Po prolétnutí přibližně 20 astronomických jednotek se u obou sond začaly projevovat odchylky od dráhy předpovězené z gravitačního zákona. U obou sond bylo z Dopplerova jevu zjištěno velmi malé zrychlení směrem ke Slunci, jehož hodnota činila po odečtení všech známých jevů pouhých  $9 \times 10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>. To je desetmiliardkrát nižší hodnota, než má tíhové zrychlení Země. Přesto bylo toto anomální zrychlení průkazně měřitelné. Počáteční šok vystřídal badatelské nadšení mnoha vědeckých skupin. Jedna hypotéza střídala druhou. Někteří tvrdili, že by mohlo jít o brzdění sond interakcí s temnou hmotou, jiní, že klíčem k řešení jsou strunová teorie, extradimenze a supersymetrie. Nejedvážnější viděli v nepatrné odchylce od vypočtené dráhy nutnost modifikovat obecnou relativitu nebo dokonce potřebu nové teorie gravitace.

V současné době se zdá být nejpravděpodobnějším zdrojem dodatečného zrychlení sond tepelné vyzařování jejich přístrojů, které jsou v sondě umístěny asymetricky, a jejichž energie pochází z radioizotopových generátorů.

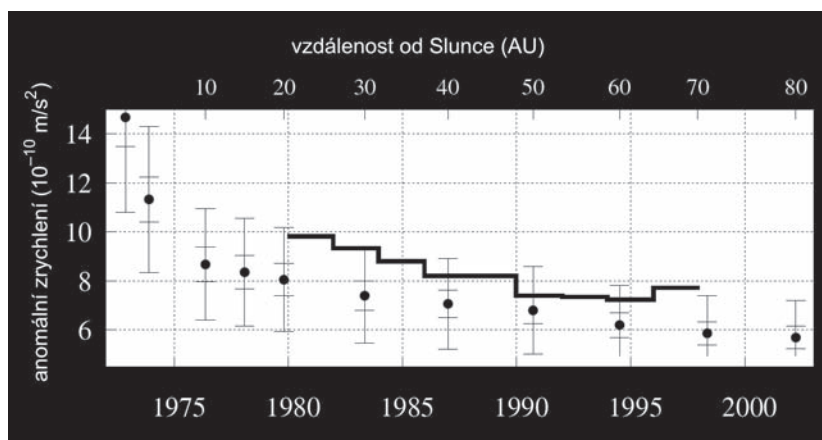
Přestože byl anomální pohyb sond detekován na počátku 80. let dvacátého století, začali se jím vědci vážně zabývat až v roce 1994. Po mnoha letech sledování anomálie se ukázalo, že měřená hodnota exponenciálně klesá s charakteristickou časovou konstantou 27 roků. Na sondě byla přítomná jediná součástka vykazující exponenciální časový pokles – radioizotopový termoelektrický generátor. Stále



větší procento fyziků dávalo do souvislosti měřené zrychlení s tepelným vyzařováním generátorů. Tato úvaha se zdála přímočará, ale měla dva zásadní háčky. Prvním bylo téměř všesměrové tepelné vyzařování obou generátorů, které by těžko udělilo sondě zrychlení směrem ke Slunci. Druhým byla charakteristická konstanta poklesu energie dodávané generátory. Ta činila 88 roků (poločas rozpadu plutonia) a nebyla v souladu s naměřenou hodnotou 27 let.

Zdá se, že celé záhadě přišel na kloub tým, který vede Slava Turyshev z NASA JPL. Pro sondu Pioneer 10 vytvořili kompletní numerický model tepelných toků v sondě. Za tím účelem museli kontaktovat konstruktéry a pamětníky stavby této dnes již velmi historické sondy. Zjistili, že vlastní radioizotopový generátor přispívá tepelným vyzařováním ke změně rychlosti sondy velmi málo. Na vině by podle numerických simulací měly být samotné přístroje, které jsou v sondě umístěny excentricky a tepelný tok z nich zahřívá na odvrácené straně od Slunce sondu a podle principu akce a reakce dochází k velmi nepatrnému brzdění sondy. Podle simulací je vliv tepelného ohřevu od přístrojů přibližně patnáctkrát vyšší než vliv samotných generátorů. Exponenciální pokles jevu způsobený snížením dodávky energie ze zdrojů má navíc jinou charakteristickou konstantu než samotný radioizotopový zdroj. Výsledky simulací jsou řádově v souladu s pozorovanými hodnotami a zdá se, že jedna z nočních můr fyziků byla úspěšně vyřešena.

■ Petr Kulhánek, 11. 5. 2012, AB 19/2012, aktualizováno



*Pokles anomálního zrychlení pro sondu Pioneer 10. Plnou čarou je označeno anomální zrychlení sondy, černými kroužky tepelné zrychlení vypočtené z numerického modelu. Zdroj: Slava Turyshev, NASA JPL.*

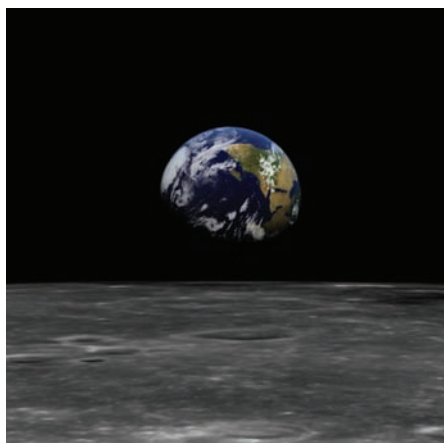
**Rychlost** – změna dráhy s časem. Jednotkou je  $\text{m/s}$ . Pokud na těleso nepůsobí síla, zůstává směr i velikost jeho rychlosti konstantní. Rychlost lze v inerciální souřadnicové soustavě změnit jen působením síly.

**Zrychlení** – změna rychlosti s časem. Jednotkou je  $\text{m/s}^2$ . Zrychlení je ústřední veličinou Newtonova pohybového zákona. Zrychlení získané tělesem je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné setrvačné hmotnosti tělesa. Na základě pohybového zákona lze předpovídat za pomoci diferenciálního počtu pohyby těles.

## Zajíc, který běhá po Měsíci

**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 ve stinných částech kráterů a pod povrchem (Lunar Prospektor, 1998). Povrch Měsíce je pokryt regolitem (drobná drť s vysokým obsahem skla). Malé pevné jádro je obklopené plastickou vrstvou (v hloubce 1 000 km pod povrchem). Velké množství kráterů má rozměry od milimetrů po stovky kilometrů. Několik z nich je pojmenováno i po českých osobnostech (například kráter Anděl, který je pojmenován podle českého astronoma Karla Anděla).

*Snímek Země pořízený Apollem 17 z blízkosti Měsíce v prosinci 1972. Zdroj: NASA.*



Měsíc, jakožto jediná přirozená družice Země, odjakživa přitahoval pozornost lidstva. Prvním lidským objektem, který dosáhl povrchu Měsíce (v tomto případě tzv. tvrdým přistáním), byla sovětská sonda Luna 2, a to 13. září 1959. V dobývání Měsíce udělalo lidstvo další významný krok v únoru 1966 tzv. měkkým přistáním (tj. bez jakéhokoliv poškození) sovětské sondy Luna 9. Historicky nejvýznamnější událostí bylo samozřejmě první přistání člověka na Měsíci (20. července 1969 ve 20:17 UTC) – dvojice amerických astronautů Neil Armstrong a Edwin Aldrin se 21. července 1969 jako první lidé procházeli po povrchu Měsíce v rámci mise Apollo 11. Poslední návštěvou měsíčního povrchu byla mise sovětské sondy Luna 24, uskutečněná 19. srpna 1976. Poté se cesty na Měsíc dostaly do ústraní lidského zájmu.

### Čínské úsilí o dobytí Měsíce

V historii lidstva dosáhlo „měkce“ povrchu Měsíce celkem 20 objektů, z nichž právě 6 neslo lidskou posádku a celkem 12 lidí (všichni z USA) se procházelo po povrchu tohoto vesmírného tělesa.

Fakt, že povrchu Měsíce dosáhly pouze dvě světové velmoce, platil až donedávna. Dne 14. prosince 2013 přistála na Měsíci čínská sonda Čchang-e 3, která sem dopravila „lunochod“ s poetickým názvem Nefritový zajíc. Po 37 letech se tak na povrch Měsíce opět dostává lidský výtvar a Čína se stala třetí zemí (po USA a bývalém Sovětském svazu), která dokázala technicky zvládnout měkké přistání na Měsíci včetně vypuštění lunárního vozítka na jeho povrch.

Čínské přistání na Měsíci je jistě velmi významnou událostí v dějinách světové kosmonautiky. Již v minulosti však Čína prokázala, že je na tomto poli velmi významným hráčem. V říjnu 2003 se na oběžnou dráhu Země poprvé dostává čínský tajkonaut Jang Li-wej. O pět let později, v září roku 2008, Čína vyslala na oběžnou dráhu trojici tajkonautů (Čaj Č'-kang, Liou Po-ming, Ťing Chaj-pcheng), jejichž cílem byl historicky první čínský výstup do volného prostoru. Následně v letech 2011 až 2012 vypustila Čínská národní vesmírná agentura (CNSA) na oběžnou dráhu Země malou orbitální stanici Tchien-kung 1 (Nebeský palác 1), ke kterému se v létě roku 2012 připojila vesmírná loď Šen-čou 9 (Božská loď 9) se třemi tajkonauty na palubě. Paralelně k programu dobývání okolí Země se rozběhl v roce 2003

program Čchang-e, jehož cíle byly daleko ambicióznější – úspěšné přistání na Měsíci. Jako přípravu na bezpečné dopravení lunárního modulu na povrch Měsíce provedla CNSA celkem dvě mise. Dne 24. října 2007 odstartovala k Měsíci sonda Čchang-e 1, která byla navedena na oběžnou dráhu kolem Měsíce 5. listopadu a měla za cíl především ověřit technologie pro následující bezpilotní mise a pořizovat snímky měsíčního povrchu. O tři roky později vyslala Čína k Měsíci druhou sondu – překvapivě s názvem Čchang-e 2. Základem jejího programu byl průzkum měsíčního povrchu (sonda pořizovala snímky měsíčního povrchu s rozlišením 1 metr na pixel). Po přechodu z měsíční orbity do Lagrangeova bodu L2 následně zkoumala meziplanetární prostor.

## Měkké přistání

Dne 1. prosince 2013 v 17:30 SEČ (2. prosince v 01:30 pekingského času) odstartovala z čínského vesmírného kosmodromu Si-čchang čínská raketa Long March 3B (Dlouhý pochod – jméno podle akce komunistických partyzánů, která zachránila celé maoistické hnutí), která v rámci mise Čchang-e 3 vyslala k Měsíci vesmírnou sondu se stejným názvem. Mise vyvrcholila dne 14. prosince, kdy ve 21:12 pekingského času přistál lunární modul na povrch Měsíce. Jeho přistání bylo plánováno do místa známého jako Duhový záliv (*Sinus Iridium*). Sonda však nakonec dosedla do Moře dešťů (*Mare Imbrium*), přibližně 40 kilometrů jižně od měsíčního kráteru Laplace F (N44.1260°, W19.5014°). Zajímavostí může být, že právě do oblasti Moře dešťů v minulosti dopadla tvrdým přistáním již zmíněná sovětská sonda Luna 2.

Po rozložení slunečních panelů a zprovoznění modulu byl na povrch Měsíce vypuštěn Nefritový zajíc – průzkumné lunární vozítko, které má především zkoumat měsíční povrch. Podle původního plánu měla mateřská sonda pracovat přibližně 12 měsíců a náplní její práce je především pozorování galaxií, aktivních galaktických jader, proměnných hvězd, dvojhvězd, nov, kvazarů a blazarů v blízkém ultrafialovém oboru (245 až 340 nm). K tomu jí slouží dalekohled o průměru 150 mm se systémem *Ritchey-Chrétien*, který je schopen detekovat objekty až o 13. magnitudě. Pozorování na povrchu Měsíce má řadu výhod: stabilita uložení dalekohledu, neexistence atmosféry a pomalá rotace Měsíce. Vše dohromady umožňuje extrémně dlouhé expozice. Sekundárním pozorovacím zařízením sondy je kamera pro extrémní ultrafialový obor (EUV, 30,4 nm), která má pozorovat zemskou plazmosféru

**Apollo** – americký program pilotovaných vesmírných letů probíhající v letech 1961 až 1972. Vyvrcholením bylo přistání člověka na Měsíci (Neil Armstrong, 20. 7. 1969 UTC). K cestě na Měsíc byla používána dosud největší nosná raketa Saturn V. Astronauté posledních misí využívali k pohybu po povrchu Měsíce speciální pohyblivé vozítko.

**CNSA** – China National Space Administration, Čínská národní kosmická agentura, založená v roce 1993. Agentura vlastní tři kosmodromy (Jiuquan, Xichang, Taiyuan) a nosnou raketu Long March.

**Tajkonaut** – po vzoru dvou velmocí si i Čína zavádí vlastní označení pro člověka, který uskutečnil kosmický let. Tedy v USA astronaut, v Rusku kosmonaut a v Číně tajkonaut.

Start rakety Long March 3B z kosmodromu Si-čchang.  
Zdroj: CNSA.



**Lagrangeovy body** – pět bodů v sousedství dvou obíhajících hmotných těles (Země-Slunce, Země-Měsíc atd.), ve kterých je gravitační a odstředivá síla vyrovnána. Polohu těchto bodů poprvé vypočítal italsko-francouzský matematik Joseph-Louis Lagrange. Velmi výhodné je například umístění sond určených k pozorování vzdáleného vesmíru do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, který je vzdálený od Země 1 500 000 km ve směru od Slunce (WMAP, Planck, Herschel). Naopak, do bodu L1 soustavy Země-Slunce se umísťují sondy určené pro monitorování Slunce (například SOHO).

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

Vyobrazení sondy Čchang-e 3 a vozítka na povrchu Měsíce. Zdroj: CNSA.



s cílem zkoumat její strukturu, dynamiku a její ovlivnění sluneční aktivitou. Tímto počínem se stala čínská sonda první měsíční observatoří v historii lidstva.

## Zajíc na scéně

Nefritový zajíc (čínsky Jü-tchu) váží 120 kilogramů, je vysoký 1,5 metru a široký 1,1 metru. Dokáže vyvinout rychlost až 200 metrů za hodinu, překonat překážky vysoké 20 cm a svah o maximálním sklonu 20°. O dodávku elektrické energie se stará dvojice postranních solárních panelů a vyhřívání celého modulu během čtrnáctidenní měsíční noci je zajištěno radioizotopovým tepelným zdrojem. Na povrchu Měsíce měl Nefritový zajíc pobývat přibližně 3 měsíce, za které měl ujet až 10 kilometrů a prozkoumat plochu tří čtverečních kilometrů.

Mezi přístrojové vybavení Nefritového zajíce patří především radar určený ke zkoumání měsíčního povrchu do hloubky 30 metrů a pro zkoumání struktury kůry Měsíce do hloubky více než 100 metrů. Dále je vozítko vybaveno alfa-částicovým rentgenovým spektrometrem a infračerveným spektrometrem, které jsou umístěny na robotických ramenech a slouží pro analýzu chemického složení lunárních vzorků. Celkové přístrojové vybavení je dovršeno dvojicí panoramatických fotoaparátů, které pořizují širokouhlé snímky okolního povrchu.

Zajímavostí je, že jméno Nefritový zajíc bylo vybráno na základě internetového hlasování čínského lidu. Stejně jako název lunárního modulu se i název lunárního vozítka váže k čínské mytologii – Nefritový zajíc dělá na Měsíci společnost čínské bohyni Měsíce Čchang a stlouká v hmoždíři elixír nesmrtnosti.

## Problémy

Nadějná mise se však potýká s problémy. Po přežití první lunární noci (26. prosince 2013 až 11. ledna 2014) byl modul oživen a úspěšně dokončil první testování měsíční



půdy. Na konci tohoto lunárního dne však CNSA oznámila, že Nefritový zajíc má významnou poruchu mechanického ovládání, která brání kompletní přípravě na druhou měsíční noc. Příčin může být hned několik – silná radiace, nízká gravitace a nebo vysoký teplotní rozdíl mezi sluncem osvětlenou a neosvětlenou částí lunárního vozítka během lunárního dne (ten činil až 100 °C).

Po druhé lunární noci byly vědecké přístroje sice schopny provozu, ale Zajíc se nemohl pohybovat. V tomto stavu přežil Nefritový zajíc třetí a čtvrtý lunární den. Dne 18. dubna 2014 uvedla čínská společnost *Space Research*, že příčina poruchy není mechanická ale elektrická, a že v současné době pracují na možnostech, jak tuto poruchu obejít. Za skutečnou příčinu problémů byla označena velmi nízká teplota na povrchu Měsíce, která byla nižší než původní odhady.

V době vydání této publikace Nefritový zajíc komunikuje se Zemí, ale je stále neschopný dosáhnout správné polohy solárních panelů, což výrazně omezuje jeho funkčnost. Navíc se jeho životaschopnost zmenšuje s každou další lunární nocí.

## Závěr

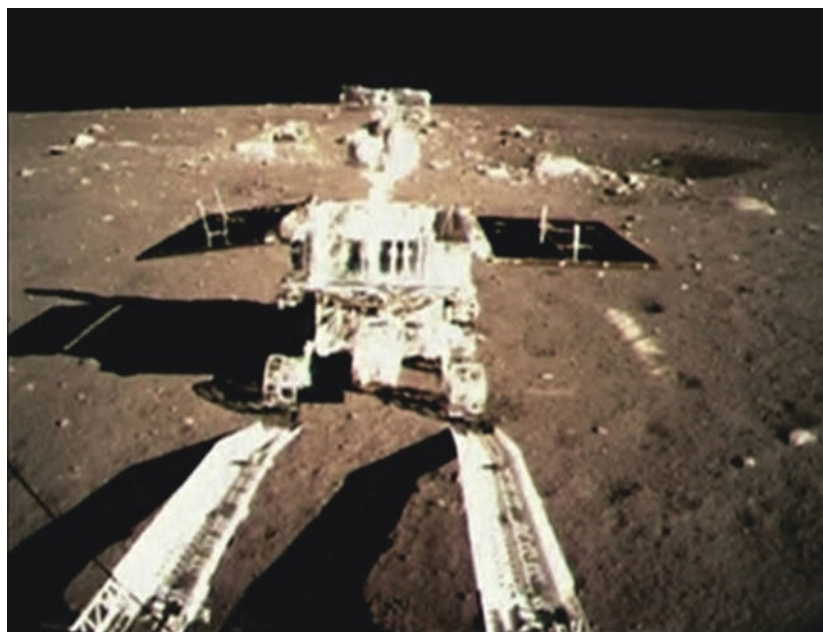
Dalším přirozeným vývojem čínské „Vesmírné odyssey“ má být vypuštění lunárního modulu, který bezpečně dopraví vzorky měsíčního povrchu zpět na Zemi, což by se mělo uskutečnit přibližně v roce 2017. Vyvrcholením celého programu je vyslání člověka na povrch Měsíce, které plánuje čínská vesmírná agentura přibližně na rok 2020. Návrat na Měsíc oznámily také Spojené státy, a to do roku 2018, do roku 2025 chce na Měsíci přistát také Japonsko a Rusko. Začínají nám tak novodobé závody v dobývání Měsíce?

■ Radek Beňo, 21. 12. 2013,  
AB 40/2013, aktualizováno



*Snímek pořízený americkou sondou RLO. Větší bílá tečka je sonda Čchang-e 1, menší je Nefritový zajíc. Zdroj: NASA.*

*Fotografie pořízená sondou Čchang-e 3 zachycuje první krůčky vozítka na povrchu Měsíce po jeho sjetí z rampy. Zdroj: Amazon Web Services.*



## WISE, bájný Fénix a prachoví psi

**Trojané** – obecný název pro tělesa nacházející se v Lagrangeových bodech L4 a L5 soustavy Slunce-planeta. V těchto bodech tělesa samostatně obíhají Slunce a vyrovnává se zde odstředivá síla vzniklá oběhem s přitažlivými silami planety a Slunce. Lagrangeovy body L4 a L5 se nacházejí na dráze planety kolem Slunce, a to 60° před planetou a 60° za planetou. Lagrangeův bod (L4 nebo L5), planeta a Slunce tvoří rovnostranný trojúhelník. Trojané jsou v rezonančním pohybu 1:1 s oběžným pohybem planety. Tělesa v libračním bodě L4 soustavy Jupiter – Slunce se někdy označují jako „Řekové“ a tělesa v bodě L5 jako „Trojané“.

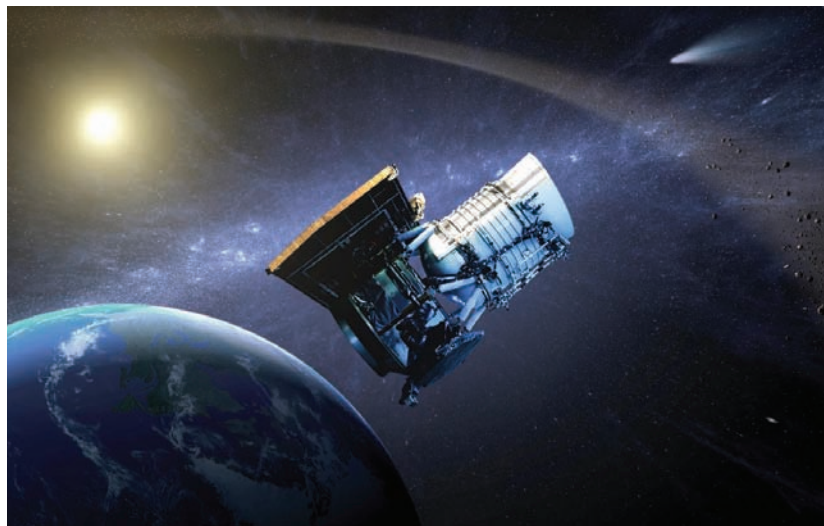
Americký infračervený dalekohled WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) byl vypuštěn na oběžnou dráhu kolem Země v prosinci 2009. Jeho průměr je 40 cm a pracuje v oblasti vlnových délek 3 až 25  $\mu\text{m}$ . Konkrétní pásma mají středy na vlnových délkách 3,4  $\mu\text{m}$  (W1), 4,6  $\mu\text{m}$  (W2), 12  $\mu\text{m}$  (W3) a 22  $\mu\text{m}$  (W4). Základním cílem tohoto přístroje bylo pořídit rutinní přehlídku oblohy v infračervené oblasti a vytipovat zajímavé objekty pro větší přístroje. V letech 2010 až 2011 WISE udělal dvě kompletní přehlídky oblohy čítající miliony veřejně dostupných snímků. Před našimi zraky se vynořil neviditelný infračervený vesmír a astronomové zažili pocity člověka tápajícího v nočním černém lese po nasazení infračervených brýlí. WISE objevil tisíce planetek, spatřil nejchladnější hvězdy ve vesmíru a objevil miliony obřích černých děr zahalených do prachových kokónů, které pohlcují světlo akrečního disku a opět ho vydávají v infračervené oblasti. Po splnění mise NASA nepovolila její prodloužení a dne 17. února 2011 byl dalekohled hibernován. Jeho zakonzervování umožnilo případné pozdější probuzení. K tomu nakonec opravdu došlo, a to dne

21. srpna 2013. Dalekohled WISE povstal jako bájný Fénix a začal se opět rozhlížet v, pro nás neviditelném, infračerveném světě.

### Černé díry

Přehlídka oblohy provedená dalekohledem WISE umožnila objevy objektů na všech škálách. Co se týče sluneční soustavy, tak zde dominují objevy tisíců planetek. Dalekohled WISE například objevil trojana 2010 TK7, který letí kolem Slunce před Zemí – někdy se mu říká „druhý Měsíc“. Na střední úrovni vzdáleností objevil dalekohled WISE extrémně chlad-

Umělecká představa dalekohledu WISE. Zdroj: NASA.



né hvězdy balancující na pomezí obří planety a nepovedené hvězdy. Z hlediska vesmíru jako celku jsou ale nejvýznamnější objevy milionů černých děr v kosmologických vzdálenostech. Objekty, o kterých jsme si ještě před čtvrt stoletím mysleli, že jsou výjimečné, vyvstávají na snímcích z přístroje WISE jako zrnka máku rozsypaná po celém vesmíru.

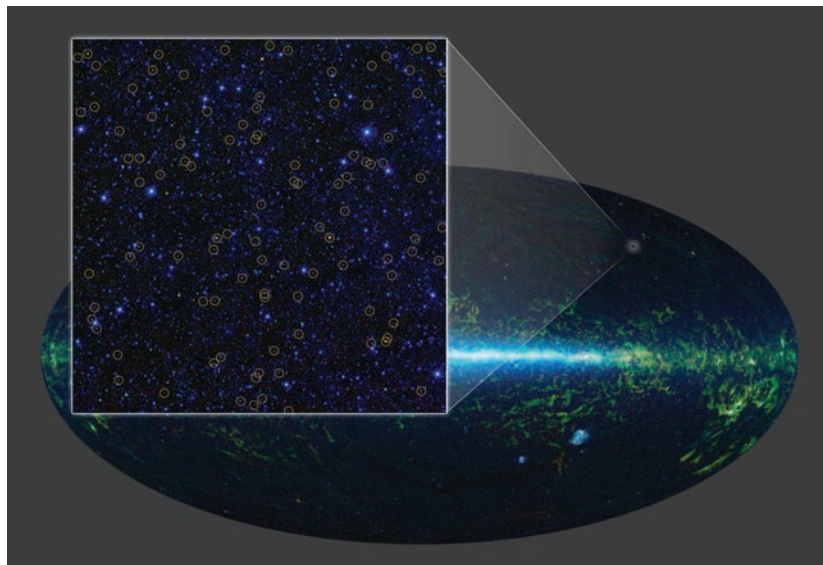
„Podezřelé“ objekty byly sledovány mnoha dalšími přístroji – v infračerveném oboru Spitzerovým dalekohledem, ve viditelném oboru Hubblovým dalekohledem, z pozemských přístrojů byly do pozorování zahrnuty: Keckovy dalekohledy na Mauna Kea, Gemini v Chile, Haleův pětimetr na Mt. Palomaru v USA nebo dalekohled MMT v Arizoně. Nejdůležitější bylo vyhledávání objektů z přehlídky COSMOS, která je největším současným projektem monitorujícím na malé části oblohy miliony galaxií v nejrůznějších vývojových stádiích. Nejhmotnější objevené černé díry měly hmotnost přibližně miliardy Sluncí, nejbližší se nacházejí 10 miliard světelných roků daleko.

Do těchto obřích černých děr, jež sídlí v centrech galaxií, padá po spirále materiál, který se zahřívá a vytváří kolem nich horký svítící plazmatický disk (tzv. akreční disk). U mnoha pozorovaných objektů je kolem akrečního disku hustý prachový obal. Celá černá díra je tak zahalena do prachového obalu, který znemožňuje pozorování v optickém oboru. Prachový obal pohltí záření akrečního disku a vyžáří ho v infračerveném oboru. A právě zde je jedinečná role přístroje WISE, který umožňuje mapovat miliony takových objektů. Jen některé z nich jsou poté zkoumány podrobněji dalšími přístroji. Z analýzy těchto detailních pozorování se ukázalo, že u některých vzdálených galaxií se nacházela obří černá díra už v období před formováním hvězd. Je tedy možné, že jsme konečně na stopě mnohaleté hádance: Existovala nejprve černá díra, kolem níž vznikla galaxie,

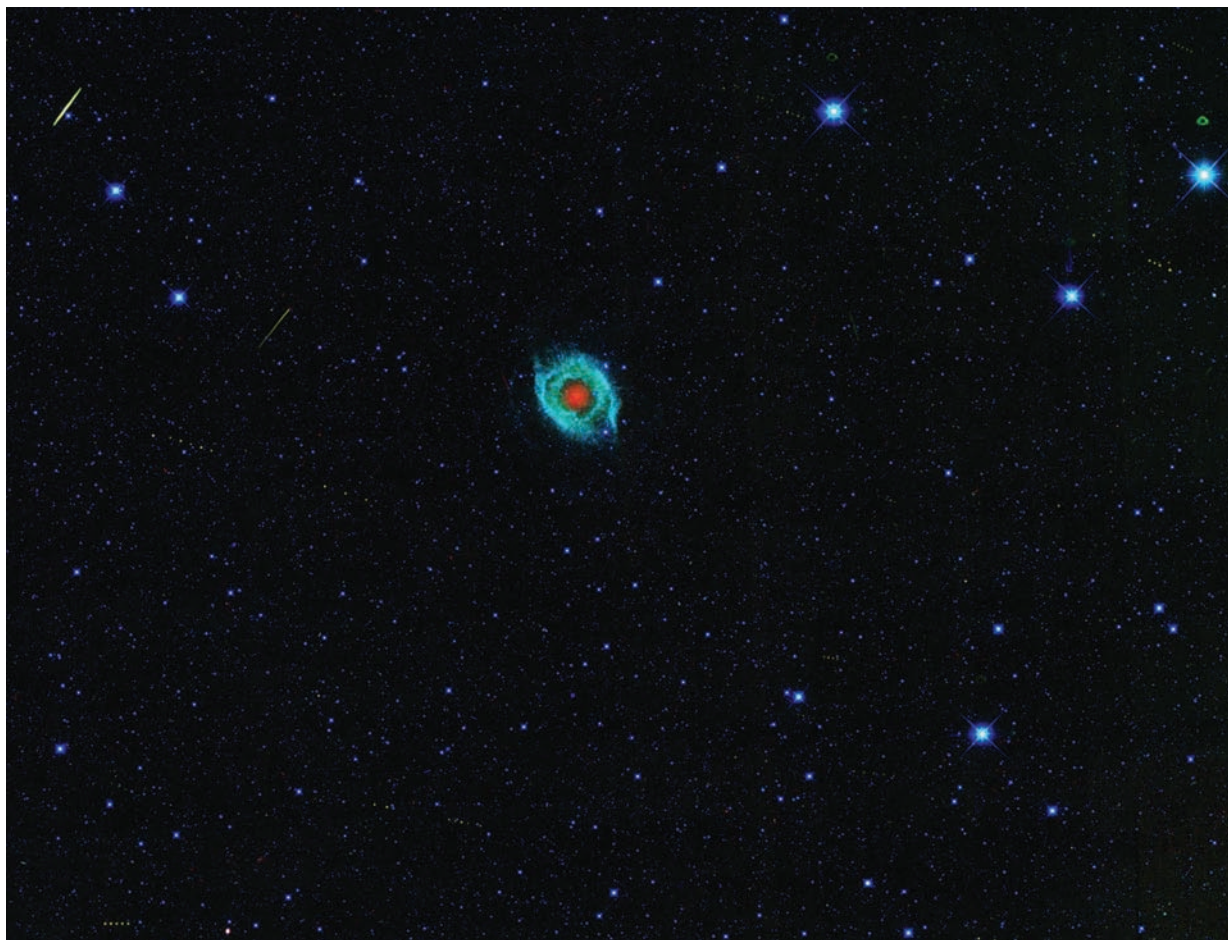
**COSMOS** – Cosmic Evolution Survey, přehlídka oblohy probíhající od roku 2002, které se účastní vesmírné observatoře od infračerveného po rentgenový obor (Spitzer, Hubble, GALEX, XMM-Newton a Chandra) a mnoho pozemských optických dalekohledů. Podrobně je sledováno čtvercové rovníkové pole o hraně 2°. Bylo detekováno přes dva miliony galaxií v nejrůznějších vývojových stádiích. Jde o největší přehlídku tohoto druhu.

**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.

*Dalekohled WISE ukázal, že vesmír je plný černých děr. Nalezl miliony kandidátů na obří černé díry v centrech galaxií. Kroužky na malém výseku oblohy znázorňují tyto kandidáty. Zdroj: NASA/JPL-Caltech/UCLA.*







*Žluté přerušované čárky jsou planetky z naší sluneční soustavy, které přecházejí přes planetární mlhovinu Helix. Zdroj: NASA/JPL-Caltech/WISE.*

nebo byla nejprve galaxie a v jejím nitru postupně vznikala černá díra? Problém slepice a vejce v této nové podobě možná bude mít brzké řešení. Prachem zahalené černé díry se označují zkratkou DOG (*Dust Obscured Galaxy*), která znamená pes, jde tedy doslova o „prachové psy“.

Další překvapení přinesl na počátku prosince 2013 objekt s označením WISE J233237.05-505643.5. Při podrobnější prohlídce dalekohledem Gemini v Chile a australskou kompaktní sítí dalekohledů ATCA

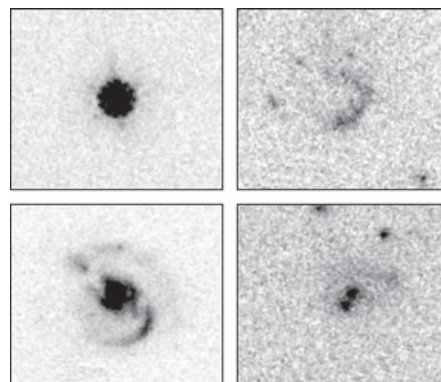


se ukázalo, že výtrysk z obří černé díry je podivně zprohýbán a objekt má podvojný charakter. Zdá se, že jde o dvojici těsně obíhající černých děr, které se vzájemně ovlivňují, ztrácejí energii vyzařováním gravitačních vln a v astronomicky blízké době mohou splynout.

### Jako Fénix

Probuzení dalekohledu WISE z hibernovaného stavu se nepochybně vyplatilo a oživený přístroj začal chrlit jeden výsledek za druhým. Místo závěru si na protější straně prohlédněte zajímavý snímek z 12. prosince 2013. Je na něm dobře známá mlhovina Helix nacházející se kolem umírající hvězdy. Žluté čárky zdánlivě narušující snímek nejsou žádnými škrábanci či kazy, ale jde o stopy planetek z naší sluneční soustavy, které přecházejí mezi námi a mlhovinou.

■ Petr Kulhánek, 13. 12. 2013, AB 39/2013



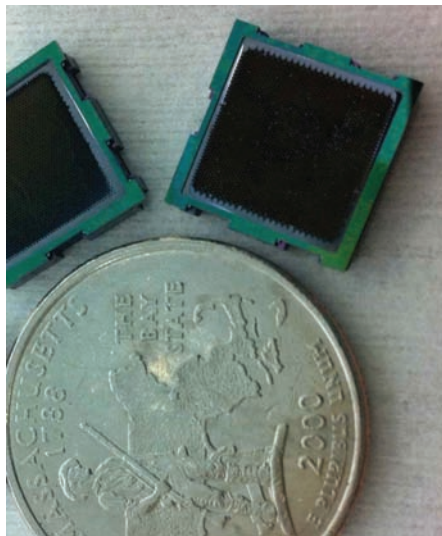
Čtveřice kandidátů na obří černé díry zahalené v jádrech galaxií do prachového obalu byly vyfotografovány kamerou ACS na Hubblově vesmírném dalekohledu v rámci přehlídky COSMOS. Úhlová šířka zobrazeného pole je 4". Zdroj: COSMOS/HST.



## Iontový motor velikosti desetníku

**Elektrosprej** – metoda vytváření malých kapiček pomocí elektrického pole. Kapičky produkováné elektrosprejem mají vysoký náboj, který zabraňuje jejich vzájemnému shlukování a zároveň podporuje vlastní disperzi jednotlivých kapiček. Rozměry produkováných kapiček jsou extrémně malé, ve zvláštních případech až nanometrické. Náboj a velikost kapičky lze do jisté míry ovlivnit hodnotou napětí a průtoků pracovních plynů. Tuto techniku zdokonalil John Fenn, který ji využil pro analýzu menších molekul, za což získal v roce 2002 Nobelovu cenu za chemii.

Porovnání iontového mikromotoru s mincí. Zdroj: MIT.



Lidstvo vysílá do vesmíru čím dál více materiálu v podobě komunikačních satelitů, sond, experimentálních zařízení a dokonce obytných stanic. Většina těchto vesmírných plavidel má na palubě vlastní pohonnou jednotku, která jim umožňuje manévrovat. Větší plavidla používají konvenční pohonný systém, ale malé družice, jako například nanosatelity a pikosatelity, nemohou kvůli své velikosti tento druh pohonu použít. Naštěstí vědci z MIT vyvinuli novou miniaturní pohonnou jednotku, iontovou mikrotrysku o velikosti desetníku.

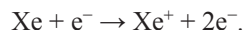
### Iontový mikromotor

Za otce iontových motorů je považován Konstantin Ciolkovskij, ruský fyzik, který v roce 1911 jako první publikoval myšlenku iontového pohonu. První experimenty s iontovými motory provedl o pět let později Robert Hutchings Goddard.

Miniaturní iontový motor navržený v MIT funguje tak, že elektrostatičky urychluje nabitě částice, které vypouští ven do kosmu. Na základě zákona akce a reakce kosmické plavidlo zvyšuje svou rychlost opačným směrem. Než se ionty dostanou z trysky do volného prostoru, musí vykonat cestu z nádrže s palivem přes porézní stěnu přímo na mikroskopické hroty, taktéž z porézního materiálu. Ionty jsou z hrotů elektrostatičky emitovány pomocí extrakční mřížky, urychlovány rozdílem potenciálů 1 až 2 kV směrem k urychlovací mřížce a skrz ni vypouštěny dále do vesmíru. Z pórů mikroskopických hrotů nasáklých iontovou kapalinou jsou elektrostatičkovou silou z kapaliny zformovány takzvané Taylorovy kužele, z jejichž vrcholů jsou emitovány mikroskopické kapičky. Tento princip je používán u elektrosprejů a při výrobě nanovláken. Mimochodem, k výzkumu elektrosprejů také významně přispěl česko-americký fyzik John Zeleny (1872–1951). Rychlost iontů vystřelených z motoru se pohybuje kolem desítek až stovek kilometrů za sekundu. Po průletu iontových kapiček urychlovací mřížkou problém nekončí, je ještě nutné iontový svazek neutralizovat. Neutralizaci vědci z MIT provádí tak, že přepínají polaritu napětí, kterým urychlují částice. Tím je způsobeno střídavé vypouštění záporně a kladně nabitých částic a při vhodně zvolené frekvenci (jednot-

ky hertzů) je výsledný iontový svazek neutrální. Neutralita iontového svazku potlačuje elektrochemické reakce, korozi trysky a prodlužuje celkovou dobu životnosti pohonného systému.

Pro porovnání: funkce elektrostatického iontového motoru začíná v ionizační komoře, do které je jako palivo vstřikován inertní plyn, nejčastěji xenon. Ionizační komora má tvar válce, který představuje anodu, uprostřed je umístěn elektronový emitor a axiální dutá katoda. Katoda poskytuje zdroj velmi rychlých elektronů pro ostřelování atomů xenonu, ze kterých vznikají ionty a elektrony podle reakce



Elektrony mohou být urychlovány více způsoby, buďto rozdílem potenciálů na anodě a katodě, statickým magnetickým polem v kombinaci s proměnným elektrickým polem na elektronové cyklotronní rezonanční frekvenci, nebo mikrovlnným ohřevem. Vygenerované ionty jsou difúzí hnány k akceleračním mřížkám (tvoří takzvanou iontovou optiku), na nichž jsou urychleny ven do volného vesmíru. Neutralizaci iontového svazku zajišťuje další elektronové dělo vysílající elektrony do kladně nabitého iontového svazku za vesmírným plavidlem. U mikromotoru odpadá pracné generování iontů, není zapotřebí ani neutralizátor iontového svazku, ani pumpa zajišťující přísun xenonu.

## Palivo

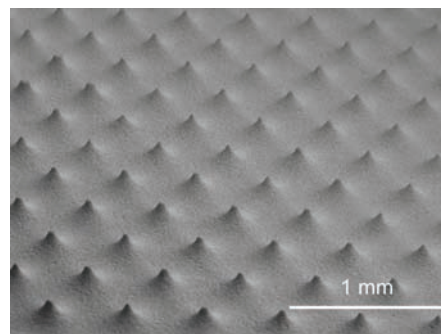
Jako palivo je použita iontová kapalina EMI-BF<sub>4</sub> (1-ethyl-3 methylimidazolium tetrafluoroborate). Ačkoliv pro vnějšího pozorovatele se zdá být bez náboje, skládá se z kladně a záporně nabitých iontů bez rozpouštědla. Ionty jsou připraveny pro snadnou extrakci. Tímto způsobem se šetří energie, která by se standardně spotřebovala na ionizaci plynu nebo paliva na orbitě. Palivo je vytvořeno na povrchu Země, kde je energie podstatně levnější komoditou. Povrchové napětí kapaliny je dostatečné na to, aby fungoval kapilární jev, takže iontový motor nepotřebuje aktivní doplňování paliva. Tím odpadá potřeba použití množství mechanických součástí, které jsou nutné ve velkých iontových motorech, a s nimi i riziko jejich poruch. Nový miniaturní iontový pohon je vlastně něco jako SSD (*Solid State Disc*, hardisk bez pohyblivých částí) mezi iontovými motory. Kapalina má navíc malou tendenci k vypařování, takže může být vystavena vesmírnému vakuu.

**Pikosatelity** – satelity s hmotností kolem 1 kg a rozměry přibližně 10 cm. Jsou často vynášeny do vesmíru ve větším množství, jako tomu bylo například při startu rakety Vega. Nejznámější projekt týkající se pikosatelitů je CubeSat, kde mají pikosatelity tvar krychlíček o hraně 10 cm.

**MIT** – Massachusetts Institute of Technology, prestižní americká univerzita v americkém Cambridge, skládající se z pěti škol a jedné koleje. Založena byla v roce 1861.

**Iontové kapaliny** – rozpuštěné soli, tekuté za pokojových teplot, obvykle s minimální tendencí k odpařování. Bývají dobře vodivé a povrchové napětí mají nižší než voda.

Hroty iontových emitorů pod mikroskopem. Zdroj: MIT.



**MEMS** – mikro-elektro-mechanické systémy, technologie ve výrobě součástek umožňující realizovat kromě vrstevnatých struktur běžných v mikroelektronice také miniaturní, mechanicky se pohybující části. Technologie využívá výrobní procesy používané pro výrobu integrovaných obvodů (fotolitografii, leptání, epitaxi atd.). Systém obsahuje elektronickou část (např. A/D převodník) a mechanické komponenty (např. malý objekt na pružině), které jsou často umístěny na jednom substrátu a uzavřeny v pouzdře, takže se uživateli jeví jako jediná součástka – například akcelerometr, gyroskop, senzor tlaku atd.

## Konstrukce a vlastnosti

Hlavní část motoru, porézní niklová destička spojená s rezervoárem pro iontovou kapalinu, má plochu  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . Do 1 mm tlusté destičky je vyleptáno 480 mikroskopických hrotů, emitorů iontů. Destička je umístěna v křemíkovém pouzdře a uzavřena urychlovacími mřížkami. Celý mikro-elektro-mechanický systém (MEMS) bez palivového rezervoáru má rozměry pouze  $12 \times 12 \times 2 \text{ mm}^3$ . Velikost nádrže na palivo je volitelná v závislosti na požadavcích vesmírné mise. Jednotlivé iontové mikromotory se dají skládat do větších ploch a pohonný tlak, který jsou schopny vytvořit, činí  $0,25$  až  $0,5 \text{ N/m}^2$ . Tah motoru je malý, nicméně motor disponuje velkou účinností, což se projevuje ve velikosti specifického impulzu, který činí  $2\,500 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$ . Oproti chemickým raketám musí iontové motory běžet dlouho, aby významněji přispěly ke zrychlení vesmírného plavidla, zato jsou ale desetkrát efektivnější. Rychlost iontů v ústí trysky se dá vypočítat z Coulombova zákona, v ideálním případě podle rovnice

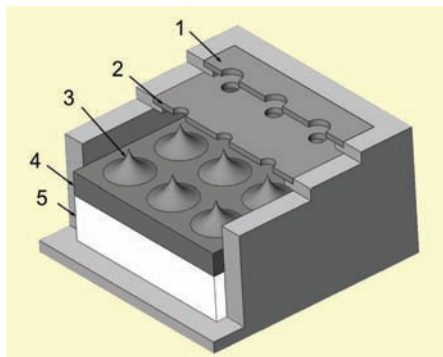
$$v = (2 QU/m)^{1/2}.$$

Tato rychlost rozhoduje o tom, jaká hybnost se předá vesmírné lodi a závisí hlavně na rozdílu potenciálů  $U$  na urychlovacích mřížkách. Toto napětí lze teoreticky zvyšovat na vysoké hodnoty. Naproti tomu maximální teplotu, kterou snese materiál trysky, hlavní omezující faktor chemických motorů, lze zvyšovat jen velmi omezeně. Testovací prototyp iontového motoru PETA (*Precision Electro-spray Thruster Assembly*) zabere přibližně třetinu objemu jednoho modulu platformy CubeSat, včetně 16 mikrotrysek v osmi párech a veškeré elektroniky. Tento pohon je schopen změnit rychlost o  $200 \text{ m/s}$  u satelitu o velikosti třech jednotek CubeSat (o hmotnosti přibližně  $3 \text{ kg}$ ), což je shodou okolností velikost sluneční plachetnice NanoSail-D.

## Úspěchy iontových motorů

Iontové motory mají za sebou velké množství úspěchů. Projekt NASA vyústil k výrobě 30 centimetrů velkého iontového pohonu NSTAR, hlavní pohonné jednotky pro vesmírnou sondu Deep Space 1. Japonská sonda Hyabusa používala iontový motor využívající elektronovou cyklotronní rezonanci k ionizaci paliva. Evropský satelit SMART-1 nesl na palubě Hallův iontový motor. Sonda Dawn používá iontové

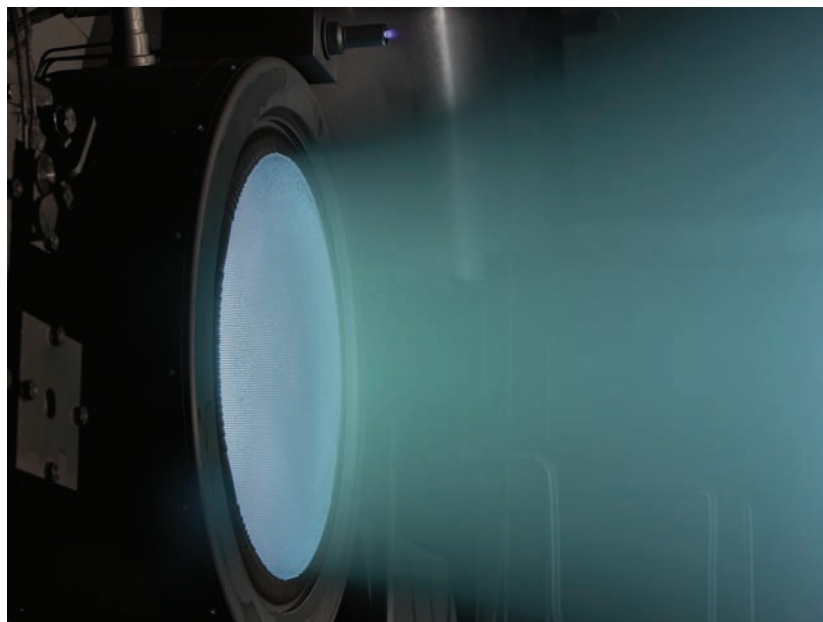
Konstrukce iontového mikromotoru. Na schématu jsou: urychlovací mřížka (1), extrakční mřížka (2), hroty iontových emitorů (3), porézní substrát (4) a palivová nádrž (5). Zdroj: MIT.





motory na bázi NSTAR. V prosinci roku 2012 NASA ohlásila překonání rekordu na poli iontových motorů – iontový motor NEXT byl nepřetržitě provozován 43 000 hodin, spálil při tom 770 kg xenonového paliva, které vytvořilo  $3 \times 10^7$  Ns celkového impulzu pro vesmírnou loď. Tento úspěch potvrzuje možnost použití iontového motoru jako hlavní pohonné jednotky pro dlouhodobé mise. Nový miniaturní iontový pohon nepochybně tyto úspěchy rozšíří.

■ Ondřej Penc, 5. 4. 2013,  
AB 12/2013



*Iontový motor NEXT v provozu. Zdroj: NASA.*

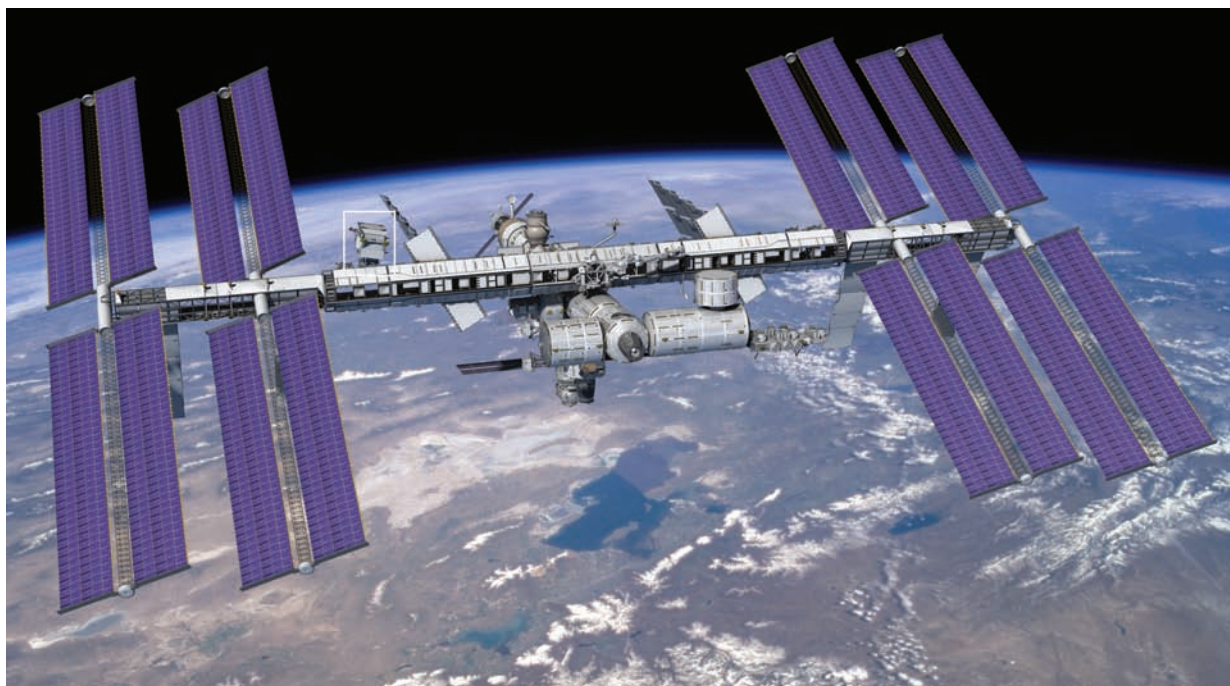


## Výnimočný detektor AMS-02

**ISS** – *International Space Station*, mezinárodní vesmírná stanice. Od roku 1993 je společným projektem americké NASA, Ruska, Kanady, evropských států sdružených v kosmické agentuře ESA a Japonska. První modul byl vynesena v roce 1998, první posádka na stanici byla v roce 2000. ISS je neustále ve stavbě a potýká se s finančními problémy na ruské i americké straně. V roce 2008 byl k ISS připojen Evropský výzkumný modul Columbus. V roce 2011 letěl k ISS poslední raketoplán.

AMS-02 na ramene Medzinárodnej kozmickej stanice.  
Zdroj: NASA

Spektrometer AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer*) je časticový spektrometer určený na precízne meranie zloženia a energií kozmického žiarenia. Je logickým následovníkom predchádzajúcich balónových experimentov (napríklad BESS, CAPRICE) a vesmírnych detektorov ako PAMELA a Fermi, ktoré prekonáva svojimi schopnosťami. Otcom projektu je Samuel Ting, pôvodcom z MIT, nositeľ Nobelovej ceny za fyziku od roku 1976 za objav novej častice  $J/\Psi$ , viazaného stavu charm a anticharm kvarku. Túto cenu zdieľa s Burtonom Richterom zo SLACu, ktorý novú časticu objavil zároveň na druhej strane kontinentu a na inom urýchľovači. Od roku 1995 Samuel Ting stojí v čele projektu AMS, ktorý sa medzičasom stal projektom medzinárodnej kolaborácie 64 inštitútov z 16 krajín. Spektrometer AMS-02 je súčasťou experimentálneho vybavenia Medzinárodnej kozmickej stanice od 19. mája 2011. Za tri roky činnosti detegoval približne 50 miliárd častíc primárneho



kozmickeho žiarenia. Na overenie funkčnosti technológií použitých pri konštrukcii spektrometra bol postavený zmenšený model nazvaný AMS-01, ktorý letel v roku 1998 na palube raketoplánu misie STS-91, pričom 10 dní naberol dáta.

Je to v podstate variácia na princípe veľkých detektorov častíc ako ich poznáme z fyziky vysokých energií. Konštrukciou a fyzikálnym programom je AMS-02 podobný experimentu PAMELA, ktorý dopĺňa a vylepšuje. Spotreba energie 2 až 2,5 kW je príliš veľká na to, aby AMS existoval samostatne ako družica, preto bol z praktických dôvodov nainštalovaný na ISS.

## Fyzikálny program

Fyzikálny program AMS-02 bol plánovaný na 3 roky, pričom na konci mal raketoplán po vyčerpaní zásob supratekutého hélia detektor priviesť späť na Zem. Potom čo NASA rozhodla o uložení raketoplánov k večnému spánku, bol AMS príliš veľký a ťažký (6 700 kg) k transportu na Zem, takže kolaborácia AMS nahradila supravodivý magnet pôvodným nesupravodivým  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  solenoidom z AMS-01, a tak predĺžila životnosť experimentu aspoň na 10 rokov. Fyzikálny program zahŕňa hľadanie antihmoty a temnej hmoty. Zaoberá sa štúdiom kozmickeho žiarenia a hľadaním prejavov exotickéj fyziky.

Z pozorovaní je dnes zrejmé, že blízky viditeľný vesmír je tvorený hmotou, nepozorujeme anihilačné fotóny pochádzajúce z oblasti našej superkopy galaxií a to vylučuje jej prítomnosť v kozmologicke významných množstvách. Toto pozorovanie sa však nedá a priori extrapolovať na celý vesmír a nemôžeme vylúčiť existenciu domén primordiálnej antihmoty. Ak by tieto antihmotné domény existovali, difundovali by z nich antičastice, ktoré by sa časom priblížili do okolia Zeme. Keďže produkcia antihélia alebo ťažších prvkov je zanedbateľná pri interakciách obyčajnej hmoty, pozorovanie jadier antihélia môže priniesť dôkaz existencie antihmotných oblastí vo vesmíre. AMS-02 bude zaujímavé doplnenie experimentov na LHC.

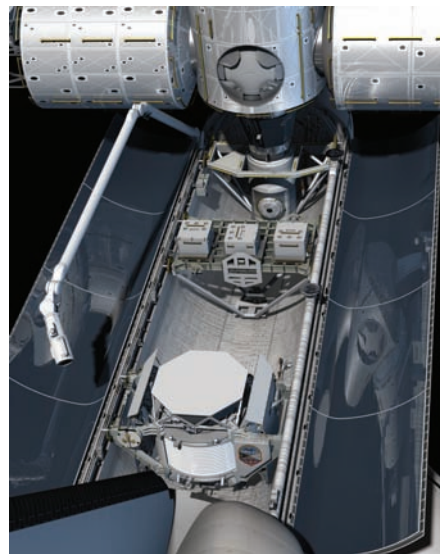
Kozmologické pozorovania sú konzistentné s výskytom temnej hmoty ako hlavnej zložky matérie vo vesmíre. Očakáva sa, že temná hmota je studená a je zložená z WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*). Najlepší kandidát na WIMP je najľahšia supersymetrická častica – LSP, stabilné neutrálino. AMS môže poskytnúť nepriame pozorovania existencie temnej hmoty prostredníctvom anihilácie neutrálin, kde sa

**Antihmota** – látka složená z antičastíc, ktoré majú oproti časticiam opačná znaménka všetkých kvantových nábojů. Atomárne jadra jsou u antihmoty tvořena antiprotony a antineutrony, atomárni obaly jsou složeny z pozitronů.

**Pozitron** – antičastice k elektronu. Teoreticky existenci pozitronu předpověděl Paul Dirac v roce 1928. Experimentálně ho objevil v kosmickém záření Carl Anderson v roce 1932.

**Pulzarová mlhovina** – Pulsar Wind Nebula (PWN) nebo také plerion je mlhovina (odvrhnutá obálka hvězdy), která je buzena intenzivním relativistickým větrem nabitých částic emitovaných pulzarem v centru. Příkladem PWN je Krabí mlhovina. Jsou zdrojem energetických fotonů s energií někdy převyšující desítky GeV.

AMS-02 v nákladovom priestore raketoplánu.  
Zdroj: NASA.

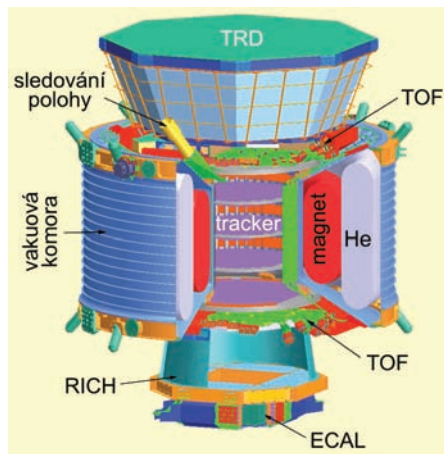


**Geminga** – zkratka z Gemini gamma-ray source. Je to rádiově tichý pulzar v souhvězdí Bliženců, který byl přiřazen ke známému zdroji gama záření.

**LSP** – Lightest Supersymmetric Particle, označení pro nejjednodušší elektricky neutrální supersymetrickou částici, která je stabilní. Je to také horký kandidát na temnou hmotu, kde se označuje WIMP.

**Čerenkovův detektor** – detektor částic využívající kůžele Čerenkovova záření za nabitou částici pohybující se v daném prostředí nadsvětelnou rychlostí. Často se využívá k detekci elektronů nebo mionů v nádrži naplněné vodou. Stěny nádrže jsou pokryty fotonásobiči detekujícími světelný kůžel. Jinou variantou jsou aerogelové Čerenkovovy detektory umístované na sondách. Dalším typem detektoru je speciální pozemský dalekohled, který sleduje Čerenkovovo záření vznikající v atmosféře ze sekundárních spršek kosmického záření.

Schéma uloženia prístrojov v pôvodnej verzii AMS-02.  
Zdroj: CERN.



očakávajú také produkty ako je antiprotón, pozitron, kvantá gama alebo antideuterón. Medzi ďalšími kandidátmi na temnú hmotu sú napríklad Kaluza-Kleinove bozóny, ktoré by sa mali anihilovať najmä na tvrdé pozitrony a elektróny, pričom by mali byť ľahko pozorovateľné.

Najväčší rozdiel v zastúpení prvkov v kozmickom žiarení a v žiarení pochádzajúcom zo slnečnej sústavy je v podiele výskytu ľahkých jadier prvkov typu Li, Be a B. Je to pravdepodobne následok procesu spalácie – fragmentácie ako dôsledku zrážky primárnych ťažkých jadier s medzihviezdny m plynom. Väčšina ľahkých jadier v spektre kozmického žiarenia sú sekundárne častice. Presné meranie ich spektra pomôže porozumieť ich propagácii v Galaxii. Medzi nestabilnými izotopmi prítomnými v kozmickom žiarení má významné postavenie izotop  $^{10}\text{Be}$ , pretože je najľahší a má polčas rozpadu zrovnateľný s dobou udržania častice v magnetickom poli Galaxie. Pomer  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  sa môže využiť na odhad stredného veku žiarenia.

AMS hľadá aj strangelety – hypotetické častice, teda viazané stavy viacerých up, down a strange kvarkov. Ak táto nová forma hmoty existuje, môže byť stabilná a je možné ju pozorovať. Strangelety by mali mať veľkú ťuhovú hmotnosť a malý pomer náboja ku hmotnosti.

AMS študuje procesy tvorby, urýchľovania, propagácie kozmického žiarenia vo vesmíre a jeho interakcie v heliosfére. Očakáva sa, že viac ako 10 rokov aktívnej činnosti a veľká štatistika meraní nám prinesú nové poznatky o tomto fenoméne. Kozmické žiarenie je jednou z prekážiek k letu na Mars s ľudskou posádkou. Väčšina štúdií na nižších energiách sa odohrávala na balónových experimentoch s krátkou dobou merania. Dlhá doba života AMS umožní merania dlhodobých variácií toku v širokom rozmedzí energií.

## Vybavenie detektora

AMS detektor sa skladá z viacerých subdetektorov plniacich rôzne funkcie, ktoré dohromady tvoria funkčný celok schopný merať náboj, smer, energiu, hmotnosť a druh prichádzajúcich častíc v širokom rozmedzí energií zhruba od 500 MeV až po niekoľko TeV s identifikáciou častíc až do protónového čísla 30. Dôležitým parametrom, kde AMS predčí ostatné experimenty, je veľká akceptancia spektrometru, alebo rozmedzie uhlov, v ktorých môžu častice nalietať a byť úspešne identifikované. Poďme sa teraz podrobnejšie zoznámiť s jednotlivými komponentmi detektora AMS-2:



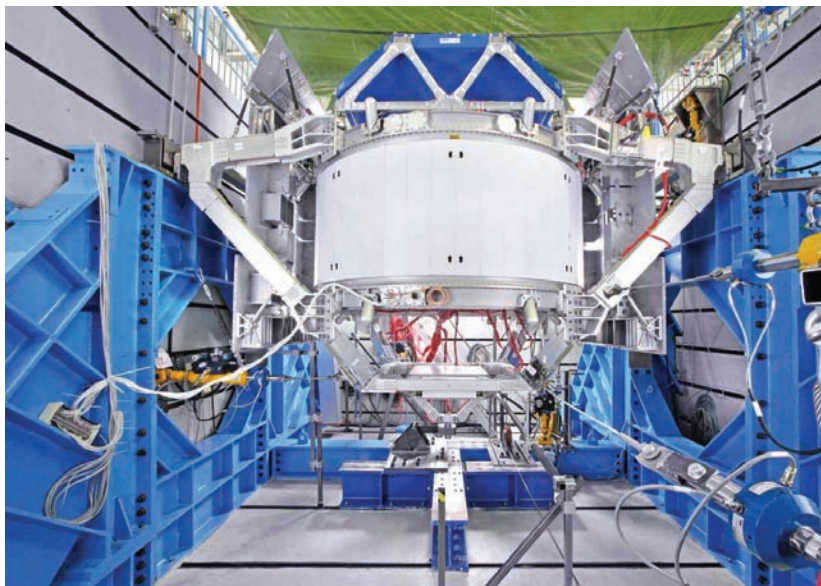
Detektor TRD (*Transition Radiation Detector*) slúži na separáciu ľahkých a ťažkých častíc pri rovnakom odmeranom náboji a hybnosti, konkrétne na rozlišovanie medzi ľahkými elektrónmi, pozitronmi a protónmi. Prechodové žiarenie vzniká pri prechode relativistickej nabitkej častice rozhraním médií s rozdielnou permitivitou, jeho charakteristické spektrum tvoria fotóny s energiou niekoľko keV a jeho intenzita je závislá na relativistickom gama faktore prelietavajúcej častice. Pri rovnakej energii bude mať pozitron podstatne väčší gama faktor a teda vyprodukuje viac fotónov ako protón. Na detekciu röntgenovských fotónov slúži niekoľko tisíc detekčných trubičiek umiestnených v 20 vrstvách, fungujúcich v Geigerovom móde naplnených zmesou Xe/CO<sub>2</sub>. Obdobný detektor funguje aj v experimente ATLAS.

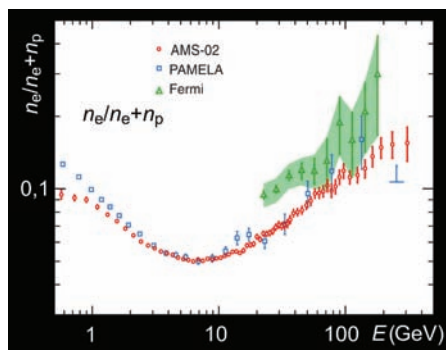
Čítače ToF (*Time-of-Flight Counter*) slúžia ako spúšťač experimentu a zároveň fungujú ako hodoskop (meranie rýchlosti častíc pomocou časových intervalov príchodu signálu) a taktiež ako diskriminátor smeru letu častice (zdola nahor a naopak). Dohromady ich tvoria 4 vrstvy scintilátorov zoskupených v 2 mechanických štruktúrach – horný a dolný ToF. Anti-koincidenčné scintilátory sú rozmiestnené okolo kremíkového detektoru dráh vo vnútri a vetujú častice letiace šikmo na os prístroja alebo zo strany.

Čerenkovov detektor RICH (*Ring Imaging Cherenkov detector*) je navrhnutý na separovanie nabitých izotopov kozmického žiarenia pomocou merania rýchlosti častíc s vysokou presnosťou. Detektor pozostáva z dvojitého dielektrického radiátoru (aerogel a NaF), v ktorom nastáva emisia kužeľa Čerenkovovho svetla pri prelete nabitkej častice s rýchlosťou prevyšujúcu fázovú rýchlosť svetla v materiáli. Emitované fotóny sú detegované maticou foto násobičov. Otvárací uhol kužeľa svetla priamo udáva rýchlosť častice. Počet Čerenkovových fotónov je úmerný náboju častice.

**Magnetosféra** – oblasť magnetického vlivu planety alebo iného nebeského telesa. U našej Zeme je dipólové magnetické pole vytvárené v jadre elektrickými prúdmi o rádovej hodnote 10<sup>9</sup> A. Toto pole je deformované interakciou so slnečným vetrom do charakteristického tvaru – magnetosféry Zeme. Magnetosféry planet sú prirozeným ochranným štítom pred nabitými časticami slnečného vetru.

Testovanie magnetov v AMS-02.  
 Zdroj: Prezentácia S. Tinga.





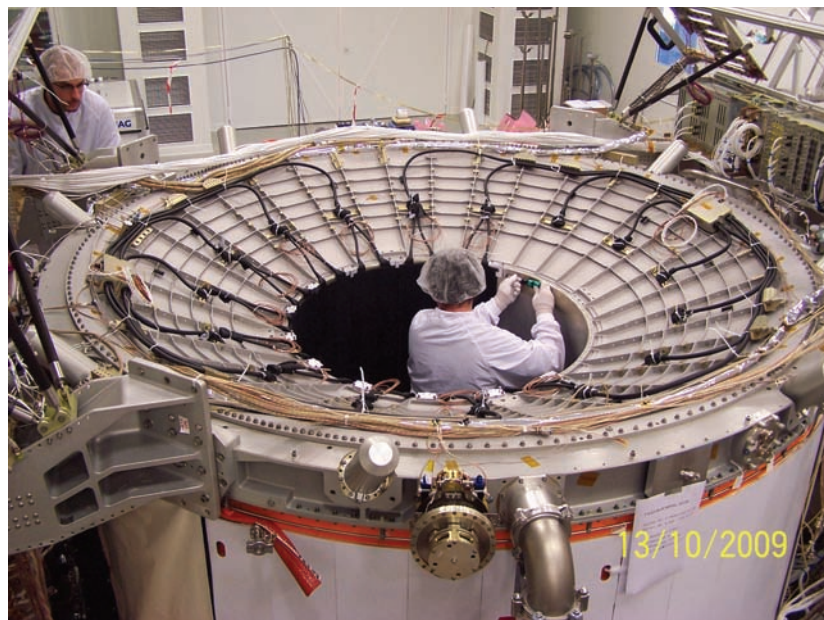
Pomer pozitronov ( $e^+/(e^++e^-)$ ) v kozmickom žiarení ako funkcia energie. Na obrázku sú tiež zobrazené výsledky experimentov PAMELA a Fermi-LAT. Zdroj: O. Aguilar et al., PRL 110 141102 (2013).

Kremíkový tracker STD meria polohu a zakrivenie dráh nabitých častíc v magnetickom poli permanentného magnetu. STD má 8 vrstiev obojstranných mikrostripových detektorov, ktoré umožňujú presné meranie polohy zásahov a následnú rekonštrukciu dráhy. Zakrivenie dráhy určuje hybnosť, smer vychýlenia dráhy zase náboj. STD môže tiež detegovať gama fotóny prostredníctvom ich konverzie na pár opačne nabitých stôp  $e^+e^-$ .

K deštruktívnemu meraniu energie častíc (najmä  $e^+$  a  $e^-$ ) slúži elektromagnetický kalorimeter ECAL zložený z vrstiev scintilačných vlákien a olova ako radiátoru. Častica prechádzajúca hustým oloveným radiátorom vyprodukuje spfšku sekundárnych častíc, kde veľkosť spfšky a deponovaná energia v scintilačných vláknach sú úmerné energii primárnej častice. Vlákna sú usporiadané striedavo vo vrstvách, ktoré sú navzájom kolmé a dávajú aspoň čiastočnú informáciu o 3D tvare spfšky. Kalorimeter tiež slúži ako fotónový spfšťač.

### Prvé výsledky – antihmota

Z prípravy detektoru AMS-02. Zdroj: Prezentácia S. Tinga.



Antihmota nie je bežná komodita vo vesmíre; tá, ktorá vznikla počas Veľkého tresku, sa už dávno anihilovala. Jediné známe zdroje antihmoty v súčasnom vesmíre sú zrážky častíc s vysokou energiou a  $\beta^+$  rozpad. Dlho očakávaný výsledok merania energetického spektra pozitronov v kozmickom žiarení priniesol zatiaľ najpresnejšie merania a potvrdil výsledky predchádzajúcich experimentov – prebytok pozitronov s vysokou energiou, ktorých zdroj je zatiaľ neznámy.

Medzi kľúčovými meraniami, ktoré sa od AMS-02 očakávali, bolo zmeranie pomeru pozitronov  $e^+/(e^++e^-)$  v kozmickom žiarení. Podľa predpovedí klasickej astrofyziky, ktorá zahŕňa „obyčajné“ procesy tvorby pozitronov (supernovy, interakcie kozmického žiare-

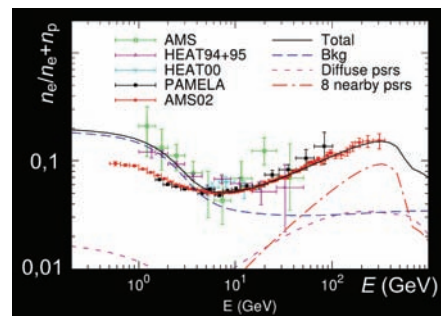
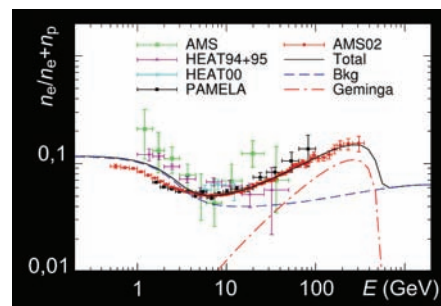
nia), by mal tento pomer klesať s narastajúcou energiou častíc. Detektor AMS-02 meral tok pozitronov v energetickom rozsahu 500 MeV až 350 GeV a do apríla 2013 detegoval celkovo 6,8 milión pozitronov. Dňa 3. apríla 2013 kolaborácia AMS verejne prezentovala výsledky merania, v ktorých bol zmeraný nárast tohto pomeru z asi 5 % pri energiách 10 GeV na približne 15 % pri energiách 350 GeV. Bola tiež odmeraná izotropia tohto pomeru a je teda s veľkou pravdepodobnosťou izotropný.

Tento prebytok pozitronov definitívne potvrdzuje predchádzajúce výsledky experimentov PAMELA a Fermi-LAT (bývalý GLAST). Merania vykonané na experimente PAMELA však boli spochybňované, pretože nebol vybavený detektorom umožňujúcim dostatočne presnú separáciu protónov a pozitronov (majú rovnaký náboj +1) a existovala možnosť, že niektoré protóny boli chybné označené ako pozitrony (zhruba  $10^{-4}$  zo všetkých prípadov a najviac práve v oblasti vyšších energií). Výsledky meraní detektoru Fermi-LAT trpeli systematickou chybou, pretože bol primárne skonštruovaný na pozorovanie vysokoenergetických fotónov. Tie sú neutrálne častice a detektor nebol vybavený na určenie náboja častíc; na tento účel využíval zakrivenie dráhy častíc v zemskej magnetosfére.

## Prebytok pozitronov

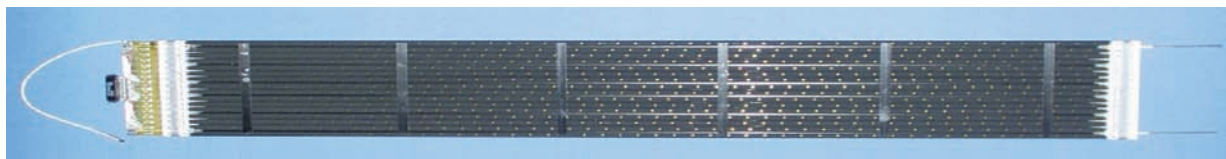
Klasické modely predpovedajú klesajúce spektrum energie pozitronov. Očakávalo sa, že pozitrony vznikajú ako sekundárne produkty pri zrážkach hadrónovej komponenty kozmického žiarenia s medzihviezdny plyn (reakcia  $p+p$ ,  $p+He$ ,  $He+He \rightarrow e^+e^-$ ). Experimenty vykonávané od konca 70-tych rokov ukazujú na možný nárast spektra pre vyššie energie, tieto merania však ani zďaleka nedosahovali presnosť dnešných experimentov. V súčasnosti existujú dve predpovede na relevantné procesy, ktoré by mohli byť za prebytok zodpovedné.

Prvým sú procesy v okolí pulzarov, ako napríklad Geminga a PWN. Okolo týchto pulzarov sú známe zdroje vysokoenergetických fotónov

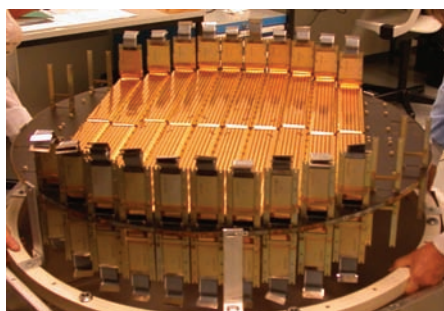


Namerané spektrum z AMS-02 a predchádzajúcich experimentov je porovnané s teoretickou predpoveďou pre pulzarovú hypotézu pôvodu excusu pozitronov. Hore: Predpoveď pre jediný pulzar (Geminga). Červenou bodkočiarkovanou čiarou je znázornené vypočítané energetické spektrum žiarenia z pulzara Geminga. Dole: Výpočet spektra pre známe blízke pulzary a difúzne pozadie vzdialených pulzarov. Zdroj: O. Aguilar et al., PRL 110 141102 (2013).

Detektor TRD slúži na separáciu ľahkých a ťažkých častíc. Zdroj: Prezentácia S. Tinga.







Kremíkový detektor dráh STD. Zdroj: CERN.

Príprava detektora AMS-2 v stredisku CERN.  
Zdroj: AGA, 2009.



s energiou až 20 TeV. Geminga je tretí najintenzívnejší zdroj gama žiarenia na oblohe, je to pozostatok supernovy, ktorá explodovala pred asi 370 000 rokmi a je vzdialený približne 250 parsekov od Slnka. Produkcia pozitronov pri energetických procesoch v okolí pulzarov môže byť prirodzeným vysvetlením excusu pozitronov nameraného pomocou AMS-02 a predchádzajúcimi experimentmi. Ak však prijme túto hypotézu, niekoľko najbližších pulzarov bude zodpovedných za väčšinu pozitronov, ktoré pozorujeme, a preto by sme mali namerať aspoň malú anizotropiu.

Ďalšia možnosť, uprednostňovaná otcom AMS-02 Samuelom C. C. Tingom je, že tieto prebytočné pozitrony pochádzajú z interakcií temnej hmoty, presnejšie z jej anihilácie v SUSY interpretácii, pri ktorej LSP neutralino, najľahšia supersymetrická častica, anihiluje sama so sebou a vytvorí pár fotónov, leptónov (elektróny, mióny alebo tau) alebo bozónov slabej interakcie. Mióny a tau leptóny sú nestabilné a časom sa rozpadnú okrem iného na  $e^+/e^-$ , podobne je to aj u slabých bozónov.

Toto vysvetlenie je však spochybňované z viacerých dôvodov: Experimenty na urýchľovači LHC nenašli zatiaľ ani náznak existencie supersymetrie. Ak by existovali LSP a prebytočné pozitrony by vznikli z ich anihilácie, v spektre by mala byť pozorovateľná hrana viac či menej ostrá (závisí od hmotnosti neutralín), ktorá pre vyššie energie splynie s pozadím. Ďalšia výhrada spočíva v tvrdení, že ak pozorujeme anihiláciu v kanáli s konečnými stavmi elektrón a pozitron, mali by sme pozorovať aj iné anihilačné kanály, najpravdepodobnejšie s konečným stavom protón-anti-protón. Tento kanál je dobre pozorovateľný, ale nebol tu pozorovaný výrazný prebytok antiprotónov.

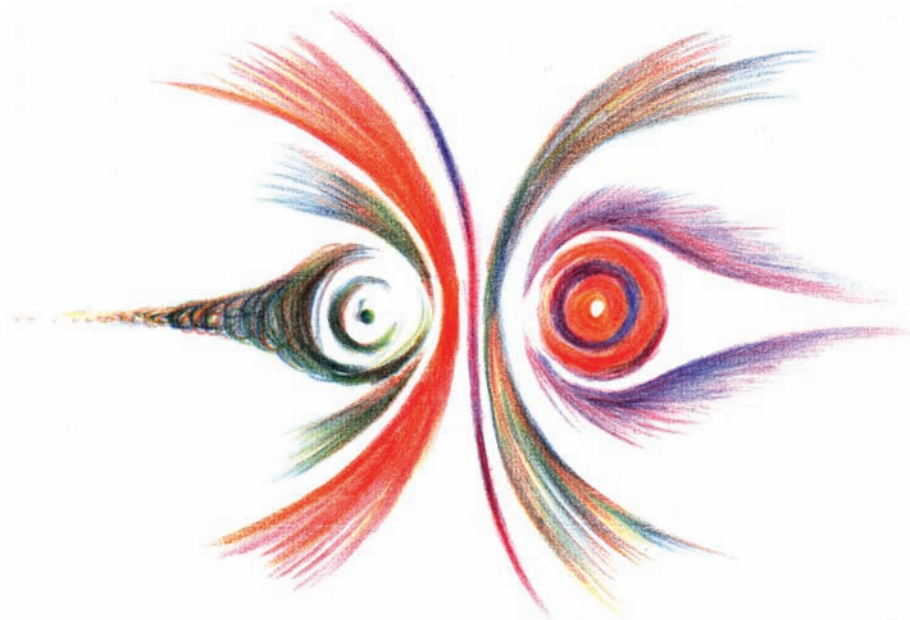
Oba modely, pulzarový a rovnako aj anihilácia temnej hmoty, sú schopné popísať namerané dáta. Pulzarové modely majú „to



správné“ vypočítané energetické spektrum. Stále však máme medzery v znalostiach urýchľovacích mechanizmov nabitých častíc u pulzarov, a práve detaily v nameranom energetickom spektre by mohli naznačiť vhodný smer.

Modely anihilácie temnej hmoty taktiež dobre popisujú namerané dáta vďaka správne nastaveniu parametrov modelu, avšak vyžadujú existenciu hypotetických častíc, ktoré sú predpovedané supersymetrickými teóriami. Posledné výsledky z LHC pre supersymetriu (SUSY) nevyzerajú pozitívne a ak SUSY naozaj existuje, jej častice budú mať väčšiu hmotnosť, než sa zatiaľ v teóriách predpokladalo. Dochádza k synergickému efektu medzi vesmírnymi experimentami ako je AMS-02 a pozemskými (LHC), navzájom sa dopĺňajú v hľadaní novej fyziky za Štandardným Modelom. AMS-02 pokračuje v meraní a v blízkej budúcnosti za pomoci väčšej akumulovanej štatistiky bude dosiahnutá ešte väčšia presnosť merania a pokrytie spektra do vysokých energií, čo môže priniesť rozuzlenie záhady prebytku pozitronov.

■ Michal Marčišovský, 19. 4. 2013, AB 14/2013



## Tevatrón predal štafetu do Európy

**Kolider** – urychlovač, ve ktorém jsou dva urychlené svazky částic nasměrovány proti sobě. Jiným užívaným systémem je namíření svazku na nepohyblivý terč.

**Fermilab** – komplex urychlovačů ve Spojených státech, ve státě Illinois. Fermilab byl založen v roce 1967, prvním ředitelem se stal Robert Wilson, vynálezce mlžné komory. V roce 2011 zde byl ukončen provoz druhého největšího urychlovače světa – Tevatronu. K nejvýznamnějším objevům patří objev kvarku „b“ (1977), kvarku „t“ (1995) a tau neutrina (2000). Fermilab se zabýval výzkumem „b“ a „t“ kvarku, výrobou a výzkumem antineutrin, narušením CP symetrie, zkoumáním platnosti CPT symetrie a výzkumem řady dalších vlastností hmoty a antihmoty za vysokých energií.

Pohľad na Hlavný injektor (vpredú) a Tevatron (vzadu).  
Zdroj: Fermilab.



Úrychľovač Tevatrón v Laboratóriu Fermilab (Batavia, Illinois) bol mnoho rokov najvýkonnejším koliderom na svete, avšak s nástupom LHC boli jeho dni spočítané a koncom septembra 2011 ukončil svoj fyzikálny program. Jeho výsledky sa zapísali do dejín fyziky ako u žiadneho urychľovača pred ním. Tevatrón sa dožil úctyhodných 25 rokov od prvých zrážok a predal štafetu do Európy.

### História

V roku 1979 americké ministerstvo energetiky (*Department of Energy*) autorizovalo stavbu supravodivého urychľovača v laboratóriu Fermilab. Stavba pokračovala rýchlo a už v marci 1983 prebehla inštalácia posledného zo 774 supravodivých magnetov a len štyri mesiace na to Tevatrón (názov dostal podľa nominálnej energie zrážok rádovo TeV, ako je americkým zvykom) dosiahol svetový rekord v energii urychlených častíc – 512 GeV za mohutných protestov prorokov apokalypsy predpovedajúcich koniec sveta. Vo svojich počiatkoch fungoval ako urychľovač pre experimenty s pevným terčom, dokončením inštalácie aparatury na výrobu antiprotonov (1985) sa z neho stal proton-antiprotonový kolider. Vtedy dosiahol ťažiskovú energiu zrážky 1 600 GeV a mal jediný detektor, CDF (*Collider Detector at Fermilab*).

Trvalo dlhých 7 rokov, kým sa nazbierali operačné skúsenosti a optimalizovali parametre zväzku. V roku 1992 bol nainštalovaný ďalší detektor D0 a začal sa fyzikálny program prvého štádia (*Run I*) s ťažiskovou energiou zrážky 1 800 GeV. Prvá fyzikálna kampaň prebiehala do roku 1996 a počas následnej odstávky trvajúcej

5 rokov sa vylepšil nielen Tevatrón (vyššia energia a intenzita zväzku), ale aj jeho predurýchľovacie stupne (bol pridaný injektor a recyklátor). Počas odstávky sa podstatne modernizovali detektory a v roku 2001 sa začala nová fyzikálna kampaň *Run II* so zvýšenou ťažiskovou energiou zrážok 1 960 GeV.

## Urýchľovanie na Tevatróne

Schéma urýchľovacieho komplexu je podobná urýchľovačom v CER-Ne. Urýchľovací komplex umožňuje pestrý fyzikálny program počínajúc neutrínovými zväzkami generovanými protónmi s energiou 8 až 120 GeV, cez zmes experimentov s pevným terčom, a samozrejme vlajkovou loďou Tevatrónom.

Na rozdiel od LHC, kde sa zrážajú protóny s protónmi, sa v Tevatróne zrážali protóny s antiprotónmi, čo prinieslo výhodu potreby iba jednej evakuovanej zväzkovej trubice a jedného magnetického systému pre zväzky. Pre oddelenie dráh zhlukov s rôznym nábojom mimo interakčné miesto slúžili elektrostatické separátory.

Protóny začínali svoju púť v Cockroft-Waltonovom urýchľovači, kde dosahovali energiu 750 keV, odtiaľ putovali do Linacu, ktorý ich urýchlil na 400 MeV. Protóny s energiou 8 GeV z Boosteru boli injektované do Hlavného injektora (*Main Injector*), kde sa urýchlili na energiu 120 GeV pre experimenty s pevným terčom a 150 GeV pre injekciu do Tevatrónu. Injektor má obvod 3 300 m a je to synchrotrón so silnou fokusáciou pomocou FODO (*Focusing-0-Defocusing-0*) mriežky. Po ukončení činnosti Tevatrónu sa využíva hlavne na produkciu neutrínových zväzkov.

Antiprotónový zdroj má 3 hlavné časti: terč, odzhlukovač (*debuncher*) a akumulátor. Antiprotóny sa vyrábajú nárazom protónových zväzkov z injektora s energiou 120 GeV na terč, spŕška vygenerovaných nabitých sekundárnych častíc sa fokusuje magnetickou optikou a častice vybrané magnetickým spektrometrom s energiou zhruba 8 GeV sa privedú do odzhlukovača, kde sa zväzok pripraví na akumuláciu. Cestu prežijú iba antiprotóny. Ich výroba je časovo a energeticky náročná, preto je nutný akumulčný prstenec, kde sa pripraví dostatočné množstvo antiprotónov na naplnenie Tevatrónu.

V akumulátore sa využíva mechanizmus stochastického chladenia zväzkov na úpravu spektra hybností a dráh (zmenšenie fázového priestoru orbitujúcich častíc – emitancie zväzku), podobne ako na

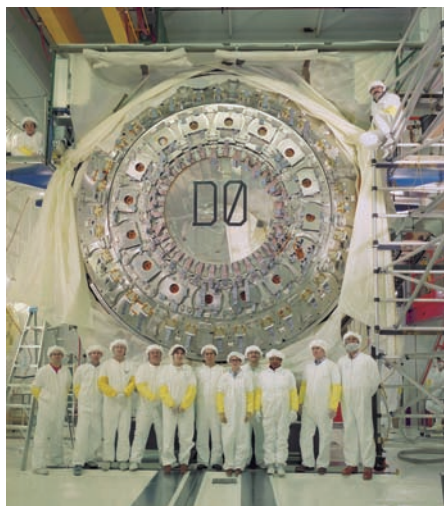
**Proton** – častice složená ze troch kvarků (duo) se spinem 1/2, hmotností  $1,673 \times 10^{-27}$  kg (938 MeV) a elektrickým nábojem  $+1,6 \times 10^{-19}$  C. Proton je na běžných časových škálách stabilní, pokud se rozpadá, je poločas rozpadu větší než  $10^{35}$  let. Za objevitele protonu je považován Ernest Rutherford, který v roce 1911 objevil atomové jádro při analýze rozptylu částice alfa pronikající tenkou zlatou fólií. Samotná jádra vodíku (protony) detekoval v roce 1918 při ostřelování dusíku částicemi alfa. Antiproton byl objeven v roce 1955 Emilio Segrém a Owenem Chamberlainem.

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

Hlavná budova Fermilabu postavená v rokoch 1971 až 1974. Zdroj: Fermilab.

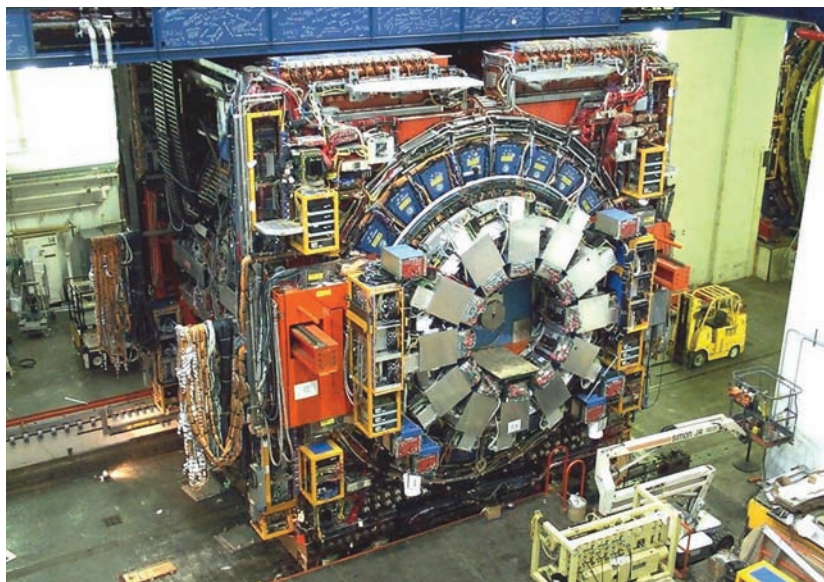






Detektor D0. Zdroj: Fermilab.

Detektor CDF počas Run 2. Zdroj: Fermilab.



kolideri SpS (predchodca SPS). Recyklátor je väčší ako akumulátor a nachádza sa v tuneli s injektorom. Bol postavený pri modernizácii na *Run II*. Využíva permanentné magnety a jeho účel je akumulácia asi  $450 \times 10^{10}$  antiprotónov. Túto hodnotu dosiahol asi po 12 hodinách akumulácie. V roku 2005 bol vylepšený pridaním systému na elektrónové chladenie antiprotónov, ktoré ďalej znižovalo emitanciu zväzku a umožnilo tak zvýšiť jeho intenzitu.

Častice boli na stabilných dráhach udržiavané magnetickým poľom Nb-Ti supravodiča chladeného tekutým héliom. Intenzita protónových zhlukov bola asi  $3 \times 10^{11}$  protónov, intenzita antiprotónových zhlukov o rád menšia. Zväzky mali konfiguráciu 36 zhlukov protónov a 36 zhlukov antiprotónov obiehajúcich v protismere a zrážajúcich sa v miestach D0 a B0 prstenca, kde sú umiestnené detektory D0 a CDF. Energia častíc v zhluku bola 980 GeV a energia zrážky teda 1 960 GeV.

Tevatrón mal dva hlavné experimenty: CDF a D0 (pomenovaný podľa interakčného miesta na urýchľovači). Tieto detektory sa vzájomne dopĺňali a zároveň overovali namerané výsledky. Posledných niekoľko rokov Tevatrón bojoval o znižujúce sa zdroje financovania kvôli vznikajúcej a neporaziteľnej konkurencii, ktorou bol urýchľovač LHC. Dňa 30. 9. 2011 prebehli posledné zrážky. Nazbierané dáta z detektorov sa však budú ešte niekoľko rokov analyzovať a výsledky sa dopĺňajú s experimentami na LHC.

### Význačné objavy

V roku 2000 experiment DONUT (*Direct Observation of the Nu Tau*) publikoval objav tau neutrína, posledného objaveného leptónu. Neutrína boli pozorované v rozpade  $D_s$  mezónov (obsahujúce  $c$  a  $s$  kvark a antikvark), ktoré sa produkovali pomocou zväzku v Tevatróne s energiou 800 GeV (*Run I*) dopadajúceho na terčik.

Najznámejším objavom bol v roku 1995 top kvark. Jeho existen-



cia bola predpovedaná spolu s  $b$  kvarkom v roku 1973 Kobayashim a Maskawou ako tretia generácia kvarkov. Top kvark je výnimočný medzi ostatnými kvarkami, pretože je to najťažšia doteraz známa častica štandardného modelu s hmotnosťou  $172,9 \pm 1,5$  GeV a žije asi iba  $5 \times 10^{-25}$  s, čo je príliš krátka doba, než aby zapôsobila silná interakcia a vytvoril sa hadrón. Rozpadá sa skoro vždy pomocou slabej interakcie na  $b$  kvark. Pretože sa stihne rozpadnúť skôr než zhadronizuje, tak predstavuje zaujímavé laboratórium na skúmanie vlastností nahých kvarkov.

K ďalším objavom patrí: objav  $B_c$  mezónu (1998), pozorovanie priameho narušenia CP symetrie u rozpadov neutrálnych kaónov (1999), objav oscilácie  $B_s$  mezónov, analogický osciláciám neutrálnych kaónov (2006), objav  $\Sigma_b$  baryónu (2006), objav  $\Xi_b$  baryónu (2007), objav  $\Omega_b$  baryónu (2009) a objav  $X_b$  baryónu (2011).

Experimenty D0 a CDF tiež spresnili mnoho predchádzajúcich meraní, ktoré merali vlastnosti už známych častíc štandardného modelu. Z nepriamych meraní bola vymedzená oblasť hmotností, kde sa môže nachádzať Higgsov bozón. Skončením éry Tevatrónu sa skúmanie hraníc poznania presunulo do Európy, americký program výskumu elementárnych častíc sa preorientuje na výskum vzácných interakcií známych častíc, najmä neutrín. Do roku 2014 majú vzniknúť nové neutrínové experimenty NOvA a MicroBooNE. V budúcnosti sa plánuje vo Fermilabe spolupráca na výstavbe a prevádzke ILC – medzinárodného lineárneho kolideru v Japonsku a výstavba vlastného miónového kolideru na pôde Fermilabu.

■ Michal Marčíšovský,  
28. 10. 2011, AB 41/2011



Tunel Tevatrónu. Zdroj: Fermilab.

**Neutrino elektronové** – častice 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 W. 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 v roce 1956 v jaderné elektrárně Savannah River v Jižní Karolině (F. Reines, L. Cowan).

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

## Obří ledová kostka v Antarktidě chytá neutrina

**Fotonásobič** – často označován jako PMT (PhotoMultiplier Tube), vakuová fotocitlivá součástka využívající zesilovacího efektu prostřednictvím sekundární emise na systému elektrod. První proud, iniciovaný dopadem světla na světlocitlivou vrstvu, fotokatodu, je tak mnohonásobně zesílen. Napětí mezi elektrodami je několik set voltů a je nastaveno tak, aby koeficient sekundární emise při dopadu elektronu na její povrch byl kladný. Fotonásobiče pracují v impulzním režimu.

Hluboko v antarktickém ledu, v blízkosti Amundsenovy-Scottovy základny, vyrostl na konci roku 2010 nový detektor neutrin obřích rozměrů s názvem ICECUBE (ledová krychle, kostka, ve skutečnosti hranol). V kilometru krychlovém ledu je zamrzlých 5 160 fotonásobičů, které detekují Čerenkovovo záření nabitých částic vznikajících interakcí neutrin s atomovými jádry v molekulách ledu. Nový detektor nevyrostl na „zelené louce“. Vznikl zvětšením předchozího detektoru AMANDA a umožní další rozvoj neutrinové astronomie. Pojdme se seznámit s tímto výjimečným přístrojem.

### Troška historie

Při experimentech s beta rozpadem neutronu bylo již ve 30. letech zřejmé, že kromě protonu a neutronu musí vznikat ještě nějaká malá neutrální částice. Celková energie vzniklého protonu a elektronu totiž nedávala původní energii neutronu. Stejně tak tomu bylo s hybností. Existenci nové částice navrhl Wolfgang Pauli v roce 1931 a Enrico Fermi ji pojmenoval *neutrino* (v italštině „malý neutron“). Hledaná částice byla objevena až po čtvrt století v roce 1956 v americké jaderné elektrárně v Savannah River. Klíčový objev učinili Frederick Reines a Clyde Cowan v toku částic z reaktoru P-105.

Neutrino interagují jen slabou interakcí, látka je pro ně průhledná a tak jsou těžko polapitelná. Prolétnou bez problémů i celou Zemí nebo Sluncem. Právě proto jsou pro astronomy cenným zdrojem informací například o nitru hvězd, kde vznikají při termojaderné syntéze. Nejběžnějším typem neutrin jsou tzv. sluneční neutrina, která vznikají v nitru Slunce. Každým centimetrem čtverečním naší pokožky namířené kolmo na Slunce jich prolétnou za každou sekundu 60 miliard. Další neutrina vznikají při interakci kosmického záření s horními vrstvami atmosféry, říkáme jim atmosférická neutrina. Neutrino vznikají také při explozích supernov, v nitru Země při přirozeném radioaktivním rozpadu hornin, v našich jaderných reaktorech i v dalších zdrojích. Kolem jedné sekundy života vesmíru se z vesmírné pralátky oddělila tzv. *reliktní neutrina*, která v sobě nesou informaci o velmi raném vesmíru. Možná se v budoucnosti naučíme sledovat i tato neutrina.

Budova s reaktorem P-105 jaderné elektrárny v Savannah River, ve které bylo objeveno v roce 1956 neutrimo. Dobová fotografie neznámého autora.



První soustavný výzkum neutrin prováděl Raymond Davis v Jižní Dakotě ve starém zlatém dole Homestake v letech 1967 až 1993. Šlo o chlórový detektor naplněný 615 tunami tetrachloretylenu. Jádra chlóru se při náhodné interakci se slunečním neutrinem změnila na radioaktivní jádra argonu, která jsou snadno detekovatelná. Počet zachycených slunečních neutrin odpovídal zhruba třetině teoretické hodnoty. Dnes víme, že je to způsobeno tzv. oscilacemi neutrin. Neutrino totiž existují ve třech provedeních, tzv. generacích. Neutrino se za letu přeměňuje z jedné generace na druhou. Davisovy experimenty byly citlivé jen na jeden druh neutrin, proto objevily přibližně třetinový tok neutrin oproti teorii. První objevená neutrino z roku 1956 byla tzv. elektronová neutrino. Mionová neutrino objevili Leon Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger v roce 1962 na urychlovači v Brookhavenu (Long Island, USA). Tauonová neutrino byla objevena v laboratoři Fermilab v roce 1999 v experimentu DONUT. Existence oscilací neutrin (mezi elektronovým a mionovým) byla potvrzena na detektoru Super-Kamiokande v roce 1998 a nezávisle potvrzena na Sudburské neutrinové observatoři. Oscilace na tauonové neutrino byla prokázána v roce 2010 na detektoru OPERA v italském Gran Sasso. Poznamenejme, že oscilace neutrin jsou možné jen při nenulové klidové hmotnosti neutrin. Hmotnosti jednotlivých neutrin dosud přesně neznáme.

### Princip ledové kostky

Neutrino s vysokou energií, která k nám přilétají z hlubin vesmíru, ve většině případů bez problémů proletí dokonale čistým antarktickým ledem. Jen málokterá z nich zachytí atomová jádra ledu. Pokud se tak stane, z místa interakce vyhlédne s vysokou rychlostí elektron nebo mion. Tyto nabitě částice se v ledu pohybují rychleji než světlo a zanechávají za sebou charakteristický kužel elektromagnetického

**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.

**Čerenkovovo záření** – kužel elektromagnetického záření v podobě rázové vlny, který vzniká za nabitou částicí pohybující se nadsvětelnou rychlostí v daném prostředí.

Detektor Opera pod horou Gran Sasso, na kterém byla v roce 2010 prokázána oscilace na tauonové neutrino. Zdroj: Expedice Aldebaranu.





záření, tzv. Čerenkovovo záření. Pokud je v ledu rozmístěn dostatečný počet detektorů elektromagnetického záření, je možné zrekonstruovat tvar kuželu tohoto záření a určit, který druh neutrin ho způsobil a z jakého směru neutrino přilétlo. Od poloviny minulého století bylo jasné, že přesné určení parametrů dopadajícího neutrina potřebuje detektor velmi velkých rozměrů. Proto byl v roce 2000 uveden do provozu malý prototyp detektoru tohoto typu s názvem AMANDA (*Antarctic Muon and Neutrino Detector Array*), který pracoval do roku 2009. Na 19 strunách bylo v ledu umístěno celkem 677 fotonásobičů. Současný

Otvor pro detektory vrtaný v antarktickém ledu do hloubky téměř 3 km. Zdroj: University of Wisconsin.





detektor IceCube vznikl výrazným rozšířením detektoru AMANDA. Ledovou krychli tvoří 86 strun, na každé je zavěšeno 60 detektorů (celkem 5 160), celkový objem zaujímaný detektory je 1 kilometr krychlový.

Prvním krokem je vyvrtání otvoru do antarktického ledu. Otvor hloubí speciální vrtná souprava za pomoci horkovodního vrtáku. Do vrtu je vháněna horká voda, která udržuje vrtnou hlavici na teplotě 66 až 85 °C. Voda je přiváděna speciální vysokotlakou hadicí s vnitřním průměrem 10 cm a vnějším 15 cm. Hadice je dlouhá 2 700 metrů a tlak v ní je 6,89 MPa. Jeden vrt má průměr cca 50 cm a sahá do hloubky 2 500 metrů. Vrtání trvá 27 hodin. Po vyvrtání otvoru se do vrtu zavěsí struna, která je osazena 60 detektory rozmístěnými v hloubce mezi 1 450 a 2 450 metrů pod povrchem ledu. Vrt se nakonec zalije a nechá zamrznout.

Na každé struně je zavěšeno 60 detektorů DOM (*Digital Optical Module*) s rozestupy 17 metrů (v dolní části vnitřního detektoru jsou na šesti strunách rozestupy jen 7 metrů). Struna je tvořena napájecím kabelem a balíkem 30 dvojic kroucených kabelů, každá dvojice je přivedena ke dvěma detektorům DOM. Detektor DOM je zcela samostatnou jednotkou tvaru koule o průměru 35 cm, která je schopná vydržet tlak až 70 MPa. Vnitřek koule je naplněn dusíkem o tlaku 0,5 atmosféry. Základním prvkem detektoru je fotonásobič o průměru 25 cm. Je zde ale i zdroj vysokého napětí pro fotonásobič, který transformuje nízké napětí přiváděné kabelem na 1 300 až 1 500 V. Další součástí detektoru je LED dioda využívaná pro kalibraci fotonásobiče.

## Závěr

Ledová kostka IceCube je navržena tak, aby zachytávala všechny generace neutrin s energiemi nad 100 GeV. Detektor pracuje zejména v oblasti stovek TeV, která je nedosažitelná konvenčními urychlovači. Mion s energií 100 TeV vytvoří například kužel záření o průměru 130 metrů. Pro záchyt vysoce energetických částic je proto zapotřebí mimořádně rozsáhlého detektoru, jakým je IceCube. Malá vnitřní část detektoru je schopná zachytit i neutrina s nízkými energiemi kolem 10 GeV. Neutrina s velmi vysokou energií přicházejí s kosmickým zářením. Detektor IceCube zkoumá mechanismy urychlení kosmického záření v různých oblastech energií a hledá směry, ze kterých kosmické záření přichází. Druhým významným úkolem je záchyt neutrin, která

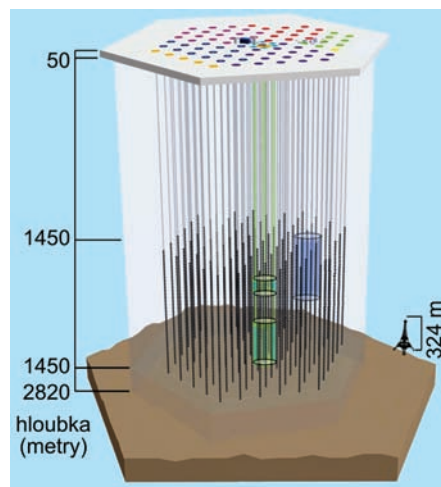


Schéma ledové kostky. Struny jsou osazeny detektory. Modrým válcem je označen předchodí detektor AMANDA. Zeleným válcem je označeno 6 strun vnitřního detektoru, který slouží k záchytu neutrin s nízkou energií. Celkový počet strun je 86, objem 1 km<sup>3</sup>. Pro představu je ukázána výška známé Eiffelovy věže. Zdroj: IceCube.

Digitální optický modul DOM. Ve spodní polokouli je umístěn fotonásobič, v horní zdroj a kalibrační LED dioda. Zdroj: IceCube.





V levé části je patrná vrtná věž napájená horkou vodou z ohřivačů (uprostřed). Mezi ohřivači a vrtnou soupravou leží vysokotlaká hadice o průměru 15 cm. Budova napravo je Scottova-Amundsenova základna s Jižním polárním dalekohledem a přístrojem BICEP 2, který hledá v polarizaci reliktního záření stopy po reliktních gravitačních vlnách. Zdroj: University of Wisconsin.

pocházejí z explozí supernov a studium mechanismu těchto explozí. Projekt je z podstatné části financován americkou Národní vědeckou nadací (NSF), z menší části z prostředků jednotlivých univerzit a dalších zemí, například Belgie, Německa, Japonska a Švédska. Cena detektoru se vyšplhala v přepočtu na přibližně 5 miliard Kč, což dá pouhých 5 Kč na 1 metr krychlový využitého ledu. Předpokládá se, že detektor IceCube bude svá data kombinovat s obdobnými menšími detektory pod mořskou nebo jezerní hladinou, zejména s detektory ANTARES (středozemní moře) a BAIKAL (v jezeře Bajkal). V letech 2011 až 2013 bylo zachyceno 28 neutrin, jejichž původ je mimo sluneční soustavu, v roce 2013 dalších devět. Dne 4. prosince 2012 bylo zachyceno neutrino s dosud nejvyšší energií – dva petaelektronvolty. Toto neutrino získalo přezdívku Velký pták (*Big Bird*). Autory projektu čeká nyní mnoho let sbírání dat. Jedině rozsáhlá statistika umožní odpovědi na zvědavé otázky neutrinové fyziky.

■ Petr Kulhánek, 14. 1. 2011, AB 2/2011, aktualizováno

## Nepořádek za humny aneb co s kosmickým odpadem?

První Sputnik vypuštěný Sovětským svazem v roce 1957 znamenal nejen počátek kosmonautiky, ale také počátek devastace vesmírného prostoru v blízkosti Země. Za celou éru kosmonautiky bylo vypuštěno přibližně 30 000 objektů. Jen necelá tisícovka z nich je dnes aktivní. Část kosmického smetí shořela v atmosféře, část dopadla na Zemi, ale mnoho zůstalo na nejrůznějších oběžných drahách. Nejde jen o nečinné kosmické lodě. V prostoru kolem Země krouží vyhořelé stupně nosných raket, nepotřebné palivové nádrže, záměrně odhozené krytky různých přístrojů, nářadí, ztracené kamery, šrouby, úlomky laku a úlomky ze dvou varovných událostí – záměrného sestřelení nepotřebné družice Čínou v roce 2007 a srážky nefunkčního Kosmosu 2251 s Iridiem 33 v roce 2009. Sečteno a podtrženo: odhaduje se, že kolem Země krouží 12 000 těles a úlomků větších než 10 cm, přibližně 600 000 úlomků větších než 1 cm a desítky milionů úlomků větších než 1 mm. Pro kosmické lodě jsou potenciálně nebezpečné úlomky větší než 1 cm. Centimetrový úlomek s rychlostí 10 km/s při srážce s družicí energeticky odpovídá explozi ručního granátu. Kilogramové těleso s rychlostí pouhých 10 km/s již spolehlivě zničí tunovou kosmickou loď. Při hrozcím nebezpečí srážky s centimetrovým úlomkem musí družice manévrovat a úlomku se vyhnout. Naše možnosti sledování těchto úlomků jsou ale velmi omezené. Na nízkých oběžných drahách umíme trvale sledovat jen tělesa s rozměry nad 5 cm a na geostacionární dráze jen tělesa s rozměry většími než 50 cm. Z 600 000 nebezpečných tělísek s rozměry nad 1 cm jde o pouhých 19 000 sledovaných úlomků.

### Události spíše úsměvné

Kosmonauti jsou lidé stejně nešikovní jako většina populace, a tak jim prostě tu a tam něco do vesmíru odletí. K nejvíce medializovaným případům patří nepochybně rukavice, kterou ztratil Ed White v roce 1965 při prvním výstupu amerického kosmonauta do volného prostoru. Z poslední doby si určitě vzpomeneme na tašku s nářadím, kterou upustila Heide Stefanyshyn-Piperová v roce 2008. Nicméně takových událostí je velké množství – Michael Collins ztratil v roce 1966 kameru v blízkosti lodi Gemini 10, stejně tak jako Sunite Williams v roce

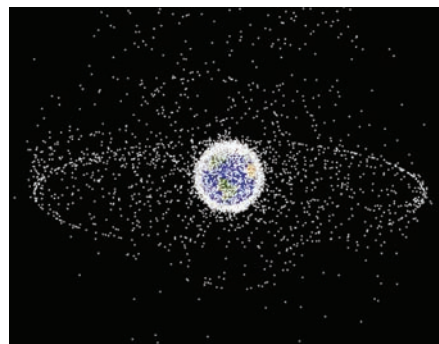
**LEO** – Low Earth Orbit, nízká oběžná dráha, na které krouží družice kolem Země ve výšce od 200 km do 2 000 km.

**MEO** – Medium Earth Orbit, střední oběžná dráha, na které krouží družice kolem Země ve výšce od 2 000 km do 35 000 km.

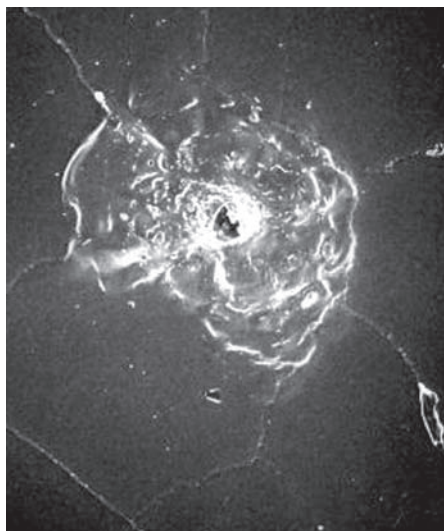
**GSO** – Geosynchronous Orbit, viz strana 186.

**GYO** – Graveyard Orbit, odkladní dráha. Dráha pro družice vyřazené z činnosti, u kterých je technicky nemožné, aby shořely v atmosféře Země. Jde o dráhu ve větší vzdálenosti než 36 100 km od Země.

Prostorová mapa neaktivních těles a úlomků v okolí Země. Zdroj: Wikipedia, 2010.

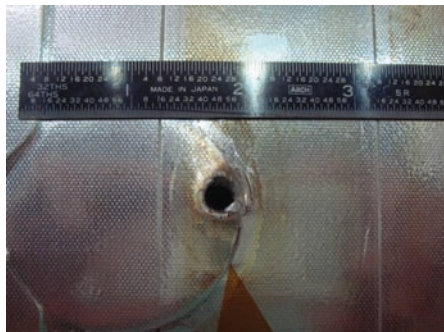






Poškozené okno raketoplánu. Za celou historii raketoplánů bylo vyměněno 80 oken poškozených vesmírným odpadem. Zdroj: NASA.

Každý z raketoplánů utrpěl mnoho šrámů při srážkách s vesmírným odpadem. Na snímku je přes 1 cm velký otvor na chladicím panelu, který vytvořil úlomek při srážce s raketoplánem Endeavour v roce 2007. Měřítko je v palcích. Zdroj: NASA.



2006 při letu raketoplánu STS 116. Ztracených šroubováků a šroubků také není málo. Jde ale o ojedinělá selhání, která jsou zanedbatelná ve srovnání s pytlíky odpadků z vesmírné stanice Mír, které byly záměrně vyhazovány do vesmírného prostoru po dobu patnácti let.

### Kesslerův syndrom a události spíše katastrofální

Na rostoucí počet úlomků ve vesmírném prostoru upozornil Donald Kessler z Johnsonova vesmírného střediska NASA již v roce 1978. Kessler předpověděl, že někdy kolem roku 2000 dojde ke kladné řetězové reakci. Náhodná srážka dvou větších úlomků nebo satelitů způsobí výrazné zvýšení úlomků v prostoru, ty zvětší počet srážek, každá srážka zvětší počet úlomků atd. Výsledek? Konec bezpečného vypouštění družic a sond do vesmíru. V posledních letech se o Kesslerově syndromu velmi často hovoří zejména s ohledem na dvě události.

Dne 11. ledna 2007 Číňané sestřelili nepotřebnou meteorologickou družici Feng Yun 1C. Snad mělo jít o demonstraci jejich schopností, snad o demonstraci síly, kdo ví. Výsledek byl katastrofální: 2 300 úlomků větších než golfový míček, 35 000 úlomků větších než 1 cm a milion úlomků větších než 1 mm. Oběžná dráha sestřeleného satelitu byla ve výšce 850 až 882 kilometrů. Úlomky zde zůstanou po mnoho desítek let. Hned v témže roce se úlomku z této události musela vyhnout americká družice Terra.

V roce 2009 došlo historicky k první katastrofální srážce dvou družic. Ruský nefunkční Kosmos 2251 se srazil dne 10. 2. 2009 nad Sibiří ve výšce 800 km s telekomunikačním satelitem Iridium 33. Kosmos byl zcela zničen, Iridium silně poškozeno, takže není schopné provozu. Kolem srážky se rozprostřel oblak 2 000 úlomků větších než 10 cm a pravděpodobně statisíce menších, které nelze sledovat. Družice Kosmos 2251 měl hmotnost 950 kg, Iridium 33 „jen“ 560 kg. Vzájemná rychlost obou lodí byla 12 km/s.

Obě dvě události téměř zdvojnásobily počet úlomků větších než 1 cm v prostoru kolem Země. Byl Kesslerův syndrom odstartován? A jak se můžeme bránit? I kdyby se nyní zastavily veškeré kosmické lety, což je nemožné, bude počet úlomků v důsledku vzájemných srážek stále stoupat. Operační střediska nyní zaznamenávají přibližně dva až tři poplachy týdně. Jde o zjištění malých těles v blízkosti funkční družice. Následuje několikadenní sledování úlomku, zpřesňování jeho dráhy (i to stojí nemalé peníze) a pokud je úlomek vyhodnocen jako

nebezpečný, musí družice provést úhybný manévr. Obzvláště citelná by byla ztráta družice tvořící formaci s jinými družicemi. Práce celé skupiny by byla znehodnocena. K nejnámějším formacím patří Vlček (*A Train*) čtyř družic pro sledování Země nebo čtveřice Cluster pro sledování magnetosféry.

## Co se dá dělat?

Na prvním místě je zodpovědné chování do budoucnosti. Důležitá doporučení připravil Výbor pro koordinaci vesmírného odpadu IADC (*Inter-Agency Space Debris Committee*). K základním zásadám by mělo patřit: 1. Družice provozované na nízké oběžné dráze (LEO) musí vstoupit do atmosféry maximálně do 25 roků po ukončení činnosti. 2. Družice provozované na vyšších drahách musí být po ukončení činnosti navedeny na odkladní dráhu GYO s výškou nad 36 100 km. 3. Nepotřebné díly, krytky a odpad nesmí být záměrně vypouštěny do vesmírného prostoru.

Dodržování těchto zásad je věcí budoucnosti. V současnosti se zdá, že bude nevyhnutelná aktivní likvidace vesmírného odpadu. To bude stát velké množství peněz a likvidace rozhodně nebude moci být plošná. Je třeba vytipovat nejnebezpečnější objekty a těmi se zabývat. Jednou z možností jsou specializované družice určené pro úklid odpadu. Nabízí se hned několik variant. Družice „uklizečka“ může být vybavena laserem, který odtaví vhodnou část bývalého satelitu, vzniklý plyn reaktivní silou odtlačí nepohodlný zbytek buď na bezpečnou dráhu, nebo ho nasměruje do atmosféry, kde shoří. Druhou možností je připevnit k nebezpečnému zbytku něco, co výrazně zvýší jeho tření o atmosféru a urychlí zánik tělesa. Mohlo by jít například o samonafukující balón. Další možností je vybudování jakési centrální stanice, do které by zbylé lodi byly stahovány.



Nádrž z raketoplánu Columbia, který explodoval v roce 2003 při návratu do atmosféry, byla nalezena v roce 2011 ve východním Texasu. Zdroj: Policejní stanice Nacogdoches.

Tato „bandaska“ dopadla do pouště v Saudské Arábii 12. ledna 2001. Bylo zjištěno, že jde o horní stupeň pomocné rakety (tzv. boosteru), která vynášela na oběžnou dráhu GPS satelit NAVSTAR 32 v roce 1993. Bohužel zdaleka nejde o ojedinělý případ dopadu kosmického smetí na povrch Země. Zdroj: JSC/NASA.





*Umělecká vize exploze horního stupně rakety. Výsledkem jsou tisíce drobných úlomků. Zdroj: Universe Today.*

Kolem likvidace vesmírného odpadu vzniká ale řada nejasností a problémů. Jmenujme alespoň některé z nich. Na prvním místě jsou právní problémy. Vrak na moři je možné odstranit bez souhlasu vlastníka. Ve vesmíru je vypuštěné těleso vlastnictvím majitele jednou provždy. Jiná otázka se týká prázdných palivových nádrží. Dnes je jich na oběžné dráze tolik, že jejich objem je dvacetinásobkem objemu Mezinárodní kosmické stanice. Mají se likvidovat, nebo by jich šlo využívat ke konstrukci orbitálních stanic? A další problém: kolem Země létá přibližně 1 000 tun mimořádně čistého hliníku. Není to škoda? Neměl by se takový odpad nějak využívat? Navedení do atmosféry tento draze pořízený materiál definitivně zničí.

### Závěr

Lidstvo tak stojí před nelehkou otázkou. Co s vesmírným odpadem? Řešení pravděpodobně nebude vůbec jednoduché. Před malými úlomky lze kosmické lodi chránit různými fóliemi. Ty jsou ale nepoužitelné u optických součástí, panelů slunečních baterií nebo antén a jsou neúčinné pro úlomky s rozměrem větším než 1 cm. Pokud se o takovém úlomku vůbec ví, družice musí složitě manévrovat, aby se mu vyhnula. Účinná likvidace musí začínat již u dosloužilých družic, které jsou v případě srážky s jiným objektem zdrojem mnoha nedohledatelných úlomků. Tvrzení estétů, že kolem Země vznikají nádherné prstence, jejichž krása v budoucnu předčí eleganci těch Saturnových, asi konstruktéry kosmických lodí příliš nenadchne.

■ Petr Kulhánek, 17. 9. 2010, AB 33/2010



## Velký start (Herschel a Planck)

Evropská kosmická agentura čas od času vyšle do vesmíru družice či sondy, které zcela zásadním způsobem změni naše znalosti v určité oblasti vědy. K takovým startům nepochybně patřilo vynesení čtveřice družic Cluster na oběžnou dráhu Země v roce 2000. Tyto přístroje pořídily unikátní třírozměrnou mapu zemské magnetosféry a objevily celou řadu nových, dosud neznámých jevů. O pouhých devět roků později, dne 14. května 2009, startovala z evropského kosmodromu v jihoamerickém Kourou dvojice sond Herschel a Planck. Infračervená observatoř Herschel se v zápětí stala největším dalekohledem vyneseným lidstvem do vesmíru a mikrovlnná observatoř Planck nejdokonalším přístrojem, který zmapoval mikrovlnný vesmír s bezprecedentní předností a přinesl nejen očekávaná kosmologická data, ale i řadu fundamentálních poznatků o nejlhadelnějších zákoutích vesmíru.

### Velký start

Slavný start se uskutečnil dne 14. května 2009 z evropského kosmodromu v jihoamerickém Kourou. Tento kosmodrom je na „evropském“ území, nachází se totiž ve státě Francouzská Guiana.

Nosná raketa Ariane je speciálně vybavena pro starty dvojic sond. Tato úprava byla použita již u Ariane 4 a zůstala zachována i u Ariane 5. Například čtveřice sond Cluster byla na oběžnou dráhu vynesena po dvou dvojicích. V nosné části rakety byla sonda Planck uložena ve speciální konstrukci, která se nazývá SPELTRA. Toto slovo vzniklo z francouzského přepisu sousloví *Speciální konstrukce pro duální starty*. Jde o jakýsi válcový kryt spodního nákladu, na jehož horní kuželové části je umístěn další náklad. Tento kryt má hmotnost 850 kg a průměr 5,4 m, což je vlastně průměr rakety Ariane. Pro menší náklady se používá konstrukce SYLDA, která je užší než raketa. Výška válcové části SPELTRY je 5,6 m, celková výška 7 m. Konstrukce chránila spodní sondu Planck při startu i před startem. Větrací otvory umožnily proudění suchého chladného vzduchu. Po startu hořely pomocné motory po stranách rakety (tzv. boostery) přibližně 2 minuty. Motory prvního a druhého stupně vyvíjely tah po dalších 25 minut. Tím byly observatoře Herschel s Planckem nasměrovány do Lagrangeova bodu L2

Slavný start. Na palubě nosné rakety Ariane 5 ECA se nachází sondy Herschel a Planck. Zdroj: ESA.





**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 1973 jako přímý následovník organizací ESRO a ELDO. Nejznámější nosnou raketou využívanou ESA je Ariane. Česká republika vstoupila do ESA v listopadu 2008. Evropská kosmická agentura má od roku 2008 vlastní výzkumný modul Columbus na Mezinárodní kosmické stanici. K největším úspěchům patří čtveřice sond Cluster, která od roku 2000 zkoumá magnetosféru Země, sonda Mars Express vypuštěná v roce 2003 k Marsu, sonda Giotto k Halleyově kometě z roku 1986 nebo pouzdro Huygens, které v roce 2005 přistálo na největším Saturnově měsíci Titanu a zkoumala zblízka jeho povrch.

soustavy Země-Slunce, který je vzdálený od Země 1,5 milionu kilometrů směrem od Slunce.

Po opuštění atmosféry byl pyrotechnicky odstraněn krycí plášť nákladového prostoru. Svislé detonátory ho rozevřely v ose rakety a vodorovné detonátory vzdálily od sond. Po získání dostatečné rychlosti na cestu do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce byla nejprve vypuštěna horní sonda Herschel. Následovalo oddělení konstrukce SPELTRA pomocí dvou detonátorů a osmi speciálních ocelových pružin. Dvě a půl minuty po oddělení Herschelu došlo také k uvolnění sondy Planck. Od tohoto okamžiku byla každá sonda zvlášť řízena letovým střediskem v německém Darmstadtu. Do Lagrangeova bodu L2 dolétly přibližně za měsíc a po necelých dvou měsících od startu byly navedeny na tzv. Lissajousovu oběžnou dráhu kolem tohoto bodu. Komunikaci se sondami v L2 zajišťovala australská pozemská stanice New Norcia v blízkosti Perthu.

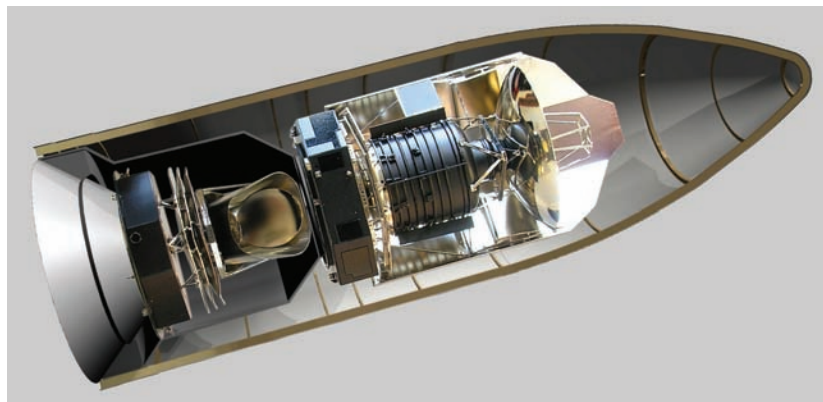
## Herschel

Observatoř Herschel byla pojmenována po významném anglickém astronomovi, Williamu Herschelovi (1738–1822). Herschel zkonstruoval ve své době největší zrcadlový dalekohled na světě. V roce 1781 objevil planetu Uran, v roce 1787 našel Uranovy měsíce Oberon a Titania, v roce 1789 měsíce Enceladus a Mimas. Byl mimořádně pečlivý pozorovatel a na základě jeho pozorování byl připraven katalog NGC (*New General Catalog of Nebulae and Clusters of Stars*). V roce 1800 objevil infračervené záření ve slunečním spektru (zaznamenal zvýšenou

teplotu na teploměru, na který dopadaly neviditelné paprsky z této oblasti spektra). Dále jako první zjistil, že krystaly mohou stáčet rovinu polarizace světla.

Sonda Herschel navázala na úspěšné infračervené observatoře ISO, Akari a SST. Jejím základem bylo zrcadlo o průměru 3,5 metru, dosud největší zrcadlo dopravené do vesmíru vůbec. Sonda byla dlouhá 7,5 metru a měla průměr 4,5 metru. Hmotnost při startu či-

Uložení sond v nosné raketě. Ve spodní části je Planck, ve vrchní Herschel. Zdroj: ESA.



nila 3 400 kg včetně 2 300 litrů kapalného helia určeného k chlazení přístrojů. Zcela výjimečný byl rozsah vlnových délek sledovaných Herschelem: 60  $\mu\text{m}$  až 670  $\mu\text{m}$ . Takový rozsah pokrývá celý jeden řád a dosud ho neměl žádný jiný přístroj vyslaný do vesmíru.

Na palubě byly tři hlavní přístroje: PACS, SPIRE a HIFI. Pod zkratkou PACS (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*) se ukrývá kamera a spektrometr nízkého až středního rozlišení pro vlnové délky kolem 205 mikrometrů. Druhý přístroj SPIRE (*Spectral and Photometric Imaging Receiver*) je kamera a spektrometr nízkého až středního rozlišení pro vlnové délky kolem 200 mikrometrů. Poslední HIFI (*Heterodyne Instrument for the Far Infrared*) je spektrometr s velmi vysokým rozlišením, pomocí kterého se určovalo chemické složení látky v okolí infračervených zdrojů. Součástí všech tří detektorů bylo pole bolometrů. Příprava sondy stála 1,1 miliardy euro. Sonda byla funkční do 29. dubna 2013, plánovanou životnost překročila o rok.

Hlavním cílem mise Herschel bylo pozorování neviditelného vesmíru v infračervené oblasti, zejména studium formování a vývoje eliptických galaxií a centrálních výdutí spirálních galaxií v první třetině existence vesmíru. Dalším cílem bylo studium vztahu hvězd a galaxií, zejména procesů vzniku hvězd a planet v naší i dalších galaxiích. S tím souvisel výzkum mezihvězdných mračen a protoplanetárních disků, včetně zjišťování chemického složení a vyhledávání složitých organických molekul.

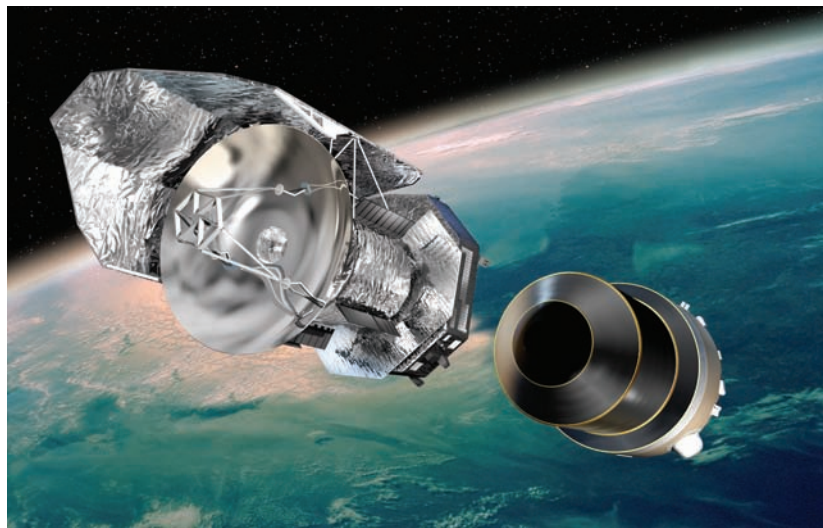
## Výsledky mise Herschel

Jako první objekt byla fotografována Vírová galaxie M51 v souhvězdí Honičích psů. Šlo o ověření funkčnosti ještě neseřazené observatoře. Poté bylo snímáno pole o velikosti  $2^\circ \times 2^\circ$  v souhvězdí Jižního kříže. Záměrně byla fotografována oblast, která ve vizuálním oboru vůbec nezáří a jeví se na obloze jako zcela temný flíček. Pohled infračervenými očima observatoře Herschel umožnil spatřit

**Ariane** – nosná raketa využívaná Evropskou kosmickou agenturou. Její název pochází z francouzského přepisu jména mytologické postavy Ariadne. Nosič byl vyvíjen od 70. let dvacátého století. První úspěšný start Ariane 1 proběhl v roce 1979. Dnes je k dispozici nosič Ariane 5 ECA s výškou 59 metrů, průměrem 5,4 metru, celkovou hmotností 770 tun a užitečným nákladem 10 tun. Rakety startují ze základny Kourou v jihoamerické Francouzské Guianě.

**Herschelova vesmírná observatoř** – viz strana 82.

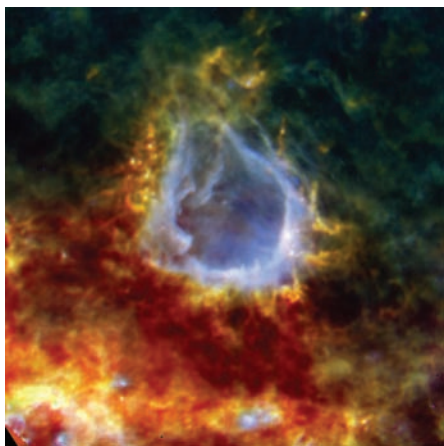
Oddělení observatoře Herschel od nosné rakety.  
Zdroj: ESA.





Řídicí středisko ESOC (European Space Operations Centre) letů Evropské kosmické agentury v německém Darmstadtu. Zdroj: ESA.

Obří bublina RCW 120, na jejímž okraji překotně vznikají hvězdy. Jde o kompozici složenou ze snímků pořízených na vlnových délkách 70  $\mu\text{m}$ , 160  $\mu\text{m}$  (PACS) a 250  $\mu\text{m}$  (SPIRE). Zdroj: ESA/Herschel.



aktivní oblast rodících se hvězd s kroutícími se vlákny plynu a prachu ve vzdálenosti několik tisíců světelných roků daleko od Země.

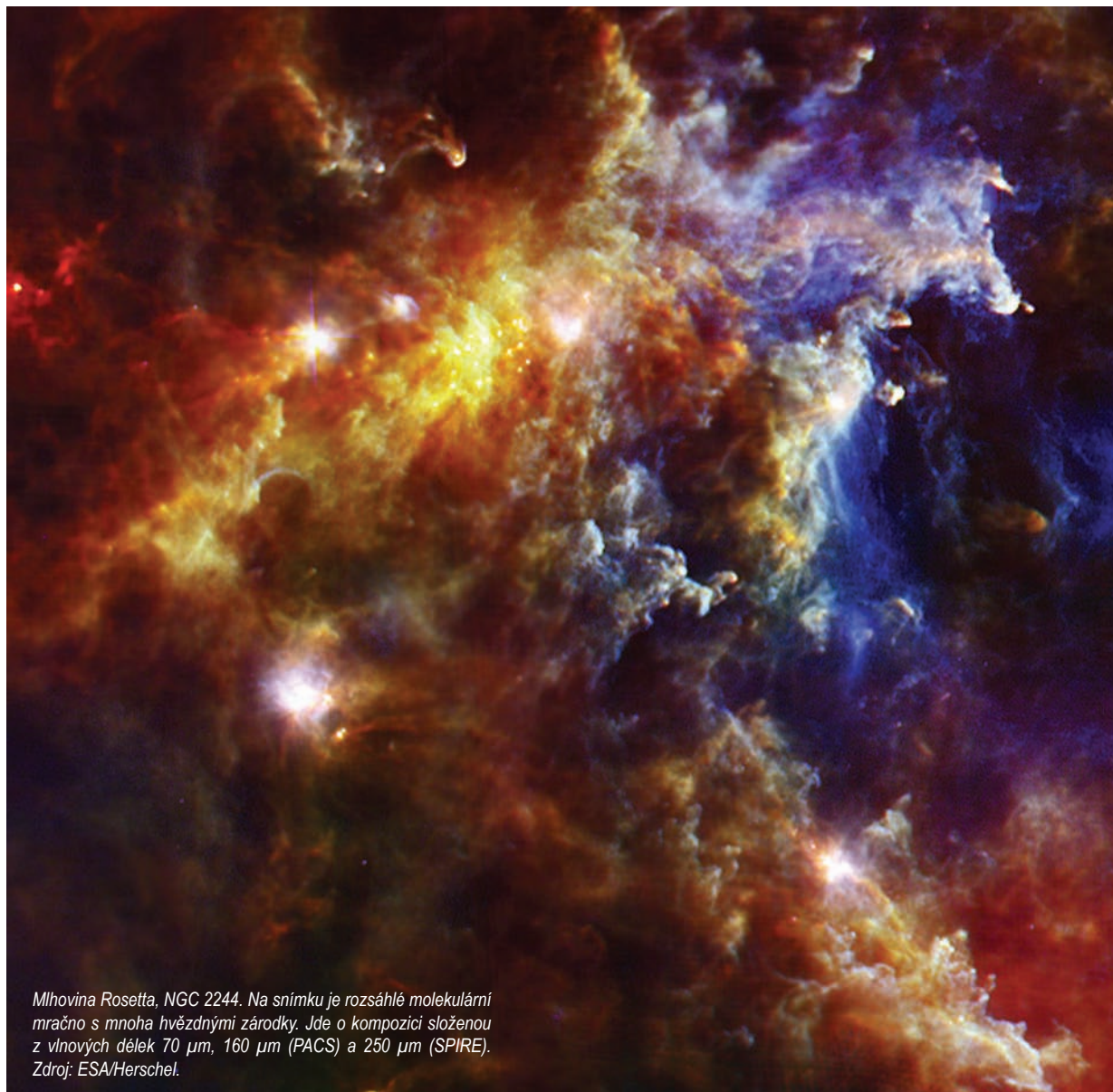
Po seřízení přístrojů fotografovala observatoř Herschel tzv. jižní pole GOODS. Jedná se o oblast v souhvězdí Pece o velikosti  $20' \times 16'$ , ve které se nacházejí velmi staré galaxie, které pozorujeme v prvních fázích jejich života. Oblast byla snímána řadou jiných dalekohledů a v lednu 2010 ji vyfotografovala i observatoř Herschel přístrojem PACS na vlnových délkách 70  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  a 160  $\mu\text{m}$ .

V roce 2013 byl oznámen objev galaxie HFLS3 s červeným kosmologickým posuvem  $z = 6,3$ , ve které vzniká přes 2 000 hvězd ročně. Galaxie je pozorována tak, jak vypadala 880 milionů let po vzniku vesmíru.

Observatoř Herschel také našla jako první v historii nesporné stopy existence molekul kyslíku ve vesmíru. Existence atomárního kyslíku byla prokázána již mnohem dříve. Jeho výskyt se potvrdil hlavně v horkých oblastech vesmíru. Hledání kyslíku vázaného v molekulách ale doposud vycházelo naprázdno. Kyslík vzniká v nitru hvězd při termojaderné fúzi a je po vodíku a heliu třetím nejhojnějším prvkem ve vesmíru. Přesto je nalezené množství atomárního kyslíku mnohem nižší, než se očekávalo. Jedním z vysvětlení, proč kyslík není pozorován ve větším množství je, že se váže v molekulách – buď kyslíkových, nebo molekul kyslíku s vodíkem. Mohl by být „uschován“ ve zmrzlých prachoplynných mlhovinách v podobě vodního ledu. Mezinárodní tým vědců se pokusil tuto domněnku potvrdit pomocí observatoře Herschel. Tým s názvem HOP (*Herschel Oxygen Project*) byl úspěšný a našel ve Velké mlhovině v Orionu, kde stále vznikají hvězdy, jednu molekulu kyslíku na každý milion molekul vodíku. Zůstává zatím nezodpovězenou otázkou, proč ho nebylo detekováno větší množství.

Fascinující bylo pozorování rodících se hvězd v různých místech oblohy. Jednou z prvních pozorovaných oblastí byla mlhovina RCW 120 nacházející se ve vzdálenosti 4 300 ly v souhvězdí Štíra. Na první pohled je zde patrná obří bublina ionizovaného vodíku, kterou vytvořila hvězda v jejím středu. Ta v infračerveném oboru sice vidět není, ale její záření vytlačuje z oblasti plyn a prach. Na okrajích bubliny dochází ke vzniku hvězd, u některých z nich dokonce ještě nezačala probíhat termojaderná syntéza v jejich nitru. Velké množství hvězdných zárodků bylo také nalezeno v mlhovině Rosetta (NGC 2244) v souhvězdí Jednorozce ve vzdálenosti 5 000 ly. Z rozsáhlého molekulárního mrač-





Mlhovina Rosetta, NGC 2244. Na snímku je rozsáhlé molekulární mračno s mnoha hvězdnými zárodky. Jde o kompozici složenou z vlnových délek 70  $\mu\text{m}$ , 160  $\mu\text{m}$  (PACS) a 250  $\mu\text{m}$  (SPIRE). Zdroj: ESA/Herschel.

**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') oblohy: na severní obloze ve Velké Medvědici a na jižní obloze v souhvězdí Pece.

na vybíhají „prstíky“, které jsou ve skutečnosti zárodky budoucích hvězd vznikajících na ostrých hranách mračna. Tuto mlhovinu s hvězdokupou objevil John Flamsteed již v roce 1690. Co se týče zrodu hvězd, dalším převratným zjištěním bylo, že v oblasti VELA C v souhvězdí Plachet vznikají hvězdy z uzlíků v plazmatických vláknech. To by nasvědčovalo tomu, že při zrodu hvězd hraje alespoň v některých případech důležitou roli magnetické pole, které tato vlákna zformovalo, a klasická představa o hroutící se globuli neplatí.

Observatoř Herchel sehrála také důležitou roli při studiu vody ve sluneční soustavě. Ze spektroskopického měření množství deuteria na kometě Hartley 2 se zdá, že by většina vody na Zemi měla pocházet z dopadů komet. Vodní páry detekované na Jupiteru by měly podle měření být pozůstatkem po srážce s kometou Shoemaker-Levy 9 v roce 1994. V lednu 2014 oznámil tým observatoře Herschel, že detekoval vodní láry na trpasličí planetce Ceres, největším tělese Hlavního pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem. To znamená, že rozdíl mezi planetkami a kometami není tak veliký, jak se předpokládalo.

Voda je ale i jinde ve vesmíru. Přístroj HIFI observatoře Herschel pořídil spektra vybraných členů otevřené hvězdokupy NGC 133 v souhvězdí Kasiopeji a našel v nich čáry vody. Ukázalo se, že voda je nedílnou součástí všech hvězdných porodnic.

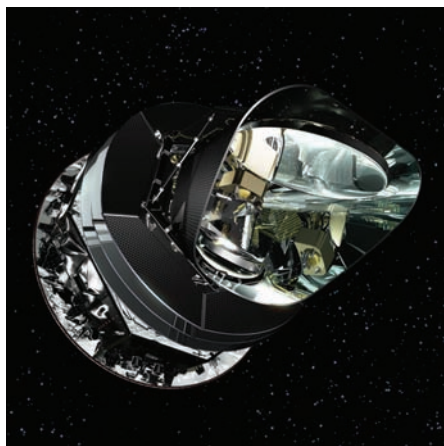
Výsledkům sondy Herschel bylo věnováno několik speciálních čísel časopisu *Astronomy and Astrophysics*, kde bylo publikováno několik set důležitých vědeckých článků.

## Planck

Sonda Planck je pojmenována po Maxi Planckovi (1858–1947), významném německém fyzikovi. Max Planck zformuloval vztah popisující vyzařování absolutně černého tělesa za předpokladu, že energie je kvantována a elementární kvantum je úměrné frekvenci. Tento předpoklad zavedl ryze matematicky, aby rovnice byly řešitelné. Fyzikální interpretaci příliš nedůvěřoval. V roce 1918 získal Nobelovu cenu za svou kvantovou teorii, úspěšně vyzkoušenou Einsteinem na fotoelektrickém jevu a Bohrem na prvním modelu atomu. Planck byl kritikem pravděpodobnostní interpretace entropie. V roce 1900 jako první použil univerzální plynovou konstantu a Avogadrovu konstantu.

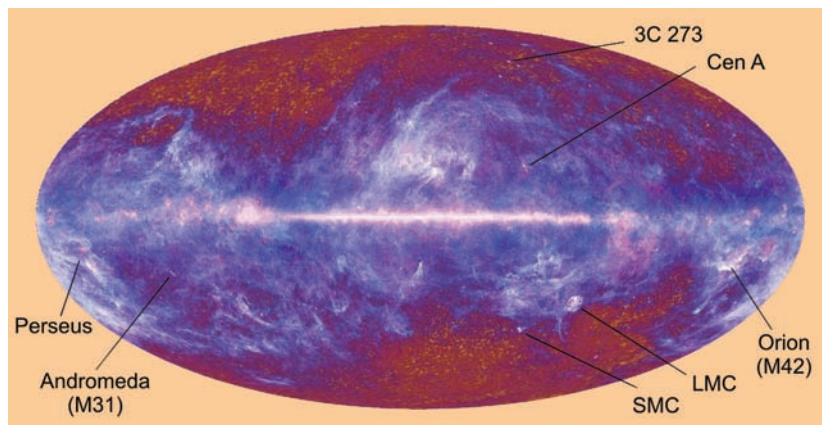
Sonda Planck byla především určena k výzkumu reliktního záření. Po družicích COBE a WMAP šlo již o třetí observatoř určenou pro

Observatoř Planck. Dobře je patrné primární zrcadlo, sekundární zrcadlo i ohnisko. Zdroj: ESA/Planck.



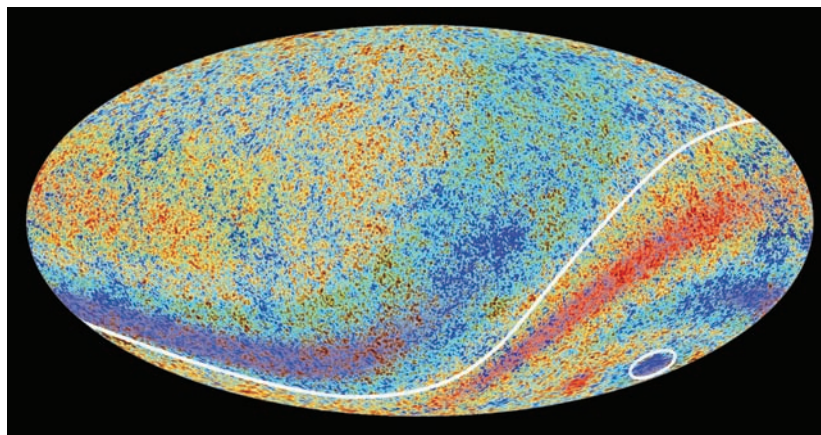
sledování reliktního záření, které pochází ze závěrečného období Velkého třesku a je největším zdrojem informací o raném vesmíru. Srdcem sondy bylo zrcadlo o rozměrech  $1,9 \times 1,5$  metru. Rozlišovací schopnost dosáhla  $5'$  (COBE měla  $7^\circ$  a WMAP  $0,3^\circ$ ). Relativní přesnost měření teplotních fluktuací reliktního záření byla  $2 \mu\text{K}$  (WMAP měla  $20 \mu\text{K}$ ). Sonda pracovala od submilimetrové oblasti až po radiovou ( $0,2 \text{ mm}$  až  $10 \text{ mm}$ ). Vysokofrekvenční detektor HFI pracoval v oboru  $83 \text{ GHz}$  až  $1 \text{ THz}$  a nízkofrekvenční přístroj LFI v oboru  $27$  až  $77 \text{ GHz}$ . Celkem bylo v ohnisku  $74$  mikrovlnných antén (radiometrů) pro devět frekvenčních oborů se středy pásem na frekvencích  $30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 \text{ GHz}$ . Snímání oblohy v devíti pásmech umožnilo rozlišení jednotlivých druhů signálu (prach, elektromagnetické záření, šum...). Při startu měla sonda hmotnost  $1\,900 \text{ kg}$ . Sonda byla  $4,2 \text{ m}$  vysoká a  $4,2 \text{ m}$  široká. Doba mise se plánovala na  $15$  měsíců, nakonec fungoval vysokofrekvenční přístroj do konce roku  $2011$  a nízkofrekvenční až do října  $2013$ , kdy byla sonda deaktivována.

Hlavním cílem sondy byl výzkum reliktního záření, které se odštělo od látky v období formování atomárních obalů, tj.  $400\,000$  roků po vzniku vesmíru. V polarizaci reliktního záření by se mohlo podařit nalézt otisk gravitačních vln z období inflace vesmíru a potvrdit, nebo vyvrátit měření přístroje BICEP 2 na jižním pólu. V době vydání této publikace nejsou polarizační data ještě zpracována. K dalším cílům mise patřilo zjišťování velkorozměrové struktury vesmíru, výzkum temné hmoty, vyhledávání topologických defektů



Kompletní mapa oblohy v mikrovlnné oblasti pořízená sondou Planck v prvním roce pozorování. Jde o souhrnný signál od  $0,2 \text{ mm}$  do  $10 \text{ mm}$ . Na zvětšenině mapy jsou označeny některé známé objekty. Zdroj: ESA/Planck.

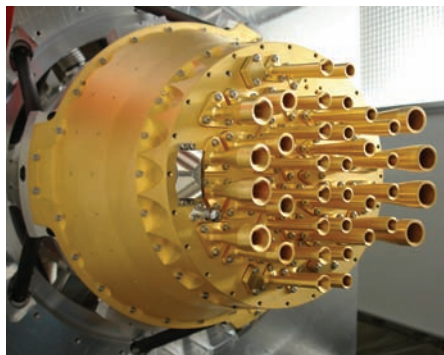
Počítačově zesílené anomálie ve fluktuacích reliktního záření. Napravo dole je zakroužkována jedna z výrazných chladných skvrn, která byla slabě zřetelná již při zpracování dat ze sondy WMAP. Zdroj: ESA/Planck.







Detail ohniska sondy Planck s jednotlivými radiometry (anténkami). Vysokofrekvenční část ohniska (uprostřed) byla chlazena na 0,1 K. Zdroj: ESA/Planck.



a studium galaxií v mikrovlnném oboru. Příprava sondy stála 700 milionů euro.

Sonda Planck byla především zaměřena na výzkum reliktního záření, přesto ale odkryla kompletní pohled na mikrovlnný vesmír, který se velmi liší od světa viditelného ve vizuálním oboru. První balík výsledků byl zveřejněn 11. 1. 2011 (pokud je rok zapsán jen dvojicí čísel, je datum tvořeno pěti jedničkami) v 11 hodin a 11 minut. Výsledky se týkaly zejména nekosmologických jevů a popisovaly různé zdroje mikrovlnného záření jak v Galaxii, tak mimo ni. Dne 21. 3. 2013 (povšimněte si zajímavé kombinace číslic 1, 2 a 3) byla zveřejněna druhá várka výsledků, tentokrát převážně kosmologických. Jde o sérii devětatdacetí rozsáhlých článků, z nichž se každý věnuje jinému výzkumu prováděnému sondou Planck. Na článcích je podepsána tzv. „kolaborace Planck“, která čítá 276 autorů. Některé z článků mají mnoho desítek stran. Tato druhá sada výsledků je založena na datech posbíraných mezi 12. srpnem 2009, kdy sonda začala měřit, a 27. listopadem 2010, kdy byly dokončeny dvě kompletní přehlídky oblohy. Kompletní analýza ze všech čtyř přehlídek doplněná o výsledky měření polarizace by měla být zveřejněna ve třetí sadě výsledků v druhé polovině roku 2014.

### Planck – nekosmologické výsledky

Sonda Planck byla určena především k výzkumu reliktního záření, proto by se mohlo zdát, že výzkum ostatních zdrojů je na okraji zájmu. Opak je ale pravdou – v mikrovlnné oblasti svítí plyn a prach kumulující se v rovině Mléčné dráhy a nacházející se i v ostatních galaxiích. Z plynoprachých mračen a molekulárních oblaků se rodí hvězdy i planety a výzkum jejich zrodu je v přední linii zorného pole astronomů. V mikrovlnném oboru svítí i mnoho galaxií, například velmi dobře známá Velká galaxie v Andromedě se v mikrovlnném obrazu světa jeví jako úzká tenká čárka. Jsou ale i galaxie, které září v mikrovlnách a radiovlnách dominantně. Sonda Planck pořídila souhrnnou mapu veškerých mikrovlnných zdrojů na obloze a na základě této mapy vznikl podrobný katalog kompaktních galaktických a extragalaktických mikrovlnných zdrojů CSC (*Compact Source Catalogue*).

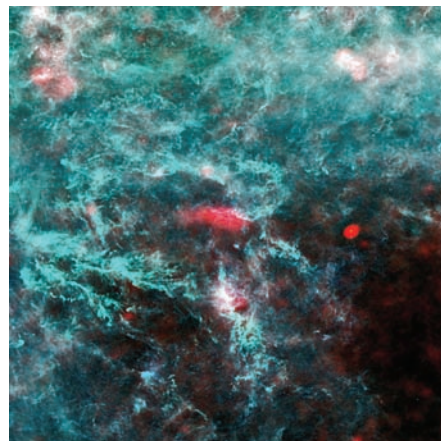
V mikrovlnné oblasti září i elektrony kroužící podél siločar magnetického pole. Při malých rychlostech hovoříme o cyklotronním záření a při vysokých rychlostech o synchrotronním záření. V takovém signálu je uložena cenná informace o rozložení magnetických polí ve

vesmíru. Dodnes je velkou neznámou vznik prvotních polí, které se podílely na formování prvních hvězd a prvních galaxií. Měření polarizace elektromagnetického signálu, která nejsou dosud zpracovaná, by mohla přinést důležité informace k této záhadě.

Naprostý průlom znamenalo využití Sunjajevova-Zeldovičova jevu k objevování nejvzdálenějších kup galaxií. Horký plyn v těchto jinak neviditelných kupách interaguje s reliktním zářením a vytvoří v něm nepatrná, ale charakteristická navýšení teploty oproti okolí. Pokud je nalezen v daném místě jinými sondami také rentgenový signál (za něj jsou zodpovědné horké elektrony), je vyhráno a v tomto směru se ve velké vzdálenosti nachází kupa galaxií, která je tak daleko, že je běžnými prostředky neviditelná. Sonda Planck objevila celkem 1227 takových objektů (kup galaxií nebo kandidátů na ně).

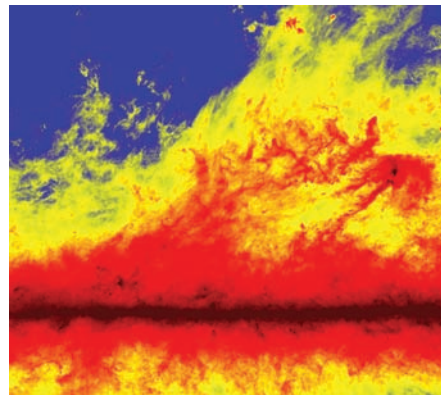
## Planck – kosmologické výsledky

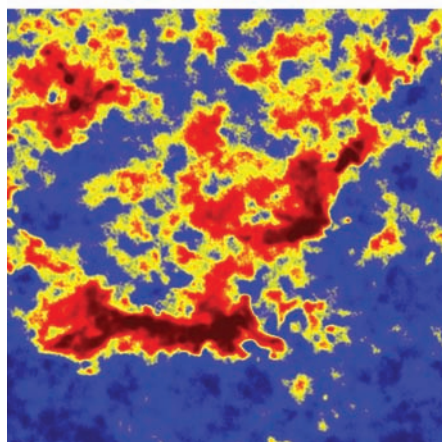
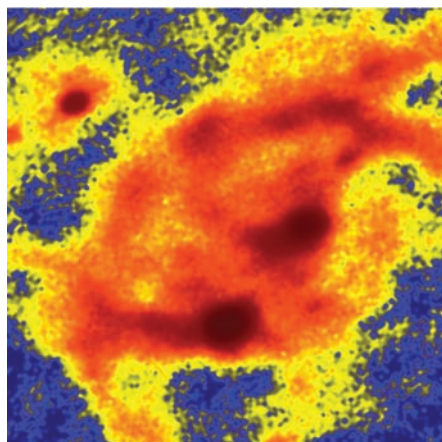
Z prvních dvou mikrovlňných přehlídek byl nejprve oddělen signál neodpovídající reliktnímu záření. Taková procedura se dělá počítačově s využitím známé frekvenční závislosti některých signálů (prachu, synchrotronního záření atd.). Při pořizování záznamu se pomocnými radiometry nahrává šum vlastní sondy, který se od dat také odečte. Po těchto a dalších úpravách vznikla zatím nejpodrobnější mapa fluktuací reliktního záření. Z takové mapy se pořizuje tzv. výkonnostní spektrum, které ukazuje, jak jsou zastoupeny fluktuace různých velikostí. Matematicky jde o frekvenční analýzu, signál se rozvíjí do tzv. kulových funkcí, které jsou na sféře obdobou sinů a kosinů, jež představují základní vlnové mody obdélníkové oblasti při běžné harmonické analýze. První maximum je kolem jednoho stupně, což znamená, že nejvíce jsou zastoupeny přibližně jednostupňové fluktuace. Další maximum je kolem  $0,3^\circ$  atd. Z polohy a velikosti jednotlivých maxim je možné určit základní kosmologické parametry. Data ze sondy Planck jsou ve velmi dobré shodě s šestiparametrovým  $\Lambda$ CDM modelem. Tak se označuje matematický model vesmíru s nenulovou kosmologickou konstantou (písmeno  $\Lambda$  v názvu modelu), která v modelu popisuje zrychlenou expanzi vesmíru. Podstatnou složkou modelu je chladná temná hmota (CDM, *Cold Dark Matter*). „Chladný“ zde znamená, že odpovídající částice mají velmi malé rychlosti v porovnání s rychlostí světla. Celý model je určen šesti parametry, z nichž je možné dopočítat podíl jednotlivých složek ve vesmíru, Hubblovu konstantu, křivost



*Perseus. Oblast rodících se hvězd o rozměru  $30^\circ \times 30^\circ$  v souhvězdí Persea. Obraz je složený z frekvencí 30, 353 a 857 GHz. Zdroj: ESA/Planck.*

*Prachová vlákna v Mléčné dráze. Zobrazená oblast má rozměr  $15^\circ \times 15^\circ$ . Snímek byl pořízen dne 17. 3. 2010 přístrojem HFI na frekvenci 857 GHz. Nejde o barevnou kompozici, ale o monochromatický snímek (na jediné frekvenci). Barvou je kódována intenzita signálu (modrá nejnižší, tmavočervená nejvyšší). Zdroj: ESA/Planck/HFI.*





Snímky Velké mlhoviny v Orionu pořízené observatoří Planck na frekvencích 30 GHz a 143 GHz. Barvy na snímku odpovídají intenzitě signálu, okem samozřejmě tyto frekvence nevnímáme a nemůžeme jim přiřadit žádnou barvu. Zdroj: ESA.

PARAMETR	WMAP	PLANCK
stáří vesmíru	$13,7 \times 10^9$ let	$13,8 \times 10^9$ let
trvání Velkého třesku	380 000 let	380 000 let
Hubbleova konstanta	$69,7 \text{ km/s Mpc}^{-1}$	$67 \text{ km/s Mpc}^{-1}$
množství atomární látky	4,5 %	4,9 %
množství temné hmoty	22,7 %	26,8 %
množství temné energie	72,8 %	68,3 %

vesmíru a další důležité údaje. Některé zjištěné hodnoty se částečně rozcházejí s předchozími měřeními, z dat pořízených Planckem vychází například o 18 % vyšší hodnota podílu temné hmoty, poněkud nižší hodnota Hubbleovy konstanty atd. Rozdíly nejsou zásadní, jde o řádově srovnatelné hodnoty, navíc při kombinaci s jinými měřeními se diskrepance snižuje. V každém případě jsou zapotřebí další analýzy, které zahrnou i dvě dosud nezpracované přehledky oblohy.

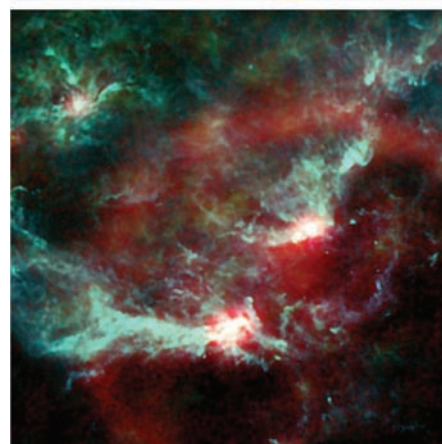
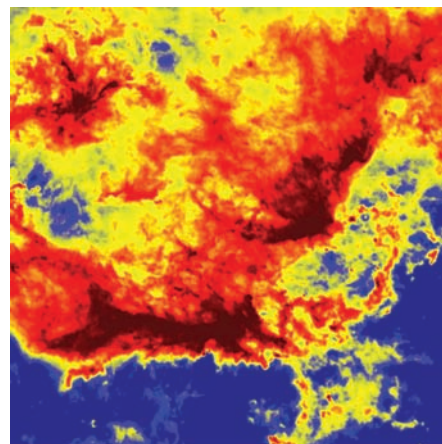
Jaké jsou tedy dosavadní nejvýznamnější výsledky? 1) Analýza fluktuací reliktního záření ukázala, že tyto fluktuace nejsou škálově invariantní, tj. že na různých škálách se chovají různě. To je základním indikátorem existence inflační fáze ve velmi raném vesmíru. Měření sondy Planck jsou tedy silnou podporou inflačních hypotéz. 2) V pořízených datech je dobře patrné gravitační čočkování obrazců fluktuací reliktního záření mezilehlou temnou hmotou. Jde o další nezávislý důkaz její existence. 3) Ve fluktuacích jsou patrné anizotropie, ty ale nijak nevybočují z normálního (Gaussova) statistického rozdělení a jsou tedy očekávaným jevem. 4) Některé parametry se poněkud odlišují od předchozích měření, týká se to zejména nižší hodnoty Hubbleovy konstanty a jiného poměrného zastoupení základních tří složek vesmíru (atomární látky, temné hmoty a temné energie). U Hubbleovy konstanty je rozptyl hodnot z různých zdrojů značný, například z Klíčového projektu na HST vychází  $(74,3 \pm 2) \text{ km/s Mpc}^{-1}$ , z WMAP  $(69,7 \pm 2,4) \text{ km/s Mpc}^{-1}$  a nyní z Plancku  $(67 \pm 2) \text{ km/s Mpc}^{-1}$ . Zde jde s největší pravděpodobností o problémy s určováním kosmologických vzdáleností, které se v různých měřeních určují různě. U složení vesmíru je třeba provést



další analýzy a zahrnout další data. 5) Data z Plancku potvrdila existenci několika velkorozměrových anomálií (chladných a horkých skvrn v reliktním záření), o jejichž existenci se již vědělo z měření sondy WMAP, ale měření nebyla dostatečně průkazná. 6) Analýza potvrdila existenci tří generací neutrin a tím tří generací elementárních částic. Jde o další nezávislý důkaz, že v přírodě existují jen tři generace částic (na úrovni elektronů je to normální elektron, těžký elektron neboli mion a supertěžký elektron neboli tauon).

Většina mikrovlnných antén byla konstrukčně připravena tak, aby bylo možné zjistit polarizaci přicházejícího signálu (signál se po průchodu anténou dělil do dvou kolmých směrů). K polarizaci signálu může přispět celá řada jevů od pouhých hustotních fluktuací přes interakci s gravitačními vlnami až po hypotetické projevy kosmických strun. V každém případě je na velkých úhlových škálách dobře patrné maximum polarizace, které odpovídá opětovné ionizaci vesmírného prostředí při vzniku prvních hvězd. V principu je ale z polarizace reliktního záření možné získat celou řadu dalších zajímavých výsledků, a pokud budeme mít štěstí, mohl by se v polarizačním signálu nalézt otisk reliktních gravitačních vln, které vznikly v prvních okamžicích Velkého třesku a jejichž předběžný objev ohlásil tým přístroje BICEP 2 v březnu roku 2014. Ať již analýza polarizačního záznamu dopadne jakkoli, budeme si muset na výsledek počkat až do druhé poloviny roku 2014, kdy ESA uvolní třetí a pravděpodobně poslední „balíček“ objevů sondy Planck. Třeba se tak opět stane v den, který bude zajímavou hříčkou číslic, jako tomu bylo u dvou předchozích várek výsledků ze sondy Planck.

■ Petr Kulhánek, 2010 až 2014



Nahoře je snímek Velké mlhoviny v Orionu pořízený observatoří Planck na frekvenci 857 GHz. Dole je kombinovaný obrázek z předchozích tří snímků v nepravých barvách. Červená odpovídá frekvenci 30 GHz, zelená 143 GHz a modrá 857 GHz. Zdroj: ESA.



# V. FYZIKA



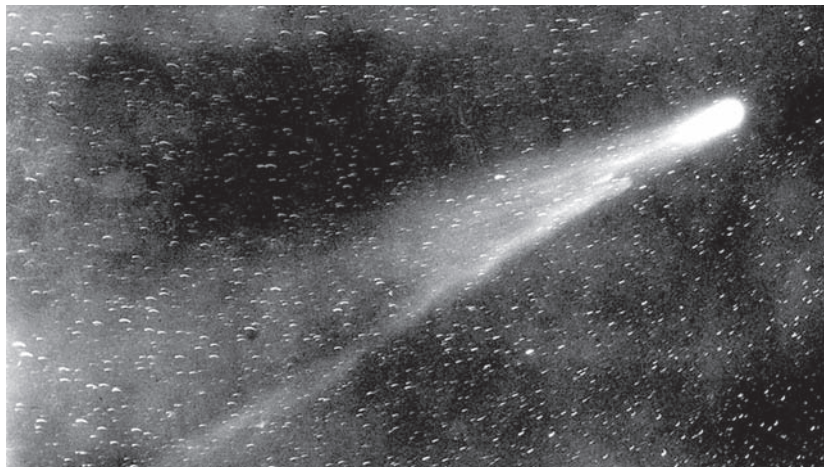


## Je gravitace skutečnou silou?



Isaac Newton (1642–1727), autor první teorie gravitace. V obrázku je zakomponováno jablko, které se stalo symbolem gravitace. Zdroj: Mariana Ruíz Villarreal.

Na základě gravitačního zákona předpověděl Edmond Halley, že komety z let 1456, 1531 a 1607 nejsou různými tělesy, ale jedinou kometou, která se vrátí v roce 1759. Na obrázku je kometa při návratu v roce 1910.



Cesta poznávání gravitační interakce je dlouhá a trnitá. První gravitační zákon zformuloval Isaac Newton již v 17. století. Newtonův gravitační zákon umožňuje počítat pohyby těles na Zemi, ve sluneční soustavě i v hlubinách vesmíru. V první polovině 20. století se stala dominantní teorií gravitace Einsteinova obecná relativita, jejíž úspěchy jsou doslova famózní. Vzpomeňme si jen na předpověď existence černých děr, gravitačních čoček, gravitačních vln nebo strhávání časoprostoru rotujícím tělesem. V lednu 2010 přišel nizozemský teoretický fyzik Erik Verlinde s názorem, že gravitace neexistuje a že jde o statistické projevy chování mikrosvěta. V tuto chvíli jde samozřejmě o pouhou hypotézu, kterou může, jako mnoho jiných, odváť čas. Tato hypotéza je ale natolik zajímavá, že si v krátkém čase získala mnoho příznivců i odpůrců.

### Newton a příběh o jablku

Podle legendy našel Newton údajně gravitační zákon, když seděl v sadě a na hlavu mu spadlo jablko. V tu chvíli prý začal přemýšlet nad příčinou pádu jablka a objevil gravitaci. Zda je tato legenda pravdivá či nikoli se už asi nikdy nedozvíme. Nicméně, jablko se stalo symbolem gravitační interakce pro celé generace fyziků. Zákon všeobecné gravitace objevený Isaacem Newtonem lze zformulovat například takto: *Každá dvě tělesa se přitahují silou, která je přímo úměrná jejich hmotnostem a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti.*

Gravitační zákon je *univerzální*, tj. platí pro všechna tělesa bez výjimky. K Zemi je přitahován nejenom kámen, ale i Měsíc, gravitace ovládá komety, vzdálené hvězdy i kupy galaxií. Z Newtonova gravitačního zákona lze za po-

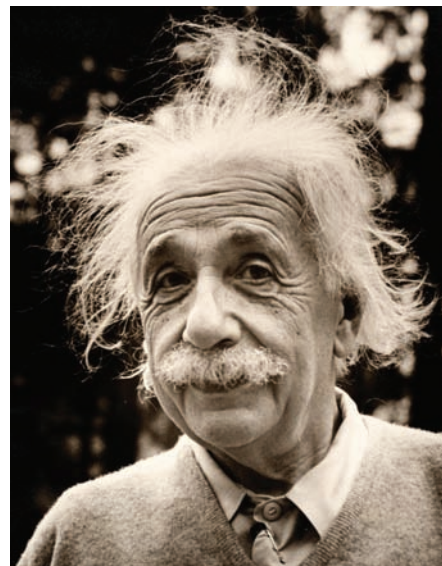
moci diferenciálního počtu předpovídat budoucí polohy těles. V tom je největší síla gravitačního zákona – schopnost *predikce*. Úlohu lze i obrátit a nacházet polohy těles v minulosti. Newtonův gravitační zákon je velmi *jednoduchý*. Slábnutí síly s druhou mocninou vzdálenosti zajišťuje uzavřenou dráhu (kružnici nebo elipsu) malého testovacího tělíska obíhajícího kolem velmi hmotného středu. Jen nepatrně odlišná závislost od druhé mocniny by vedla na neuzavřené trajektorie těles.

Ve své době Newtonův gravitační zákon znamenal geniální nástroj k výpočtu drah těles. Odpovídá samozřejmě době, ve které vznikl a nemohl řešit otázky, které se zdají důležité z hlediska našich současných znalostí. 1) Newtonův gravitační zákon je nutné chápat jako výpočetní předpis; nijak nevysvětluje, co to je gravitační působení a jaký je jeho původ. 2) Prostor a čas je předem dán a tělesa se pohybují nezávisle na těchto entitách. 3) V gravitačním zákoně není implementována konečná rychlost šíření interakce. O změně rozložení hmoty se ostatní tělesa „dozvědí“ okamžitě. 4) Pro nekonečný vesmír vyplněný homogenně a izotropně látkou neposkytuje Newtonův zákon jednoznačné řešení.

## Einsteinova obecná relativita

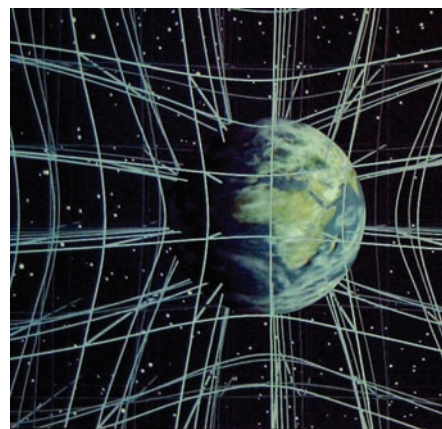
Další posun v chápání gravitace nastal až ve 20. století. V roce 1916 publikoval Albert Einstein zcela revoluční obecnou relativitu, která se stala novou teorií gravitace. V obecné relativitě zakřivuje každé těleso prostor a čas kolem sebe a v tomto pokřiveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. *geodetikách*. K existenci prostoru a času přispívají samotná tělesa, bez nich by tyto pojmy neměly smysl. Symbolem obecné relativity je opět jablko, jehož povrch je charakteristicky zakřiven a můžeme na něm pozorovat neeuklidovské efekty, například součet úhlů v trojúhelníku není na povrchu jablka  $180^\circ$  a obvod kruhu není  $2\pi r$ .

Zakřivení prostoru znamená, že kolem hmotných těles neplatí zákony Eukleidovy geometrie. Kdybychom například změřili plochu Slunce a z ní vypočetli poloměr, lišil by se od skutečného poloměru o přibližně 1 km! Natolik Slunce zakřivuje prostor kolem sebe a eukleidovský vzoreček nelze použít. Zakřivení času tělesem znamená, že hodiny jdou jinak na povrchu tělesa a jinak ve větší vzdálenosti. Příkladem může být polohovací systém GPS, kde Země zakříví kolem sebe čas. Hodiny v GPS přijímači, který máte v automobilu, jdou jinak



Albert Einstein (1879–1955), autor současné teorie gravitace, obecné relativity.

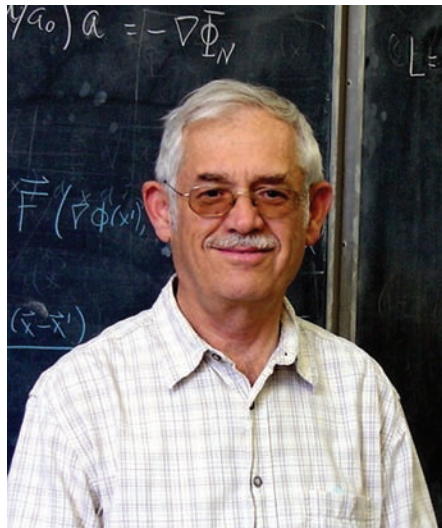
Gravitace je podle Einsteinovy teorie ekvivalentní pokřivenému světu kolem těles.



**GPS** – globální polohovací systém, navigace pomocí družic umístěných na oběžné dráze Země. Oficiální název je NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System). Systém je vyvíjen 30 let a v roce 2007 byla na oběžné dráze umístěna již čtvrtá generace polohovacích družic. Evropská unie a ESA budují obdobný, ale pouze civilní systém Galileo.

**Teplota absolutní** – míra neuspořádaného pohybu v látce. Stav látky s absolutní nulou znamená stav s minimálním množstvím pohybu, které umožní zákony kvantové teorie (s minimální entropií). Absolutní nuly nelze dosáhnout konečným počtem procesů, lze se jí ale libovolně přiblížit. Absolutní teplota se měří v kelvinech. Jeden stupeň kelvina je roven jednomu stupni Celsia. Kelvinova stupnice má jiný počátek než Celsiova stupnice,  $0\text{ K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Jacob Bekenstein (\*1947), izraelský teoretický fyzik, který dal jako první do souvislosti termodynamiku a fyziku černých děr.



než hodiny na družici, se kterou přístroj komunikuje. Pokud by software vyhodnocující polohu nepočítal se zakřivením času naší Zemí, rozešla by se udávaná poloha od skutečné za 24 hodin o přibližně 10 kilometrů!

Obecná relativita předpověděla řadu jevů, které jsou dnes pozorovány a nejsou slučitelné s newtonovskou fyzikou. Připomeňme alespoň černé díry, gravitační čočky, gravitační vlny, červený gravitační posuv nebo expanzi vesmíru. Vzhledem k velké úspěšnosti při objasňování mnoha pozorovaných jevů se obecná relativita stala jedinou obecně uznávanou teorií gravitace.

## Gravitace a termodynamika

Souvislost mezi gravitací a termodynamikou poprvé ukázal izraelský teoretik Jacob Bekenstein na myšlenkovém pokusu s černou dírou. Mějme v blízkosti černé díry dvě kabinky spojené lankem vedeným přes kladku. Vzdálenější kabinku naplníme fotony (elektromagnetickým zářením) o teplotě  $T$ . Tato kabinka je těžší a černá díra ji přitáhne. V blízkosti horizontu černé díry otevřeme spodní část kabinky a fotony se vysypou do černé díry. Dolní kabinka zůstane prázdná. Mezitím naplníme horní kabinku fotony a celý děj se opakuje. Plná kabinka sjede k horizontu, vyprázdníme ji atd.

Celý experiment je z hlediska termodynamiky tepelným strojem. Roli chladiče má v tomto experimentu horizont černé díry, do kterého házíme fotony. Bekenstein určil z termodynamiky teplotu tohoto chladiče a tedy formální teplotu horizontu černé díry.

Má ale nějaký hlubší smysl přiřadit horizontu černé díry teplotu? Neměla by potom černá díra, jako každé těleso, zářit tepelným zářením? Odpověď na sebe nenechala dlouho čekat. Již po dvou letech publikuje v roce 1975 Stephen Hawking práci, ve které ukazuje, že pokud vezme v úvahu kvantové jevy, bude skutečně černá díra tepelně zářit na Bekensteinově teplotě. Jev můžeme buď chápat jako kvantové tunelování z oblastí pod horizontem nebo jako kreaci páru částice-antičástice v blízkosti horizontu černé díry, při kterém antičástice se zápornou hmotou (jde o virtuální páry, jejichž celková hmotnost musí dát navenek nulu) končí pod horizontem, a zbývající částice se jakoby vynoří v blízkosti horizontu. Jevu se říká Hawkingovo vypařování. Vlnová délka maxima tohoto vyzařování je řádově rovna Schwarzschildovu poloměru. Čím menší je černá díra, tím vyšší má Bekensteino-



vu teplotu a tím intenzivněji září (se zmenšujícími se rozměry částice snadněji tunelují ven). Konec vypařování černé díry by tak mohl mít charakter exploze.

Bekensteinova teplota je pro makroskopické objekty mimořádně malá a „odpaření“ černé díry vychází neporovnatelně vyšší než stáří vesmíru. Například pro černou díru s hmotností Slunce vychází teplota povrchu  $10^{-7}$  K a doba odpaření  $10^{62}$  let. Pro běžné černé díry tedy jev není pozorovatelný.

## Princip maximální entropie

Představme si nějakou prostorovou oblast, třeba kulového tvaru, do které budeme odkládat stále větší a větší množství látky. Množství informace uvnitř oblasti poroste a s ním poroste i entropie oblasti. Uvedenou proceduru nelze ale opakovat donekonečna. V určitém okamžiku množství hmoty v oblasti překročí kritickou mez a oblast se stane černou dírou. Existuje tedy maximální entropie, kterou je možné do dané oblasti „uskadnit“. Tomuto tvrzení se říká *princip maximální entropie*. Z principu maximální entropie plyne zajímavá skutečnost. Víme, že látka je složená z atomů, atomy z jader a obalů, jádra z neutronů a protonů, neutrony a protony z kvarků. Tato hierarchie nemůže jít do nekonečna, jinak by entropie každým dělením vzrostla a celková entropie konkrétní konečné oblasti složené z částic by byla nekonečná. Pokud je princip maxima entropie správný, plyne z něho, že existuje určitá poslední hranice dělení elementárních částic na subčástice, za kterou z principiálních důvodů není možné jít.

Jinou otázkou je, co se stane s entropií oblasti, když se promění v černou díru. Pokud by entropie zmizela, odporovalo by to druhé větě termodynamické, podle které může entropie uzavřeného systému jen růst. Od Bekensteinových

**Entropie** – v termodynamice je definována vztahem  $dS = dQ/T$ , kde  $dQ$  je diferenciál tepla a  $T$  je absolutní teplota ( $1/T$  je integrační faktor). Takto zavedená entropie je na rozdíl od tepla úplným diferenciálem, její integrál nezávisí na cestě ve stavovém prostoru. Ve statistice má entropie význam logaritmické míry pravděpodobnosti realizace stavu, v kvantové teorii je logaritmickou mírou počtu kvantových stavů, kterými lze daný makroskopický stav realizovat.

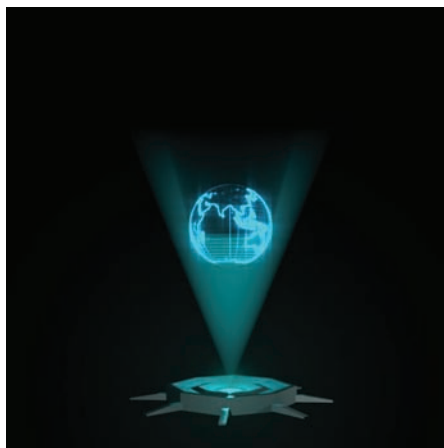
Jedna z variant Bekensteinova myšlenkového experimentu s fotony.



**Informace** – veličina, která má různý význam v různých oborech. V technických vědách znamená zprávu zapsanou jako uspořádaný řetězec symbolů. Nejmenší informací je jeden bit odpovídající zápisu dvoustavové veličiny (0/1, ano/ne atd.). Ve fyzice může jít o cokoli, co je schopno ovlivnit stav systému. Informace lze přenášet za pomoci vln nebo jiných signálů. Logaritmicovou mírou informace obsažené v látce je entropie.

**Holografie** – forma záznamu obrazu, která umožňuje zachytit jeho trojrozměrnou strukturu na dvourozměrný obrazový nosič neboli hologram (fotografická deska, binární záznam) a jeho opětovnou rekonstrukci. Na hologram se zaznamenává jak intenzita, tak fáze světla. Holografii objevil Dennis Gabor v roce 1948, kvalitní hologramy byly ale pořízeny až po objevu laseru.

Z dvojrozměrného hologramu je možné zrekonstruovat třírozměrný obrázek předmětu. Zdroj: Gigibuzz.



a Hawkingových úvah je k řešení jen krůček. Entropie by mohla být, podobně jako teplota, lokalizovaná na horizontu černé díry. Toto řešení navrhnul již Stephen Hawking při svých úvahách o termodynamice černých děr.

Jenže entropie souvisí s informací, a tak okamžitě vzniká další otázka: Jak může být informace uložena na povrchu (horizontu) černé díry? Možné řešení ukázali Gerard 't Hooft a Leonard Susskind v roce 1994. Představme si černou díru, ze které unikají fotony i jiné částice mechanismem Hawkingova vypařování. Fotony mají tepelné spektrum. Černá díra se vypařováním velmi pomalu zmenšuje a v daleké budoucnosti zcela zanikne. Tomu můžeme zabránit – zajistíme zvenku přísun fotonů do černé díry tak, abychom dosáhli rovnovážného stavu. Hmotna unikající z černé díry vypařováním je kompenzována fotony (předpokládejme, že monoenergetickými, tj. jedné konkrétní vlnové délky), které posíláme do černé díry. Vytvořili jsme tak velmi absurdní stroj. Trvale do něho házíme fotony o jedné jediné energii a ven vylétávají fotony s tepelným spektrem. Tomuto paradoxu říkáme *informační paradox*. Jeho řešení je asi i řešením otázky lokalizace entropie černé díry. Foton, který přilétá do černé díry má energii, tudíž i hmotnost, která způsobí lokální vzduť horizontu. Fotony vylétávající v místě vzduť už nebudou tepelné. Navíc každý z nich také zdeformuje horizont. Horizont černé díry tak nebude vůbec sférický, ale plný nejrůznějších drobných fluktuací způsobených kombinací gravitačních a kvantových jevů. Právě tyto fluktuace by mohly být nositelem informace na povrchu černé díry.

## Holografický princip

Lokalizace entropie na povrchu je poněkud zvláštní, uvědomíme-li si, že entropie za normálních okolností roste s počtem částic a tedy s objemem, nikoli s plochou. V případě černé díry je veškerá informace o látce v nitru černé díry lokalizována na jejím povrchu. Jde o jednu z mnoha variant holografického principu, podle kterého může být informace o  $N$ -dimenzionální oblasti zakódována na  $N-k$  rozměrném holografickém plátně (hologramu, chcete-li), v našem případě horizontu černé díry. Obdobná situace je známa v matematice, v teorii komplexní proměnné. Má-li komplexní funkce komplexní proměnné v určité oblasti komplexní derivaci (říkáme, že je *holomorfní*), postačí znát hodnoty této funkce na hranici oblasti a hodnoty uvnitř už jsou jimi určeny.

Platí holografický princip jen pro komplexní proměnnou v matematice a černé díry ve fyzice, nebo jde o hlubší princip, na který jsme náhodou přišli při studiu termodynamiky černých děr? Mnoho vědců věří, že holografický princip je jedním z nejzákladnějších přírodních zákonů. Počet dimenzí modelu nemusí být příliš důležitý, protože problém lze převést na jinou úlohu na množině s menším počtem dimenzí. Například lze ukázat, že za určitých předpokladů je model homogenního a symetrického vesmíru s gravitační interakcí a zápornou křivostí ekvivalentní kvantové teorii pole bez gravitace na hranici této oblasti.

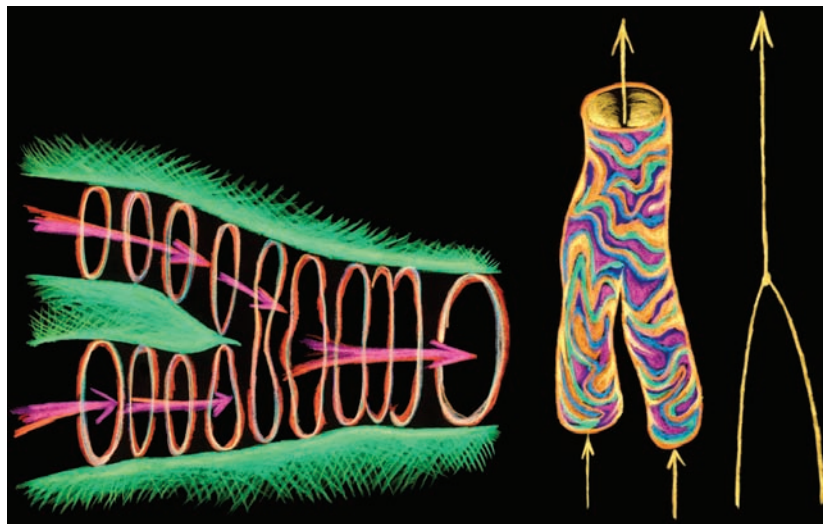
Formulací holografického principu je velké množství a pro naše účely nejsou jednotlivé nuance důležité. Holografický princip je v tuto chvíli stále nepotvrzenou hypotézou. Pokud by měl platit pro vesmír jako celek, není zcela jasné, kam umístit holografické projekční plátno, na němž by byla lokalizována veškerá informace o celém vesmíru. Možná by šel nějak využít stále se rozpínající horizont viditelného vesmíru, s takovou představou se lze ale jen těžko ztotožnit. Na druhé straně měřítkové škály, v mikrosvětě, je situace zajímavější. Pokud jsou částice skutečně strunami ve vícerozměrném světě, nevytvářejí v časoprostoru světočáry jako bodové částice, ale světoplochy. Právě světoplocha struny by mohla být příslušným holografickým plátnem, na němž je lokalizována veškerá informace o vnitřku struny. Šlo by o zcela přirozenou nepřekročitelnou hranici, za kterou již není možné z principiálních důvodů jít.

## Verlindeho hypotéza a její vznik

Holografický princip se stal velmi oblíbeným nástrojem teoretických fyziků. V roce 1995 se podařilo americkému teoretickému fyzikovi Tedu Jacobsonovi (1954) zformulovat rovnice obecné relativity pomocí termodynamických vlastností horizontu událostí. Erik Verlinde přidal koncept entropické síly (síly způsobené růstem entropie mikroskopického systému) a nová

**Holografický princip** – skutečnost, že černé díře lze přiřadit entropii lokalizovanou jen na Schwarzschildově horizontu černé díry. Tato informace je pravděpodobně uložena ve fluktuacích horizontu způsobených jak gravitačními, tak kvantovými jevy, a je, obdobně jako dvojrozměrný hologram, nositelem informace o třírozměrném vnitřku černé díry. Mnoho autorů považuje holografický princip za zásadnější a aplikuje ho buď na celý vesmír nebo naopak v mikrosvětě na světoplochy strun.

*Světoplochy strun. Souvisí snad holografický princip s těmito plochami?*







Anglický teoretik Stephen Hawking (\*1942) přispěl výraznou měrou k pochopení vztahů mezi obecnou relativitou, kvantovou teorií a termodynamikou.

Nizozemský teoretik Erik Verlinde (\*1962), autor hypotézy, podle níž není gravitace skutečnou silou, ale jen projevy kvantových vlastností mikrosvětla.



hypotéza byla na světě. Podle Verlinda gravitace jako interakce neexistuje. Je jen makroskopickým projevem růstu entropie mikroskopických systémů, nic víc...

Erik Verlinde je původem z Holandska, kde se narodil v roce 1962 spolu s dvojčetem Hermanem. Oba bratři mají mimořádné nadání pro exaktní vědy a vystudovali je na univerzitě v Utrechtu. Diplomovou práci Erika vedl Gerard 't Hooft, Erik jí završil magisterská studia v roce 1985. Titul PhD získal Erik v roce 1988 pod vedením Bryce DeWitta. Poté do roku 1993 působil v Princetonu jako profesor teoretické fyziky. Ve své profesní kariéře se věnuje zejména teorii strun, která je jedním z kandidátů na spojení obecné relativity a kvantové teorie pole. Jeho bratr Herman se stal profesorem matematiky v Princetonu, a tak byla akademická kariéra obou bratrů těsně provázaná. Erik Verlinde se v roce 1993 přestěhoval zpět do Holandska, kde působí na Univerzitě v Amsterdamu. Souběžně má úvazky v americkém Princetonu, na holandské Univerzitě v Utrechtu a v Evropském středisku jaderného výzkumu CERN.

V létě roku 2009 byl Erik Verlinde ve Francii na dovolené a těsně před odletem do Holandska mu zloději ukradli z hotelu věci včetně cestovních dokladů. Erik musel neplánovaně zůstat ve Francii o týden déle, než zamýšlel. V průběhu tohoto týdne ho napadl koncept gravitace jako entropické síly. Podstatou je, že gravitaci (Newtonovu i Einsteinovu) lze odvodit ze statistického chování mikroskopických objektů, aniž by mezi nimi nějaká síla vůbec působila. Gravitaci tak Erik Verlinde přestal chápat jako skutečnou sílu. V únoru 2011 se anglickým fyzikům Samuelu Braunsteinovi a Manasu Patrovi z Univerzity v Yorku podařilo na základě Verлиндových myšlenek odvodit spektrum Hawkingova vypařování černých děr bez použití časoprostoru zakřiveného obecnou relativitou.

### Verlindeho pojetí gravitace

Když rozbijete v místnosti lahvičku s voňavkou, ucítíte ji po chvíli v celé místnosti. Je to způsobeno difúzí, při které se molekuly vůně pohybují chaoticky a postupně se šíří prostorem. Dokonce lze zavést tzv. termodynamickou sílu (je úměrná gradientu koncentrace vůně), která je z makroskopického hlediska za šíření vůně zodpovědná. Síla, které mají původ v mikroskopickém chování látek, je velké množství. Uvedme ještě alespoň dva příklady. Prvním je osmóza (difúze přes

polopropustnou membránu) a druhým je elastická síla. Když natáhnete gumičku, má snahu se vrátit do původní délky. Makroskopicky pociťujete sílu, která může být popsána Hookovým zákonem. Původ této síly je v růstu entropie na mikroskopické úrovni a jde o typický příklad entropické síly. Erik Verlinde založil svou teorii gravitace na dvou předpokladech:

**1. V mikrosvětě platí holografický princip.** K primárním pojmům patří informace (entropie) lokalizovaná na hranici určité malé oblasti. Můžeme si představit, že svět malých rozměrů je rozdělen na určité buňky, na jejichž hranicích (holografickém plátně) je nesena informace o vlastnostech jejich nitra. Existence prostoru a času uvnitř je důsledkem informace na povrchu buňky (jde o zásadní odlišnost od obecné relativity, kde jsou zdrojem času a prostoru tělesa samotná!). Mikrosvět si na elementární úrovni můžeme představit například jako prostorovou mříž základních buněk (tzv. pixelizace světa). Na jejich tvaru nezáleží, podstatné je, že veškerá informace je uložena na hranicích buněk.

**2. V mikrosvětě platí druhá věta termodynamická,** tj. pohyb částic způsobuje růst entropie na hranicích buněk (těm je přiřazena entropie a teplota). Pokud se částice v blízkosti stěny (holografického plátna) pohne o  $\Delta x$ , způsobí změnu entropie stěny o  $\Delta S$  a změnu tepelného obsahu o  $T\Delta S$ . Na částici přitom působí síla  $F$  daná energetickou bilancí  $T\Delta S = F\Delta x$ . V případě uzavřeného holografického plátna se tato entropická síla projevuje jako gravitace.

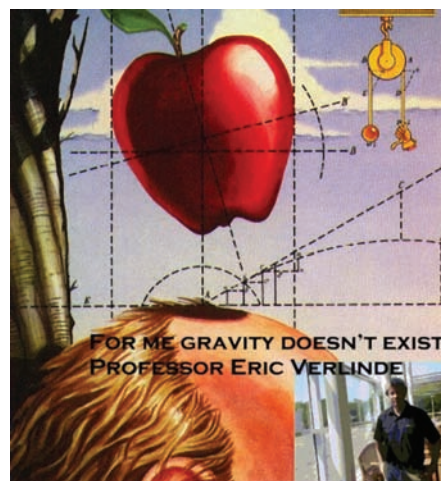
Verlindovo pojetí řeší zcela neobvykle existenci prostoru a času. Prostor a čas se automaticky vynoří v důsledku existence informace (entropie) na uzavřeném holografickém plátně (hranici oblasti). Stejně tak, jako vznikne prostor a čas, je i zákon setrvačnosti (těleso setrvává v rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud na něj nepůsobí síla) důsledkem existence informace na hranici oblasti. Verlinde ukázal, že růst entropie v jeho holografickém světě vede na gravitační sílu (ať v Newtonově nebo v Einsteinově pojetí). Gravitační tak chápe jako entropickou sílu, což znamená, že gravitace jakožto primární interakce neexistuje, je jen důsledkem statistického chování objektů mikrosvěta, stejně jako síla elastická.

Verlindovo pojetí gravitace je zatím neověřenou a velmi odvážnou hypotézou. V první řadě bude nutné, aby na základě jeho hypotézy byly předpovězeny experimenty, které se neshodují s obecnou relativitou. O případné pravdivosti či nepravdivosti hypotézy pak rozhodne

**Mikrosvět** – svět malých rozměrů neuchopitelný lidskými smysly. V tomto světě platí zákony kvantové teorie, charakteristické jsou diskrétní hladiny některých veličin, dualismus vln a částic a nekomutativnost příslušných teorií.

**Makrosvět** – svět uchopitelný lidskými smysly, svět škál, které jsou pro nás snadno představitelné, od tisícín milimetru po miliony kilometrů. Na straně malých rozměrových škál stojí mikrosvět, na straně velkých megasvět. Hranice mezi těmito "světy" není přesně definovaná a často jde o subjektivní hledisko použití.

Podle profesora Verlindeho gravitace neexistuje...





Neexistence gravitace v podání časopisu Times (těsně po zveřejnění Verlindeho hypotézy). Zdroj: Times.

experiment. Pokud by Verlindeova představa byla pravdivá, znamenalo by to existenci jen tří základních přírodních sil. Je možné, že by Verlindeova teorie mohla vyřešit i ožehavý problém temné energie a temné hmoty, ale nepředbíhejme. Zatím jde sice o velmi zajímavou, ale nepotvrzenou konstrukci.

■ Petr Kulhánek, 2. 12. 2011,  
AB 46/2011



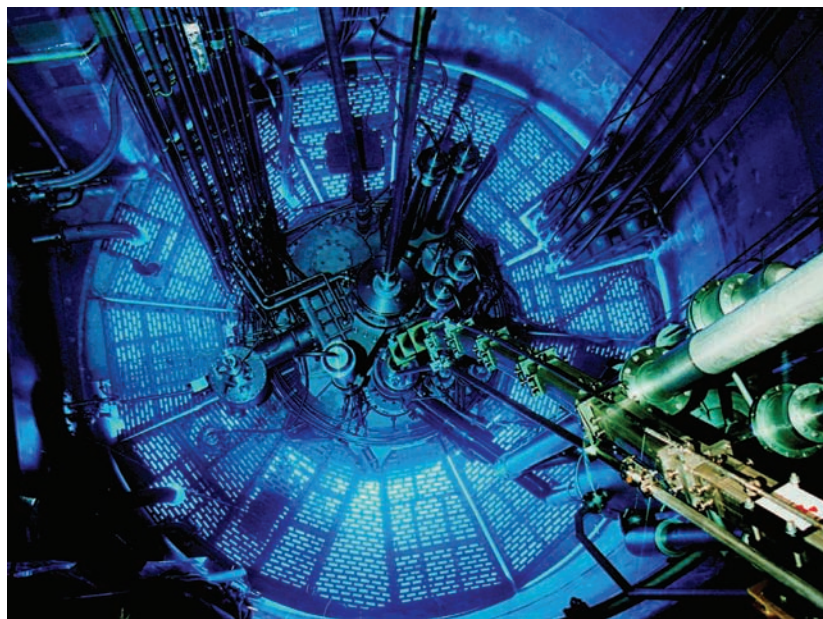


## Měření gravitace v mikrosvětě

Gravitační síla je nejslabší ze všech čtyř interakcí. Její projevy jsme zatím viděli jen v makrosvětě. Gravitace řídí pády těles, pohyby planet kolem Slunce nebo pohyby hvězd v galaxiích. Její působení na elementární částice je velmi malé a donedávna bylo neměřitelné. Ve světě elementárních částic dominuje elektromagnetická interakce, která je mnohem silnější než gravitace. A na krátkých vzdálenostech se setkáme s interakcí silnou, která drží pohromadě atomové jádro a interakcí slabou, která je zodpovědná například za beta rozpad. V roce 2010 se metodami kvantové teorie podařil neuvěřitelný kousek – bylo změřeno zakřivení času způsobené gravitačním působením Země na výškovém rozdílu 0,1 mm. Kvantové měření sledovalo jev způsobený gravitací. Dvě neslučitelné teorie si podali ruce a výsledkem byla mimořádná přesnost změření červeného gravitačního posuvu. První vlašťovka, první příslib nové generace měřících metod pro gravitační interakci, založených na kvantové teorii.

### Neutron jako testovací míček

Pokusy s tíhovým polem působícím na elementární částice prováděla skupina vědců pod vedením profesora Hartmuta Abeleho z Vídeňské technické univerzity. Součástí skupiny jsou i vědci z Laueho-Langevinova ústavu v Grenoblu (ILL, *Institute Laue-Langevin*), kde byly experimenty fyzicky prováděny. Jako ideální testovací míček posloužil neutron. Pro gravitační pokusy má totiž ideální vlastnosti. Neutron je neutrální částice, která je minimálně ovlivňována všudepřítomnými elektrickými a magnetickými silami.



**Gravitační interakce** – interakce působící na všechny částice bez výjimky. Má nekonečný dosah a její intenzita ubývá s kvadrátem vzdálenosti. Současnou teorií gravitace je obecná relativita publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1916. Podle této teorie kolem sebe každé těleso zakřivuje prostor a čas a v tomto pokriveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách. Obecná relativita předpověděla řadu jevů, které z Newtonovy teorie gravitace nevyplývají.

Neutronový zdroj v ILL v Grenoblu. Jde o štěpný reaktor, který je nejintenzivnějším kontinuálním zdrojem neutronů na světě. Pohled shora. Zdroj: ILL.

**Axion** – hypotetická částice temné hmoty, málo hmotný, slabě interagující boson se spinem 0 postulovaný kvantovou chromodynamikou. Souvisí s nepozorovaním narušení CP symetrie v silné interakci. Je jedním z kandidátů na temnou hmotu. Měl by vznikat v období krátce po Velkém třesku.

**Struny** – jednodimenzionální útvary ve vícerozměrném světě (uzavřené nebo otevřené), jejichž vibrační stavy odpovídají jednotlivým elementárním částicím. Jde o podstatný prvek tzv. strunových teorií, které se pokoušejí spojit svět kvantové teorie se zakřiveným prostoročasem obecné relativity.

**LASER** – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Roku 1958 ukázal C. Townes spolu s A. L. Schawlowem, že je možné zkonstruovat podobné zařízení jako již existující MASER (pracuje v mikrovlnné oblasti) také pro světlo. První laser zkonstruoval T. H. Maiman v roce 1960.

Laueho-Langevinův ústav v Grenoblu.



Neutron je velmi obtížně polarizovatelný, takže na něho nepůsobí ani různé dipólové síly, jako je například van der Waalsova síla. Neutron má pro experimenty s gravitací dostatečnou životnost, jeho poločas rozpadu je přes 800 sekund. K experimentům je ovšem třeba mít zdroj ultrachladných neutronů s velmi nízkou energií. Jedině u takových částic je možné měřit kvantové stavy neutronu v tíhovém poli. Proto byl použit zdroj neutronů z Laueho-Langevinova ústavu v Grenoblu, který vytváří neutrony s energií nižší než 300 nanoelektronvoltů, tomu odpovídá teplota nižší než 2 milikelviny a rychlost nižší než 15 m/s.

### Kvantový ping-pong

Pokud poskakuje na stole míček, může se dostat do libovolné výšky dané jeho celkovou energií. Kvantový míček v tíhovém poli se ale chová poněkud jinak. Může se nacházet jen v určitých energetických stavech daných řešením Schrödingerovy rovnice s potenciální energií  $V(z) = mgz$  a okrajovou podmínkou na vlnovou funkci ve tvaru  $\psi(0) = 0$ , která říká, že míček nemůže proniknout do stolu a vždy se odrazí. Kvantový míček může vystoupat jen do určitých výšek daných možnými energetickými stavy. Nejnižší energetický stav pro poskakující míček má energii 1,41 peV (pikoelektronvoltů), druhý 2,46 peV, třetí 3,32 peV atd. Pro normální pinpongový míček nejsou tyto stavy měřitelné, pro ultrachladné neutrony je možné, jak uvidíme dále, takové stavy detekovat. Pravděpodobnost výskytu míčku v určité výšce nad podložkou je dána druhou mocninou vlnové funkce, v tomto případě jde o Airyho funkci, na které vede řešení Schrödingerovy rovnice.

### Gravitační rezonanční spektroskopie

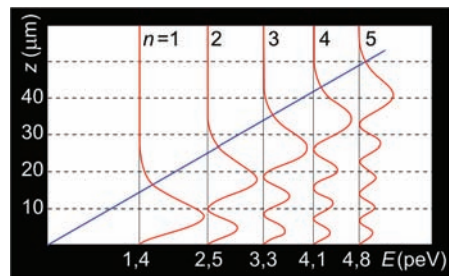
K nejpřesnějším experimentálním metodám patří rezonanční metody. Vzpomeňme si například na elektronovou nebo jadernou mag-

netickou rezonanci. Principem těchto metod je přechod systému mezi dvěma kvantovými stavy způsobený vnějším podnětem. V případě neutronu nad podložkou půjde o kvantové stavy v tíhovém poli. A jak vypadal skutečný experiment? Ultrachladné neutrony byly nasměrovány mezi dvě vodorovné desky. Spodní deska sloužila jako podložka, od které se neutron, pohybující se v klasickém případě po parabole, může odrazit. Horní deska byla pomocná a byla zkonstruována tak, aby pohltila neutrony, které se dostaly až do její výšky. Vzdálenost mezi deskami byla přibližně 20 až 25 mikrometrů, takže neutrony v prvním a druhém kvantovém stavu mohly bez problémů prolétnout mezi deskami (nedosáhly výšky druhé desky). Chladné neutrony to ale neměly tak jednoduché. Spodní deska totiž vibrovala řízeným způsobem. Byla rozkmitána za pomoci piezoelektrického jevu a její kmity byly přesně kontrolovány za pomoci laseru. Pokud deska vibrovala, způsobila rezonanční přeskok neutronů mezi prvním a třetím energetickým stavem a většina neutronů mezi deskami neprolétla, protože třetí energetický stav znamená, že se neutron dostal až do výšky horní desky a byl jí absorbován. Pokud dolní deska nevíbrovala, většina neutronů mezi deskami prošla.

## Závěr

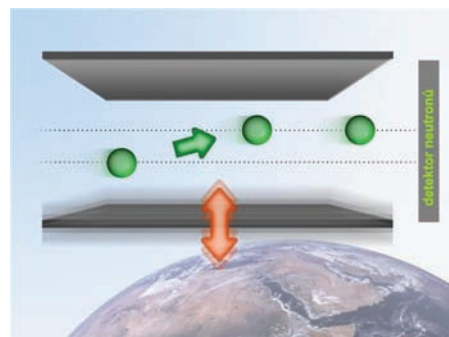
Historicky poprvé byly měřeny kvantové stavy částice v gravitačním poli a bylo možné tyto stavy změnit za pomoci vibrující destičky. Tato rezonanční metoda může mít zcela zásadní vliv na poznání gravitační interakce na malých měřících, kde dosud chyběla jakákoli měření. Máme vysokou šanci se dozvědět, jak gravitace funguje ve světě elementárních částic a zda se skutečnost odchyluje od Newtonových a Einsteinových představ či nikoli. Gravitační rezonanční spektroskopii bude možné hledat předpovězenou vazbu mezi spinem a hmotností částic, ze které plyne existence axionům podobných částic. Gravitační bude možné testovat na tak malých vzdálenostech, že by se na výsledku měření mohla podepsat existence či neexistence strun. Lidem se tak otvírá nové okno do světa gravitace na ultrakrátkých vzdálenostech, které může zcela změnit náš pohled nejen na gravitaci, ale i na její vztah k ostatním interakcím.

■ Petr Kulhánek, 6. 5. 2011, AB 18/2011



*Kvantový míček. Na vodorovné ose je energie míčku, vyznačeny jsou přípustné energetické stavy v kvantové teorii. Na svislé ose je výška nad podložkou. Modrou čarou je znázorněna výška, které by poskakující míček s danou energií dosáhl v klasické mechanice. Červeně je vyznačena kvantová pravděpodobnost výskytu míčku (její hodnota narůstá směrem doprava). Zdroj: Tobias Jenke.*

*Uspořádání experimentu. Neutrony prolétávají mezi deskami vzdálenými 20 až 25 mikrometrů rychlostí přibližně 5 m/s v základním energetickém stavu. Dolní deska může vibrovat a rezonančně předat neutronům energii a vybudit je do vyššího energetického stavu. Detektor napravo sleduje počet prolétlých neutronů. Pokud deska nevíbroje, neutrony prolétnou. Pokud vibruje, dostanou se do třetího energetického stavu a horní deska je pohltí. Zdroj: Videňská technická univerzita.*





## Pevnolátkový maser za pokojové teploty

**MASER** – *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Zařízení, které zesiluje elektromagnetické záření pomocí stimulované emise v mikrovlnném a rádiovém oboru. Obdobně funguje v optickém oboru LASER. Teoreticky byl maser předpovězen v roce 1952 Nikolajem Basovem a Alexandrem Prochorovem. Tato práce však byla zveřejněna až v roce 1954. Mezitím byl v roce 1953 nezávisle realizován Charlesem Townesem, Jamesem Gordonem a Herbertem Zeigrem na Kolumbijské univerzitě. Masery se využívají jako velice přesné etalony frekvence, například v atomových hodinách, jako zesilovače vynikají velice nízkým šumem, díky čemuž mohou být použity například k zesílení signálu od velice vzdálených sond, které vysílají na relativně malých výkonech nebo k radiolokaci. Nezaslužitelnou roli mají rovněž v radioteleskopii. Klasické konstrukce maserů jsou poměrně náročné na provoz (vakuumové systémy, magnetické stínění, silné elektromagnety nebo chlazení tekutým heliem). V roce 2012 byla zveřejněna úspěšná konstrukce maseru, který pracuje za pokojové teploty bez nutnosti magnetického stínění a bez použití vnějšího magnetického pole.

**Stimulovaná emise** – *vynucená emise*. Děj, při kterém atom či molekula vybuzené do stavu, ze kterého je spontánní přechod do nižšího stavu zakázán kvantovými pravidly, po interakci s fotonem s energií odpovídající rozdílu energií těchto stavů, emituje další foton se stejnou fází, frekvencí, polarizací i směrem šíření. Stimulovaná emise tvoří podstatu činnosti kvantových zesilovačů fotonů, v mikrovlnné a rádiové oblasti nazývané masery a v kratších vlnových délkách až po gama záření označovaných jako lasery.

**Pentacén** – *polycyklický aromatický uhlovodík tvořený pěticí lineárně konjugovaných aromatických jader*. Tato molekula se proslavila při prvním bezprostředním pozorování jediné molekuly po-

Přestože byly masery historicky prvními zařízeními, ve kterých se podařilo využít k praktické aplikaci stimulovanou emisi, zůstávaly v době rozmachu mikroelektroniky ve veřejném povědomí ve stínu svých mladších bratrů, laserů. Ruku na srdce, kdo si o maserech vzpomenete na něco dalšího, než že pracují v mikrovlnném oboru, že byly sestrojeny před lasery a že se v nich využívá stimulovaná emise? Možná si někdo vzpomene na atomové hodiny, jiní zas na komunikaci s družicemi či radiofrekvenční teleskopii.

Zatím jsou masery stále natolik nákladné jak z hlediska pořízení, tak provozu, že až dosud byly součástí drahých zařízení, kde potřeba přesné referenční hodnoty frekvence či zesilovače s nízkým šumem převážila nad nutností použít vakuový systém, magnetické stínění, vytvořit silné magnetické pole a chladit systém tekutým heliem. Tato skutečnost se může změnit díky vytvoření prvního pevnolátkového maseru, který pracuje při atmosférickém tlaku, pokojové teplotě, nevdá mu magnetické pole Země a nepotřebuje vnější magnetické pole.

### MASER není LASER

Přestože úspěšná realizace maseru vedla ke konstrukci prvního laseru, konstrukce maseru se poněkud liší od konstrukce kvantových zesilovačů na kratších vlnových délkách. Společným prvkem obou zařízení je princip činnosti, a to sice existence aktivního prostředí, ve kterém se elektromagnetické záření namísto běžného exponenciálního útlumu exponenciálně zesiluje. Na kvantové úrovni je toto chování aktivního prostředí podmíněno stimulovanou emisí. Jelikož platí zákon zachování energie, je jasné, že aktivní prostředí musí být vytvářeno na úkor vnějšího zdroje energie, který je obecně označován jako čerpání. Dalším společným prvkem je zesílení efektu umístěním aktivního prostředí do rezonátoru naladěného na buzenou či zesilovanou frekvenci (u jednopřechodových laserů tato část není nezbytná).

Při konstrukci rezonátoru však narazíme na první zásadní rozdíl. Vlnové délky rádiových vln a mikrovln jsou srovnatelné s rozměry samotného rezonátoru. V prostoru rezonátoru se tedy vytvářejí stojatá vlnění s poměrně malým počtem uzlů, jinak řečeno, v rezonátoru jsou

buzené nízké módy. Zatímco se u laseru jako rezonátor používají polopropustná zrcadla, kterými vystupuje vysoce směrový paprsek záření, masery používají kovovou dutinu, ze které je energie vyváděna do vlnovodu pomocí vazebné smyčky.

Z hlediska směrovosti generovaného záření maser naráží na problém rozměrů. Představme si například polovodičový laser, naladěný na červené světlo o vlnové délce zhruba 600 nm. Fyzicky součástka laseru může být i relativně malá, řekněme šest desetin milimetru u povrchové montáže na desce. Vlnová délka záření se do laseru vejde tisíckrát, což už je dostatečné na to, abychom si mohli zavést pojem paprsku, podél kterého bude v laseru zesilováno záření. U maseru na typické vodíkové čáře 21 cm se dostáváme ke zlomkům metru, které jsou souměřitelné s vlnovou délkou, paprskový popis zcela selhává a můžeme popisovat pouze vybuzení kmitů. Směrovost vysílaného záření je zajištěna nikoli činností maseru, ale vnější směrovou anténou.

Druhým problémem jsou energie fotonů v maseru a jim odpovídající energie přechodů elektronů. I zde se posouváme nejméně o dva až tři řády. Jestliže energie fotonů viditelného světla jsou souměřitelné s rozdíly energetických hladin, které se běžně vyskytují u excitovaných částic, k vytvoření hladin s relativně malými rozdíly energií je potřeba excitované částice v klasickém maseru umístit do vnějšího magnetického pole.

Třetím problémem je teplota. Zatímco u viditelného světla jsou teploty souměřitelné s energií fotonů srovnatelné s teplotou povrchu Slunce, tedy s jednotkami tisíc kelvinů, u rádiových vln a mikrovlň musíme zabránit tomu, aby aktivní prostředí nedegradovaly tepelné kmity samotných částic, které ho tvoří. Toho bylo až dosud dosahováno buď prací ve vysokém vakuu, nebo při teplotách dosažených chlazením tekutým heliem.

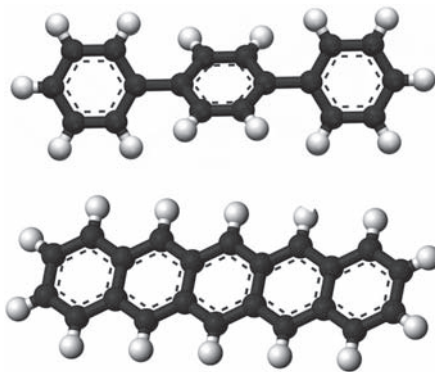
## Posun maserů do pokojových teplot

Zprostředkované vybuzení hladiny, ze které se uskuteční stimulovaná emise pomocí jiného excitovaného stavu, není v realizaci kvantových zesilovačů nic nového. V jednom z neznámějších laserů, helium-neonovém laseru, je čerpáním vybuzen atom helia a srážkou s atomem neonu dojde k vlastnímu vybuzení hladiny potřebné pro činnost laseru. Úspěšný posun činnosti maseru do pokojových teplot je realizován pomocí nezářivého přechodu singletového stavu  $S_1$  do tripletového

*mocí mikroskopie atomárních sil. Pomocí rastrové tunelové mikroskopie byly u pentacénu experimentálně určeny tvary nejvíce a nejméně obsazených elektronových orbitalů. Další prvenství nese jako aktivní příměs prvního pevnolátkového maseru pracujícího za pokojové teploty.*

**Terfenyly** – difenylbenzeny, trifenyly jsou aromatické uhlovodíky, ve kterých jsou na centrální benzenové jádro navázány dva fenylly. Jsou používány jako konzervační látky, které brání růstu plísní. Meta-terfenyl je používán při termotisku, para-terfenyl je laserové barvivo a složka opalovacích krémů. Terfenyly jsou meziproduktem sloučenin používaných jako emulgátory, nestékající maziva, optické projasňovače, změkčovače plastů či aditiva do chladících tekutin. Deriváty terfenylu jsou využívány ve farmacii jako protizánětlivé látky, imunosupresiva či protinádorová chemoterapeutika.

*Molekula p-terfenylu (nahoře). Přísada do opalovacích krémů si našla své místo v barvivových laserech a nyní i maserech. Molekula pentacénu (dole). První jednotlivá molekula pozorovaná mikroskopii atomárních sil se znovu proslavila posunem pevnolátkových maserů do pokojových teplot.*



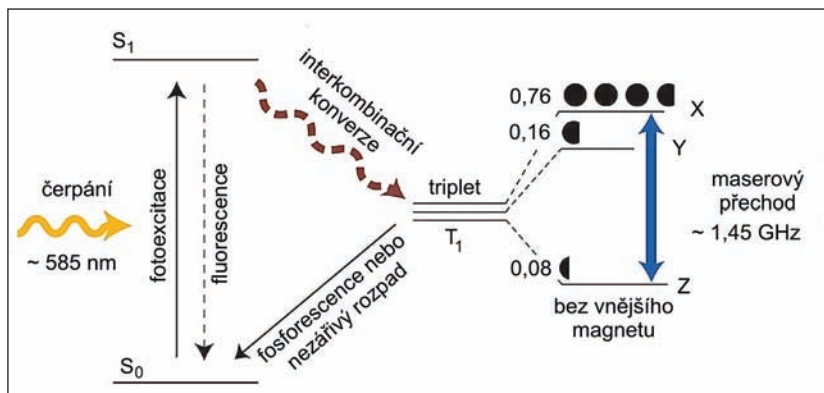


Schéma buzení maseru. Hodnoty u detailu jednotlivých hladin tripletu ukazují pravděpodobnosti obsazení hladin. Zdroj: M. Oxborrow et al. *Nature*, 488 (2012).

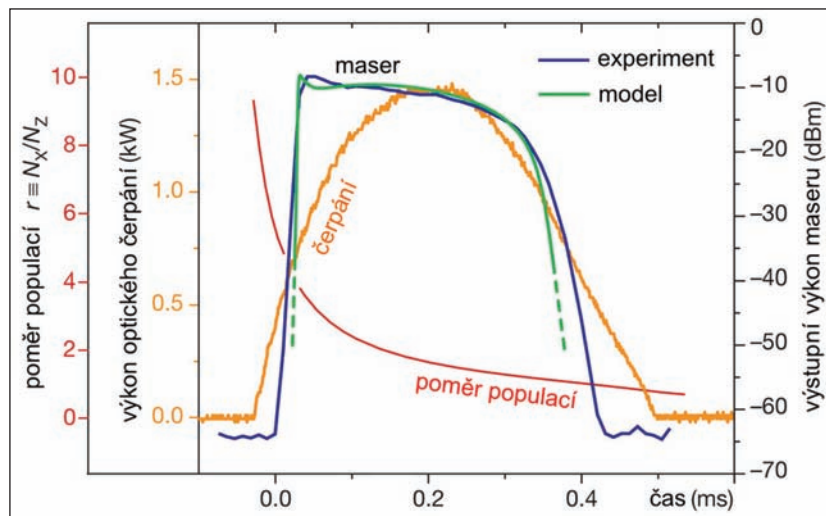
zována nejvyšší hladina. Spontánní přechod elektronů na nejnižší hladinu je zakázaný kvantovými výběrovými pravidly, což jsou vhodné podmínky pro stimulovanou emisi. Samotné vybuzení singletového stavu  $S_1$  je uskutečněno pomocí žlutého světla barvivového laseru.

Rozštěpení tripletu se uskuteční pomocí střídavého magnetického pole, které vzniká při zesilování mikrovlnného pole přímo v rezonátoru. Toto řešení z jedné strany ušetří náklady na vytváření vnějšího stejnosměrného magnetického pole, z druhé strany vyřeší problém s teplotou.

Vzhledem k tomu, že magnetické pole kmitá s frekvencí buzené vlny 1,45 GHz, triplet se účinkem magnetického pole rozštěpí na zlomky nanosekundy, což jsou příliš krátké časy na relaxaci systému s okolím. Interkombinační konverze je však dostatečně rychlá na to, aby stačila zajistit vybuzení  $T_1$ .

### Práce by levné masery měly dost...

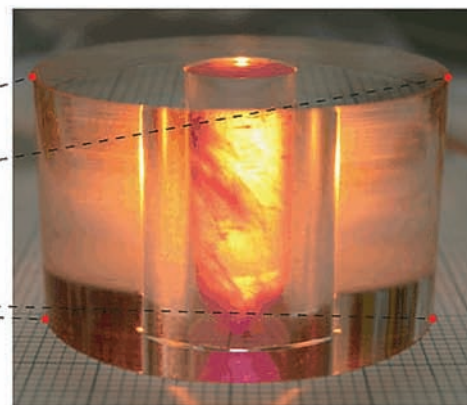
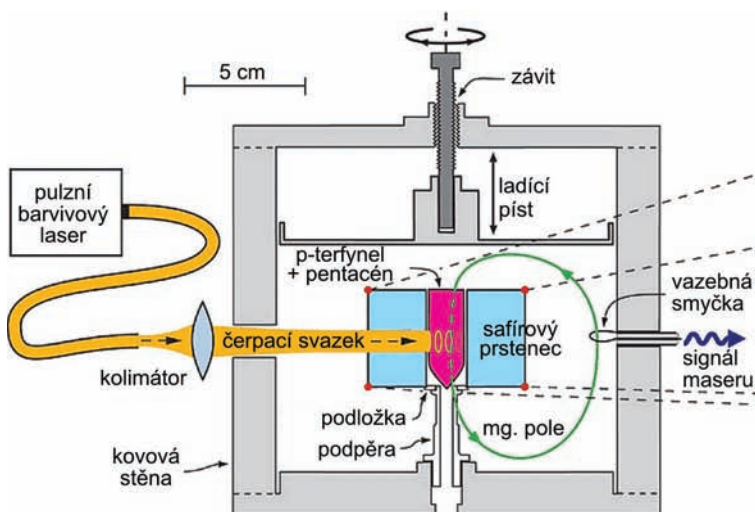
Je samozřejmě obtížné odhadnout význam a dopad revolučního objevu. Historie už zažila dost slibných technologií, které po dlouhá desetiletí zůstaly slibnými, případně





sliby byly plané, protože vývoj šel jiným směrem. Nicméně pokud by organické krystaly začaly chrlit jeden nový maser za druhým, určitě to bude znamenat bouřlivý rozvoj telekomunikačních sítí zcela nové generace. Mikrovlnná medicína by jen v diagnostice vysoce přesnými a zároveň výkonnými zdroji (nový typ maseru v režimu oscilátoru má o osm řádů vyšší výkon než klasický vodíkový maser) získala nástroj, který by byl schopen doplňovat současnou ultrazvukovou diagnostiku a byl by srovnatelně nákladný, terapeutické možnosti by získaly neinvazivní nástroj pro ošetření hlubokých tkání, případně zdroj spouštěcích signálů pro nanomedicínu. Pro radioteleskopii a mikrovlnnou teleskopii by nová generace maserů znamenala možnost daleko detailnějšího mapování oblohy v těchto oblastech spektra, včetně pohledu k nejranějším vývojovým fázím vesmíru.

■ Vítězslav Kříha, 7. 10. 2012, AB 37/2012



Energetické charakteristiky maserového pulsu.  
Zdroj: M. Oxborrow et al., Nature 488 (2012).

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

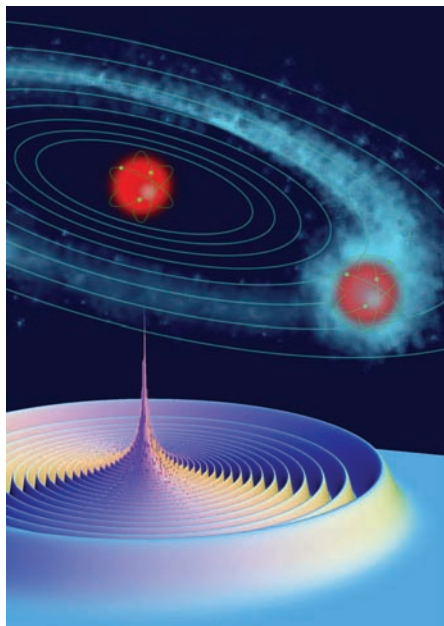
**Singletový stav** – stav kvantového systému, například elektronového obalu molekuly, při kterém jsou všechny spiny spárovány. Celkový spin je nula a multiplacita stavu je rovna 1.

**Tripletový stav** – stav kvantového systému, například elektronového obalu molekuly, ve kterém je celkový spin roven jedné a multiplacita rovna třem. Zářivý přechod molekul z tripletového stavu do singletového základního stavu je vzhledem k dlouhým časům relaxace označován jako fosforescence. Skutečnost, že se molekula kyslíku za pokojové teploty vyskytuje v tripletovém stavu, umožňuje výskyt kyslíkové atmosféry na Zemi, neboť tento stav je z hlediska chemické kinetiky málo reaktivní.

## Rydbergovy atomy simulují trojanské asteroidy

**Rydbergův atom** – atom excitovaný do vysokého hlavního a vedlejšího kvantového čísla. Rydbergovy atomy jsou velmi citlivé na okolní elektrická a magnetická pole. Elektronová vlnová funkce může být u těchto atomů aproximována klasickým pohybem elektronu po kružnici. Vysoce excitované atomy jsou pojmenovány podle švédského fyzika Johannese Roberta Rydberga (1854–1919).

Rydbergův atom. Zdroj: Universita ve Stuttgartu.



Kromě známých objektů, jako jsou planety, komety a planetky hlavního pásu se v naší sluneční soustavě nachází řada dalších kategorií objektů, mezi něž patří i Trojané, skupinka planetek obíhajících Slunce před a za planetou Jupiter. Trojané, řádově tisíce planetek, se nacházejí v Lagrangeových bodech L4 a L5 soustavy Jupiter-Slunce. Lze nalézt podobné chování elektronů v atomárním obalu? Na první pohled by se zdálo, že takovéto stabilní konfigurace nám v atomu kvantová mechanika neumožní. Ukázalo se ale, že lze obdobné chování nalézt v tzv. Rydbergových atomech. To jsou atomy, které mají alespoň jeden elektron excitovaný do extrémně vysoké energetické hladiny. Proto je interakce mezi tímto elektronem a jádrem daleko slabší a rozdíly mezi kvantovou a klasickou mechanikou se v takovémto systému poněkud stírají. Pojďme se podívat, jaké analogie si můžeme dovolit při studiu gravitačního pole a chování elektronových balíků v atomárním obalu.

### Rydbergovy atomy

Energie vnějšího elektronu vodíkupodobných atomů, tj. atomů, které mají v neuzavřené slupce jeden elektron, je záporná a nepřímo úměrná druhé mocnině hlavního kvantového čísla

$$E_n \sim -1/n^2.$$

Nejnižší je pro základní stav (je nejstabilnější), kde je hlavní kvantové číslo  $n = 1$ . Pro vyšší excitované stavy tato energie roste a pro velmi vysoká  $n$  se blíží zleva k nule. Energie vysoc excitovaného elektronu sice roste, ale roste ke konečnému číslu (nule), zatímco nejpravděpodobnější vzdálenost výskytu elektronu od jádra roste k nekonečnu. Tuto analogii z gravitačního pole známe. Planeta vázaná gravitačně ke Slunci má celkovou mechanickou energii zápornou. Čím více se energie planety blíží k nule (směrem od záporných hodnot), tím je poloosa trajektorie planety větší a v případě nulové celkové energie se trajektorie stává parabolou a oběžnice uniká do nekonečna. Proto nás nepřekvapí, že v případě Rydbergových atomů je elektron velice citlivý na vnější elektromagnetické pole a atom se může snadno ionizovat, tedy

tento elektron s vysokým hlavním kvantovým číslem  $n$  zcela ztratit. Povšimněme si také, že rozdíl dvou sousedních hladin pro vysoké hodnoty hlavního kvantového čísla  $n$  se blíží k nule, a proto jsou přechody mezi takovými hladinami velmi snadné.

Analogie mezi planetárním modelem a elektronovým obalem přeci jenom pokulhává. Hlavní příčina je v kvantové mechanice, která například nedovoluje libovolné energie, ale jen diskrétní (nespojité) hodnoty, jak je patrné ze vztahu uvedeného výše. Rovněž tak moment hybnosti elektronu nemůže být libovolný, ale je kvantovaný. Podle Bohrových představ by měly být povoleny pouze takové trajektorie, jejichž obvod je celočíselným násobkem vlnové délky elektronu, tj.

$$2\pi r = n\lambda.$$

Dalším podstatným rozdílem je fakt, že trajektorie planety okolo Slunce je vždy rovinná, zatímco elektron se může vyskytovat ve všech třech základních směrech. Přesto se pojdme podívat na paralelu mezi elektronem a planetou blíže.

### Paralela mezi elektronem a planetou

Na obrázku jsou trajektorie planet s různým momentem hybnosti  $L$  (hodnoty jsou bezrozměrné). Představme si, že všechny planety mají stejnou celkovou mechanickou energii, tj. součet kinetické a potenciální energie. Liší se pouze velikostí tečné složky rychlosti v místě nejvíce napravo každé z elips, to znamená, že se liší velikostí momentu hybnosti  $L$ . V klasické fyzice by možnost, kdy je moment hybnosti roven nule, vedla k pádu do centra. To je ale v případě soustavy jádro – elektron nemožné, protože lokalizaci elektronu nekonečně blízko jádra vylučují Heisenbergovy relace neurčitosti

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2.$$

Nulové velikosti momentu hybnosti odpovídají atomové orbitaly  $s$ , které jsou pro všechny energie (různá hlavní kvantová čísla  $n$ ) kulové symetrické. Naopak čím větší je moment hybnosti, tím více se může tvar trajektorie blížit kružnici, a to až do případu, že má těleso právě kruhovou rychlost. Poté pak budou trajektorie opět elipsy a v případě vysoké rychlosti se trajektorie stane parabolickou, popřípadě

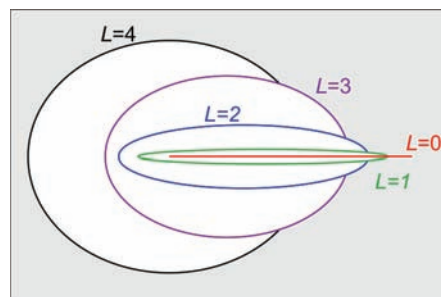
**Kvantový stav** – soubor pozorovatelných parametrů kvantového systému, kterými je systém plně charakterizován. Popis stavu musí respektovat omezení kvantové mechaniky na současnou měřitelnost či neměřitelnost veličin. Například základní energetický stav atomu značíme symbolem  $|S\rangle$ , vakuový stav symbolem  $|0\rangle$ , živou kočku označíme  $|Z\rangle$ , mrtvou kočku  $|M\rangle$  a podobně. Kvantový stav je zpravidla charakterizován sadou kvantových čísel a je matematicky vyjádřen tzv. vlnovou funkcí (prvkem Hilbertova prostoru stavů).

**Kvantové číslo hlavní** – značíme  $n$ , čísluje energii systému  $E_n$ . Hodnota energie závisí na průběhu potenciální energie. Energie je proto jinak kvantována ve vodíkovém atomu, jinak v harmonickém oscilátoru, kvantové jámě atd.

**Kvantové číslo vedlejší** – značíme  $l$ , čísluje velikost momentu hybnosti,  $L^2 = l(l+1)\hbar^2$ . U atomu vodíku nabývá vedlejší kvantové číslo hodnot  $0, 1, \dots, n-1$ .

**Kvantové číslo magnetické** – značíme  $m$ , čísluje projekci momentu hybnosti do libovolného směru. Ta může nabývat celistvých násobků Planckovy konstanty  $\hbar$ , tedy  $L_x = m\hbar$ ,  $m$  nabývá celistvých hodnot mezi  $-l$  a  $+l$ .

Trajektorie s různým momentem hybnosti.





**Orbital** – oblast v atomárním obalu, kde se vyskytuje elektron. Pravděpodobnost výskytu elektronu v orbitálu je rovna kvadrátu velikosti komplexní vlnové funkce.

**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.

hyperbolickou. Druhou mocninu momentu hybnosti lze pro soustavu atomové jádro – elektron vyjádřit ve tvaru

$$L^2 = l(l + 1) \hbar,$$

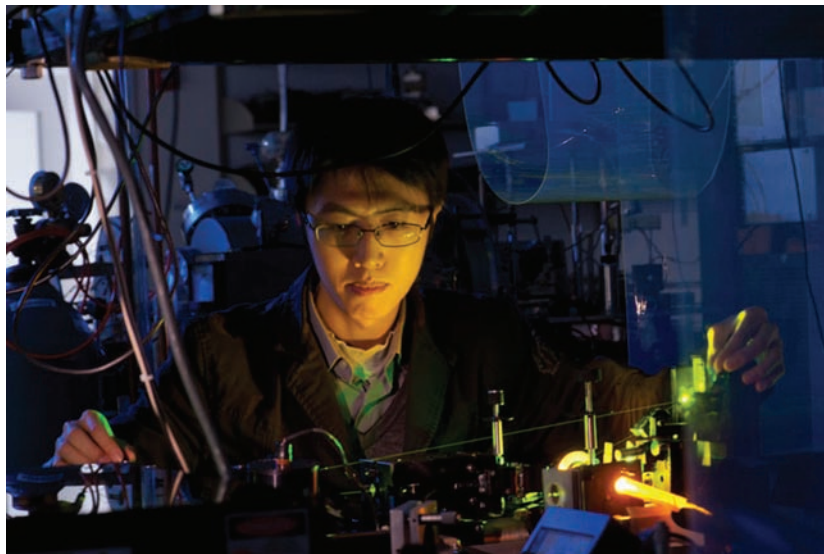
kde vedlejší kvantové číslo  $l$  nabývá hodnot  $0, 1, \dots, n - 1$ . Pro danou velikost momentu hybnosti, tedy  $l$ , může mít vlnová funkce elektronu různé tvary podle velikosti magnetického kvantového čísla  $m$ , které pro dané  $l$  nabývá hodnot  $-l, -l+1, \dots, l-1, l$ . Při vhodně zvoleném magnetickém kvantovém čísle ale můžeme sledovat jistou rovinnou symetrii vlnové funkce, která se při vysokých  $l$  začíná podobat kružnici. Na obrázku z předchozí strany jsou znázorněny vlnové funkce pro zvyšující se hlavní a vedlejší kvantová čísla  $n$  a  $l$  pro magnetická čísla  $m$  zvolená tak, aby vlnová funkce měla symetrii v rovině.

Druhá mocnina velikosti komplexní vlnové funkce udává pravděpodobnost výskytu elektronu. Pro skutečně vysoká  $n$  a  $l$  si můžeme podle obrázku snadno představit, že elektron „bude někde na kružnici“ kolem atomového jádra.

Již zmíněný tým vědců ze Spojených států a Rakouska se pokoušel o lokalizaci elektronů na Rydbergových hladinách atomu draslíku.

Vědci se snažili vytvořit pravděpodobnostní oblak elektronu s kvantovým číslem  $n$  velikosti řádově stovek, který by obíhal jádro atomu podobně jako planeta. Matematicky je totiž možné vytvořit takovou superpozici stavů, kdy se elektron bude chovat podobně jako oběžnice kolem Slunce. Problémem ale je, že se tato superpozice stavů v čase rychle rozpadá a otázkou bylo, zda a jak je možné tento křehký systém stabilizovat. Inspirace přišla právě z nebeské mechaniky, kde se na oběžné dráze o  $60^\circ$  před a za planetou Jupiter nalézá relativně stabilní systém Trojanů. V atomovém obalu jádra ale není

Pracoviště na Riceově univerzitě. Student Shuzhen Ye vytváří Rydbergův atom za pomoci ultrafialového laseru. Zdroj: Riceova univerzita.



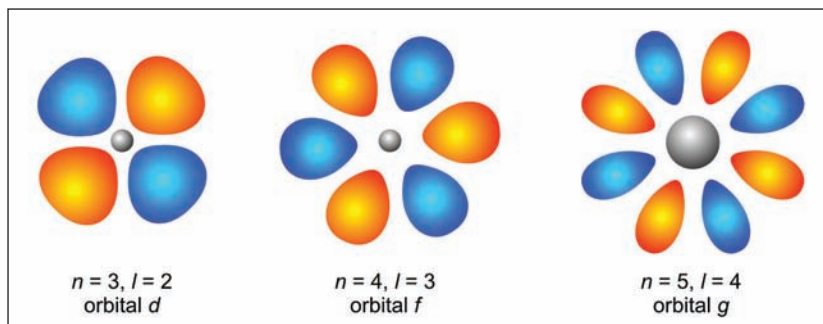
žádná taková těžká částice, kolem které by se vytvořila analogie Lagrangeových bodů. Tuto „těžkou planetu“ však v experimentu nahradilo rotující elektromagnetické pole, které umožnilo realizovat lokalizované elektronové orbitály a přemostit tak v tomto případě rozdíl mezi kvantovou a klasickou mechanikou. Vědci užili laser k excitaci osamělého elektronu

v atomu draslíku na energii s hlavním kvantovým číslem okolo 300. Poté aplikovali lineárně polarizované sinusoidální pole, jehož frekvence byla v rezonanci s vlnovým balíkem a jehož fáze byla synchronizována s fází orbitalů, které zkombinovalo několik blízkých orbitalů a vytvořilo tak nedisperzní „trojanské vlnové balíky“. Elektron měl lokalizovanou vlnovou funkci, jejíž maximum pravděpodobnosti obíhalo po kruhové trajektorii obdobně jako planeta kolem Slunce.

Navíc při citlivé změně frekvence tohoto polarizovaného pole změní elektron svojí „dobu oběhu“, a dostane se tak na hladiny s vyšším kvantovým číslem. Ve výsledku se podařilo elektron vybudit na  $n$  okolo 600 a vytvořit tak atom draslíku velikosti tečky nad písmenkem „i“.

Navzdory podobnosti mezi Trojany – planetkami a trojanskými vlnovými balíky nám kvantová mechanika říká, že vlnový balík predikuje pouze pravděpodobnost nalezení elektronu v daném místě, zatímco klasická mechanika nám říká, kde přesně planetka bude. To, co vědci měřili, byla pravděpodobnost zjištění, že je jeden elektron v určitém místě. Pro ověření musel experimentální tým z Riceovy univerzity provést mnoho a mnoho měření a porovnat svá zjištění s matematickým modelem teoretiků z Vídně.

Praktické využití si, zdá se, nedokáží představit ani autoři článku, natož autor tohoto textu, nicméně již samotné studium oblastí na pomezí kvantové a klasické fyziky je nejenom zajímavé, ale také krásné. Tato oblast je plná fascinujících hádanek a ještě překvapivějších odpovědí.



*Některé elektronové orbitály (vykreslen je kvadrát velikosti vlnové funkce).*

## Díry v oblacích

**Počasí** – soubor fyzikálních veličin popisující stav atmosféry v daném místě a čase (tlak, teplota, vlhkost vzduchu, oblačnost, ...). Počasí studuje meteorologie, snaží se také o předpověď počasí, tedy na základě znalosti počasí v okolí pozorovaného místa předpovědět vývoj počasí v příštích hodinách, někdy i dnech.

**Podnebí** – neboli klima. Dlouhodobá charakteristika počasí, opírá se o dlouhodobé průměry teploty (v daném ročním období), srážkové úhrny atd. Typicky se jedná o průměrování za období několika desítek let, dělají se ale i průměry za 10 000 let. Anglické přísloví: „Podnebí je to co očekáváme, počasí to, co máme“.

Kruhový otvor v oblaku nad Antarktidou vytvořilo letadlo 12. prosince 2009. Patrná je kupovitá struktura s šedivými pásy. Autory snímku jsou Eric Zrubek a Michael Carmody, oblast West Antarctic Ice Sheet Divide Camp.



Poručíme větru, dešti? Jsme zas o krok blíž. Po více než padesát let se pozoruje, že letadla mohou při průletu vytvořit v oblacích velké díry nebo vyvrtat kanály, které jsou jasně viditelné i po čtyřech hodinách. Nikdo se až doteď ale nesnažil tento fenomén vysvětlit. Andrew Heymsfield z amerického Národního centra pro výzkum atmosféry NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) z Koloradské univerzity v Boulderu zjistil, že oblaka s dírami skutečně ovlivňují lokální počasí v okolí letiště. Zřejmě se tak podaří vysvětlit fenomén, proč je v okolí velkých letišť pozorován nárůst sněhové pokrývky oproti okolí.

### Analýzy a simulace

Heymsfield se spolu s kolegy z celých Spojených států pustil do podrobné analýzy několika satelitních snímků zachytávajících umělé díry a kanály v oblacích (v angličtině *hole-punch* a *canal clouds*). Poté nasimulovali vývoj těchto oblaků s použitím počítačových modelů předpovědi počasí a zjistili, za jakých podmínek tyto jevy nastávají. Zkoumali oblaka s dírami na dvaceti satelitních snímcích pořízených nad Texasem 29. ledna 2007. Tato pozorování poté porovnali s archivními záznamy letů z Americké federální správy letů (*Federal Aviation Administration*) a zjistili, které typy letadel prolétaly tento den nad oblastí ve výšce 7 až 8 kilometrů nad zemí. Identifikovali nemalý počet letadel, která jsou schopna vytvářet pozorované díry. Patří sem velká trysková letadla, malá turbovrtulová letadla či jednomotorové tryskače.

Při simulaci se skupina vědců snažila zjistit parametry, za kterých pozorované díry v oblacích vznikají. Vědci se zaměřili na známý jev, při němž letící letadlo lokálně ochlazuje okolní vzduch. Do simulace zahrnuli zvýšení koncentrace ledových krystalů v oblacích, které odpovídalo chladicím účinkům letadel. Při vhodných podmínkách se začal zárodek díry zvětšovat a po 30 až 90 minutách dosáhl maximální velikosti 2 až 4 km. Poté se díry začaly pomalu rozpadat – podobně, jako tomu bylo na satelitních snímcích reálné situace.

### Díry a kanály

Díry a kanály v oblacích jsou pozorovány již déle než 50 let, ale mechanismy, jak se formují a vyvíjí nebyly dosud popsány. Stejně tak



nebyl zkoumán jejich dopad na okolí. Díry v oblacích jsou přitom spojeny s jevem náhodného osévání mraků částicemi ledu, za které mohou letadla. Ta způsobují spontánní zmrznutí podchlazených částicек vody, které projdou kolem hrotů vrtulí nebo přes křídla letadla. Kanál v mraku vytvoří letadlo, když prolétá mrakem podélně. Čáru, kterou vyřízne do mraku, pak nazýváme oblačný kanál nebo také disipační stopa. Díra může vzniknout, pokud letadlo proletí mrakem kolmo.

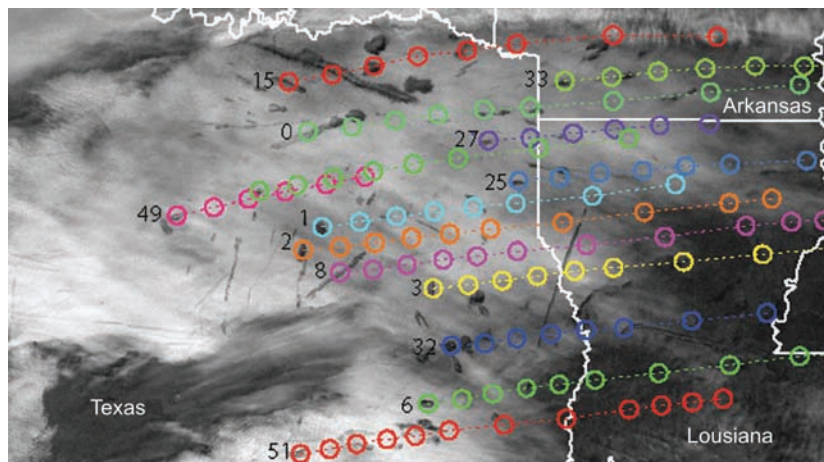
## Osévání mraků

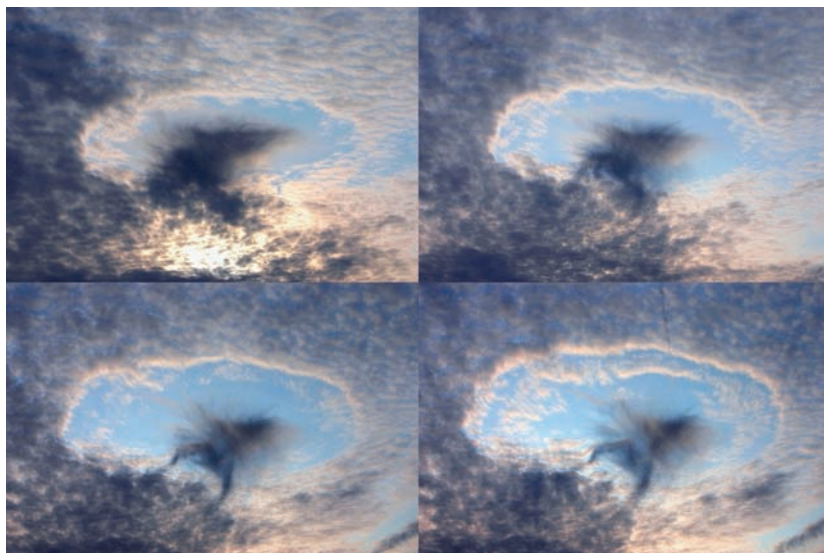
„Osévání mraků“ je způsob vytvoření umělého deště nebo sněhu, který byl v minulosti používán k ovlivnění množství přeháněk. Letadla se uměle pokoušela přinutit mraky k dešti nebo sněhu „rozséváním“ chemických látek – například jodidu stříbrného. Částice této látky se chovají jako tzv. kondenzační jádra, na nichž se vysrážejí malé ledové krystalky, které pak spadnou jako srážky. Aby k této krystalizaci mohlo dojít, musí být vodní kapičky v oblaku v podchlazeném stavu při teplotě přibližně  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při nižších teplotách dochází dokonce k samovolné krystalizaci. Nový výzkum ukazuje, že letadla sama o sobě dokáží za určitých podmínek vyvolat tento jev bez použití chemických prostředků. Při proudění vzduchu kolem letadla je prostředí v okolí lopatek vrtulí a nebo na zadní straně křídel lokálně silně ochlazováno až o  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toto ochlazování je způsobeno expanzí plynu a prudkým snížením tlaku. Na těchto místech pak vznikají ledové krystalky. Jak ukázala simulace, na krystalcích dochází ke zmrazení kapiček vody a jev se šíří mrakem, čímž v něm vzniká díra. Proces trvá asi hodinu. Důležitou podmínkou vzniku děr je vhodná teplota mraku, která musí být mezi  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Většina letadel však létá v prostředích s teplotou pod  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (kolem  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), což je již příliš nízká teplota pro vznik tohoto jevu. Zajímavým zjištěním je, že výraznější výskyt děr a kanálů v oblacích je pozorován v okruhu 100 km kolem velkých letišť a v polárních oblastech.



Kanál v mraku způsobený průletem letadla pod malým úhlem. Broxted v Essexu, UK. Autor Michael Holt.

Obrázek ze satelitu GOES pořízený 29. ledna 2007 v 16:32 UTC. Na obrázku jsou příklady drah vícenásobných děr. Kroužky označují střed díry nebo kanálu za patnáctiminutový interval měřený od první detekce. Zdroj: Science/AAAS.





Vývoj díry v oblaku doprovázený deštěm. Kompozice zachycuje vývoj po dobu 20 minut. Piberbach, Rakousko 17. srpna 2008.

### Závěr

Vypadá to tak, že za vyšší množství sněhových srážek jsou zodpovědná vzletající a přistávající letadla, která mohou za určitých podmínek „osévat“ oblaka. Je zřejmé, že díry v oblacích ovlivňují lokální počasí, ale je nepravděpodobné, že by měly vliv na globální klima. Na závěr ještě jedna poznámka. Při pohledu na některé obrázky (jako jsou například tyto poslední) se nelze ubránit pocitu, že na nich není díra v oblaku, ale spíše mimozemská loď. Možná, že Heymsfield díky své studii pomůže vysvětlit i jinou záhadu...

■ Jiřina Scholtzová, 15. 7. 2011,  
AB 28/2011



## Na stopě kulovému blesku

Kulový blesk je jedním z přírodních úkazů, jehož vědecké vysvětlení dodnes chybí. I přes tisíce doložených pozorování není jasné, jak kulový blesk vzniká a jakou má povahu. Je zřejmé, že vznik alespoň některých kulových blesků souvisí s bouřkovou činností. Chování kulových blesků je natolik atypické oproti všemu, co známe, že tyto útvary vzbuzují respekt a vyvolávají pocit tajemna. A lidé nadevše milují záhady.

Podle doložených svědectví mají kulové blesky velikost od několika centimetrů až po rozměr většího míče. Svítí bíle, žlutě, oranžově, mohou mít namodralý okraj, který někdy splývá s okolím, jindy je ostrý. Tu a tam z povrchu kulového blesku srší jiskry nebo vybíhají svítící jazyky. Pozorovatelé nepocítují teplo. Úkaz zpravidla trvá několik desítek sekund. Nejpodivnější je pohyb kulového blesku. Někdy se volně vznáší, jindy prudce poskakuje. Dokáže projít miniaturní skulinkou. Pohybuje se podél vodičů nebo jiných předmětů, někdy nehlučně, jindy s tichým bzukotem. Přívětivá tvář kulového blesku se může změnit. Dokáže rozbít nábytek, prorazit stěnu nebo vytrhnout dveřní zárubeň ze zdi. A jak celý úkaz končí? Někdy se svítící koule potichu rozplyne, jindy hlasitě rozprskne, tu a tam se rozdělí na několik menších nebo vylétne z uzavřené místnosti komínem. To může souviset s tím, že komín pokrytý sazemi tvoří přirozený vlnovod. Možná je takový konec blesku jádrem historek o komínem přilétajících čertech.

### Kulový blesk

V literatuře popsaná pozorování kulových blesků jdou do tisíců. Jeden kulový blesk by podle optimistických odhadů měl připadnout na přibližně 200 blesků čárových, podle pesimistických jde o jeden případ z milionu. Pozorovány byly v uzavřených místnostech, v letadlech i v otevřené přírodě. Laici obtížněji odhadují vzdálenost, velikost, rychlost a zaměňují kulový blesk s jinými jevy nebo optickými klamy. Část lidí si také nepochybně vymýšlí a chce na sebe upoutat pozornost. I tak ale zůstává mnoho seriózních pozorování, která nás nenechají na pochybách, že kulový blesk je reálným a významným atmosférickým jevem.

K nejcennějším patří pozorování prováděná vědci, těch je ale velmi málo. První pozorování navíc dopadlo tragicky. Profesor George Richmann v Petěrburgu sváděl atmosférickou elektřinu ze střechy do laboratoře. V roce 1753 sjel za bouře po drátu výboj, který vytvořil

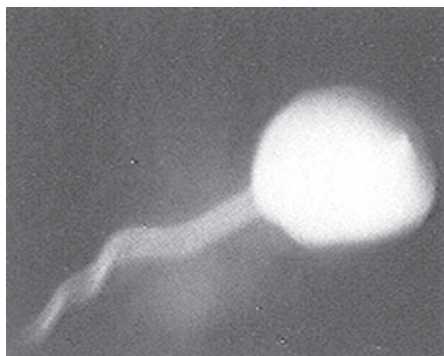
**Kulový blesk** – Zatím ne zcela objasněný jev, pravděpodobně koule z plazmatu objevující se při bouřkách. Kulový blesk má typicky 30 centimetrů v průměru a trvá po dobu několika sekund.

**Křemík** – polokovový prvek, hojně se vyskytující v zemské kůře. Slouží jako základní materiál pro výrobu polovodičových součástek nebo položek pro pěstování nanostruktur. Oxid křemičitý je základní surovina pro výrobu skla a významná součást keramických a stavebních materiálů. Objev křemíku je připisován švédskému chemikovi Jacobu J. Berzeliovi (1824).

Rytina G. Hartwiga z roku 1886 patří k raným vyobrazením kulového blesku. Zdroj: Archiv AGA.

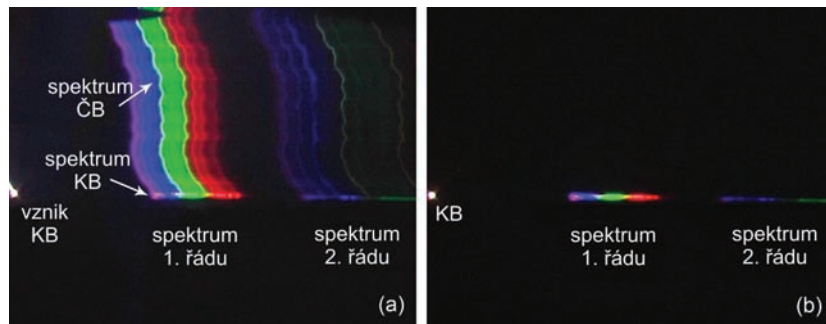






Kulovou strukturu může vytvořit i meteorická stopa. Tato působivá fotografie byla pořízena farmářem Chasem Brownem dne 24. března 1933 v časných raních hodinách v Pasamonte. Při fotografování byla koule  $40^\circ$  nad obzorem, poté prolétla farmářů nad hlavou. Není jasné, zda zkroucenou strukturu za kouli způsobil náhodný pohyb fotoaparátu, nebo má nějakou reálnou fyzikální příčinu. Zdroj: Proc. of the Royal Society A.

Levý snímek byl pořízen videokamerou v době vzniku kulového blesku (KB). Na snímku je jak čárový (ČB), tak kulový blesk a spektra obou objektů. Druhý obrázek byl pořízen o 20 ms později. Čárový blesk zcela zmizel, je patrný jen kulový blesk a jeho spektrum. Zdroj: PRL.



malou kouli, a ta Richmana zabila. V roce 1963 pozoroval v kabině letadla kulový blesk americký radioastronom Roger Jennison. Kulový blesk také sledoval v roce 1965 při stanování na břehu řeky sovětský chemik Dmitriev. V roce 2013 se k tomuto výčtu přidalo jedno čínské pozorování, o kterém se podrobněji zmíníme v další části textu.

Existují stovky teorií o původu kulového blesku. Některé z nich jsou úsměvné a je jasné, že patří do říše nereálných teorií či pohádek. Jde o sání energie z vakua, malé černé díry, meteority z antihmoty, zjevující se anděly nebo duše hříšníků.

Teorie, která chce být alespoň částečně úspěšným kandidátem na vysvětlení jevu kulového blesku, se musí vypořádat s několika problémy. Prvním je zdroj energie blesku. V zásadě může být elektrostatický, elektromagnetický, chemický nebo jaderný. Druhou otázkou je, zda je kulový blesk samostatnou a od okolí izolovanou energetickou jednotkou, nebo zda nějak získává energii ze vzdálenějšího okolí. Příkladem je tichý nezářící výbojový kanál, kterým proudí energie do místa, kde se malá část kanálu navenek zviditelnila v podobě kulového blesku. Třetí záhadou je mimořádná stabilita kulového blesku. Vydrží minimálně několik sekund, někdy předvádí své divadlo déle než minutu. Čtvrtým problémem je teplota blesku. Žádný pozorovatel nepociťoval teplo sálající z kulového blesku. Buď musí jít o relativně chladný útvar, nebo jde o horkou kouli, která je od okolí účinně izolována. Správná teorie musí také vysvětlit pozorované sluchové a čichové vjemy.

Každá ze stávajících teorií vysvětluje jen některé jevy spojené s kulovým bleskem. Skutečné řešení je dodnes neznámé. Může jít dokonce o kombinaci několika jevů naráz, nebo jako „kulový blesk“ označujeme několik fyzikálních jevů, které mají různou podstatu.

## Křemíkový blesk

K nejnadějnějším hypotézám patří především různé formy elektrostatického nebo vysokofrekvenčního elektromagnetického výboje, například mikrovln generovaných v bouřkové oblasti. Viditelnou částí je plazmatická koule izolovaná nějakým způsobem od okolí. Často se také uvažuje o chemické podsta-

tě energie kulového blesku. Za bouřky vznikají exotické a energeticky bohaté sloučeniny dusíku a uhlíku. V současnosti je nejpůvodnější variantou chemického blesku tzv. *křemíkový blesk*, jehož hypotézu rozpracovali v roce 2000 novozélandští fyzikální chemici John Abrahamson a James Dinniss z Cantenburské univerzity.

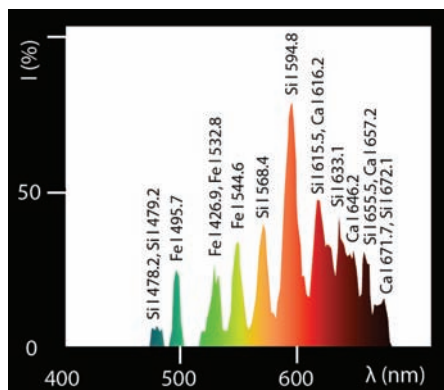
Při úderu normálního blesku do půdy se prudce zahřeje místo dopadu a z křemičitanů a oxidu křemičitého vzniknou nanočástice čistého křemíku Si, monooxidu křemíku SiO a karbidu křemíku SiC. Nanočástice mají elektrický náboj a ten způsobí jejich řetězení do vláknité sítě. Vznikne útvar podobný chomáči vaty, jehož část je z půdy vytlačena nad povrch, kde dochází k postupné oxidaci, při níž se uvolňuje značné množství energie v podobě světla a tepla. Oxidace jak Si tak SiO je bouřlivou reakcí, při které vznikají stabilní molekuly oxidu křemičitého SiO<sub>2</sub>. Ten vytvoří na povrchu vatovité struktury jakousi slupku, jež brání další prudké oxidaci. Útvar tak pomalu doutná uvnitř a na povrchu je relativně chladný. Většinou zaujme kulový tvar, který má nejmenší možnou energii. Je ale snadno formovatelný i do jiných tvarů. Může se pohybovat vodorovně, neboť je jeho hustota srovnatelná s hustotou vzduchu. Chomáč si v nitru udržuje vysokou teplotu a může postupně vyhasnout. Pokud vnitřní teplota stoupne nad určitou mez, kulovitá struktura zakončí svůj život explozivně. Autoři teorie detailně vysvětlují většinu z pozorovaných vlastností kulového blesku (ale bohužel ne všechny). Svou teorii podpořili i experimenty – podobné struktury se jim podařilo vytvořit za pomoci výbojů směřujících do půdy. Abrahamsonova-Dinnissova teorie je velmi nadějná a mohla by popisovat kulový blesk vzniklý v přímé souvislosti s dopadem čárového blesku.

V roce 2006 se podařilo Elimu Jerbyovi a Vladimíru Dikhtyarovi z Tel Avivské univerzity vytvořit levitující kulové struktury při ozařování vzorku křemíku intenzivními mikrovlnami, které natavily a částečně odpařily ozařovaný materiál. Vzniklé struktury měly rozměry kolem 3 centimetrů a dobu života 30 až 40 ms po vypnutí mikrovlnného zdroje. V lednu 2007 publikovala skupina brazilských vědců, v jejichž čele stáli Gerson

*Spektrum – rozklad elektromagnetického záření (většinou světla) na jednotlivé vlnové délky. Zpravidla se provádí za pomoci hranolu nebo mřížky. Spektrum slunečního světla může také vzniknout na vodních kapkách jako duha. Ve spektru se nachází kontinuum (spojitě se měnící barvy) a charakteristické spektrální čáry. Světle se nazývají emisní (vznikají emisí fotonů) a tmavé absorpční (vznikají absorpcí fotonů).*

*Časový vývoj kulového blesku pořízený videokamerou. Na prvním obrázku je ještě patrný čárový blesk, na dalších už ne. Zřetelná je i změna barvy útvaru. Zdroj: PRL.*





Spektrum naměřené čínskými vědci obsahuje čáry křemíku, vápníku a železa. Zdroj: Olli Niemitalo.

Poloha provincie a náhorní planiny Qinghai, kde bylo uskutečněno pozorování kulového blesku.



Silva Paiva a Antonio Carlos Pavão z Federální univerzity v Pernambuco, jiný zajímavý experiment. V obloukovém výboji v křemíku vytvořili kulové struktury o průměru 1 až 4 centimetry, které přetrvávaly po dobu 2 až 5 sekund a svítily namodralým nebo oranžovým světlem. V těchto i dalších experimentech nebyla ale nijak jasná souvislost vytvářených kuliček s přírodními kulovými blesky.

## Čínské pozorování

Čínské skupině vědců, kteří dlouhodobě pozorovali bouřkovou aktivitu, se podařil husarský kousek. Dvěma kamerami nafilmovali vznik kulového blesku a ještě pořídili záznam časového vývoje jeho spektra. To se doposud nikomu nepodařilo. Pozorování se uskutečnilo dne 23. července 2012 v 21:54:59 pekingského času na náhorní planině Qinghai Plateau v místě se souřadnicemi 37,013473°S, 101,620080°V a s nadmořskou výškou 2 530 m. Publikace o tomto vzácném pozorování byla zaslána do časopisu Physical Review Letters v dubnu 2013. Po obvyklém zdlouhavém recenzním řízení vyšel článek až v lednu 2014, kdy se vědecký svět po roce a půl o vzácné nahrávce dozvěděl. Skupina z několika univerzitních pracovišť rutinně pořizovala spektra běžných čárových blesků. K dispozici měla dva spektrografy s rovinnou mřížkou s 600 vrypů na milimetr. Záznam byl pořizován jednak vysokorychlostní kamerou a jednak digitální videokamerou. Vysokorychlostní kamera byla sice černobílá, ale umožňovala pořídit 3 000 snímků za sekundu s rozlišením 1280×400 pixelů a vlnovým rozsahem 400 až 1 000 nanometrů. Digitální videokamera pořizovala standardní barevný záznam s frekvencí 50 snímků za sekundu, rozlišením 640×480 pixelů a spektrálním rozsahem 400 až 690 nanometrů.

V inkriminovaný den došlo k bouřce a přibližně 900 metrů od přístrojové techniky udeřil čárový blesk mezi mrakem a zemí. V místě dopadu se objevila koule, která vydržela svítit 1,64 sekundy. Videokamera nahrála celý proces vzniku kulového blesku a jeho vývoj na 82 snímcích. Pořídila jak spektrum čárového blesku, tak kulového blesku, který přetrvával i po zániku čárového blesku. Obě spektra se výrazně liší. U běžného blesku jsou převážně spektrální čáry jedenkrát ionizovaného dusíku (to odpovídá běžné teplotě bleskového kanálu kolem 30 000 K). Ve spektru kulového blesku jsou výrazné čáry neutrálního křemíku, železa a vápníku, což poukazuje na nižší teplotu, ale tu se nepodařilo ze spektra jednoznačně určit. Vysokorychlostní kamera ne-



měla takové štěstí, záznam začíná až v čase 0,78 sekundy po vzniku kulového blesku a celkem čítá 2 360 snímků. Dobře patrný je časový vývoj spektrálních čar, jejichž intenzita zjevně vykazuje oscilace s frekvencí 99,4 Hz. Vzhledem k tomu, že v těsné blízkosti vzniku kulového blesku bylo vedení vysokého napětí (35 kV, nejbližší vodič byl 20 metrů od kulového blesku), je pravděpodobné, že jde o druhou harmonickou základní rozvodné frekvence a jde tedy o pouhé rušení pozorování, které s kulovým bleskem nesouvisí.

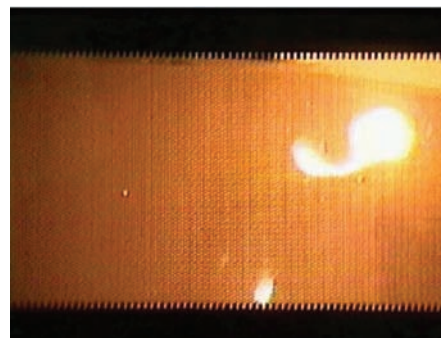
Ze vzdálenosti místa a počtu pixelů, který zabrala kulová svítící oblast, bylo možné určit její rozměry. Ty vychází až 7 metrů. Musíme si ale uvědomit, že i při laboratorních experimentech jsou pozorovány svítící kulové struktury o rozměrech několika centimetrů, ale zdrojem světla je malé husté jádro o milimetrových rozměrech. Co se tedy týče velikosti, šlo by o atypický kulový blesk, pokud bychom uvažovali celou svítící oblast zabranou kamerou. Skutečný zdroj světla ale mohl být o řád menší (kamery filmovaly ze vzdálenosti téměř kilometr!). Z kamer bylo možné přesně určit projekci rychlosti kulového blesku do roviny kolmé na zorný paprsek – vyšlo 8,6 metrů za sekundu, což je ve vynikajícím souladu s odhady z pozorování jiných událostí. Na počátku byl kulový blesk fialově bílý, kolem 80 milisekund se barva změnila na oranžovou, mezi 160 a 1 160 ms šlo o bílou barvu a v závěrečné fázi struktura zčervenala.

## Závěr

Zatím nikdy v historii nebyl pozorován kulový blesk vědeckými přístroji s takovými detaily, jako se to podařilo čínským vědcům. Historicky jde o první podrobný záznam včetně pořízení spektra a časového vývoje. Spektrum je silným argumentem ve prospěch křemíkové hypotézy novozélandských vědců. Nyní je vysoce pravděpodobné, že po úderu běžného blesku do půdy může vzniknout křemíkový kulový blesk. Nicméně je také nepochybné, že kulových blesků musí existovat více druhů, neboť křemíková hypotéza není schopná vysvětlit občasná pozorování kulových blesků v kabinách letadel. V každém případě je pozorování z roku 2012 (zveřejněné v roce 2014) zcela výjimečné a výrazně přispělo k pochopení fenoménu kulového blesku.

*V úvodní části byly použity některé starší texty autora*

■ Petr Kulháněk, 24. 1. 2014, AB 4/2014



*V různých experimentech s výboji, ať už jiskrovými, ob-  
loukovými či mikrovlnnými, vznikají kulové struktury. Na  
snímku je výsledek interakce mikrovln se vzorkem půdy,  
Experiment byl proveden v mikrovlnné troubě na Tel Aviv-  
ské univerzitě v roce 2006. Souvislost těchto umělých  
kulových struktur s přírodními kulovými blesky není zcela  
jasná. Zdroj: AB 11/2006.*

## Produkce černých děr při částicových srážkách

**Horizont události** – rozhraní u černé díry, po jehož překročení již není možné vyslat jakýkoli signál vnějšímu pozorovateli.

**Zdánlivý horizont** – oblast oddělující světlo, které je navždy uvězněné uvnitř černé díry, od světla, které v daném čase ještě může uniknout gravitačnímu působení. Vzniká při formování černé díry. Jak černá díra roste, zdánlivý horizont může v pozdějším čase uvěznit také fotony, které by v dřívějším čase mohly uniknout gravitaci černé díry. Po skončení gravitačního kolapsu zdánlivý horizont splyvá s horizontem události.

Vypařování černé díry.



Vytváření černých děr v laboratoři patří zatím spíše do říše science-fiction, a to zejména díky vysokému energetickému prahu pro jejich produkci. Nicméně teoretické modely popisující srážky částic za produkce černých děr a jejich počítačové simulace jsou seriózní vědeckou disciplínou. Právě vznik a vývoj miniaturních černých děr je vědecky nesmírně zajímavý, protože v blízkosti takových objektů je možné současně pozorovat jevy popisované kvantovou teorií, jako je například vypařování černé díry a její následný zánik, a také relativistické jevy v podobě gravitačního čočkování nebo vyzařování gravitačních vln.

### Obručová hypotéza

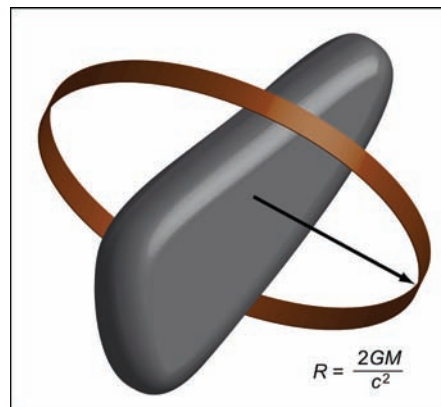
Původní recept na výrobu černé díry zní takto: vezměte dostatečné množství hmoty a stlačte je pod jeho Schwarzschildův poloměr. Zatímco v případě vzniku hvězdných černých děr ve vesmíru se o stlačení hmoty vyhasínající hvězdy o hmotnosti několika Sluncí postará gravitace, tak v případě hypotetického částicového experimentu je třeba urychlit

částice na energie blízké Planckově energii a nechat je čelně srazit. Taková situace je zcela odlišná od gravitačního kolapsu sféricky symetrické hvězdy. V případě stlačování asymetrických těles dojde ke gravitačnímu kolapsu a vzniku černé díry pouze tehdy, pokud se všechny části tělesa nacházejí pod jeho Schwarzschildovým poloměrem. Někdy se také hovoří o „obručové hypotéze“, kterou odvodil z rovnic obecné relativity Kip Thorne v roce 1972. Kromě kolidujících částic mohou být asymetrickým tělesem dvě vzájemně obíhající neutronové hvězdy (binární systémy), které se eventuálně sloučí a vytvoří černou díru.

## Kolize super-planckovských částic

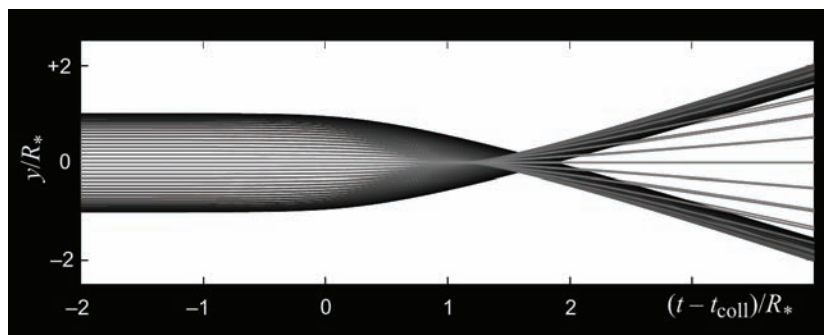
Simulacemi kolizí relativistických částic o energiích vyšších než Planckova energie (super-planckovských částic) se zabývá skupina vědců na Princetonské univerzitě. Relativistické částice jsou charakteristické tím, že jejich kinetická energie je vyšší, než klidová energie. Při srážkách těchto částic se na „výrobě“ černé díry podílí jak klidová, tak i jejich kinetická energie. Zatímco při nízkých energiích kolidujících částic je gravitační síla zanedbatelná, tak na super-planckovských energiích gravitační interakce svou silou překoná všechny ostatní interakce, a proto na těchto škálách může docházet ke gravitačnímu kolapsu. Simulace kolizí těchto částic byly prováděny numerickým řešením Einsteinových gravitačních rovnic. Samotné částice byly modelovány jako objekty s konečným rozměrem složené z dokonalé kapaliny. Překvapivým výsledkem simulace bylo zjištění, že k produkci černých děr dochází při energii 2,4krát nižší, než předpovídá obručová hypotéza, a to při gama faktoru větším než 8,5. Ke snížení energetického prahu pro produkci černých děr přispívá efekt gravitační čočky. Podobně jako blízká galaxie deformuje obraz vzdálenější galaxie, tak i hmota částic je těsně před kolizí gravitačně fokusována. Při vizualizaci byly simulovány geodetiky lehkých testovacích částic fokusovaných těžkou relativistickou částicí.

V průběhu srážky částic se zformují dva zdánlivé horizonty, které se časem spojí a nakonec vytvoří jednotný horizont událostí a zrodí se tak černá díra. Pokud je ale celková energie srážky nižší, než práh pro produkci černé díry, pak sice dojde k dočasné fokusaci hmoty, která ale následně exploduje. Černá díra vyprodukovaná při kolizích částic je značně asymetrická. Nerovnosti horizontu událostí způsobují intenzivní vyzařování gravitačních vln a následné vyhlazení horizontu událostí. Detailní simulace struktury časoprostoru okolo kolize testovacích částic umožňují odhadnout, že gravitační vlny odnášejí přibližně 16 % celkové energie srážky. Po odeznění gravitačního vyzařování černá díra dále ztrácí svoji energii (a tedy i hmotnost) Hawkingovým zářením a zakončí svůj život explozí.



Podle obručové hypotézy může z asymetrického tělesa vzniknout černá díra pouze tehdy, pokud okolo něj můžeme otáčet pomyslnou obručí o Schwarzschildově poloměru. Z tělesa na obrázku by tedy černá díra nevznikla.

Vizualizace gravitačního čočkování mnoha geodetik testovacích částic vlivem zakřivení časoprostoru těžkou relativistickou částicí. Vodorovná osa znázorňuje čas a svislá osa znázorňuje vertikální souřadnici částice. Zdroj: W. East/ArXiv.







*Efekt gravitační čočky. Galaxie LRG3-757 v popředí, jejíž hmotnost je  $5 \times 10^{12}$  Sluncí, fokusuje světlo přicházející z mnohem vzdálenější galaxie a zobrazí ji jako modrý prstenec tvaru koňské podkovy. Zdroj: NASA/HST.*

## Závěr

Produkce černých děr při kolizích částic byla široce diskutovanou otázkou v souvislosti se spuštěním Velkého hadronového kolideru (LHC) ve středisku CERN. Energie protonů srážených na LHC je ale o 15 řádů nižší než Planckova energie, a proto podle současně platných teorií není možné černou díru na LHC vytvořit. Některé teorie za hranicemi Standardního modelu ale jejich možnou produkci připouštějí. Jedná se o teorie obsahující mikroskopické nebo kompaktní extradimenze. Podle posledních dat z urychlovače LHC žádné stopy po extra dimenzích ani po černých dírách zaznamenány nebyly. Ačkoliv je problematika produkce černých děr na urychlovačích nesmírně lákavá, je třeba mít na paměti skutečnost výstižně popsanou citátem slavného fyzika Richarda Feynmana:

*„It doesn't matter how beautiful your theory is,  
it doesn't matter how smart you are.  
If it doesn't agree with experiment, it's wrong.“*

■ Miroslav Havránek, 29. 3. 2012, AB 11/2013

**Planckovy škály** – charakteristické rozměry získané kombinací fundamentálních konstant (gravitační, Planckovy a rychlosti světla). Planckova délka vychází  $10^{-35}$  m, Planckův čas  $10^{-43}$  s a Planckova energie  $10^{19}$  GeV.

**Geodetika** – nejrovnější možná dráha v zakřiveném časoprostoru. Po této dráze se pohybují všechna volná hmotná tělesa bez rozdílu.

**Gama faktor** – koeficient  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ , kterým je ve speciální relativitě dilatován chod letících hodin a kontrahována délka tyče ve směru pohybu.

**LHC** – Large Hadron Collider. Urychlovač protonů na nominální energii 14 TeV. LHC byl vybudován v urychlovačové laboratoři CERN v tunelu po urychlovači LEP II, který má obvod 27 km. Do zkušebního provozu byl uveden v září 2008, ale zanedlouho došlo k poruše na jednom z magnetů. Urychlovač byl opětovně spuštěn v listopadu 2009. Od března 2010 probíhal fyzikální program na energii 7 TeV. V roce 2012 byl na urychlovači objeven Higgsův boson. Od roku 2013 probíhá rekonstrukce, s opětovným spuštěním se počítá na konci roku 2014 a s dosažením nominální energie v roce 2015.

# Neutrinový experiment

## OPERA

Neutrína jsou částice, jejichž vlastnosti nás stále překvapují a jejichž chování v některých situacích zatím neznáme. Z mnoha experimentů zkoumajících neutrína se zaměříme na velmi důležitý detektor. Neutrinový svazek vytvořený v evropském středisku jaderného výzkumu CERN je namířen směrem na Itálii a po 732 kilometrech letu skrze Zemi jsou neutrína chytána italským detektorem OPERA, který se nachází 1 400 metrů pod zemí, pod horou Gran Sasso. Hlavním cílem je sledování oscilací neutrin a zpřesnění informací o jejich hmotnostech. V květnu 2010 se v tomto experimentu historicky poprvé podařilo detekovat oscilaci mionového neutrina na tauonové. Pojďme se s tímto velmi sofistikovaným experimentem seznámit podrobněji.

### Příprava neutrin

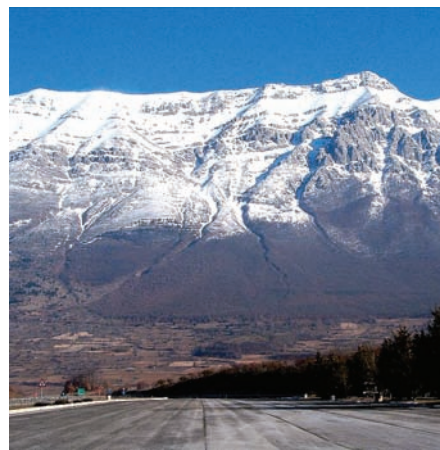
Neutrína pro experimenty pod horou Gran Sasso jsou připravována v evropském středisku jaderného výzkumu CERN. Svazek urychlených protonů z urychlovače SPS je namířen na terč, ve kterém se z protonů stane svazek pionů a kaonů (jde o mezony složené z kvarku a anti-kvarku). Tyto piony se v kilometr dlouhé vakuované rozpadové trubici rozpadají na miony a mionová neutrína. Vzniklý svazek neutrin míří přibližně ve směru původního protonového svazku (směrem na italskou horu Gran Sasso). Jde téměř o čistý svazek mionových neutrin, pouze 0,8 % tvoří elektronová neutrína a 2 % mionová antineutrína. Cesta z CERN (Ženevy) pod horu Gran Sasso je dlouhá 732 kilometrů a neutrína ji uletí za něco málo přes dvě milisekundy. Většina z nich detektor mine, ale i tak je tok neutrin z CERN pod horou Gran Sasso obrovský. Každým metrem čtverečním jich proletí 500 miliard za rok (16 000 za sekundu). Průměrná energie těchto neutrin je 17 GeV.

### Gran Sasso

Národní laboratoř Gran Sasso byla vybudována ve střední Itálii na bočních tunelech, který spojuje města Teramo a L'Aquila. Nachází se 1 400 metrů pod horou Gran Sasso a tvoří ji tři haly (A, B, C), každá o délce 100 metrů a výšce necelých 30 metrů. V těchto experimentálních halách je v současnosti umístěno 18 funkčních experimentů. K těm

**CERN** – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, evropské centrum jaderného výzkumu. Komplex urychlovačů a laboratoří na pomezí Švýcarska a Francie založený v roce 1954. Na výzkumu se podílí 20 členských zemí včetně České republiky. K největším objevům patří objev částic slabé interakce, příprava antivodíku a objev kvarkového-gluonového plazmatu. V CERN byl také vynalezen a poprvé použit Web. V současné době je zde vybudován největší urychlovač světa – Large Hadron Collider, který byl po závadě na jednom z magnetů opětovně spuštěn na konci roku 2009. V roce 2012 na něm byl objeven Higgsův boson. S provozem na maximální energii (14 TeV) se počítá v roce 2015.

Pohoří Gran Sasso ve střední Itálii, pod kterým se ukrývá Italská národní laboratoř. Zdroj: AGA.



**SPS** – Super Proton Synchrotron, jeden z urychlovačů v evropském středisku jaderného výzkumu CERN. Dosažitelná energie je 400 GeV/proton. Urychlovač je v provozu od roku 1976. Na přelomu roku 1983 a 1984 zde byly objeveny intermediální bosony slabé interakce, v roce 2000 bylo poprvé vytvořeno kvarkové-gluonové plazma.

nejznámějším patří DAMA/Libra, BOREXINO a OPERA. Celková plocha laboratoří, které byly otevřeny v roce 1987, je 17 300 m<sup>2</sup>. Laboratoře patří pod Národní ústav jaderné fyziky INFN (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*) a nad zemí mají správní budovy pro zaměstnance, jídelnu, přednáškový sál a další zázemí. Přístup do podzemí je z dálničního tunelu, který měří celkem 10 kilometrů. Nejbližší jaderný reaktor je až ve Slovinsku, a tak je zde minimum parazitních neutrin z umělých zdrojů. Národní laboratoř Gran Sasso má celou řadu aktivit. Základem je neutrinová fyzika zaměřená na hledání slunečních neutrin, atmosférických neutrin, neutrin z explozí supernov a neutrin z nitra Země. Experiment OPERA sleduje neutrina uměle vytvářená za tímto účelem v CERN. K dalším aktivitám patří hledání temné hmoty, geofyzika a základní fyzika (experiment VIP například sleduje, zda není v některých situacích narušen Pauliho vylučovací princip). Aktivity Národní laboratoře jsou mimořádně široké.

## OPERA

Neutrina jsou v detektoru OPERA (*Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus*) zachytávána ve speciálních cihličkách vyrobených ze střídajících se vrstev olova a citlivé emulze. Běžné neutrinové detektory jsou schopné detekovat elektronová a mionová neutrina. Detektor OPERA umí zachytit i taunové neutrino a umožňuje tak sledovat oscilace svazku mionových neutrin letících z CERN na taunová. Pokud taunové neutrino zainteraguje s olověným plátem v cihličce, vznikne taun (supertěžký elektron). Ten se v zápětí rozpadne na mion (17 % případů), elektron (18 % případů) nebo pion (64 % případů). Průměrná rozpadová vzdálenost taunového neutrina je 0,6 mm. Cihlička má rozměry 7,5×12,5×10 cm a přesahuje tedy 10 průměrných rozpadových vzdáleností taunového neutrina. Její hmotnost je 8,3 kg.

K výrobě olověných plátů do cihliček se částečně využívalo tzv. římské olovo. Jde o olovo z potopené římské lodi (potopila se mezi 80 až 50 lety př. n. l.), které bylo určeno pro stavbu vodovodního potrubí. Pod hladinou moře leželo netknuté 2000 let. Za tu dobu se již rozpadla většina radioaktivních jader a jde tedy o ideální materiál do detektorů a na jejich stínění. Zbytky potopené lodi byly objeveny v roce 1988 v hloubce 28 metrů, asi 1,5 km od sardinského pobřeží. Loď vezla původně 1 000 ingotů, z nichž každý měl hmotnost 33 kilogramů. Část nákladu se dochovala a byla vyzdvižena v roce 1991. Národní

Přístupové chodby k laboratořím jsou velmi vlhké a chladné. Snímek je z návštěvy AGA v Gran Sasso.



ústav jaderné fyziky INFN přispěl na vyzdvižení částkou v přepočtu přibližně 4 miliony korun. Ingoty jsou uloženy v Národním archeologickém muzeu v Cagliari (jižní Sardinie) a část z nich se využívá v detektorech pod horou Gran Sasso.

Z olověných cihliček je v detektoru OPERA postaveno 31 stěn, ve kterých je celkem 150 000 cihliček o celkové hmotnosti 1 300 tun. Mezi stěnami jsou plastové scintilátory, jejichž signál je sváděn svazky optických vláken. Ze záznamu scintilátorů lze automaticky vyhodnotit, ve kterých cihličkách by mohl být užitečný záznam (úspěšnost je 70 až 80 %). Robotické zařízení automaticky podle souřadnic vyjme podezřelé cihličky a předá je na vyvolání. Automaty vyvolají jednotlivé citlivé vrstvy a naskenují je pod mikroskopem. Skenování jedné cihličky trvá celý den. Vše je plně automatizováno, od balení cihliček, přes jejich ukládání do detektoru OPERA, vyjímání, vyvolání, skenování a uložení pořízených dat. Detektor je doplněn magnetickými spektrometry a dalšími pomocnými zařízeními. V průměru je zaznamenáno 46 interakcí mionových neutrin za den a předběžně se počítalo s jednou interakcí taunového neutrina za rok. Úspěšnost nalezení rozpadu taunu na elektron je 3,4 %, na mion 2,8 % a na pion 2,4 %. Celková úspěšnost zaznamenání události je tak kolem 9 %.

Stavba detektoru byla dokončena v roce 2006, kdy proběhly první testy. V plném provozu je detektor od roku 2008, kdy bylo zaznamenáno 1698 událostí, v roce 2009 to bylo již 3 500 událostí.

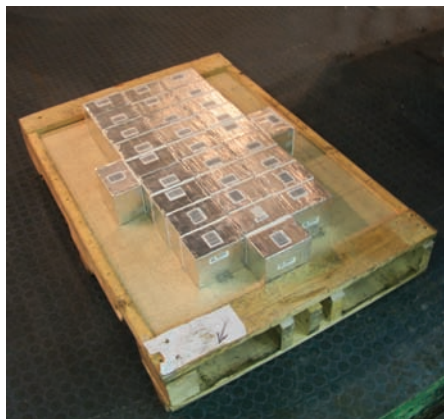


Neutrina připravená v CERN jsou sledována v italské laboratoři pod horou Gran Sasso. Zdroj: CERN.

Členové Aldebaranu (Martin Batelka a Vladimír Scholtz) před experimentem OPERA. V levé horní části je robot vytahující cihličky. Dvě tmavé stěny v pozadí jsou vyskládané z olověných cihliček. Zdroj: AGA.







*Cihličky připravené k osazení do detektoru. Na první pohled vypadají jako vyskládané kostky másla. Jedna kostka má ale hmotnost přes 8 kilogramů. Jejich výroba je plně automatizovaná. Zdroj: AGA.*

*Římské olovo z potopené lodi je ideálním materiálem pro výrobu detektorů. Po tak dlouhé době je většina radioaktivních jader rozpadlá, a tak římské olovo nedává parazitní signály. Zdroj: AGA.*



Dne 31. května 2010 byl oznámen první nalezený rozpad tauonu, což znamená, že bylo zachyceno tauonové neutrino. Jde o historicky první tauonové neutrino zachycené jako produkt oscilace neutrin. Odhaduje se, že v celkové kolekci posbíraných dat by mohla být až tři tauonová neutrina (ze seriózních odhadů plyne přibližně jedna událost za rok). V tuto chvíli je nejdůležitější pokračování ve sběru dat a analýza zaznamenaných událostí, ze které bude možné zpřesnit odhad hmotnosti neutrin a jejich mixážních úhlů.

V roce 2011 rozjitřil detektor OPERA fantazii médií a lidových myslitelů zprávou, že neutrino z CERN přicházejí do Gran Sasso o 60 ns dříve, než by se slušelo a patřilo. Jinými slovy to znamenalo, že se pohybují nadsvětelnou rychlostí. Objevily se zaručené zprávy, že pád Einsteinovy relativity je nevyhnutelný, odvážnější „myslitelé“ šli ještě dále a tvrdili, že celá stavba fyziky se hroutí a je nesprávná. Řešení bylo nakonec mimořádně jednoduché – špatně upevněný konektor kabelu pro komunikaci mezi podzemní a nadzemní částí laboratoře. Senzace se nekonala a my se můžeme těšit na další výsledky z tohoto unikátního experimentu.

■ Petr Kulhánek, 17. 12. 2010, AB 45/2010, aktualizováno

# Casimirův jev při pokojové teplotě

Co zbude v nádobě, pokud z ní odčerpáme veškerý vzduch? Bude zcela prázdná? Nebude, zbude v ní vakuum. Ačkoliv se vakuum na makroskopické úrovni jeví jako prázdný prostor, na mikroskopické úrovni tomu tak není. Přestože je vakuum systém s nejnižší energií, tato energie není přesně nulová. Úvahy o nenulové energii vakua pocházejí z roku 1913 od Alberta Einsteina a Otto Sterna, kteří studovali teorii záření absolutně černého tělesa formulovanou Maxem Planckem roku 1901. Ve vakuu neustále dochází ke kvantovým fluktuacím, které jsou patrné pouze na mikroskopických škálách. Nepřetržitě zde vznikají páry částic a antičástic, které později anihilují. Doba jejich života klesá s rostoucí energií částic. Tento princip vystihují Heisenbergovy relace neurčitosti pro energii a čas. Způsob, jakým by bylo možné tyto projevy vakua experimentálně změřit, navrhl v roce 1948 holandský fyzik Hendrik Casimir.

## Casimirův jev

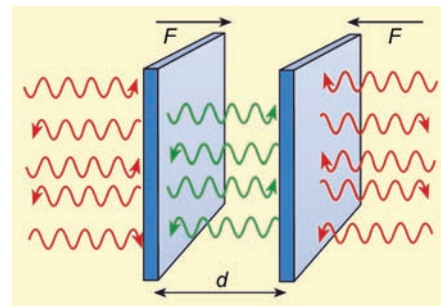
Casimir uvažoval o dvou paralelních elektrodách (zrcadlech) umístěných ve vakuu za teploty blízké absolutní nule. Vně těchto zrcadel vakuové fluktuace elektromagnetického pole dosahují širokého spektra energií, ovšem v souladu s relacemi neurčitosti. Jiná situace nastává mezi elektrodami, které tvoří rezonátor. Zde mohou vznikat pouze fluktuace určitých vlnových délek – módů rezonátoru. Ostatní vlnové délky jsou zde potlačeny. Tato nerovnováha fluktuací vně elektrod a mezi nimi způsobuje tlakovou sílu, která přitahuje elektrody k sobě. Jev se nazývá Casimirův jev a je makroskopickým projevem kvantových jevů, stejně jako například supravodivost nebo supratekutost.

Přitažlivá síla mezi elektrodami klesá se čtvrtou mocninou jejich vzdálenosti, a proto je měřitelná pouze, pokud jsou elektrody velmi blízko u sebe (řádově mikrometry). Proto bylo možné Casimirův jev pozorovat s uspokojivou přesností až v roce 1997. Experiment provedl Steve Lamoreaux v Národní laboratoři v Los Alamos v USA. Odchylka naměřených dat od teoretické hodnoty byla 5 %. Casimirova síla také závisí na tvaru elektrod. Pokud bychom uvažovali elektrody ve tvaru dvou kulových ploch, měla by Casimirova síla opačné znaménko a mohli bychom pozorovat kvantovou levitaci.

**Bosony** – částice, které mají celočíselný spin, symetrickou vlnovou funkci, nespĺňují Pauliho vylučovací princip a podléhají Boseho-Einsteinově statistickému rozdělení. Například jsou to všechny skalární i vektorové mezony, fotony a gluony. Při nízkých teplotách se bosony mohou hromadit v základním stavu.

**Fermiony** – částice, které mají poločíselný spin, vlnová funkce je antisymetrická, splňují Pauliho vylučovací princip a podléhají Fermiho-Diracovu statistickému rozdělení. Patří mezi ně všechny leptony, kvarky a baryony – například elektron, neutron, proton a neutron. Při nízkých teplotách fermiony obsazují stavy postupně, až po tzv. Fermiho mez.

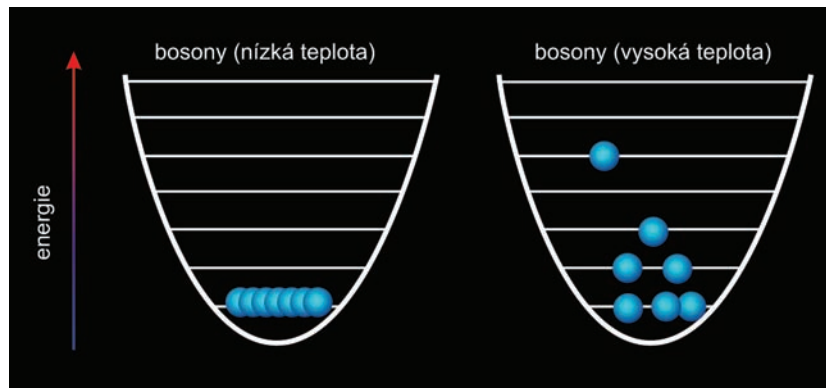
Casimirovu sílu mezi dvěma vodivými elektrodami způsobuje nerovnováha mezi kvantovými fluktuacemi vakua vně elektrod a mezi nimi. Tato nerovnováha je dána tím, že mezi elektrodami mohou vznikat pouze takové fluktuace, které odpovídají módům rezonátoru tvořeným těmito elektrodami. Ostatní fluktuace jsou zde potlačeny. Zdroj: A. Lambrecht, *Physics World*.



**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. Stejná relace platí také mezi energií a časovým intervalem. Ve vakuu mohou po velmi krátkou dobu vznikat ve shodě s relací neurčitosti fluktuace (objekty) o určité energii. Čím vyšší energie, tím kratší doba života těchto fluktuací.

**Supravodivost** – supravodivost objevil v roce 1911 Kamerlingh-Onnes, který zjistil, že při ochlazení rtuť pod teplotu 4,2 K dochází k prudkému poklesu elektrického odporu až na milióntinu původní hodnoty. Za tento objev obdržel v roce 1913 Nobelovu cenu za fyziku, ale ještě dlouho trvalo, než se podařilo vysvětlit, proč se elektrony v ochlazeném materiálu pohybují bez odporu.

Vlevo: při teplotách blízkých absolutní nule bosony zaujmou jediný stav s nejnižší energií – energie systému je nejnižší. Vpravo: se vzrůstající teplotou bosony postupně obsazují stavy s vyšší energií – energie systému se tak zvyšuje. Zdroj: AGA.



## Tepelný Casimirův jev

Při konečné teplotě vstupují do hry tepelné fluktuace elektromagnetického pole, a přispívají tak k silovému působení mezi elektrodami. Tepelné fluktuace jsou způsobeny chaotickým pohybem volných elektronů v materiálu elektrod. Paralelní elektrody opět představují rezonátor, ve kterém je možné vybudit pouze určité módy. Každý mód představuje stav s přesně určenou energií. Tyto stavy jsou obsazovány fotony, které reprezentují fluktuace elektromagnetického pole. Obsazení těchto hladin popisuje Boseho-Einsteinovo rozdělení. Při nulové teplotě všechny fotony obsadí pouze nejnižší energetickou hladinu. S rostoucí teplotou postupně dochází k obsazování i dalších, vyšších energetických hladin. Mezi zrcadly vzniká další přitažlivá síla, která ovšem závisí na teplotě. Jedná se o *tepelný Casimirův jev*.

Přestože tepelný Casimirův jev byl teoreticky předpovězen Jevgenijem Lifšicem v roce 1955, dočkal se svého objevu až v roce 2010. Tento úkol se podařilo zvládnout skupině vědců na americké Yaleově univerzitě. Tepelné fluktuace elektromagnetického pole byly opět měřeny prostřednictvím přitažlivé síly mezi dvěma elektrodami. Připravit dokonale rovinné paralelní plochy je poměrně obtížné, a proto byl experiment prováděn s jednou rovinnou elektrodou a druhou elektrodou ve tvaru kulové plochy. Obě elektrody byly vyrobeny ze zlata s přesností 10 nm (kulová elektroda) a 1 nm (rovinná elektroda). Síla mezi elektrodami byla měřena pomocí torzního kyvadla, kde torzní síla wolframového drátku o průměru 25  $\mu\text{m}$  byla vyrovnávána přitažlivou silou mezi elektrodami. Výchylku torzního kyvadla snímal kapacitní polohový senzor. Celý experiment probíhal při teplotě 300 K.

Naměřené výsledky byly porovnávány se dvěma teoretickými modely – plazmovým modelem a Drudeho modelem. Tyto modely popisují chování permitivity elektrod v závislosti na frekvenci. Naměřené výsledky jsou ve shodě s Drudeho modelem při teplotě 300 K. Podle tohoto modelu tepelná přitažlivá síla roste lineárně s teplotou a klesá s druhou moc-

ninou vzdálenosti. To znamená, že zatímco Casimirova síla převládá na velmi malých vzdálenostech, tepelná Casimirova síla dominuje na velkých vzdálenostech. Při experimentu byl naměřen pokles přitažlivé síly odpovídající závislosti  $1/\text{vzdálenost}^2$  při rozestupu mezi elektrodami větším než  $3 \mu\text{m}$ . Tento výsledek je ve shodě s teoretickou předpovědí tepelné Casimirovy síly popsané Drudeho modelem.

## Uplatnění v reálném životě

Kvantové a tepelné fluktuace elektromagnetického pole nejsou pouze laboratorní záležitostí. Projevy Casimirova efektu (kvantového i tepelného) je třeba brát v úvahu při návrhu miniaturních elektromechanických systémů (MEMS). Jedná se o mikroskopická mechanická zařízení vytvářená pomocí fotolitografie na křemíkových čípech. MEMS mají velmi široké uplatnění od laboratorních mikromanipulátorů, až po předměty denní potřeby. Takové systémy například pracují jako akcelerometry pro aktivaci airbagů v automobilech. MEMS akcelerometry také bývají integrovány v některých mobilních telefonech, kde umožňují nejrůznější zábavné funkce. Přitažlivá síla působící na krátkých vzdálenostech může způsobit, že jednotlivé součásti MEMS systémů se k sobě budou lepit, čímž může dojít k omezení funkčnosti zařízení. Naopak vhodným tvarováním mikrosoučástek bychom mohli tyto jevy využít ke zlepšení vlastností MEMS systémů.

■ Miroslav Havránek, 11. 3. 2011, AB 10/2011

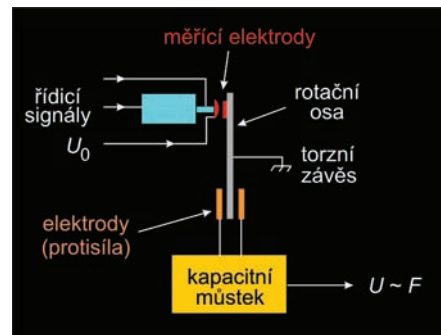
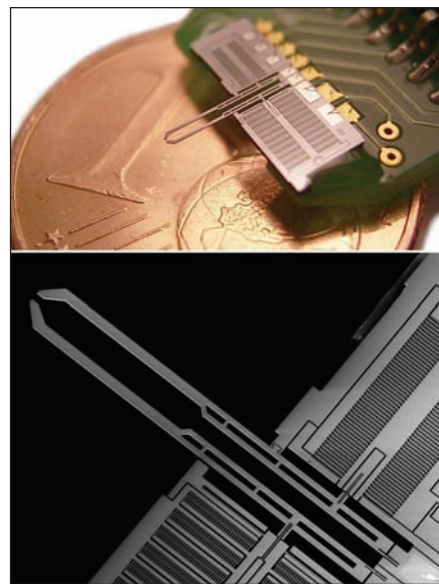


Schéma zařízení (pohled shora) pro měření tepelného Casimirova jevu. Zdroj: A. Sushkov, ArXiv.

Příklad použití MEMS technologie – elektrostaticky řízená miniaturní pinzeta umožňující manipulovat s objekty o velikosti 1 až  $100 \mu\text{m}$ . Zdroj: FemtoTools.



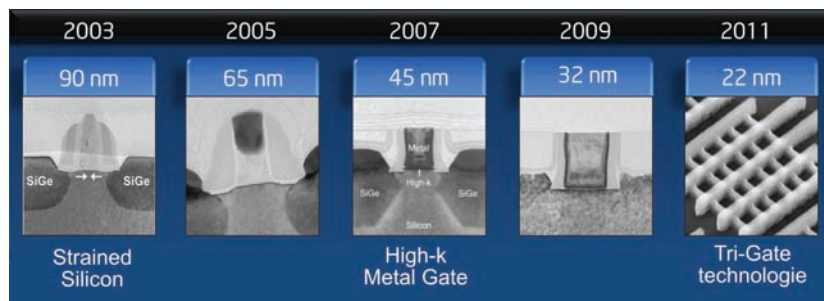


## Jak tenký vodič ještě dokáže vést proud?

**Moorův zákon** – pozorování Gordona Moorea, jednoho ze spoluzakladatelů společnosti Intel, které říká, že počet tranzistorů na jednom čipu se přibližně každých 18 měsíců zdvojnásobí. Nejedná se o přesný fyzikální zákon, nicméně toto tvrzení platí již téměř 50 let.

**CMOS** – Complementary Metal Oxid Semiconductor, technologie, která využívá tranzistorů MOSFET obou typů vodivosti (NMOS a PMOS). CMOS technologií se vyrábí většina elektronických integrovaných obvodů včetně procesorů, paměť a v posledních letech také obrazové senzory digitálních fotoaparátů (alternativa k CCD). CMOS součástky vynikají nízkou spotřebou a vysokou hustotou integrace. Technologie samotná je poměrně laciná a dobře technologicky zvládnutá.

Historický vývoj rozměrů tranzistorů v předchozích devíti letech. Poslední obrázek ukazuje topologii tranzistoru Tri-Gate (také označována jako 3D nebo Fin-Fet) představenou společností Intel v roce 2011. Tato technologie umožňuje snížit rozměr tranzistoru až na 22 nanometrů. Zdroj: Intel.



Mikroelektronika je patrně nejrychleji se vyvíjejícím oborem a proniká do našich životů ze všech stran. Elektronické čipy s vysokou hustotou integrace elektronických obvodů umožňují ukládat gigabyty dat, provádět s nimi komplexní operace, přijímat a odesílat data prostřednictvím mikrovlnných signálů, a to vše v jediném zařízení kapesní velikosti. Za tyto možnosti vděčíme neustále se vyvíjejícím technologiím, miniaturizaci a zvyšující se komplexitě integrovaných obvodů. Rychlost zmenšování obvodových struktur již téměř 50 let úspěšně popisují proslulé Moorovy zákony. Asi každého napadne otázka, kdy tento pokrok skončí. Kde jsou fyzikální hranice miniaturizace tranzistorů? Jak moc můžeme zmenšovat průměr propojovacích vodičů mezi tranzistory, aby ještě zůstaly vodivé?

### Problémy při zmenšování elektronických obvodů

Většina integrovaných obvodů (elektronických čipů) se vyrábí technologií CMOS. Základním elementem integrovaného obvodu je MOSFET tranzistor technologicky vytvořený na křemíkovém substrátu. MOSFET má tři vývody nazývané S (*Source*), D (*Drain*) a G (*Gate*). Napětím na elektrodě *gate* je možné modulovat proud protékající mezi elektrodami *source* a *drain*. Elektroda *gate* je elektricky izolovaná vrstvou izolantu od ostatních elektrod a také od křemíkového substrátu. S takovou strukturou je možné realizovat téměř dokonalý spínač s téměř nekonečným odporem v rozepnutém stavu a téměř nulovým odporem v sepnutém stavu. V digitálních obvodech tranzistory pracují

téměř výhradně jako velmi rychlé spínače. Zmenšováním rozměrů tranzistorů na úroveň desítek nanometrů lze dosáhnout spínacích frekvencí v řádu gigahertzů. V takto malých tranzistorech se začínají uplatňovat kvantové efekty, jako je například tunelový jev zodpovědný za svodové proudy (mezi elektrodami *source* a *drain* a mezi

gate a substrátem). Pokud svodový proud jediného tranzistoru dosáhne i zdánlivě zanedbatelné hodnoty 10 pA, pak v případě potřeby integrace deseti miliard tranzistorů, jako například v paměti běžného MP3 přehrávače, může vznikat poměrně vysoký ztrátový výkon a vybit tak napájecí baterii MP3 přehrávače za několik hodin.

Nejenom zmenšování tranzistorů samotných představuje výzvu pro polovodičové technologie. Dalším problémem je elektrické propojení transistorů s rozměry desítek nanometrů. Elektrické propojení tranzistorů je realizováno sítí hliníkových nebo měděných vodičů nanosených v několika vrstvách.

Pokročilé CMOS technologie používají až 11 vrstev metalizace. Se zmenšováním průřezu elektrických propojek se zvyšuje odpor, což má za následek zvýšení ztrátového výkonu a také snížení rychlosti čipu. Nabízí se ale otázka: Lze principiálně vytvořit vodič o průměru několika atomů pro vedení elektrického proudu? Nezamezí kvantové jevy průchodu proudu? Odpověď na tuto otázku poskytly experimentální výsledky skupiny vědců z Univerzity v Novém Jižním Walesu v australském Sydney.

## Ověření platnosti Ohmova zákona na atomární úrovni

Skupině experimentátorů z Austrálie se podařilo vytvořit na křemíkovém substrátu miniaturní vodič o šířce čtyři atomy a tloušťce pouhý jeden atom. Cílem experimentů s tímto vodičem bylo prokázat, zda je vůbec možné takovou strukturu vytvořit a nechat jí protékat elektrický proud.

Elektrony jsou v takovém vodiči uvězněny v jednodimenzionálním prostoru a chovají se podobně jako auta na dálnici. Stejně jako jediná dopravní nehoda na dálnici zcela zastaví provoz, tak i výskyt jediné poruchy vazeb mezi atomy může přerušit tok proudu. Tento princip částečně funguje i opačně – zdánlivě nepatrná koncentrace vhodné příměsi může z nepříliš vodivého materiálu udělat dobrý vodič. Přesně takovým způsobem byl za pomoci epitaxe z molekulárních svazků tento miniaturní vodič připraven.

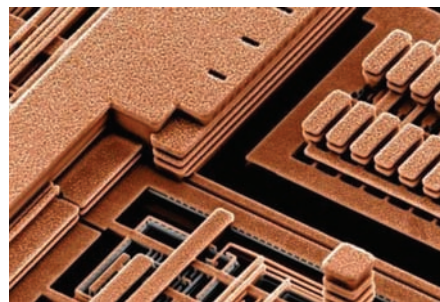
Dopováním křemíku atomy fosforu s průměrným rozestupem 1 nm vznikl vodič o relativně nízké rezistivitě, přibližně 0,3 mΩ·cm. Ke koncům vodiče byl připojen zdroj o napětí cca 500 μV a byla studována jeho vodivost. Výsledky měření potvrdily lineární závislost mezi napětím a proudem – tedy dobře známý Ohmův zákon.

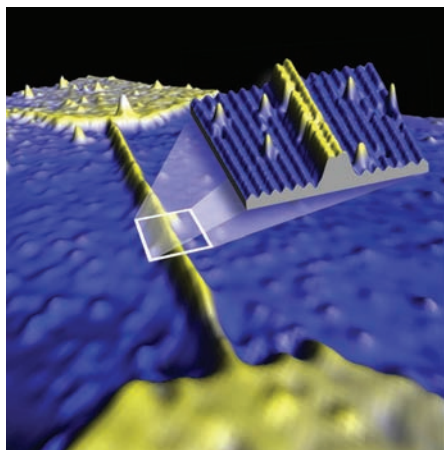
**MOSFET** – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, polem řízený tranzistor, ve kterém je vodivost kanálu mezi elektrodami S (Source) a D (Drain) ovládána elektrickým polem vytvářeným ve struktuře kov-oxid-polovodič (MOS, Metal-Oxid-Semiconductor) napětím přiloženým mezi řídicí elektrodu G (Gate) a elektrodu S.

**Epitaxe** – termín pocházející z řeckých slov „epi“ (nad) a „taxis“ (uspořádaně) označující orientovaný růst monokrystalických vrstev. Tyto vrstvy vznikají (doslova rostou) na monokrystalickém substrátu (podložce) z plynných, kapalných či pevných látek a svou krystalickou strukturou plynule navazují na strukturu substrátu. Tento technologický postup se hojně využívá při výrobě polovodičových struktur.

**Předepnutý křemík (Strained Silicon)** – technologie, jak zvýšit maximální spínací frekvenci tranzistorů. Jde o křemík s uměle zvětšenou mřížkovou konstantou. Nosiče náboje v předepnutém křemíku dosahují vyšší pohyblivosti, a proto tranzistory mohou pracovat rychleji. Zvětšení mřížkové konstanty se dosahuje epitaxním růstem několika atomárních vrstev křemíku na povrchu substrátu vyrobeného ze sloučeniny křemíku a germania (Si-Ge). Mřížková konstanta této epitaxní vrstvy (Si) se přizpůsobí mřížkové konstantě substrátu (Si-Ge), která je větší než u křemíku samotného.

Spleťtá mnohvrstevnatá struktura elektrických propojení tranzistorů v integrovaném obvodu. Zdroj: IBM.





Obrázek pořízený skenovacím tunelovým mikroskopem ukazuje velmi tenký vodič o šířce pouhé čtyřičtyř atomů.  
Zdroj: IEEE Spectrum.

### Závěr

Výsledky výše uvedeného experimentu ukazují, že síť propojení mezi tranzistory integrovaného obvodu je možné škálovat až na atomární úroveň. Pokud se v budoucnu podaří miniaturizovat i tranzistory na atomární úroveň, pak by tento stav představoval skutečnou fyzikální hranici miniaturizace. Vstoupí mezitím do hry kvantové počítače? Zatím se nacházíme poměrně daleko od takto smělých cílů a zdá se tedy, že výrok Richarda Feynmana z roku 1959 „*There's plenty of room at the bottom*“ je platný i nadále.

■ Miroslav Havránek, 10. 2. 2012, AB 6/2012



## Nobelovy ceny za fyziku

Nobelova cena je udělena švédskou Královskou akademií jednou ročně v pěti kategoriích: za fyziku, chemii, fyziologii a medicínu, literaturu a za úsilí o mír. Cena je hrazena z Nobelovy nadace, kterou založil Alfréd Nobel, vynálezce dynamitu, v roce 1895. První cena za fyziku byla udělena v roce 1901 Wilhelmu Roentgenovi za objev rentgenového záření. Nobelova cena činí 10 milionů švédských korun, tj. přibližně 25 milionů Kč. Udělování má svá pravidla: Nobelova cena nemůže být udělena posmrtně, naráz mohou být oceněni maximálně tři vědci a nominace mohou být podány nejpozději do konce ledna daného roku.

Od roku 1901 do roku 2013 bylo uděleno celkem 107 Nobelových cen za fyziku. Podělilo se o ně 196 fyziků. Většinou se uděluje Nobelova cena více vědcům naráz. Ve 47 případech byla udělena Nobelova cena za fyziku jen jednomu jedinému vědci, z toho do roku 1950 ve 33 případech. Poslední cena udělená jedinému vědci byla v roce 1992, a to Georgu Charpakovi za vynález a vývoj částicových detektorů, zejména drátové komory.

V letech 1916, 1931, 1934, 1940, 1941 a 1942 nebyla Nobelova cena za fyziku udělena vůbec. Většinou šlo o léta globálních válečných konfliktů. Za celou historii byly uděleny jen dvě Nobelovy ceny za fyziku ženám, šlo o Marii Curie-Sklodowskou v roce 1903 (za objev radioaktivity) a Mariu Mayerovou v roce 1963 (za slupkový model jádra). Jediný vědec získal Nobelovu cenu za fyziku dvakrát. Byl to John Bardeen, poprvé v roce 1956 za výzkum polovodičů a objev tranzistorového jevu a podruhé v roce 1972 za objasnění supravodivosti.

Nejmladším nositelem Nobelovy ceny za fyziku se stal Lawrence Bragg. Cenu získal v roce 1915 spolu se svým otcem za výzkum krystalových struktur za pomoci rentgenového záření. Bylo mu pouhých 25 roků. Průměrný věk oceněných laureátů je 55 let. Většinou ale dostali cenu za výzkum, který prováděli v období do 30. roku života.

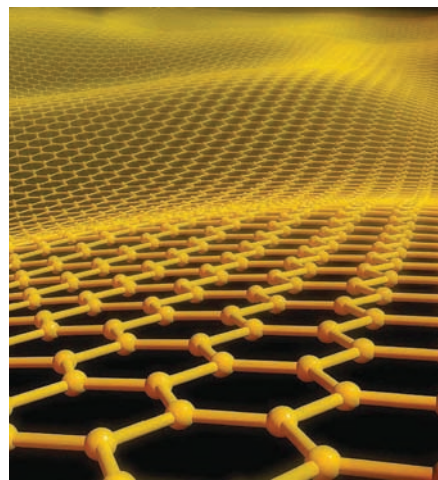
### 2010 – grafen

Nobelovu cen za fyziku pro rok 2010 získali vědci Andrej Geim a Konstantin Novoselov za průkopnické experimenty s grafenem, formou uhlíku, která skýtá široké možnosti využití v elektronice. Oba vědci jsou původem z Ruska. V současnosti působí v Británii na Univerzitě v Manchesteru. Geim má nizozemské občanství, Novoselov má



Medaile získávaná při udělení Nobelovy ceny.  
Zdroj: Nobelovský výbor.

Krystalická mříž grafenu. Zdroj: McCormix 2013.







Andrej Geim (\*1958) se narodil se v ruské Soči. V roce 1987 získal doktorský titul na Institutu fyziky pevných látek Ruské akademie věd. V následujících letech pracoval v ruském Institutu mikroelektronických technologií. Počátkem 90. let absolvoval stáže na univerzitách v Nottinghamu, Bathu a Kodani. V letech 1994 až 2000 byl profesorem na univerzitě v nizozemském Nijmegen. Od roku 2001 působí na univerzitě v Manchesteru.

Konstantin Sergejevič Novoselov (\*1974) se narodil v Nižním Tagilu v Rusku. Vystudoval Moskevský fyzikálně technický institut. V současnosti je profesorem na Univerzitě v Manchesteru, kam následoval svého učitele Andreje Geima. Oba vědci zahájili dlouholetou spolupráci v oblasti nanostruktur v Holandsku, kde Novoselov získal v roce 2004 doktorát na Nijmegenské univerzitě.



občanství britské i ruské. Oba zahájili vědeckou kariéru v Rusku. Novoselov je nejmladším laureátem Nobelovy ceny za fyziku od roku 1973.

Grafen je nejtenčí a přitom nejpevnější známý materiál, má perspektivní využití v elektronice, kupříkladu při výrobě počítačových prvků, či v oblasti nanotechnologií. Experimenty s grafenem by mohly vést k vývoji nových materiálů a k výrobě elektronických prvků nových vlastností. Grafen tvoří extrémně tenká síť z jediné vrstvy atomů uhlíku uspořádaných do tvaru šestiúhelníků. Unikátní vlastnosti jej předurčují k výrobě nových tranzistorů, mikroprocesorů, pamětí, displejů a fotovoltaických článků. Grafen je průhledný a dobře vodivý, proto je vhodný při výrobě průhledných dotykových obrazovek, světelných panelů a solárních článků.

Existence jednovrstvé formy uhlíku a její vlastnosti byli předpokládány již dříve. Geim a Novoselov byli první, kdo tuto formu uhlíku v roce 2004 připravili a ověřili její unikátní vlastnosti. Vědci grafen získali z obyčejné tuhy. Každý, kdo něco psal obyčejnou tužkou, zanechal možná na papíru jednu vrstvu atomů – grafen. Elektrony se ve vrstvě grafenu pohybují relativně volně, nenarážejí na žádný odpor jiných částic. Grafen proto může být supravodičem. V určitém stavu při pohybu dvou grafenových vrstev proti sobě nevzniká tření. Grafen je nejpevnějším známým materiálem, výborným vodičem elektrického proudu, nejlepším známým vodičem tepla a je propustný pro světlo.

V roce 2007 byla prokázána nastavitelná šířka zakázaného pásu dvojevrstvé grafenové struktury. V roce 2008 byl v laboratořích IBM vyroben palem řízený tranzistor pracující na frekvenci 26 GHz. V roce 2009 spatřil v italské laboratoři L-NESS světlo světa první logický obvod – invertor pracující na frekvenci 10 kHz. Po roce 2010 došlo k širokému využití grafenu v nejrůznějších technologiích. Objev grafenu je přirovnáván k revoluci způsobené objevem plastů.

## 2011 – zrychlená expanze

Rok 1998 byl pro fyziku a astronomii v jistém smyslu přelomový. V tomto roce byla objevena zrychlená expanze vesmíru. Za ni nemůže být zodpovědná gravitační síla, pokud se tato síla chová tak, jak si myslíme. Gravitace je přitažlivou interakcí a není možné, aby docházelo k samovolnému zrychlování expanze. Stejně tak není možné, aby se kámen vržený vzhůru začal sám od sebe pohybovat rychleji a rychleji od osoby, která ho vrhla. Entita zodpovědná za zrychlenou expanzi

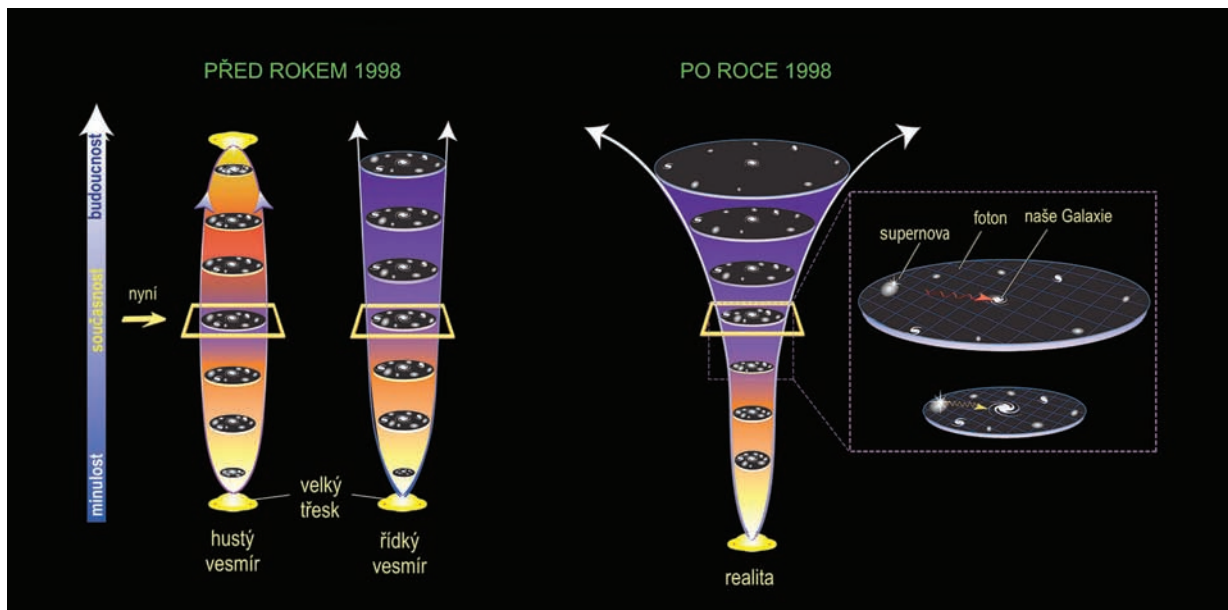
získala pracovní název *temná energie* a po jejím skutečném původu se dosud pátrá. Je sice škoda, že udělení Nobelovy ceny za tak zásadní objev trvalo celých 13 roků, ale autoři objevu jsou relativně mladí, a tak se ocenění ve zdraví dožili.

Při ověřování kosmologických modelů je největším problémem měření vzdáleností. V kosmologických měřících byly do konce 20. století prováděny jen hrubé odhady vzdálenosti. Chyběla „standardní svíčka“, pomocí které by se určovaly vzdálenosti ve vesmíru. Na konci dvacátého století se k určování vzdálenosti začaly používat – jako zdaleka viditelné standardní svíčky – supernovy typu Ia. Množství energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze jednoznačně identifikovat podle tvaru jejího spektra. Navíc jsou tyto objekty ve vesmíru relativně časté, v průměrné galaxii dojde ke dvěma explozím za století.

V letech 1998 a 1999 provádělo měření vzdáleností a červeného kosmologického posuvu (a tím i expanzní funkce) galaxií za pomoci



Adam Guy Riess (\*1969) je americký fyzik a astrofyzik. Jeho rodiče emigrovali z nacistického Německa do Spojených států v roce 1936. Riess vystudoval MIT, PhD získal na Harvardu v roce 1996. V současnosti je zaměstnancem Hopkinsonovy univerzity a výzkumného ústavu Space Telescope Science Institute.





Brian Schmidt (\*1967) je americký fyzik a astrofyzik. V roce 1989 dokončil bakalářská studia fyziky a astronomie na Arizonské univerzitě v USA. Magisterský titul získal na Harvardu v roce 1992 a PhD v roce 1993. Brian Schmidt je v současnosti zaměstnancem Observatoře na Mt. Stromlo patřící Australské národní observatoři.

Saul Perlmutter (\*1959) je americký astrofyzik. Studoval na Harvardu, PhD získal na Kalifornské univerzitě. Saul Perlmutter je dnes zaměstnancem Lawrenceovy národní laboratoře v Berkeley a profesorem fyziky na Kalifornské univerzitě v Berkeley.



supernov Ia několik nezávislých vědeckých skupin. Jedna z nich byla vedená Adamem Riessel a Brianem Schmidtem (*Space Telescope Science Institute, Baltimore*), jejich tým se nazýval *High-z Supernova Search Team*. Jinou skupinu vedl Saul Perlmutter (*Lawrence Berkeley National Laboratory*), jejich projekt se nazýval *Supernova Cosmology Project (SCP)*. Obě skupiny na vybraném souboru supernov určovaly dvě veličiny: vzdálenost z jejich skutečné jasnosti (průběhu světelné křivky) a rychlost expanze vesmíru z červeného kosmologického posuvu spektrálních čar. To umožnilo určit, jak se vesmír rozpínal v různých časových obdobích. Výsledek byl překvapivý – byla zjištěna zrychlená expanze vesmíru. To znamená ve svém důsledku přítomnost temné energie ve vesmíru, která se projevuje záporným tlakem a způsobuje urychlování expanze vesmíru. Tato temná energie se projeví nenulovou hodnotou tzv. kosmologické konstanty, která z Perlmutterových i Riessových měření vycházela kolem 70 % celkové hustoty hmoty a energie ve vesmíru. Obě zmíněné skupiny měly k dispozici do roku 2003 soubor 230 supernov. Nejvzdálenější použitou supernovou byl objekt 1997ff. V posledních letech existuje celá řada projektů vyhledávajících supernovy typu Ia. Tyto objekty byly vyhledávány také v klíčovém projektu HST pro určení Hubblovovy konstanty i v současných přehlídkových projektech, například projektu GOODS.

Efekt zrychlené expanze, jehož původce jsme pojmenovali temná energie, by mohl být způsoben netriviálními dynamickými vlastnostmi vakua, které souvisí s kvantovými procesy. Mohlo by také jít o další neznámou interakci, nové kvantové pole, které se nazývá *kvintesence*. Jinou možností je, že se gravitační interakce na velkých vzdálenostech chová jinak, než jsme si dosud mysleli. Objev zrychlené expanze znamenal v každém případě zcela zásadní změnu v našich názorech na chování vesmíru jako celku na kosmologických vzdálenostech a otevřel cestu k novým myšlenkám a teoretickým konstrukcím.

## 2012 – kvantová měření

Nobelova cena za fyziku pro rok 2012 byla udělena fyzikům Sergeju Harochovi z Francie a Davidu Winelandovi z USA za vývoj zcela nových průlomových kvantových měření a za s nimi související technologie manipulace s jednotlivými kvantovými objekty. Tyto výzkumy umožňují další vývoj kvantových počítačů, systémů kvantového šifrování a kvantové teleportace. Zároveň dovolují sledovat, za jakých

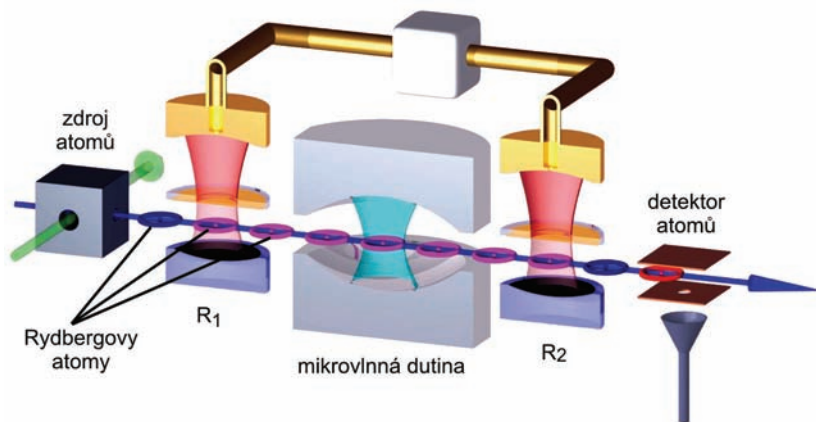
podmínek se kvantové objekty přestávají chovat kvantově a začínají nabývat klasických vlastností, které známe z makrosvětla.

Objekty mikrosvětla se chovají zcela jinak než tělesa, na která jsme zvyklí kolem nás. Tyto objekty se projevují někdy jako vlny a někdy jako částice, dokážou být v několika stavech naráz, interferovat samy se sebou a v mnoha dalších ohledech se odlišují od klasických objektů. K podstatnému rysu mikrosvětla patří akt měření. Při měření v makrosvětě objekty nijak viditelně nenarušíme, ale v mikrosvětě je tomu zcela jinak. Po měření je stav systému jiný, než byl před měřením, a nezděravka je systém samotný zcela zničen. Měření narušuje objekty mikrosvětla, a proto musí být součástí kvantové teorie, která tento – pro nás podivný svět – popisuje. Serge Haroch a David Wineland vyvinuli technologie měření, které nejen, že objekty mikrosvětla nezničí, ale některé veličiny se dokonce po měření nezmění vůbec.

Skupina Serge Harocha vyvinula v 70. letech 20. století novou metodu laserové spektroskopie založenou na kvantové interferenci. Haroche se dlouhodobě zabýval kvantovými vlastnostmi Rydbergových atomů. Tyto obří atomy jsou mimořádně citlivé na mikrovlny, a to je přímo předurčuje ke studiu interakce atomů s fotony, k provádění měření na jednotlivých fotonech a k detekci jednotlivých fotonů.

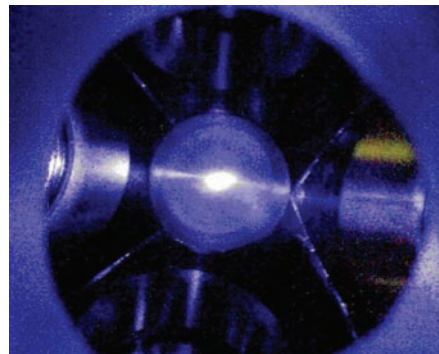
Skupina Serge Harocha vyvinula v 70. letech 20. století novou metodu laserové spektroskopie založenou na kvantové interferenci. Haroche se dlouhodobě zabýval kvantovými vlastnostmi Rydbergových atomů. Tyto obří atomy jsou mimořádně citlivé na mikrovlny, a to je přímo předurčuje ke studiu interakce atomů s fotony, k provádění měření na jednotlivých fotonech a k detekci jednotlivých fotonů.

Za pomoci laseru excitovali ve svazku atomů rubidia elektron v atomárním obalu do stavu s velmi vysokou energií. Tím vznikl Rydbergův atom, u kterého poté sledovali vývoj jeho vnitřních stavů. Na jednom konci byl svazek vystaven pulzu mikrovlnného záření, který vyvolal koherentní superpozici mezi dvěma stavy Rydbergova atomu. Na druhém konci svazku bylo další mikrovlnné pole, které interagovalo s Rydbergovým atomem a vytvořilo s prvním polem interferenční obrazec. Interferometr využívající interference mezi dvěma stavy atomu se nazývá Ramseyův interferometr. Poté Harochův kolektiv mezi oba mikrovlnné pulzy umístil mikrovlnný rezonátor (dutinu s mikrovlnným



Ramseyův interferometr. Rydbergovy atomy jsou znázorněny kroužky. R1 a R2 jsou pomocné dutiny, první slouží k přípravě superpozice stavů dvojhledinového Rydbergova atomu a druhá k detekci. Zdroj: S. Haroche.

Aparatura pro laserové ochlazování atomů vápníku zkonstruovaná na univerzitě ve skotském městě Starthclyde. Zdroj: Erling Riis Fosa.

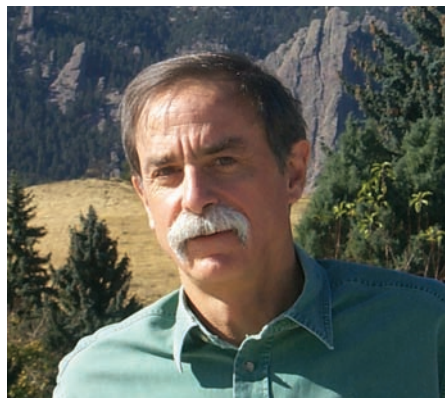






*Serge Haroche (\*1944) je francouzský teoretik. Narodil se v marocké Casablance, jeho otec byl marocký právník a matka učitelka původem ze Sovětského svazu (Ukrajiny) – její rodina se přestěhovala do Paříže na počátku 20. let 20. století. Haroche se trvale usídlil ve Francii v roce 1956. Dnes je profesorem na Francouzské kolejí.*

*David Wineland (\*1944) je americký fyzik. Pochází z kalifornského Sacramenta. Studoval na Kalifornské univerzitě v Berkeley. Doktorát obdržel na Harvardu. Poté pracoval na Washingtonské univerzitě. V roce 1975 začal pracovat v Národním ústavu standardů a technologií NIST. Dnes je zaměstnancem NIST a Coloradské univerzity v Boulderu.*



polem). Stav Rydbergova atomu je propleten se stavem pole v dutině. Při interakci s Rydbergovým atomem se mění fáze pole rezonujícího v dutině a z této změny fáze lze v principu určit stav a polohu prolétávajícího Rydbergova atomu a naopak ze stavu Rydbergova atomu (měřeného na konci experimentu za pomoci statického elektrického pole) usuzovat na pole (množství fotonů) v dutině. Harochův tým postupně metodu natolik vylepšil, že bylo možné detekovat jednotlivé fotony v dutině včetně jejich kvantového stavu. Dutina obsahující jen několik fotonů je vhodná pro testování kvantové dekoherence a k realizaci logických operací, které využívají kvantový přenos informace.

David Wineland prováděl obdobné experimenty, ale namísto fotonů využíval ochlazené ionty. Jako první v roce 1978 demonstroval princip laserového ochlazování. Tato technika využívá k ochlazování atomů laserového světla s vlnovou délkou nepatrně nižší než je charakteristický elektronový přechod v atomu. Toto „podladění“ má za následek, že atomy absorbují větší množství fotonů, pokud se pohybují směrem ke zdroji, než pokud se pohybují od zdroje. Při interakci s fotonem atom ztrácí odpovídající hybnost ve směru zdroje světla. Při následném vyzáření fotonu sice hybnost opět získá, ale v náhodném směru. Zpravidla se používá šest laserů ve směru a proti směru tří souřadnicových os. Ať se atom vydá kamkoli, vždy proti němu bude svítit laser se správně posunutou frekvencí. Mnohonásobným opakováním lze shluk atomů ochladit na nanokelvinové teploty.

Tato metoda umožnila ochlazovat elektricky nabitě atomy nebo molekuly na teplotu blízkou absolutní nule. Ochlazené ionty zachycené ve vhodné pasti se dají používat k testování základních principů kvantové teorie, na kterých je například založeno kvantové počítání. Winelandova metoda byla poté rozpracována Williamem Phillipsem, Stevenem Chu a Claudem Cohenem-Tannoudji, kterým se podařilo laserově ochladit a poté zachytit v pasti neutrální atomy. Za tyto práce získali Nobelovu cenu v roce 1997. Laserové ochlazování umožnilo Wolfgangu Ketterlemu a Carlu Wiemanovi přípravu bosonového kondenzátu, za kterou získali Nobelovu cenu v roce 2001. Winelandovo laserové ochlazování také umožnilo konstrukci laserem chlazených atomových hodin, které jsou dnes standardem při měření času. Winelandova skupina demonstrovala i hodiny tvořené jediným atomem rtuti (nejpřesnější „hodiny“ na světě) a hodiny využívající iont hliníku. Winelandova skupina prováděla také průkopnické práce, při kterých

vytvořila základní stavební jednotky kvantového počítače a předvedla paralelní přenos informace za pomoci laserem ochlazených iontů zachycených v iontové pasti.

## 2013 – Higgsova částice

Nobelova cena za fyziku pro rok 2013 byla udělena Françoisi Englertovi a Peteru Higgsovi za teoretické vysvětlení mechanismu, který přispěl k našemu pochopení původu hmotnosti subatomárních částic a který byl v roce 2012 potvrzen objevem jimi předpovězené částice na detektorech ATLAS a CMS při experimentech v evropském středisku jaderného výzkumu CERN.

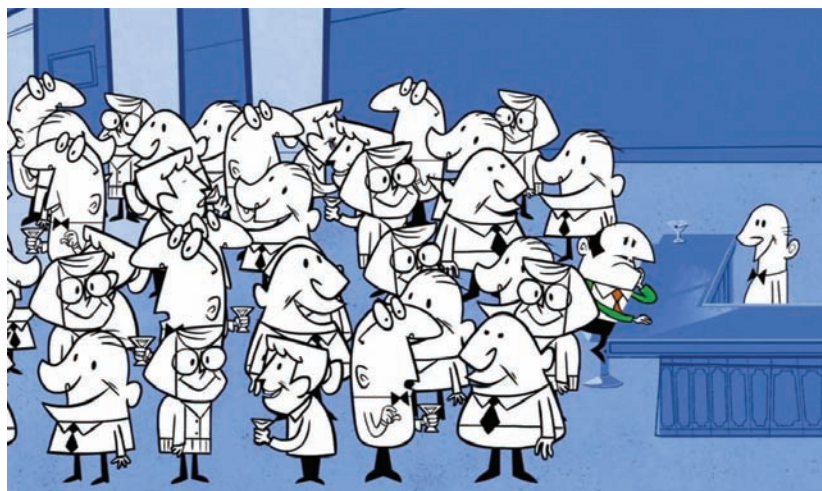
Ještě na počátku 19. století se zdálo, že elektrické a magnetické děje mají naprosto rozdílnou povahu. K pochopení společné povahy obou jevů byly důležité experimenty André Ampéra, Michaela Faradaye. Ampér zjistil, že kolem vodiče protékaného elektrickým proudem vzniká magnetické pole. Zcela klíčovým byl objev elektromagnetické indukce v roce 1831. Faraday ukázal, že proměnné magnetické pole způsobuje vznik elektrického pole. Na základě těchto a dalších experimentů vytvořil James Clerk Maxwell jednotnou teorii elektromagnetického pole, kterou pod názvem *A Treatise on Electricity and Magnetism* publikoval v roce 1873. Bylo zřejmé, že proměnné elektrické pole dává vzniknout magnetickému poli a naopak. Pole, které se z hlediska jedné souřadnicové soustavy jeví jako magnetické, se může z hlediska jiné soustavy jevit jako elektrické. První velké sjednocení dvou sil bylo na světě. Dnes hovoříme o elektrických a magnetických dějích společně jako o elektromagnetické interakci.

V letech 1946 až 1949 byla dokončena první kvantově polní teorie – kvantová teorie elektromagnetického pole, které dnes říkáme kvantová elektrodynamika. Za její formulaci získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1965 Richard Feynman, Shin-Itiro Tomonaga a Julian



*Peter Higgs (\*1929) je skotský teoretický fyzik a matematik, který na počátku 60. let 20. století navrhl mechanismus spontánního narušení elektroslabé symetrie za pomoci pole, kterému dnes říkáme Higgsovo pole.*

*Higgsovo pole ztvárněné v příběhu o výběřím dani.  
Zdroj: Ted Ed Lessons.*





François Englert (\*1932) je belgický teoretický fyzik. V roce 1955 dokončil studia na Svobodné univerzitě v Bruselu (ULB) a stal se elektroinženýrem. V roce 1959 získal na této univerzitě PhD z fyziky. Poté pracoval tři roky na Cornellově univerzitě a nakonec se vrátil na ULB. V roce 1984 přesídlil na Univerzitu v Tel Avivu a od roku 2011 spolupracuje s Chapmanovou univerzitou v Kalifornii.

Nadzemní část detektoru ATLAS. Na budově je namalována zmenšená verze detektoru ATLAS.



Schwinger. Kvantová elektrodynamika je kvantovou analogií Maxwellových rovnic. Elektromagnetická interakce je způsobena polními částicemi, v tomto případě fotony, které si mezi sebou posílají nabitě částice. Klasický pojem síly ztrácí svůj smysl. Feynmanovi se podařilo složité rovnice interpretovat za pomoci názorných grafů, kterým dnes říkáme *Feynmanovy diagramy*. Na obdobném základě byla později vytvořena i současná kvantová teorie slabé a silné interakce.

Od počátku 60. let probíhaly snahy o spojení elektromagnetické a slabé interakce. Při prvních pokusech o vybudování teorie elektroslabé interakce vyvstal zásadní problém. V teorii správně figurovaly čtyři polní částice, ale všechny měly nulovou hmotnost. Z vlastností slabé interakce, zejména z jejího konečného dosahu, bylo zřejmé, že polní částice slabé interakce musí mít nenulovou hmotnost. Návrh teoretického řešení vzniknul nezávisle na třech místech. V roce 1964 publikoval svou práci skotský teoretik Peter Higgs. Obdobný mechanismus navrhli ve stejné době belgičtí teoretici François Englert a Robert Brout, který zemřel v roce 2011, a proto Nobelovu cenu získat nemohl. Obdobné závěry publikovala také skupina z anglické Cambridge (Gerald Guralnik, Carl Hagen a Tom Kibble). Mechanismus předpokládá zavedení nového pole, které vyplňuje celý prostor a uděluje některým částicím hmotnost. Toto pole bylo později nazváno Higgsovo pole a jeho částice Higgsovou částicí.

Jak Higgsův mechanismus funguje? Britský ministr pro vědu vyzval v roce 1993 vědce, aby vymysleli nějakou jednoduše pochopitelnou interpretaci Higgsova mechanismu, který dokáže různým částicím udělit jejich hmotnost. Vítězi slíbil láhev šampaňského. Nakonec zvítězil tento příběh: Představte si rozsáhlý sál, kde je na večírku velké množství vědců. Tito vědci představují Higgsovo pole. Nyní vejde výběřčí daní a chce projít sálem k barovému pultu. Celkem bez odporu projde, nikdo se s ním bavit nebude. Výběřčí daní představuje částici, která s Higgsovým polem neinteraguje a ponechá si nulovou hmotnost. Takovou částicí je například foton. Poté do sálu vejde někdo významný, například sám Peter Higgs. Každý z vědců mu chce sdělit novinky ze své laboratoře, každý touží si s ním potrást pravicí a prohodit alespoň pár slov. Než se Higgs prodere k baru, aby si objednal pivo, uplyne celá věčnost. Taková významná persóna představuje částici, která intenzivně interaguje s Higgsovým polem a získá nenulovou klidovou hmotnost, a proto se pohybuje pomaleji. Nakonec vejde posel



zajímavých zpráv. Novinku sdělí nejbližším stojícím hned u vchodu a poté odejde. Novinka se šíří davem, tu a tam se vytvoří hlouček, který o zprávě diskutuje a poté ji sdělí dalším účastníkům večírku. Takové vynořující se hloučky představují Higgsovu částici, která se občas vynoří z Higgsova pole.

Higgsova částice byla poslední neobjevenou částicí tzv. standardního modelu elementárních částic. Polapena byla na detektorech ATLAS a CMS v roce 2012 ve středisku jaderného výzkumu CERN. Její hmotnost je 125 GeV a má nulový spin. V roce 2013 bylo zjištěno, že má kladnou paritu. Jde o nejdéle hledanou elementární částici. Od návrhu její existence až po objev uplynulo 48 let. Standardní model se stal nejúspěšnějším popisem světa elementárních částic.

■ Petr Kulhánek, 2010 až 2013



Segment detektoru CMS před spuštěním do podzemí (2007). Před segmentem je jeden z členů Aldebaranu David Břeň, který pro ukázkou velikosti detektoru drží jako měřítko zapalovač.







# VI. NOVÉ TECHNOLOGIE



# Akustická levitace

## vrací úder

**Elektroakustický měnič** – zařízení, které mění elektrický signál na zvuk (akustický signál). Elektrický signál v zařízení vybudí mechanické chvění, které se šíří vzduchem a je schopné vybudit sluchový vjem.

**Fotoelektrický jev** – vyrazení elektronů z povrchu některých látek (zejména kovů) světlem. Při tomto jevu se projevují částicové vlastnosti světla, jednotlivý foton musí mít energii vyšší než je výstupní práce nutná k vytržení elektronu z atomu. Jevo poprvé objevil Heinrich Hertz v roce 1887 a vysvětlil Albert Einstein v roce 1905.

*Historie levitace na principu Archimédova zákona. Exploze německé vzducholodi Hindenburg při přistání na letišti Lakehurst v New Jersey dne 6. května 1937. Při katastrofě zahynulo 35 osob. Zdroj: Wikipedia.*



Lidé jsou od pradávna fascinováni gravitací. Gravitace je síla, která údajně přiměla Galilea Galileiho házet předměty z šikmé věže v Pise nebo nechala spadnout jablko ze stromu, které podle pověsti inspirovalo Isaaca Newtona při zformulování gravitačního zákona. Gravitace donutila mnoho lidí přemýšlet, jak nad touto silou zvítězit. Nakonec přišla doba, kdy několik jedinců mohlo opustit Zemi, ba dokonce okusit gravitaci jiného srovnatelně velkého vesmírného tělesa. Proces překonávání této síly nazýváme levitace. Je to snaha dostat objekt do stavu, ve kterém zdánlivě nepodléhá zemské gravitaci. Objekt se umístí do stabilní polohy, není podpírán žádnou mechanickou konstrukcí, a přesto se nedotýká země. Levitace představuje boj člověka s gravitací, která je pro něj všudypřítomná, a pouze malý zlomek lidstva zažil stav bez ní. Z toho vyplývá důvod, proč je lidstvo levitací fascinováno ještě více než samotnou gravitací.

## Levitace

Existuje velmi mnoho metod, jak donutit nějaký objekt levitovat. Podle principu se dají rozdělit do několika kategorií:

**Levitaci na principu Archimédova zákona** asi není potřeba uvádět, avšak i tato může vypadat velice působivě. Někdo by však mohl namítat, že je lepší ponechat si helium na chlazení urychlovačů, že vodík je příliš nebezpečný a že horký vzduch už nikoho nepřekvapí.

**Aerodynamická levitace** využívá sílu vzduchu proudícího kolem levitovaného objektu. Tok vzduchu musí být namířen vertikálně proti gravitaci. Tento způsob levitace je asi nejjednodušší, což dokazuje i skutečnost, že můžeme nechat levitovat věci vlastním dechem. Aerodynamická levitace je také nejlevnější metoda, jakou můžeme způsobit levitaci člověka. Ten však výrazně pocítí sílu turbovětráku, který ho bude nadnášet, jinak by musel sedět v letadle typu Harrier, tedy letadle se schopností kolmého startu, a startovat například z letadlové lodě. Do této skupiny levitací patří také levitace na principu vzduchového polštáře.

**Lokálně inerciální soustava.** Další možností, jak ošálit gravitaci, je přesun člověka do lokálně inerciální vztažné soustavy, která bude

v gravitaci volně padat – například do prudce klesajícího letadla. Do stejné kategorie patří i pobyt člověka na Mezinárodní kosmické stanici, tam však není od stavu beztlíže úniku.

Následující tři typy levitace mají společné to, že pracují na bázi elektromagnetické interakce. První typ využívá **elektrostatické pole**, z čehož vyplývá, že levitovaný objekt musí být nabitý. Čím větší má objekt hmotnost, tím větší silou na něj musíme proti gravitaci působit, a tím větší musí být náboj tělesa a intenzita použitého pole. Elektrostatický levitátor navíc vyžaduje vysoké vakuum. Náboj levitovaného objektu totiž musí být izolován od neutrálního plynu a navíc musí být obnovován, což lze zajistit například pomocí fotoelektrického jevu. Na preparát míří ultrafialový laser o vyšší než prahové frekvenci a vytrhává z něj elektrony. První zařízení tohoto druhu bylo zkonstruováno v roce 1993 v NASA. Bylo navrženo pro levitování 1 až 3 mm velkého objektu s nominálním nábojem řádově desítky nanocoulombů. Zařízení vytvářelo potenciál pro levitaci  $-5,64$  kV. V tomto experimentu muselo být těleso nejen malé, ale také mít schopnost nabíjet se fotoelektrickým jevem.

Nejrozšířenější způsob, jak se vznášet, je však **levitace na principu magnetického pole**. Není divu, magnetické pole se dá velmi snadno generovat a řídit pomocí elektromagnetu – cívky s paramagnetickým jádrem. Tato technologie často využívá i permanentních magnetů, diamagnetických látek nebo supravodičů, které se chovají jako dokonalé diamagnetikum. O rozšířenosti levitace na tomto principu svědčí i komerčně používané vlaky typu maglev, například v Japonsku. Tak těžký objekt, jako je vlak, vyžaduje velmi silné magnety a zde přichází na scénu supravodič. Supravodivé elektromagnety dokážou vyvinout magnetické pole o velikosti desítek tesla a jsou



**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 a dlouhá řada dalších.

SC Maglev na testovací dráze v roce 2005 v Japonsku.  
Zdroj: Wikipedia/Yosemite.



**Poyntingův vektor** – vektor, který míří ve směru přenášené elektromagnetické energie a jeho velikost je rovna toku energie. Jednotkou je watt na metr čtvereční. Poyntingův vektor míří v homogenním izotropním prostředí ve směru vlnového vektoru (ve směru šíření vlnoploch). V anizotropním prostředí se energie může šířit v jiném směru než elektromagnetické vlnění. Vektor zavedl anglický fyzik John Henry Poynting (1852–1914) v roce 1884.

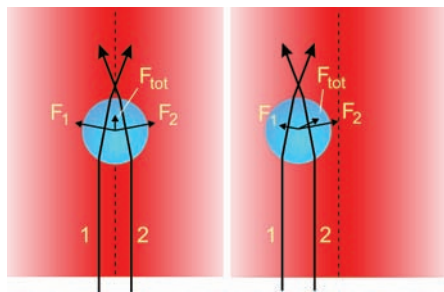
použity například ve vlaku Šinkansen L0 nebo SC Maglev (*Superconducting Maglev*).

Magnetická levitace vyžaduje, aby levitovaný objekt buď obsahoval zdroj magnetického pole, nebo byl diamagnetický. Právě levitace diamagnetických těles je zajímavým případem. Diamagnetikum ze svého objemu vytěšňuje externí magnetické pole, což umožňuje tělesu nad permanentním magnetem levitovat. Podobně se chová i supravodič v magnetickém poli, v tomto případě hovoříme o tzv. *Meissnerově jevu*. Ten objevil německý fyzik Walther Meissner (1882–1974) v roce 1933. První patent na magnetickou levitaci (číslo US1020943A) byl publikován panem Emilem Bacheletem v roce 1912. Důležitým omezením pro levitaci je *Earnshawův teorém*, podle kterého nelze dosáhnout trvalé levitace s použitím jakékoli kombinace statických nábojů a permanentních magnetů. Magnetická pole musí být časově proměnná. Tento teorém publikoval britský matematik Samuel Earnshaw už v roce 1842.

Posledním druhem levitace z elektromagnetické rodiny je **levitace optická**. Ta pracuje na principu předání hybnosti fotonů levitovanému objektu, který ovšem musí být mikroskopický. Optická levitace je předurčena pro levitování mikroorganismů, buněk, molekul a atomů. Levitaci objektů na světelném principu lze popsat pomocí geometrické optiky za pomoci lomu světla na levitované průhledné sférické části – ta je vždy přitahována do místa s větší intenzitou světla.

Takto geometricky lze jev vysvětlit pouze tehdy, pokud je největší rozměr částice podstatně větší než vlnová délka světla. Přitahování částic menších, než je vlnová délka, do oblasti s vyšší intenzitou světla, lze odvodit z Lorentzovy pohybové rovnice. Zjednodušeně lze předpokládat, že levitovaná částice je elektrický dipól se zanedbatelnou vzdáleností obou nábojů a že levitační laser nemění svou intenzitu, tudíž se Poyntingův vektor  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  v čase nemění. Potom můžeme tvrdit, že na dipól bude působit síla  $F \sim \text{grad}(E^2) \sim \text{grad}(I)$ , kde  $E$  je velikost intenzity elektrického pole a  $I$  je intenzita záření. Stačí tedy mít laser s Gaussovým průběhem intenzity záření na průřezu paprskem a částice bude přitahována silou do středu tohoto paprsku. Levitovaný objekt musí být nejen malý, ale také dielektrický. Dále je možné svazek zaostřit do nějakého bodu a částice bude přitahována k tomuto ohnisku. Vývoj optické levitace vedl až k vynálezu optické pinzety (1986), která se používá hlavně v biologii. První vědci, kteří začali experimentovat

Samofokuse při optické levitaci. Je-li sféra mimo osu (napravo), dopadá zprava větší množství fotonů a lámou se na ní. Fotony z paprsku 2 předají sféře více hybnosti než fotony z paprsku 1. Výsledná síla odtáhne sféru do středu svazku. Zdroj: Wikimedia/Roland Koebler.

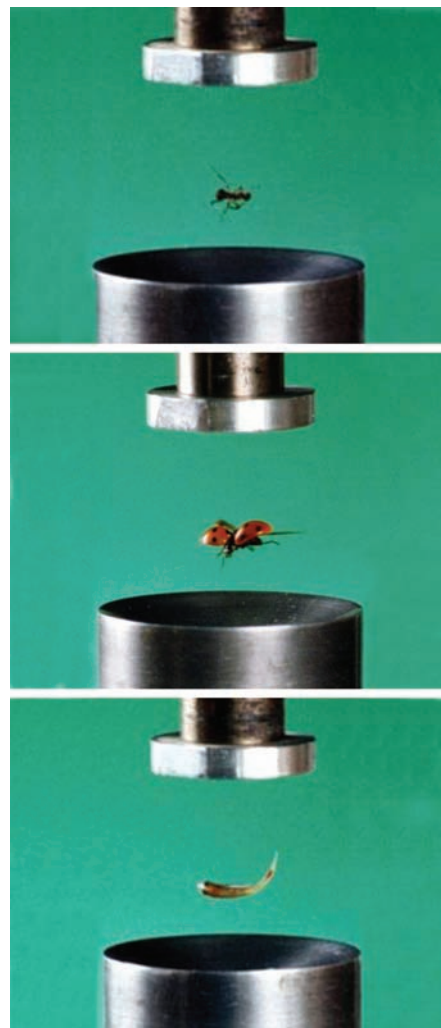


s optickou levitací a nejvíce přispěli k jejímu vývoji začátkem sedmdesátých let dvacátého století, byli Arthur Ashkin (\*1922) z Bellových laboratoří a na sovětské straně Vladilen Stepanovič Letochov (1946 až 2009) z Ústavu spektroskopie Ruské akademie věd.

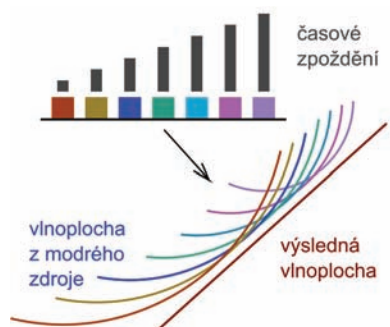
Na závěr tohoto stručného souhrnu patří představení **akustické levitace**, již je tento text věnován. Akustická levitace pracuje na principu mechanického vlnění média, ve kterém se zvuk šíří. Toto vlnění je podélné a vytváří akustický tlak, jehož silové účinky mohou působit proti gravitaci a nadnášet levitovaný objekt. Každá uvedená metoda levitace má svá pro a proti. Akustická levitace nebude fungovat ve vakuu, avšak neklade významné nároky na vlastnosti levitovaného objektu. Největšími omezeními, kromě velikosti objektu, je podmínka, aby jeho hustota byla větší než hustota okolního média a v případě kapalin je zde omezení na jejich povrchové napětí. Při malém povrchovém napětí může dojít k rozprsknutí levitované kapky.

Pokud pomíneme Tibeťany a další pradávňé stavitele, kteří údajně dokázali akusticky levitovat těžké stavební kameny pomocí bubnů a dalších nástrojů, začíná historie akustické levitace kolem roku 1902, kdy lord Rayleigh sepsal pojednání O tlaku vibrací (*On The Pressure of Vibrations*). První člověk, který začal teoreticky zkoumat vliv akustického tlaku na překážky jednoduchých geometrických tvarů, hlavně nestlačitelné sféry ve stlačitelném médiu, byl Louis V. King v roce 1934. Navrhl matematické vysvětlení shlukujících se prachových částic v rezonanční trubici (Kundtově trubici) – jevu, který byl poprvé pozorován už v roce 1866 a je za něj zodpovědné stojaté vlnění uvnitř trubice. První experiment s akustickou levitací byl však uskutečněn o rok dříve (1933). Karl Bücks a Hans Müller postavili zařízení, ve kterém levitovali malý objekt pomocí stojatého vlnění. Rozšíření Kingovy práce, týkající se zobecnění na stlačitelnou sféru, publikovali v roce 1955 K. Yosioka a Y. Kawasima. Shrnutí předchozích výsledků a matematický popis levitace částic menších, než je vlnová délka vlnění v ideální tekutině, vypracoval v roce 1962 Lev Petrovič Gorkov. Jeho výsledky a výsledky Wesley L. Nyborga z roku 1967 představují základ pro dnešní akustickou levitaci.

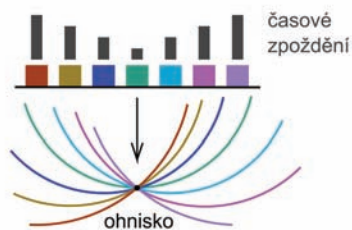
Na těchto teoretických základech se podařilo levitovat nejrůznější objekty a tekutiny. Akustická levitace byla použita v zrcadlových pecích pro tažení monokrystalů a pro polohování tavených materiálů. Používá se pro výzkum dynamiky tekutin, v materiálovém inženýrství,



Ukázka akustické levitace malých živých tvorů (mravence, sluněčka a rybky). Zdroj: Honalu.



Fázové pole. Obrázek ukazuje skládání jednotlivých vlnoploch zdrojů ve fázovém poli do jedné vlnoplochy (nalevo) a fokusaci fázového pole do jednoho bodu (na-pravo). Obou stavů bylo dosaženo nastavením správné doby zpoždění před vysláním zvukové vlny z jednotlivých zdrojů. Kresba autor.



v mikrogravitaci a při výzkumu vzniku oblaků, sněžení a dalších atmosférických jevů. Podařilo se levitovat i materiál o velké hustotě – například wolfram. V roce 2006 dokonce čínští vědci nechali akusticky levitovat i menší živá zvířata jako hmyz a malé rybky.

Podle způsobu využití akustického tlaku lze rozlišit dva typy akustické levitace: levitaci na

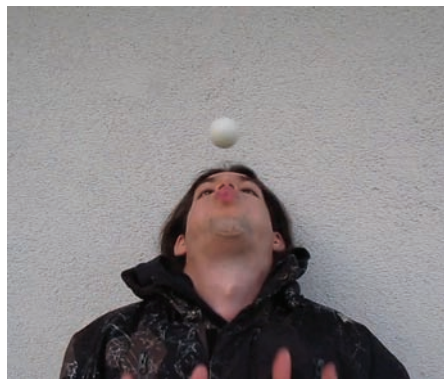
principu stojatého vlnění a levitaci na principu stlačené vrstvy. Druhý způsob umožňuje levitaci plochých objektů v malé výšce nad zdrojem zvuku. Tato výška bývá výrazně menší, než je vlnová délka, a tak zde nemůže vzniknout stojaté vlnění. Tenká vrstva vzduchu mezi zdrojem zvuku a plochým levitovaným předmětem se akusticky stlačuje a uvolňuje a vytváří tlak nadnášející levitovaný předmět. Tento způsob, který připomíná levitaci na principu vzduchového polštáře, byl poprvé experimentálně ověřen v roce 1964 a dnes se používá při vývoji speciálních ložisek s minimálním třením.

U akustické levitace se nejčastěji využívá vlastností stojatého vlnění. U stojatého vlnění je maximum pohybu akustického média lokalizováno v kmitnách a minimum v uzlech. Proto se levitovaná částice nemůže stabilně vyskytovat jinde než v uzlu. Ten si můžeme představit jako klidný ostrůvek mezi rozbouřenými vlnami. V jednom rozměru je snadné si tuto situaci představit jako rozkmitanou strunu a ve dvou rozměrech jako stojaté vlnění na vodě, například na povrchu hladiny vody v sudu. Ve třech dimenzích je představa těžší. Obtížnější je i realizace – vyžaduje tvarování a fokusování akustické vlny, například pomocí fázového pole.

## Ultrazvukové fázové pole

Princip funkce ultrazvukového fázového pole spočívá v uspořádání jednotlivých zdrojů zvuku do dvourozměrné plochy. Všechny elektroakustické měniče jsou namířeny ve stejném směru a tvoří pole o velikosti  $N \times N$  měničů. Toto zařízení se nejčastěji používá na diagnostiku v medicíně a na nedestruktivní testování součástek v průmyslu. Každý elektroakustický měnič má vlastní elektroniku a jeho amplituda a fáze

Autor článku předvádí v praxi, co je to levitace.



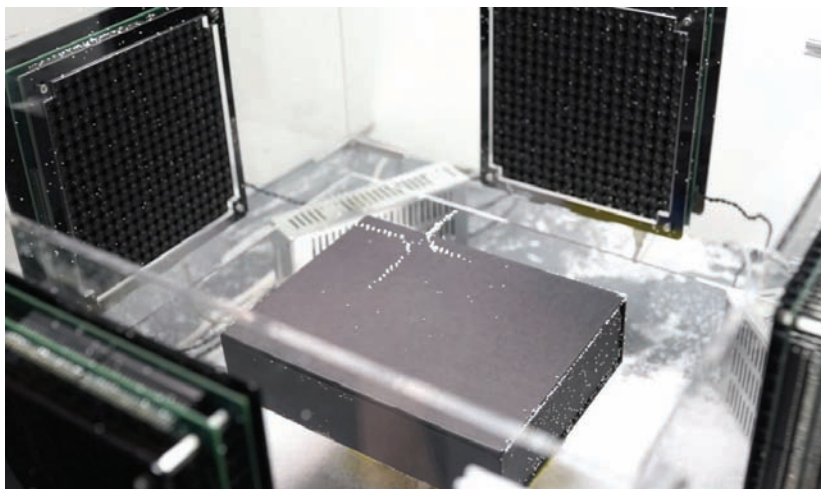
je nezávisle řízena počítačem. Jednotlivé měniče generují kulovou vlnoplochu, avšak celé pole může generovanou vlnoplochu tvarovat a zaostřovat do daného bodu.

Stojaté vlnění lze vytvořit pomocí akustického reflektoru vlnění ve vzdálenosti násobků poloviny vlnové délky od zdroje nebo umístěním dvou zdrojů vlnění o stejné frekvenci proti sobě v obdobné vzdálenosti. Generované vlny jdoucí proti sobě se spolu složí takovým způsobem, že vzniknou již zmíněné oblasti s nulovým vychýlením (uzly) a oblasti s maximálním vychýlením (kmitny) akustického média. Uzly se ve směru akustické osy vyskytují ekvidistantně ve vzdálenosti poloviny vlnové délky, což jednoznačně definuje velikost levitovaného objektu, který by měl být menší, než je tato vzdálenost.

### Akustická levitace ve 3D

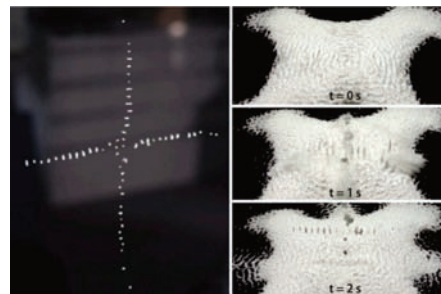
Japonští vědci z Tokijské univerzity sestavili zařízení umožňující akustickou levitaci drobných předmětů ve třech dimenzích. Dokáže zvednout předměty a manipulovat s nimi do stran. Zařízení využívá kompozice čtyř ultrazvukových fázových polí umístěných ve stěnách kvádrů o čtvercové podstavě a namířených proti sobě dovnitř kvádrů.

Vnitřek kvádrů představuje pracovní prostor akustického manipulátoru. Zařízení používá elektroakustické měniče na principu piezoeffektu navržené francouzským fyzikem Paulem Langevinem (1872–1946). Protilehlé zdroje zvuku vytvářejí stojaté vlnění, takže není potřeba odrazové plochy. Velikost jednoho fázového pole je  $170 \times 170$  mm a skládá se z 285 elektroakustických měničů. Měniče jsou řízené počítačem tak, aby výsledná zvuková vlna byla zaostřena do jednoho bodu. Tohoto zaostření je docíleno správným časováním fází jednotlivých zdrojů zvuku. Aby celé zařízení fungovalo správně, nestačí synchronizovat jediné pole, ale všechna čtyři pole najednou, tedy více než 1 000 elektroakustických měničů. Generovaný zvuk má frekvenci 40 kHz a při

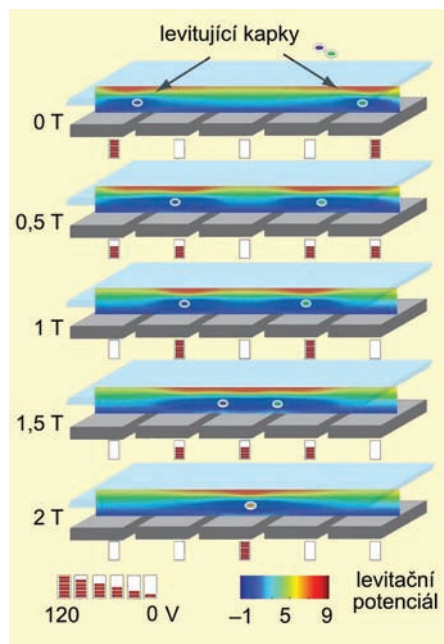


Rozmístění čtyř ultrazvukových fázových polí v experimentu pro 3D akustickou levitaci. Patrné jsou vznášející se polystyrénové kuličky. Zdroj: GPB News.

Na obrázku jsou vidět vznášející se zrnka pěnového polystyrenu. Uprostřed kříže je hlavní ohnisko levitace, vedlejší ohniska se vyskytují na obou akustických osách (obrázek nalevo). Obrázek napravo znázorňuje zvednutí polystyrénových kuliček jako sekvenci snímků v čase. Zdroj: ArXiv/Očiai, Hoši a Rekimoto.

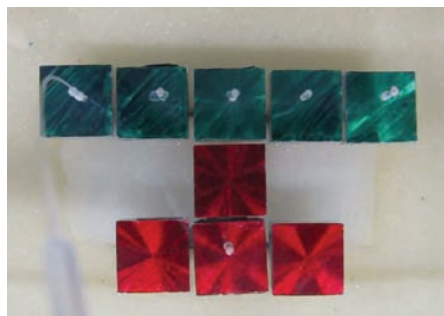






Přesun levitujících kapek mezi jednotlivými akustickými měniči. Zdroj: Daniele Foresti.

Demonstrace použití planárního akustického levitátoru z horního schématu. Zdroj: PNAS.



rychlosti zvuku 340 m/s je jeho vlnová délka přibližně 8 mm. Vzdálenost mezi uzly stojatého vlnění dosahuje asi 4 mm. Efektivní akustický tlak jednoho fázového pole v ohnisku při ohniskové vzdálenosti 200 mm je přibližně 2 600 Pa. Obnovovací frekvence levitátoru je 1 kHz a prostorové rozlišení 0,5 mm.

Matematický popis rozložení akustického potenciálu stojatého vlnění, který používají vědci z Japonska, vychází z prací Gorkova a Nybarga. Popisuje hustotu potenciální energie vlnění ve třech rozměrech a umožňuje modelovat funkci zmíněného levitátoru.

Minima potenciální energie (uzly) jsou rozmístěna ve vzdálenosti  $\lambda/2$ . Výpočet byl proveden pro kuličku pěnového polystyrenu ve vzduchu. Japonským vědcům podařilo levitovat vodu, kousky dřeva, plasty, polystyren a dokonce i elektronické součástky pro osazování plošných spojů.

Během experimentu vědci zkusili pohybovat levitovanými objekty po kruhových drahách kolem všech tří os, nejstabilnější byl pohyb kolem vertikální osy. V dalším kroku chtějí japonští vědci snížit frekvenci zvuku na 25 kHz, čímž dojde k prodloužení vlnové délky a zvětšení klidové oblasti v uzlu, což umožní levitaci dvojnásobně větších objektů.

## Aplikace akustické levitace

S další zajímavou aplikací přišli vědci z univerzity ETH v Curychu ve Švýcarsku, kteří používají ultrazvukovou akustickou levitaci pro míchání tekutin a dalších substancí a jejich bezkontaktní transport. Bezkontaktní manipulace se zkoumaným materiálem je zcela zásadní při používání reaktivních a korozivních látek, žiravin a kyselin. Tyto látky totiž vyžadují speciální kontejnery a navíc se předejde kontaminaci těchto zkoumaných látek s materiálem samotného kontejneru.

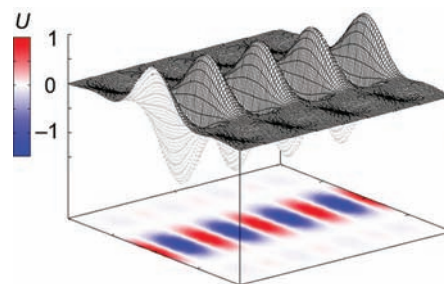
Zařízení má v tomto případě planární strukturu a dokáže pohybovat předměty pouze ve dvou dimenzích. Funguje opět na principu stojatého vlnění. Elektroakustické měniče jsou umístěny v ploše vedle sebe a namířeny vzhůru proti akustickému reflektoru. Opět byly vybrány Langevinovy elektroakustické měniče a reflektor je umístěn ve vzdálenosti  $0,496 \lambda$ . Každý z měničů o velikosti  $15 \times 15$  mm představuje jakousi zastávku pro levitovaný objekt. Přesun levitované substance mezi dvěma zastávkami je založen na přesunu lokálního minima potenciální energie změnou amplitudy jednotlivých měničů. Měniče pra-

cují na frekvenci 24,3 kHz, což odpovídá vlnové délce  $\lambda = 14,2$  mm při rychlosti zvuku přibližně 345 m/s. Zařízení vyvinuté v ETH podporuje míchání tekutin v několika krocích. Lze realizovat složité výroby chemických sloučenin, do nichž vstupují neaktivní látky, které se v počátečním kroku aktivují, v dalším použijí a v konečném kroku přijde na řadu jejich stabilizace a neutralizace. To vše bezkontaktně v jednom přístroji. Jednotlivé substance jsou do zařízení vstříkovány pipetami o průměru 1,2 mm. Toto planární zařízení se dá přestavět do polohy, kdy zvládne levitovat i větší objekty, než je vlnová délka generovaného zvuku, například párátka.

### Závěr

Akustická levitace je poměrně stará technologie, která se však pořád rozvíjí. Díky neustálému vývoji elektronických součástí dosahuje zajímavých výsledků, jako je například akustická levitace ve třech rozměrech. Akustická levitace tvoří pouze jednu z mnoha metod, jak docílit požadovaného efektu. Magnetické levitaci zřejmě nebude nikdy konkurovat na poli výkonu, avšak oproti ní nezávisí na povaze materiálu levitovaného objektu, který nemusí být feromagnetický, diamagnetický, dielektrický atd. Lze pomocí ní levitovat téměř cokoli, a tím pádem zkoumat chování rozmanitých materiálů bez fyzického kontaktu. Její význam v chemii a biologii demonstrováný na výsledcích vědců z ETH je evidentní. Nasazení 3D levitace při výrobě a osazování desek plošných spojů také nezní nereálně, a tak můžeme očekávat další zajímavé aplikace.

■ Ondřej Penc, 14. 2. 2014, AB 7/2014



Graf zobrazující rozmístění minim a maxim potenciální energie. Minima potenciálu jsou rozmístěna ve vzdálenosti  $0,5 \lambda$ . Zdroj: ArXiv/Očiai, Hoši a Rekimoto.

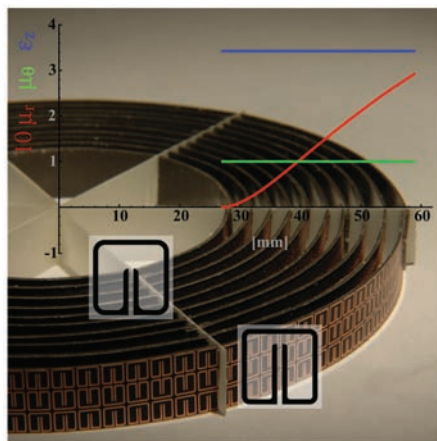
## Aplikace metamateriálů v transformační optice

**Metamateriál** – umělá struktura, která vykazuje elektrické a magnetické vlastnosti (permitivitu, permeabilitu) nevyskytující se v přírodě.

**Veselagova čočka** – planoparalelní destička se záporným indexem lomu, zobrazuje bod na bod. Teoreticky se jako první zabýval hypotetickým prostředím se záporným indexem lomu Victor Veselago v roce 1968.

**Permeabilita** – lineární koeficient úměrnosti mezi magnetickou indukcí a intenzitou. V izotropním a homogenním materiálu jde o jediné číslo, v komplikovanějších materiálech o tenzor (matici) koeficientů.

Struktura prvního vyvinutého maskovacího zařízení. Metamateriál je tvořen kruhovými štěrbinovými rezonátory, jejichž zjednodušené schéma je v bílých čtverečcích. Barevné křivky znázorňují závislost permitivity a permeability na vzdálenosti od středu.



V 21. století jsou zákony optiky běžně známe většině uživatelů fotoaparátů a dalekohledů. Klasická optika popisuje šíření viditelné části elektromagnetického vlnění v prostředí a jeho interakci s hmotou, tedy například vliv spojné a rozptylné čočky, zrcadel apod. Transformační optika je nově odvětví, které chování elektromagnetických vln matematicky modeluje v neeuklidovském (zakřiveném) prostoru a zabývá se návrhem a vývojem optických soustav, které mohou zakřivené trajektorie využít. Takové soustavy lze konstruovat pouze z materiálů, které mají jedinečné elektromagnetické vlastnosti, jako je záporná permeabilita, záporná permitivita a záporný index lomu. S pomocí technologií známých od roku 1999 lze navrhnout a vyrobít tzv. metamateriály, které takové chování vykazují v určité frekvenční oblasti.

Metamateriálů lze využít ke konstrukci velmi pokročilých mikroskopů, které mohou nabídnout mnohem větší rozlišení než mikroskopy elektronové právě díky fokusaci a deformaci svazku do cíleného místa. Z téhož může těžit fotovoltaika, která při dobré fokusaci umožní velmi efektivní konverzi světla na elektrickou energii.

### Neviditelnost na obzoru?

Jednou z velmi zajímavých aplikací metamateriálů je maskování předmětů před detekcí elektromagnetickými vlnami (například světlem). Ač se to může zdát jako science-fiction, principiálně musíme pouze dosáhnout toho, aby se světlo plně neodráželo od povrchu objektů, které chceme skrýt. Za posledních 5 let bylo již několikrát demonstrováno, že takové zařízení je teoreticky možné navrhnout a fyzicky za určitých podmínek zkonstruovat.

Maskování je realizováno použitím metamateriálových struktur, které jsou menší než vlnová délka světla v dané frekvenční oblasti. Vhodnou konstrukcí lze dosáhnout, aby maskovaný objekt ohýbal kolem sebe paprsky světla podobně, jako voda obtéká kámen v řece. To znamená, že každý foton by místo interakce s objektem měl překážku obletět a pokračovat dál v cestě, jakoby mu žádný předmět neprekážel. Maskování se tak projeví jako značná redukce v odrazivosti předmětu a v potlačení vrhaného stínu.

První návrh maskovacího zařízení byl předveden v říjnu 2006 na Dukeově univerzitě (v *Pratt School of Engineering*). Speciálně navržený objekt o poloměru 60 mm dokázal značně zredukovat odraz a stín při interakci s elektromagnetickými vlnami v infračerveném oboru. Nejednalo se o zařízení, jehož účelem by bylo maskovat jiný objekt, ale o speciálně navrženou strukturu, která okolo sebe ohýbá elektromagnetické vlny určité frekvence.

V současné době se vědci pokoušejí rozšířit frekvenční spektrum maskovacích systémů a dále zjednodušit metamateriálovou konstrukci. Jelena Semučkinová a její tým z Michiganské technické univerzity MTU a Pensylvánské státní univerzity navrhli v listopadu 2009 cylindrické maskování, které dokáže ukrýt předmět s průměrem 15  $\mu\text{m}$  před detekcí na infračervených vlnových délkách. Maskovací systém se chová jako metamateriál díky vhodné prostorové konfiguraci identických rezonátorů vyrobených z chalkogenidového skla Ge-Sb-Se a křemíku. Pokud jsou rezonátory soustředně uspořádány v okolí objektu, vytvářejí radiální magnetické pole, které rezonuje a odklání světlo přicházející z různých směrů. Objekt je v simulacích nahrazen lineárním útvarom nekonečné délky, maskovací metamateriálová struktura je rozprostřena v kolmé rovině.

Tento systém vyniká nad návrhy z předchozích let především spolehlivostí, protože v počítačové simulaci byly detailně zkoumány i vzájemné interakce jednotlivých rezonátorů. Výsledky ukázaly, že optimální tvar rezonátoru je válcový a maskovací systém lze nastavit na poměrně velkou škálu infračervených frekvencí manipulací vzdálenosti mezi jednotlivými rezonátory. Vědci zároveň demonstrovali, že takto jemnou strukturu skleněných rezonátorů lze vyrobit pomocí elektronové litografie.

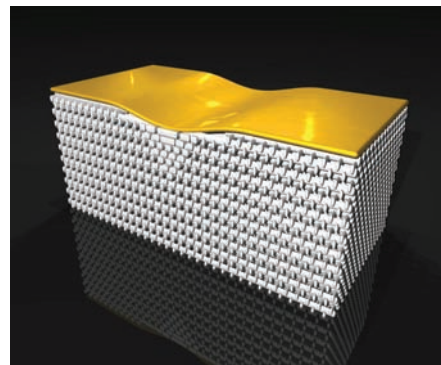
### Trojrozměrná realizace maskování

Většina navržených maskovacích systémů pro mikrovlnné a optické frekvence je pouze dvojrozměrných, detekci odolávají jen v určité rovině. Jinými slovy lze tyto struktury okamžitě odhalit při pohledu z kolmého směru (třetí dimenze). Ovšem tým z Institutu technologií v Karlsruhe předvedl potenciál transformační optiky v experimentu, kde úspěšně zamaskovali uměle vyrobenou deformaci na povrchu zlata. Vědci mezi plíšek o velikosti  $100 \times 30 \mu\text{m}$  a mikroskop umístili maskovací systém z fotonických krystalů, který se pro elektromagnetické

**Permitivita** – lineární koeficient úměrnosti mezi elektrickou indukcí a intenzitou. V izotropním a homogenním materiálu jde o jediné číslo, v komplikovanějších materiálech o tenzor (matici) koeficientů.

**Index lomu** – absolutní index lomu je v homogenním izotropním prostředí bez disperze definován jako podíl rychlosti světla a fázové rychlosti. Obecně je index lomu komplexní veličina závislá na frekvenci, v případě anizotropního prostředí tenzorová. Frekvenční závislost reálné části popisuje disperzi v daném prostředí. Imaginární část indexu lomu popisuje (v závislosti na znaménku) absorpci nebo zesílení světla. Relativní index lomu je dán poměrem indexů lomu prostředí, do kterého záření vstupuje vůči indexu lomu prostředí, z něhož záření vychází. Na rozhraní dvou prostředí je relativní index lomu roven podílu sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu (Snellův zákon). Uvozující přídavné jméno (absolutní nebo relativní) se často vypouští, takže zda se jedná o absolutní či relativní index lomu poznáme pouze z kontextu.

Schéma třírozměrné struktury povrchového maskování prohlubně na povrchu zlata. Fotonické krystaly v maskujícím systému jsou uspořádány do bloku pod vzorkem tak, aby měl materiál co nejizotropnější optické vlastnosti. Zdroj: Science Express.





**Disperze** – závislost rychlosti vlny na vlnové délce. Pokud se vlny různých vlnových délek šíří daným prostředím různě rychle, dochází k postupné změně tvaru vlnového balíku.

**Litografie** – metoda tisku na hladké povrchy a současně metoda úpravy povrchu polovodičů. Speciálním případem je imersní litografie, jejímž základem je odpuzování oleje a vody. Část povrchu média má za pomoci leptání kyselinami implemtován do své struktury olej. Při tisku je povrch pokryt vodou, barva rozpustná v oleji přilne jen k leptaným částem. Obdobnou metodou je elektronová litografie, jejíž podstatou je bodový zápis difrakční mikrostruktury (pomocí skenovacího elektronového paprsku). Záznam se provádí do fotorezistu, kde vzniká po expozici a chemickém odleptání reliéfní profil. Zdroj: Wikipedie.

**MTU** – Michigan Technological University, univerzita původně založená jako báňská škola v roce 1885. Dnes ji navštěvuje téměř 7 000 studentů a jde o americkou veřejnou univerzitu se sídlem v městě Houghton.

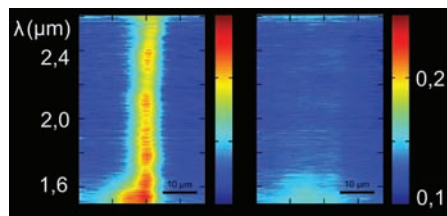
vlny chová jako „koberec“ s nerovnoměrným rozložením indexu lomu a který prohlubeň ve zlatě zakrývá. Požadované prostorové rozdělení indexu lomu lze odvodit ze zákonů transformační optiky. Výsledek experimentu je vidět následujícím obrázkem. Tým nyní pracuje na zvětšené verzi tohoto experimentu.

## Závěr

Současné technologie maskování nejsou prozatím schopné zakrýt skutečný makroskopický objekt. Konstrukčně realizovatelné je plošné maskování velmi malých předmětů (cca 10  $\mu\text{m}$ ) na infračervených vlnových délkách. Musíme ale zdůraznit, že se nejedná tak zcela o neviditelnost jako spíše o „průhlednost“ obdobnou vlastnosti skla v optickém oboru. Ač jsou lidé s výrobou skla obeznámeni přes 5 000 let, podrobným pozorováním přítomnost skla odhalíme jen díky odrazům nebo z přimíšených nečistot. Nedá se předpokládat, že by maskovací systémy byly schopné něčeho efektivnějšího. Maskovací systémy jsou nicméně výbornou ukázkou potenciálu metamateriálů a transformační optiky. Ten se naplno projeví nejspíše v astronomii a mikroskopii díky Veselagově čočce nebo v diagnostických a terapeutických metodách pro biomedicínu.

■ Martin Zeman, 13. 8. 2012, AB 29/20101

Viditelnost prohlubně ve zlatém plišku v závislosti na vlnové délce nepolarizovaného světla použitého k detekci. Na obrázku (A) je prohlubeň nemaskovaná, na obrázku (B) je patrný vliv maskování. Zdroj: Science Express.



## Budou amorfní metamateriály technologickým převratem?

Metamateriály jsou umělé materiály, ve kterých se elektromagnetické vlny šíří jinak než v běžných přírodních látkách. Zatím se metamateriály připravovaly jako umělé periodické struktury složené z mnoha se opakujících prvků, například štěrbínových rezonátorů. V úzkém frekvenčním pásmu má taková struktura obecně komplexní permeabilitu nebo permitivitu, často se zápornou reálnou částí, což může vést na záporný index lomu a velmi atypické šíření elektromagnetické vlny. Příprava takových struktur je mimořádně náročná a drahá a exotické chování nastává jen ve velmi malé oblasti frekvencí. Se snižující se velikostí opakujících se prvků bylo možné tyto atypické vlastnosti pozorovat až v blízkosti optického oboru. V roce 2012 vyvinula skupina odborníků z Oregonské státní univerzity (OSU) převratný způsob přípravy metamateriálů. Jde o střídající se nanovrstvy amorfni kovové slitiny a nevodivého oxidu (skla). Dnes již patentovaná technologie má mnoho předností. Především je příprava vzorku mimořádně levná a lze vyrobit i vzorky větších rozměrů (decimetry). Tloušťka jednotlivých vrstev dosahuje řádově deset nanometrů, a proto vzorky vykazují metamateriálové vlastnosti v optickém oboru. Navíc mají vzorky oblast atypické permitivity a permeability v širokém pásmu vlnových délek, nejen v úzké rezonanční oblasti, jako tomu je u štěrbínových rezonátorů. Množství aplikací levně připravených metamateriálů může být značné.

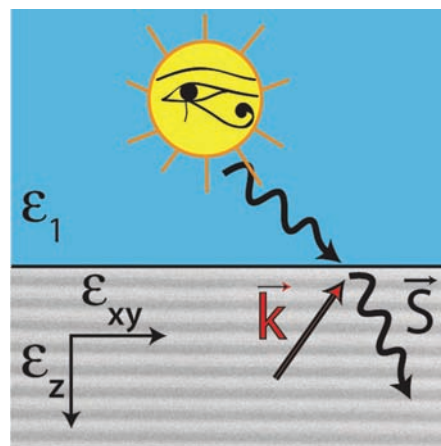
### Příprava nanolaminátu

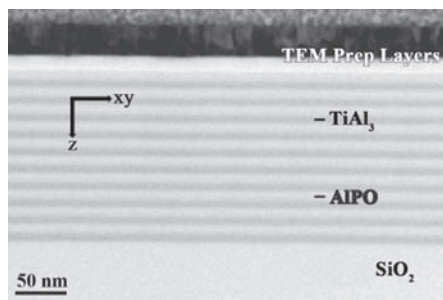
Standardně se tenké vrstvy připravují plazmovým naprašováním. Plazma (zpravidla vytvořené inertním plynem, například argonem) vytrhává atomy z kovového terče, který tvoří katodu. Na anodě je připevněna podkladová vrstva, na kterou se kov pomalu nanáší. Rychlost nanášení je možné řídit tlakem ve výbojové komoře. K výhodám této metody patří zejména vynikající přilnavost, homogenita vrstvy a možnost kontroly krystalografického uspořádání ve vrstvě. Tým z OSU (William Cowell, Nicholas Kuhta a Chris Knutson) využil plazmové naprašování

**Štěrbínový kruhový rezonátor – SRR** (Split Ring Resonator), Základní součástka metamateriálů se zápornou permeabilitou navržená Johnem Pendrym z Imperial College London v roce 1999.

**OSU** – Oregonská státní univerzita, výzkumná univerzita ve Spojených státech, která byla založena v roce 1868. Od založení univerzity ji vystudovalo přes 200 000 studentů, kteří získali tituly v 200 udělovaných oborech. Na univerzitě studuje 25 000 studentů a je zde zaměstnáno 3 000 akademických pracovníků.

Vrstvený metamateriál. Obrázek slouží jako logo skupiny vytvářející amorfni metamateriály v OSU. Zdroj: OSU.





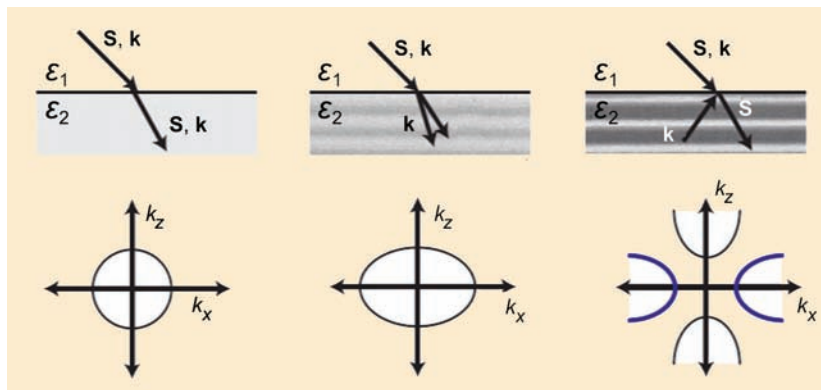
Fotografie vytvořeného nanolaminátu pořízená elektronovým mikroskopem TEM. Zobrazené jsou střídající se vrstvy amorfni kovové slitiny  $\text{TiAl}_3$  (tmavé proužky) a oxidu  $\text{AlPO}$  (Aqueous soLution Processed Oxide, světlé proužky). Zdroj: OSU.

pro vytvoření kovové amorfni nanovrstvy na základni vrstvě. Tloušťka kovové nanovrstvy byla řádově deset nanometrů a jako kovovou slitinu v experimentech používali buď  $\text{TiAl}_3$ , nebo  $\text{ZrCuAlNi}$ . Na první kovovou vrstvu nanесли další oxidovou vrstvu zcela odlišnou metodou SSC (*Solution Spin Coating*). Byl zvolen oxid rozpustný ve vodě a ten byl nanesen na rotující podklad. Při rotaci vzniká odstředivá síla, která nanášený roztok žene radiálním směrem pryč z podkladu. Rychlostí otáčení lze tak kontrolovat tloušťku nanášené vrstvy. Rozpouštědlo se v průběhu nanášení odpařuje, a tak je výsledkem pevná oxidová nanovrstva podobná sklu. Postup se dále opakuje a střídavě se oběma metodami nanáší amorfni kovové nanovrstvy a nanovrstvy z oxidu. Vznikne vzorek, kterému autoři říkají nanolaminát. Tento metamateriál má jiné chování ve směru vrstev (permitivitu  $\epsilon_{xy}$ ) a jiné kolmo na vrstvy (permitivitu  $\epsilon_z$ ). Pro elektromagnetické vlnění má silně anizotropní vlastnosti a procházející elektromagnetická vlna se z hlediska běžných materiálů chová zcela neobvykle – například vlnový vektor  $\mathbf{k}$  (míří ve směru šíření vlny) má opačný směr než Poyntingův vektor  $\mathbf{S}$  (míří ve směru šíření energie). Toto atypické chování je naznačeno na úvodním obrázku, který se stal jakýmsi neoficiálním logem výzkumné skupiny z Oregonské státní univerzity.

## Vlastnosti nanolaminátu

Tři základní typy disperze: izotropní, anizotropní eliptická a anizotropní hyperbolická. Dělení se provádí podle směru vlnového vektoru  $\mathbf{k}$  a Poyntingova toku energie  $\mathbf{S}$ .

Vzniklý nanolaminát má silně anizotropní chování. Dielektrická permitivita je jiná podél vrstev ( $\epsilon_{xy}$ ) a jiná kolmo na ně ( $\epsilon_z$ ). Reálná část permitivity má v některých oblastech zápornou hodnotu, což vede na záporný index lomu. Obecně můžeme chování látky při průchodu elektromagnetické vlny rozdělit do tří typů: 1) izotropní (sférická disperze), 2) anizotropní eliptická disperze a 3) anizotropní hyperbolická disperze. Právě při hyperbolické disperzi je index lomu v některém směru záporný a směr šíření vlny je opačný než směr šíření energie. Skupina z OSU pečlivě proměřovala odrazivost a propustnost samostatných vrstev i střídajících se



vrstev amorfni slitiny kovu a oxidu, permitivitu ve směru kolmém na vrstvy i podél nich. Některé vzorky vykazovaly záporný index lomu ve velmi široké oblasti vlnových délek. To je pro budoucí technologie nesmírně slibné, neboť dosavadní vzorky připravené ze štěrbinových rezonátorů měly metamateriálové chování jen v úzkých rezonančních pásech.

## Využití metamateriálů

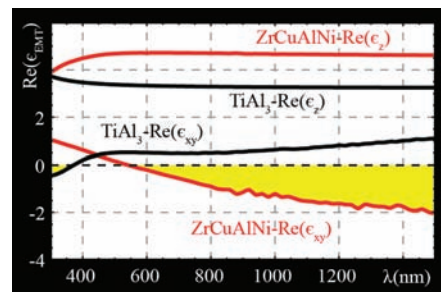
Využití levných nanolaminátů s metamateriálovými vlastnostmi může být velmi široké. Především mohou posloužit ke konstrukci Veselagovy čočky, která je rovinná a přitom fokusuje světlo jako běžná broušená čočka. Jinou možností jsou *hyperčočky*, které půjde vytvořit ze stočeného nanolaminátu. Do vzniklé dutiny se dá malý předmět, který po osvětlení světlem bude možné zobrazit za pomoci evanescentní vlny vytvořené stočeným nanolaminátem. Evanescentní vlna se poté sleduje běžnou čočkou. Metodou lze zobrazit i předměty s menší vlnovou délkou, než má použité světlo (u hyperčoček neplatí, že rozlišovací schopnost je dána ohybovou limitou). Metamateriály mohou posloužit jako neviditelný plášť, který skryje předmět schovaný uvnitř. Světelné paprsky se odkloní tak, že ukrytý předmět zůstane neviditelný. Metamateriály mohou fungovat jako pásmové filtry, sloužit k ukládání dat, ke konstrukci vysokorychlostních optoelektronických a fotonických zařízení, k výrobě nejrůznějších biosenzorů nového typu, a především k výzkumu dosud nepoznaných fyzikálních jevů. Aplikační možnosti levných metamateriálů znamenají neskutečný potenciál pro budoucí špičkové technologie.

■ Petr Kulhánek, 6. 7. 2012, AB 27/2012

**SSC** – *Solution Spin Coating*, jedna z mnoha metod nanášení tenkých vrstev. Nanášená látka je součástí roztoku. Podkladová vrstva rotuje a odstředivou silou je řízena tloušťka roztoku nanášeného na substrát.

**Vlnový vektor** – prostorová změna fáze vlnění. Složky vlnového vektoru získáme jako prostorové derivace fáze vlnění. Pro monochromatickou vlnu je velikost vlnového vektoru rovna  $2\pi/\lambda$ . Vlnový vektor míří ve směru pohybu vlnění.

Reálná část permitivity vzorků složených z deseti vrstev (8 nm ZrCuAlNi + 8 nm AlPO) nebo z deseti vrstev (4,37 nm TiAl<sub>3</sub> + 11,3 nm AlPO). Ve žlutě označené oblasti je reálná část indexu lomu nanolaminátu záporná.





## Honba za vysokými tlaky

**Země** – největší z planet zemského typu. Je jedinou planetou v celém vesmíru, o které víme, že na ní existuje život. Má dostatečně hustou atmosféru, dostatek kapalné vody v povrchových oceánech. Kolem Země obíhá jediný měsíc s vázanou rotací. Při pozorování Země z kosmu vidíme hlavně modrou barvu oceánů. 70 % povrchu Země je pokryto oceány, 30 % tvoří kontinenty. Země sestává z těchto vrstev: jádro, plášť, kůra, troposféra, stratosféra, mezosféra, termosféra. Plášť a kůra jsou odděleny tzv. Mohorovičovým rozhraním. Kůra se posouvá a „plave“ na polotekutém plášti. Teplota v centru Země je 5 100 °C, tlak 360 GPa. Magnetické pole Země má přibližně dipólový charakter, je deformováno slunečním větrem do typického tvaru.

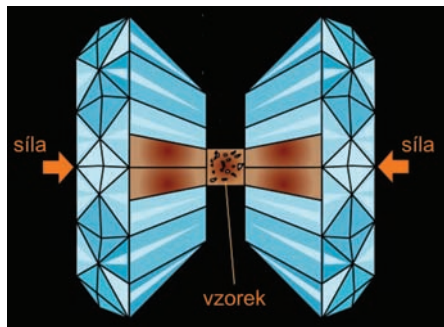
V nitru Země je tlak až 360 GPa, v nitru Jupiteru 7 000 GPa a v nitru obřích exoplanet a hnědých trpaslíků až desítky tisíc GPa. Je v lidských silách připravit látku za tak extrémních podmínek? Podle teorie by se vodík při tlacích vyšších než 25 GPa měl za pokojové teploty stát kovem. V žádném experimentu se ale kovový vodík zatím připravit nepodařilo. Přitom by mělo jít o základní materiál obřích planet a malých hvězd. Extrémně silné magnetické pole Jupiteru domněnku kovového vodíku v jeho nitru nepřímo potvrzuje. Nejvyšší tlaky dosažitelné v laboratořích byly donedávna „jen“ desítky, maximálně stovky GPa. Těchto tlaků bylo dosaženo na miniaturních vzorcích uložených mezi dvěma malými diamantovými kovadlinami. Jde o jakýsi svěrák, jehož čelisti tvoří velmi malé hroty dvou diamantových krystalů. Čím menší čelisti, tím vyšší tlak, protože tlak je roven působící síle dělené plochou. Stejný princip jistě znáte z běžného života: pokud vám dáma šlápně na nohu jehlovým podpatkem, zapůsobí na vás podstatně více, než když vás přišlápně jen teniskou.

V roce 2007 se tato technika získávání vysokých tlaků začala kombinovat s rázovou vlnou získanou laserovým pulzem. V roce 2009 byla publikována série experimentů, ve kterých se podařilo dosáhnout extrémních tlaků jen za pomoci laserového pulzu. Běžné prvky změnily své vlastnosti natolik, že bychom Mendělejevovu tabulku prvků vůbec nepoznali. Například hliník, který je za pokojové teploty neprůhledným kovem se za vysokého tlaku stal průhledným izolantem. Pojďme se na experimenty posledních let, které doslova otevírají cestu do nitra obřích planet, podívat blíže.

### Kovadlina a laser

V roce 2007 publikoval profesor Raymond Jeanloz se svými kolegy z Kalifornské univerzity v Berkeley (UCB) revoluční metodu získávání extrémních tlaků. Po čtvrt století skupina vyvíjela diamantové kovadliny, ve kterých bylo možné stlačit vzorky maximálně na 500 GPa (5 milionů atmosfér), což je jen o něco více, než činí tlak v jádru Země. V těchto experimentech ukázali, že za tlaku přes 10 GPa v zemském plášti dominuje minerál perovskit, který za nízkých tlaků neexistuje. Jeanloz ve svých experimentech také prokázal, že na hranici jádra a pláště dochází k přeměně pevného pláště v tekuté kovové jádro.

Diamantová kovadlina. Zdroj: Argonne Laboratory.

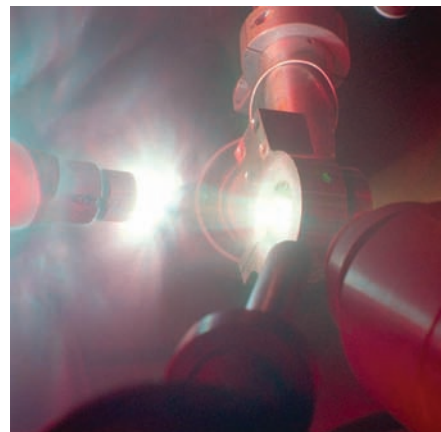
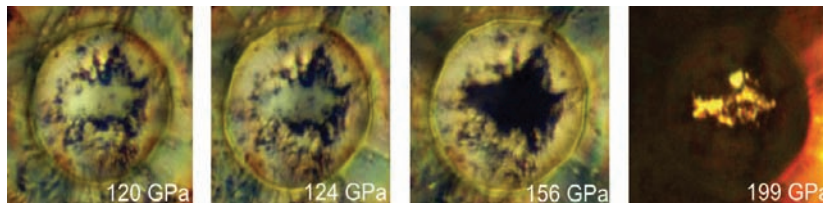


V roce 2007 začali v UCB kombinovat metodu diamantové kovadliny s laserovým pulzem. Využili ultrafialový laser Omega Laboratoře laserové energetiky v New Yorku. Laboratoř je součástí Univerzity v Rochesteru a její laser Omega má energii jednoho pulzu 30 kJ. Pulz namířili na jednu z diamantových kovadlin, která se odpařila za vzniku explozivní rázové vlny působící na vzorek mezi kovadlinami. Hned při prvních experimentech získali na dvě nanosekundy tlak 1 000 GPa (1 TPa) a lze očekávat, že kombinací obou metod bude možné získávat i výrazně vyšší tlaky a hustoty s možností regulace teploty vzorku. Cesta k vyšším tlakům v laboratoři tak byla otevřena.

### Průhledný sodík

Sodík je za normálních podmínek bělomodrým vysoce reaktivním kovem. Yanming Ma na čínské Univerzitě v Jilinu spočetl, že za vysokých tlaků by se alkalické kovy, jako sodík nebo lithium, měly stát průhlednými izolanty. Při tlaku 200 GPa dojde k pětinasobnému stlačení látky a elektronové obaly atomů sodíku se začnou prolínat. Elektrony z překrývajících se obalů jsou vytlačeny do děr mezi atomy a jejich shluky se začnou chovat jako záporné ionty. Měla by tak vzniknout velmi neobvyklá krystalická mříž ze sodíkových iontů a shluků vytlačených elektronů. Látka by se měla chovat jako iontová sloučenina nazývaná *elektrid*, která je nevodivá a průhledná.

Yanming Ma se spojil s profesorem Oganovem z americké Univerzity ve Stony Brook na Long Island, který je specialistou v teoretické krystalografii. Oganov potvrdil správnost výpočtů. Oba vědci poté kontaktovali experimentální skupinu v německém Institutu Maxe Plancka pro Chemii, kterou vedl Mikhail Eremets. Ten byl z počátku k předpovědi obou teoretiků skeptický, nicméně v laboratoři zahájili sérii experimentů s mikrometrovým vzorkem sodíku umístěným mezi dvěma diamantovými kovadlinami. Sodík se zvyšujícím se tlakem nejprve zčernal a při tlaku 200 GPa začal mít žlutavý nádech a skutečně se stal nevodivým a průhledným. Za pomoci ohybu rentgenových paprsků (ze zdroje APS z Argonne Laboratory, USA) byla určena krystalická struktura, která přesně odpovídala teoretickému výpočtu. Předpověď Maa a Oganova tak



Laser Omega zaměřený na diamantovou kovadlinu. Zdroj: UCB.

Experimenty se sodíkem v Institutu Maxe Plancka. Na pravém snímku je sodík pod tlakem 199 GPa a začíná být žlutavě průhledným. Podle teorie by se při tlaku 300 GPa měl stát zcela průhledným, podobně jako sklo. Zdroj: Stony Brook University.

**Jupiter** – největší a nehmotnější ( $1,9 \times 10^{27}$  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 pestré zbarvených pásů. Charakteristickým útvarem Jupiterovy atmosféry je Velká rudá skvrna, která je pozorována po několik století. Atmosféra obsahuje kromě vodíku a helia také metan, amoniak a vodní páry. Teplota pod oblačky směrem ke středu roste. Na vrcholcích mraků je  $-160$  °C, o 60 km hlouběji je přibližně stejná teplota jako na Zemi. Proudění tekoucí v nitru (v kovovém vodíku) vytvářejí kolem Jupiteru silné dipólové magnetické pole.

byla beze zbytku potvrzena. Za vysokých tlaků lze očekávat zcela nové fyzikální vlastnosti známých prvků. Objev byl publikován v roce 2009, v březnovém čísle časopisu Nature.

## Experimenty s hliníkem

V německém středisku jaderného výzkumu DESY mají k dispozici výkonný laser FLASH. Jde o laser na volných elektronech. Svazek elektronů je urychlován v konvenčním lineárním urychlovači a poté prochází *undulátorem* – segmentem se střídajícími se magnety, které vychylují elektronový svazek na jednu a vzápětí na druhou stranu. Elektrony svazku se pohybují po vlnovce a přitom září. Vzniká koherentní elektromagnetický pulz, jehož frekvence je laditelná od ultrafialového po měkké rentgenové záření. Celý laser FLASH je dlouhý 260 metrů. V současnosti se v DESY staví laser XFEL, který bude dlouhý 3 kilometry.

Mezinárodní tým vědců (zahrnující i několik Čechů) připravil mimořádně zajímavý experiment: vědci poslali na malý kousek hliníkové fólie pulz měkkého rentgenového záření z laseru FLASH. U laserových experimentů není většinou zřejmý dosažený tlak a zpravidla se uvádí výkon aplikovaný na jednotkovou plochu vzorku (plošný výkon).

V popisovaném experimentu změnil aplikovaný plošný výkon  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> vzorek k nepoznání. Z každého atomu byly laserovým pulzem vytrženy vnější elektrony. Přitom byl foton měkkého rentgenového záření z laserového pulzu absorbován. V této fázi byl tedy vzorek pro pulz neprůhledný. Odtržení vnějších elektronů mělo za následek změnu kvantové struktury atomárního obalu. Vnější elektrony přestaly zeslabovat svým nábojem pole jádra a tato změna vedla k přesunu obsazených i volných hladin hlouběji do potenciálové jámy, tedy blíže k jádru. V takové „kompaktnější“ formaci již

Část laseru FLASH. Zdroj: DESY.



vnitřní elektrony nemohly pohltit fotony rentgenového pulzu. Uvolněné elektrony zformovaly kolem vzniklých iontů hliníku horká oblaka. Získaná energie zabránila těmto elektronům v okamžité rekombinaci, tedy opětovném obsazení uvolněných hladin. V tomto stavu již nebyl rentgenový pulz ničím absorbován a vzorek hliníku se stal na malou chvíli průhledným pro rentgenové záření. Tým připravil zcela nový stav hmoty, který ale netrval příliš dlouho. Energie soustředěná v horkém oblaku elektronů byla během několika nanosekund předána iontům a vzorek se rozprskl. Nicméně cesta k extrémním stavům hmoty, jež vzniknou při aplikaci gigantického laserového pulzu na malý vzorek látky, je schůdná. Tento objev byl také publikován v roce 2009, tentokrát v zářijovém čísle časopisu Nature.

## Závěr

Všechny popsané experimenty ukazují, že v laboratořích je možné dosáhnout extrémních stavů hmoty a není daleko doba, kdy bude možné vytvořit tlaky panující v nitru obřích planet. Nedávno byl uveden do provozu laser LCLS (*Linac Coherent Light Source*), který vznikl ze známého stanfordského lineárního urychlovače (má délku tři kilometry). Jde o laser na volných elektronech, ve kterém je laserový paprsek generován v undulátoru. Na tomto rentgenovém zdroji bude možné dosáhnout ještě extrémnějších stavů hmoty než doposud. Německé DESY chystá zprovoznit tříkilometrový laser XFEL už v roce 2015. Představa výzkumu látky nacházející se v samém centru obřích exoplanet nebo menších hvězd se tak rychle přibližuje realitě. A nejde jen o obří lasery, existují i jiné možnosti. Pokud protéká plazmovým sloupcem elektrický proud, vzniká kolem magnetické pole, které sloupec stlačuje k ose. Vzniklý útvar se nazývá pinč (z anglického *pinch* – stisknout). Jde o jinou alternativu, jak získat extrémně husté a horké stavy hmoty, kterou se vydali vědci v další řadě vědeckých pracovišť.

■ Petr Kulháněk, 12. 2. 2010, AB 6/2010

**Hnědý trpaslík** – hvězda s tak malou hmotností (13 až 80  $M_J$ ), že teplota v nitru nikdy nedosáhne bodu vzplanutí dostatečně energetických termojaderných reakcí (alespoň  $8 \times 10^6$  K). Dalšímu stlačování vlivem gravitace a tím i nárůstu teploty zabrání elektronová degenerace. Od planet se liší tím, že vzniká kontrakcí zárodečné mlhoviny (planeta vzniká akrecí v periferní oblasti) a emituje po dobu několika miliard let viditelné světlo (planeta září v IR).

**Diamant** – forma uhlíku s diamantovou krystalovou mříží. Sousední vazby (tzv.  $\sigma$  vazby) svírají úhel  $109^\circ 28'$  a jejich délka je 0,154 nm. Za normálních podmínek je teplota tání 3 500 °C, hustota 3,51 g/cm<sup>3</sup> a index lomu  $n = 2,417$ , je-li dotován kyslíkovými ionty, stane se polovodičem typu n.

**UCB** – University of California at Berkeley. Požadavky na vznik Kalifornské univerzity pocházejí již z roku 1849, vlastní univerzita byla založena v roce 1866, nejznámější část (UCLA) sídlí v Los Angeles. Berkeleyská část vznikla v roce 1873.

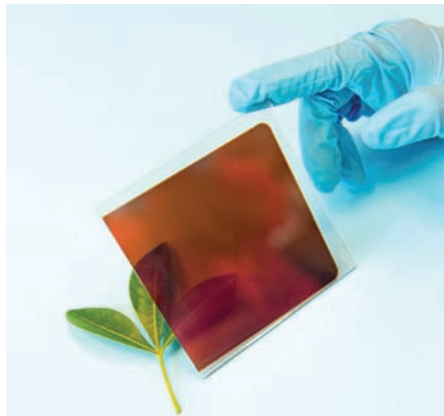


## Nové fotovoltaické panely z Anglie

**Fotovoltaický jev** – vznik elektrického napětí při dopadu světla na rozhraní dvou materiálů. Jevu lze využít ke konstrukci fotovoltaického článku. Fotovoltaický jev objevil v roce 1839 Alexandr Edmond Becquerel (1820–1891) spolu se svým otcem Antoine Césarem Becquerelem (1788–1878).

**Fotovoltaický článek** – polovodičová součástka schopná přeměňovat za pomoci tzv. fotovoltaického jevu světelnou energii na elektrickou. Z fotovoltaických článků se například konstruuji panely slunečních baterií na kosmických družicích a sondách.

Nový fotovoltaický článek. Perovskitová vrstva o tloušťce 320 nm je nanosená na průhledné skleněné tabulce. Zdroj: Nanotechweb.



Na Oxfordské univerzitě v Anglii se podařilo vyvinout nový typ fotovoltaických článků. Účinnost je vyšší než 15 % a výroba článků je velmi jednoduchá, protože je kompatibilní s již používanými technologiemi. Fotovoltaické panely se tedy mohou začít brzy vyrábět ve velkém množství.

### Křemík versus perovskit

Stávající solární články jsou založené na křemíkových polovodičích. Tato technologie je na výrobu solárních panelů poměrně drahá a navíc dnes naráží na své technologické hranice (účinnost článků již nejde výrazně zvýšit). Je tedy potřeba hledat nové materiály, které by byly na výrobu článků vhodnější a především levnější. Nový solární článek je vyroben z nového typu polovodičů – tzv. perovskitových polovodičů. Perovskity ( $\text{CaTiO}_3$ ) jsou vzácné minerály, které se u nás vyskytují například v Loučné v Krušných horách (pyroxenity, hornblendity) nebo v povodí Ploučnice (polzenity).

Nově navržené perovskitové solární články mají účinnost kolem 15 % (přičemž ještě nedávno to byla pouhá 4 %), což je srovnatelné s dnešními nejvýkonnějšími křemíkovými články. Je zde však možnost zvýšení až na 25 %. A to není jediná výhoda. Články vyrobené z perovskitu mohou být podstatně tenčí než křemíkové (1 mikrometr perovskitu nahradí 200 mikrometrů křemíku), navíc lze použít stejnou technologii výroby jako u křemíkových článků. Výsledkem je nesrovnatelně nižší cena jak výroby, tak zavedení nové technologie do praxe.

Ale abychom neuváděli jen samé výhody: vývoj je ještě v plenkách a aby mohl perovskit plně nahradit křemík, je třeba vyřešit dva zásadní problémy. Prvním problémem je, čím nahradit v polovodiči olovo, které je součástí organokovového trihydrogen-perovskitového barviva používaného k pohlcování světla. Toxické látky obsahující toto olovo se uvolňují do okolí jak při výrobě, tak při používání. Druhým problémem je částečná rozpustnost perovskitů ve vodě. Testy ukazují, že perovskit nevydrží tolik, co křemík, který je stabilní po celé desítky let.

## Generace organických fotovoltaických článků

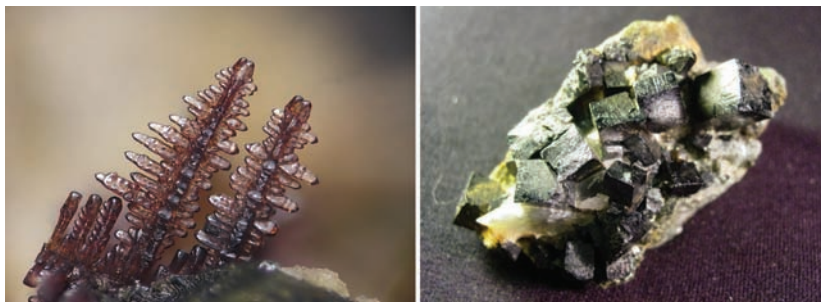
Organické články vedle (nebo i namísto) křemíku používají různé polymerní, organické nebo uměle vytvořené nanomateriály, které mají schopnost absorbovat světlo a přeměnit jej na elektrickou energii. Hledání materiálů vhodných k této přeměně je dnes hlavním předmětem výzkumu. Velmi slibné se jeví využití velmi levné titanové běloby  $\text{TiO}_2$  v kombinaci s organickým barvivem, které absorbuje světlo. Do této kategorie patří i perovskitové články.

Technologie výroby perovskitových článků se dělí na dvě generace. V první generaci se vyvíjely především tzv. *waferové* (tlustovrstvé) články. Název je odvozen z analogického vývoje křemíkových článků, mající za substrát polovodič vyrobený rozřezáním monokrystalického nebo polykrystalického ingotu, anglicky *wafer*. Tloušťka waferu se pohybuje řádově v několika stech mikrometrů, přesto zůstává výroba tohoto typu článku drahá.

Přirozeným vývojem z tlustovrstvých článků vznikly tenkovrstvé články, kde je hlavní snahou snížit spotřebu drahého materiálu (původně křemíku). Pracuje se bez substrátu, pouze se různými postupy (například napařováním technologií CVD nebo rotačním nanášením technologií SSC) nanese tenoučká polovodiivá vrstva (tloušťka se počítá v nanometrech) na podklad, kterým je typicky sklo nebo plast. Vrstva vodivého materiálu je výrazně tenčí než u waferových článků a cena je tak výrazně nižší.

## Pod drobnohledem

Historie perovskitových polovodičů je velmi krátká, zato intenzivní. První generace byla představena v roce 2009 a od té doby vzniklo několik typů těchto polovodičů. Aktuálně se zkoumají vlastnosti polovodičů skládajících se z tenkých polovodičových vrstev sevřených mezi dva kontakty. K pohlcování světla dochází díky organokovovému trihydrogen-perovskitovému barvivu s obecným vzorcem  $(\text{RNH}_3)\text{BX}_3$ , kde R je zástupný symbol pro  $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ , B reprezentuje olovo nebo cín a X je jód, brom, nebo chlór.



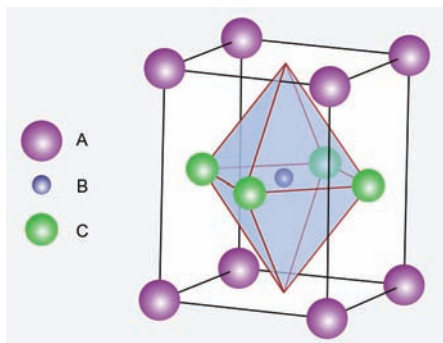
Perovskit nalezený v Německu (vlevo) a v Rusku (vpravo).  
Zdroj: Mindat, CSGA.

**Perovskit** – minerál krystalující v kosočtverečné soustavě, chemický vzorec  $\text{CaTiO}_3$  (oxid titaničito-vápenatý). Byl objeven na Urale v roce 1839 Gustavem Rosem a pojmenován podle ruského diplomata, ministra, mineraloga a archeologa Lva Alexejeviče Perovského (1792–1856). Dnes se tento minerál dostává do popředí díky svým polovodičovým vlastnostem, kterými by mohl konkurovat stávající křemíkové technologii.

**Organické solární články** – hybridní organické solární články, které obsahují jako polovodič anorganické mezostrukturované oxidy (jako je například  $\text{TiO}_2$ ) a komplexní organokovové barvivo absorbující světlo (například perovskity).

**CVD** – Chemical Vapour Deposition, způsob nanášení tenkých vrstev. Proces probíhá za vysoké teploty, podklad je vystaven působení prekurzoru, který reaguje s povrchem, čímž vzniká požadovaný materiál. Vedlejší produkty se odstraňují proudem plynu nebo unikají do komory se sníženým tlakem.

**SSC** – viz strana 307.



Krystalová struktura perovskitu  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ . Na obrázku je symbolem A označeno methylamonium  $\text{CH}_3\text{NH}_3$ , B je olovo a C je jód nebo chlór. Zdroj: Nature.

V Oxfordu představili organokovové trihalogenid-perovskitové polovodiče se vzorcem  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ , kde X může být jód, bróm, nebo chlór a porovnali, jaký vliv na účinnost má způsob nanosení na médium. Použili přitom nanočásticového filmu z oxidu titaničitého ( $\text{TiO}_2$ ), který působil jako kontakt na elektrodě. Zjistili, že optimální tloušťka perovskitové vrstvy je přibližně 330 nanometrů. Pokud je vrstva příliš tenká, není schopna vstřebat veškeré sluneční záření z okolí. Pokud je ale příliš tlustá, nemusí se generované náboje difúzí dostat až k elektrodám. Jejich měření také vyvrátilo dosud uznávanou domněnku, že příčinou vyšší účinnosti je nanostrukturování materiálů.

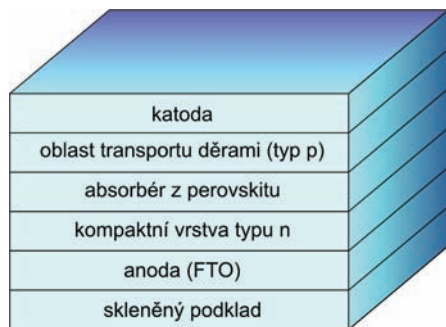
Solární článek se skládá ze skleněné destičky potažené fluorem dopovaným oxidem cínatým (SnO), který má roli anody, na ní je nanesena souvislá n-vrstva z  $\text{TiO}_2$  tvořící elektronový kontakt. Na n-vrstvu je pak napařena vrstva perovskitů, nad kterou následuje p-vrstva navržená tak, aby zaručovala sběr kladně nabitých děr na stříbrné katodě. Schéma je znázorněné na obrázku, FTO znamená fluorem dopovaný oxid cínatý (*Fluorid doped Tin Oxid*).

Když perovskitová vrstva absorbuje světlo, vznikají páry elektron-díra. Tyto nosiče náboje jsou následně vedeny různými transportními materiály, například  $\text{TiO}_2$  pro elektrony a jinými materiály pro díry. Transportní materiál přenesení náboje na dvě oddělené elektrody, čímž na nich vzniká napětí.

## Budoucnost perovskitových polovodičů

Vše vypadá velmi nadějně. Perovskitové polovodiče jsou srovnatelné s křemíkovými. Také se otvírá možnost kombinovat oba typy polovodičů – křemíkové i perovskitové, protože perovskit absorbuje světlo z opačné části světelného spektra než křemík. Mohli bychom se tak dočkat i tzv. tandemového solárního článku, ve kterém by byla pod vrstvu perovskitů umístěna vrstva křemíku. Perovskitová vrstva by absorbovala fotony s vyšší energií a vrstva křemíku pod ní by absorbovala fotony s nižší energií. Výsledný článek by byl ještě účinnější než ty, které využívají pouze jedné vrstvy, ať už perovskitů, nebo křemíku. Dodejme, že energie získávaná s využitím perovskitů by v budoucnu mohla být tak levná, že by mohla na poli energetiky úspěšně konkurovat i fosilnímu palivu.

Schéma perovskitového polovodiče naneseného na skleněném médiu. Zdroj: Nature.



■ Jiřina Scholtzová, 25. 10. 2013, AB 33/2013

# Break Junction, aneb jak změřit vodivost organické molekuly

Celosvětově stále dochází k vývoji výpočetní techniky. Hlavní trend ve vývoji integrovaných obvodů vede k jejich zmenšování, což umožňuje natěsnat velké množství součástek na stále menší plochu. V uplynulých čtyřiceti letech se jejich počet vměstnaných na čip dařilo zdvojnásobit každé dva roky. Zmenšení velikosti čipu způsobuje snížení příkonu. Tempo miniaturizace ale začíná narážet na rozměrové limity klasické metody CMOS, založené na nanášení kovové elektrody na křemík a její izolaci. K významným omezením přispívá nedořešené chlazení těchto systémů. Funkčnost tranzistorů by další miniaturizací mohla utrpět, což by vedlo k jejich nespolehlivosti. Z těchto a jiných důvodů věda uvažuje o možných nových technologiích. Jedna z cest se zaměřila na studium elektrického chování organických molekul. Tyto molekuly se dají navrhnout na počítači, ale pouze měření může prokázat, zda je zvolený matematický model správný. Proto je potřeba takovou molekulu nejen vyrobit, to je věc, kterou chemie celkem běžně zvládá, ale i nakontaktovat na elektrický obvod a namodelované elektrické vlastnosti změřit.

## Metoda

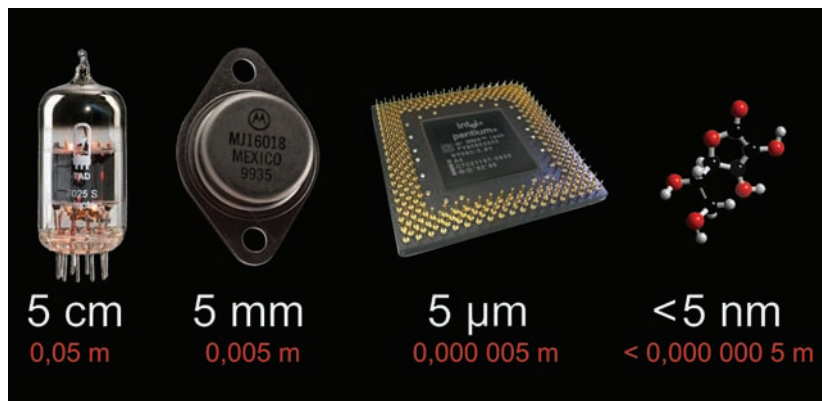
K nakontaktování organické molekuly se používá vysoce tenký zlatý můstek o rozměrech zhruba  $50 \times 50 \times 120$  nm. Ten je pomocí přesné mechaniky postupně natažen a přetržen, až vzniknou ostré hroty. K přetržení můstku musí dojít pomalu, aby měl dostatek času vytvořit jednoatomární hrot. Zlato je zvoleno pro své vhodné mechanicko-elektrické vlastnosti. Neoxiduje, proto se používá v elektrotechnice na ochranu kontaktů, a je

**Organická sloučenina** – chemicky čistá látka, jejíž molekuly obsahují vždy jeden nebo více atomů uhlíku. Obsahuje i další atomy, především vodík, kyslík, dusík, síru. Mezi organické sloučeniny se nepočítají jednoduché oxidy uhlíku.

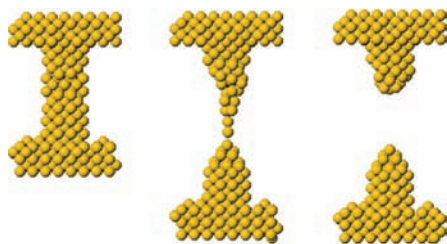
**Oxid** – dříve označovaný jako kysličník, je sloučenina kyslíku s méně elektronegativními prvky. Oxidy vznikají oxidací (hořením) za přítomnosti kyslíku ze vzduchu nebo jiných přítomných chemických látek.

**Elektronegativita** – vlastnost prvku, která vyjadřuje jeho schopnost přitahovat elektrony (většíinou souvisí se snahou prvku dosáhnout konfigurace vzácného plynu). Tuto vlastnost zavedl americký chemik Linus Pauling jako bezrozměrou relativní veličinu.

Obrázek znázorňuje historické a snad i budoucí rozměry polovodičových přechodů.

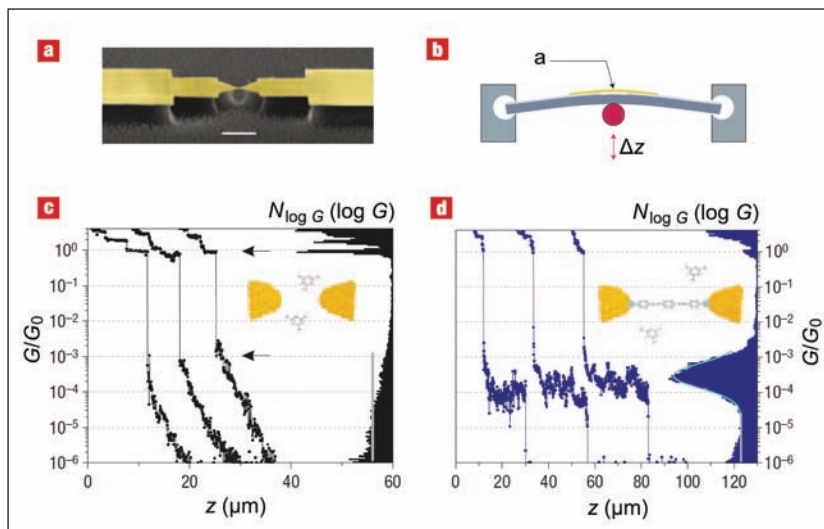






Postupně formování jednoatomárního můstku a jeho přetržení. Zdroj: PCCP.

Na obrázku a) je vidět mechanické provedení můstku. Schematické znázornění uchycení destičky je na obrázku b). Obrázek c) znázorňuje graf několika měření bez přítomnosti molekuly. Obrázek d) ukazuje, jak se křivka změní v případě, že dojde k úspěšnému navázání molekuly. V pravé části je zobrazena četnost měřených hodnot z mnoha měření. Zdroj: SPS.



tažné. Postupným natahováním můstku se atomy začnou přeskupovat, až je můstek v jediném místě tvořen skupinou dvou atomů. Vodivost takového jednoatomárního zlatého řetízku je rovna  $G_0 = (12\,906\ \Omega)^{-1}$ .

Bezprostředně po přetržení můstku prochází mezi nejbližšími atomy tzv. tunelovací proud. Rozevíráním můstku tento proud neustále klesá. Jakmile dosáhne vodivosti kolem  $10^{-9}$  siemensů, je můstek zcela přetržen. Nyní stačí můstek opět postupně zavírat a při dostatečně přesné mechanice a stabilitě můstku dojde k jeho opětovnému spojení. Přidáním testovací organické molekuly v roztoku dochází v okamžiku přetržení můstku k jeho přemostění organickou molekulou. Molekuly jsou upraveny tak, aby na svých koncích obsahovaly síru, která má vaznost na atomy zlata. Ne vždy dojde k úspěšnému uchycení molekuly, a proto se můstek trhá a spojuje mnohokrát a výsledky měření se zpracovávají statisticky.

## Měření

K proměření vodivosti je třeba: destička nesoucí zlatý můstek, zdroj konstantního napětí, přesný pikoampérmetr a mechanika umožňující kontrolovaně hýbat s můstkem. K proměření vodivosti potřebujeme poměrně jednoduchý elektrický obvod. Zdroj stejnosměrného stabilizovaného napětí hodnoty kolem 100 až 200 mV. To zvládně při dobré stabilitě a přesnosti běžný laboratorní zdroj. Pro změření vodivosti si již s běžným laboratorním přístrojem nevystačíme. Hodnoty měřeného proudu se pohybují až do řádu pikoampérů. Na trhu lze pořídit takový přístroj například od firmy Keithley.

Při měření se periodicky můstek trhá a spojuje. Za spojený můstek lze považovat můstek spojený čtyřmi až deseti atomy. Z několika násobného měření se sestavují histogramy četnosti naměřené vodivosti. Jejich tvary jsou mírou přesnosti měření a z polohy vrcholu se odvozuje výsledná vodivost.

Při měření se periodicky můstek trhá a spojuje. Za spojený můstek lze považovat můstek spojený čtyřmi až deseti atomy. Z několika násobného měření se sestavují histogramy četnosti naměřené vodivosti. Jejich tvary jsou mírou přesnosti měření a z polohy vrcholu se odvozuje výsledná vodivost.

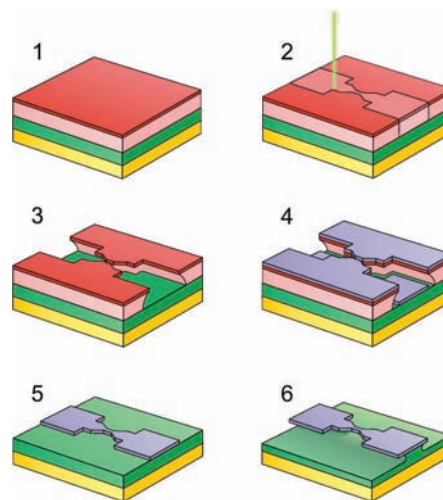
## Výroba nejmenšího kontaktu

Pro uchycení základu zlatého můstku se používá fosfor-bronzový plech. Tento materiál se používá pro své vhodné mechanické vlastnosti, zejména pružnost. Protože je elektricky vodivý, je na něm nanášena tenká (100 až 200 nm) izolační vrstva umělé hmoty (polyimid). Na ni se metodou podobnou, jako se dělají běžné desky plošných spojů, vytvoří základní makroskopický motiv kontaktních ploch a přívodních vodičů. Ty jsou na polyimid nanášeny termickým napařením zlata v napařovací komoře, za tlaku zhruba  $10^{-6}$  torru ( $10^{-4}$  Pa).

Vlastní motiv můstku se doplní pomocí elektronové litografie. K tomuto procesu se dají použít speciálně upravené elektronové mikroskopy. Pomocí svazku elektronů širokého několik nanometrů se osvětlí nanášená fotocitlivá vrstva. Obraz vzniká postupně, řádek po řádku. Osvětlená vrstva se rozpustí ve vývoje a opět se celá destička nechá pokovit 50 nm tlustou vrstvou zlata. Zbývá poslední operace – odstranění přebytečného zlata, které se provede rozpuštěním neosvětlené fotocitlivé vrstvy překryté zlatem.

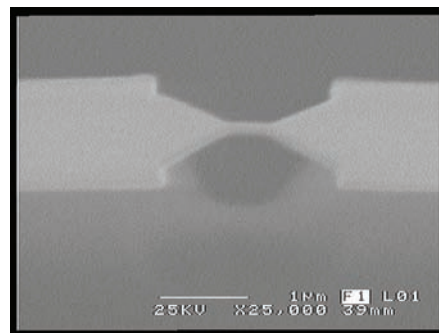
Aby bylo místo, ve kterém chceme můstek přetřhnout, přesně definované, je třeba pod samotným můstkem, a pouze pod ním, odstranit vrstvy izolačního polyimidu. V tzv. plazmatickém leptacím zařízení se za přítomnosti vysokého napětí, kyslíku a dalších plynů odleptá teď již nechráněný polyimid. Protože odleptání postupuje nejen shora dolů, ale částečně i do boků, dojde k podleptání zlatého motivu nejdříve v jeho nejužším místě, tedy právě pod vlastním můstkem.

■ Vladimír Příbyl, 21. 2. 2014, AB 8/2014



Jednotlivé fáze přípravy můstku: 1. Fosfor-bronzový plech (žlutá) pokrytý nevodivým polyimidem (zelená), separační vrstvou (růžová) a fotocitlivou vrstvou – fotorezistem (červená). 2. Aplikace elektronové (e-beam) litografie. V praxi se makroskopická část motivu provede optickou litografií pomocí masky. 3. Červený fotorezist se rozpustí ve vývoje a v jiné vývoje se rozpustí separační růžová vrstva. 4. Napaření zlata (fialová). Pouze ta část, která je napařena přímo na polyimidu (zelená), je budoucí můstek. 5. Rozpuštění separační vrstvy odnese i přebytečnou část zlata. 6. Po plazmovém leptání je můstek hotov.

Hotový můstek při pohledu v elektronovém mikroskopu. Zvětšeno 25 000×.



## Komunikace za pomoci neutrin

**bit** – základní jednotka informace, která nabývá dvou hodnot (ano/ne), (0/1), (pravda/nepravda) atd.

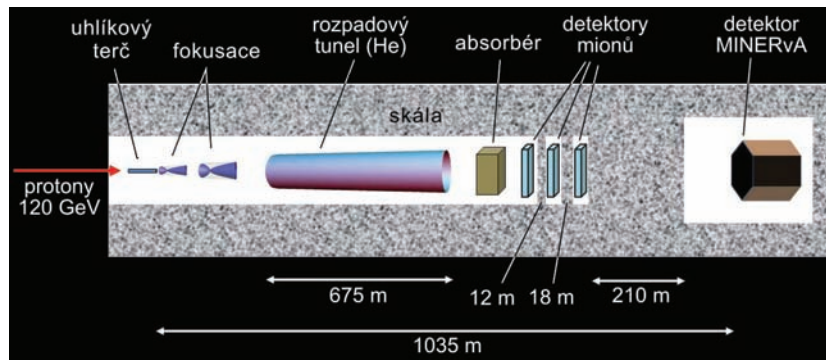
**byte** – bajt, jednotka informace, která označuje osm bitů, tj. osmiciferné binární číslo. Takové množství informace může reprezentovat například celé číslo od 0 do 255 nebo jeden znak abecedy. Jeden byte je obvykle nejmenší objem dat, se kterým dokáže procesor přímo pracovat. Větší jednotky: kilobyte (kB,  $2^{10} = 1024$  bytů), megabyte (MB,  $1024 \cdot 1024$  bytů), gigabyte (GB,  $1024^3$  bytů), terabyte (TB,  $1024^4$  bytů).

**Binární násobky** – viz strana 324.

Neutrina jsou částice připomínající duchy. Nejenom, že procházejí běžnou látkou, ale za letu mění svou podobu a přeměňují se jedno v druhé. Neutrina by byla ideálním nosičem informace v prostředích, kterými se nemůže šířit elektromagnetický signál – pod vodou, uvnitř Země, napříč galaxiemi atd. Vzhledem k velmi slabé interakci neutrin s látkou by k takové komunikaci byly zapotřebí velmi mohutné svazky neutrin a velmi hmotné detektory. Přenášení zpráv je proto hudbou vzdálené budoucnosti. V březnu 2012 byl ale učiněn první krok. Skupině fyziků pod vedením Daniela Stancila ze Státní univerzity v Severní Karolíně se ve Fermilabu podařilo přenést za pomoci neutrin jednoduchou zprávu – slovo „neutrino“ – na vzdálenost jednoho kilometru, z toho 240 metrů vedlo skrze dolomitovou skálu. Odborníci na internetové technologie by zajisté ohrnuli nos – rychlost přenosu byla pouhých 0,1 bitu za sekundu a chybovost přenosu 1 %. Fyzikové jsou samozřejmě jiného názoru – provedený experiment jasně prokázal, že komunikace prostřednictvím neutrin je v principu možná.

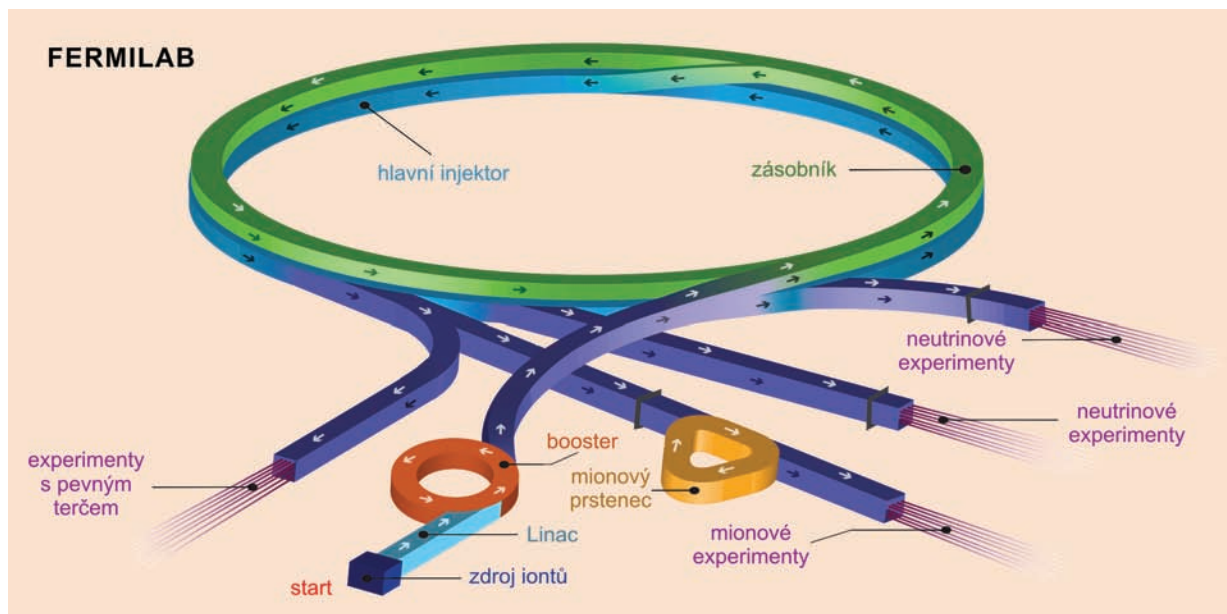
### Neutrinový svazek NuMI

Zařízení NuMI. Protony urychlené v hlavním injektoru bývalého Tevatronu se přemění na svazek přesně směřovaných pulzů neutrin. Zdroj: 1.D. D. Stancil/ArXiv.



Když byl v roce 2011 uzavřen pro nedostatek financí druhý největší urychlovač na světě, americký Tevatron, neznamenalo to definitivní konec veškeré částicové fyziky ve Fermilabu. V provozu zůstal hlavní injektor, který dokáže urychlit protony na energii 120 GeV. Protony je

možné v podzemním tunelu NuMI (*Neutrinos at the Main Injector*, neutrina v hlavním injektoru) přeměnit na jeden z nejintenzivnějších neutrinových svazků na světě. Jak se to dělá? Urychlené protony jsou nejprve namířeny na uhlíkový terč. Z něho vylétá řada částic, nejvíce jsou zastoupeny nabitě piony a kaony, které je možné fokusovat magnetickým polem do málo rozbitavého svazku. Fokusované pio-

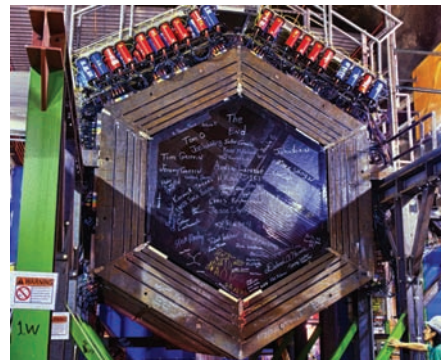


ny a kaony letí do rozpadového tunelu naplněného heliem. Zde se na vzdálenosti 675 metrů většina z nich rozpadne na neutrina. Vytvořený svazek prochází absorbérem, kde je pohlcena většina nechtěných částic, ke kontrolním detektorům mionů. Svazek neutrin je nasměrován k detektoru MINERvA; za rozpadovým tunelem neutrina proletí k detektoru celkem 240 metry (12 m + 18 m + 210 m) dolomitové skály. Do detektoru vchází téměř čistý svazek mionových neutrin (88 % mionových neutrin, 11 % mionových antineutrin a 1 % elektronových neutrin) o průměru několika metrů. Svazek neutrin je pulzní – jeden pulz je vytvořen  $2,25 \times 10^{13}$  protony a trvá 8,1  $\mu$ s. Opakování pulzu je možné nejdříve po čase 2,2 s. Průměrná energie neutrin ve svazku je 2,8 GeV s pološířkou 3,2 GeV.

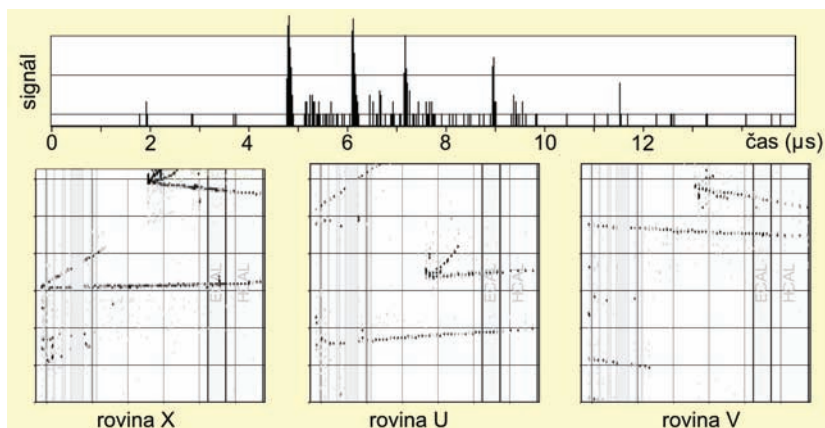
### Detektor MINERvA

Neutrina svazku jsou namířena do podzemního detektoru MINERvA (*Main Injector Experiment for  $\nu$ -A*). Název má připomínat římskou bohyni řemesel a moudrosti Minervu. Předposlední písmeno ale není „vé“, nýbrž řecké „ný“, symbol pro neutrina. Detektor je umístěn

Ze stavby detektoru MINERvA. Zdroj: Fermilab.







Detekce více neutrin v průběhu jednoho impulsu. V průměru je ovšem zachyceno jen 0,81 neutrina na impuls. Zdroj: Fermilab.

před detektorem a jednak z interakce neutrin s jádru atomů detektoru samotného (C, Pb, Fe). Většina zachycených mionů pochází z horniny před detektorem. Detektor je dimenzován tak, že pokud by jím svazek neutrin nepřetržitě procházel 4 roky, zachytil by detektor přibližně 16 milionů událostí. Mion, který vznikne interakcí neutrina s jádrem nějakého atomu, proletí v detektoru několik metrů, a proto je zachycen v několika desítkách scintilačních proužků. Mion generuje ve scintilačním proužku záblesk, který je veden optickými vlákny do fotonásobičů nad detektorem a dále zpracován. Z průletu je možné nalézt hybnost i energii původního neutrina. Mnoho nezávislých segmentů minimalizuje šum z kosmického záření.

### Přenos informací

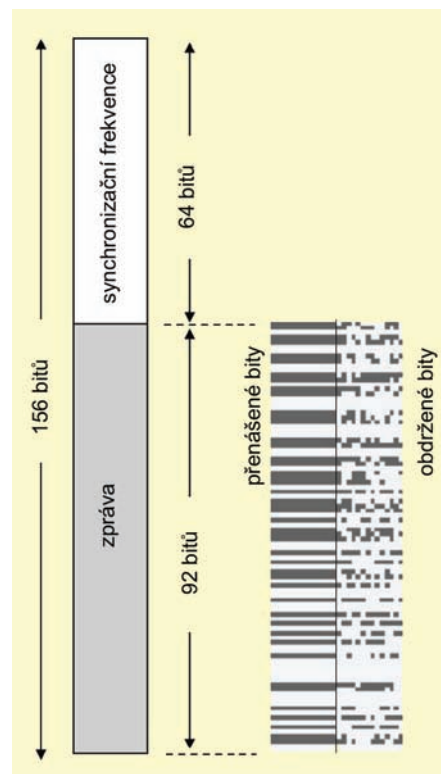
Již jsme se zmínili, že neutrina přicházejí do detektoru v pulzech. Průměrný pulz byl vytvořen  $2,25 \times 10^{13}$  protony a trvá 8,1  $\mu\text{s}$ . Z takového pulzu je v průměru možné zachytit 0,81 události (detekce neutrina). Nejsou ale výjimečné i vícenásobné detekce v průběhu jednoho impulsu. Detekovaný impuls neutrin lze považovat za binární jednotku „1“ – samozřejmě, že vícenásobná detekce neutrin přispěje k rozpoznání, že byl přenesen bit s hodnotou „1“. Pokud není generován impuls, není zachyceno žádné neutrina a situaci vyhodnotíme tak, že byl přenesen bit s hodnotou „0“. Za pomoci posloupnosti nul a jedniček můžeme přenést libovolnou informaci. Samozřejmě, že posílaná informace musí obsahovat synchronizační část, aby bylo na druhé straně



100 metrů pod zemí a jeho celková hmotnost je 170 tun, z toho 3 tuny tvoří vnitřní část pro sledování stop. Kolem této vnitřní části jsou pláty se scintilačními proužky. Plátů je celkem 200 a jejich roviny tvoří šestiboký hranol, jehož stěny mají tři různé orientace (roviny plátů ze sousedních stěn svírají úhel 60°). Tyto tři detekční roviny se označují X U a V. Scintilační proužky v plátech detekují nabitě miony, které pocházejí jednak z interakce neutrin s horninou

skály známo, kdy byly/nebyly vysílány jednotlivé impulzy. Týmu pod vedením Daniela Stancila ze Státní univerzity v Severní Karolině se takto podařilo za pomoci neutrin přenést slovo „neutrino“. Dosažený tok informace byl 0,1 bitu za sekundu a chybovost nepřesáhla 1 %. Sekvence byla přenášena dvakrát, aby byla jistota správné interpretace. Celková vzdálenost mezi místem kódování a detektorem byla 1035 metrů, z toho 240 metrů vedlo dolomitovou skálou. Jde o první experiment tohoto druhu, jehož jediným cílem bylo prokázat, že komunikace za pomoci neutrin je možná. Pro praktické využití by byly potřebné intenzivnější svazky a mohutnější detektory. Zde se k podobným experimentům přímo nabízí využít největší detektor neutrin na světě Icecube, který má objem 1 km<sup>3</sup> a je vybudován v antarktickém ledu. Je otevřenou otázkou, zda by vyspělé civilizace (pokud by existovaly) volily pro komunikaci napříč Galaxií (pokud by chtěly komunikovat) elektromagnetické signály nebo spíše ničím netlumená neutrina. Pro pozemšťany by neutrinová komunikace byla nepochybně velmi užitečná pro podmořské ponorky a pro komunikaci skrze Zemi k protinožcům. Přenos většího množství informací za pomoci neutrin je ale zatím mimo naše technologické možnosti.

■ Petr Kulhánek, 11. 1. 2012, AB 2/2013



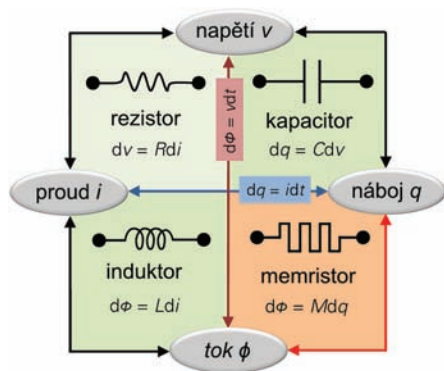
*Způsob kódování zprávy. Je patrné, že z obdržených bitů je velmi dobře možné rekonstruovat vyslaný signál*

## Komerční využití memristoru

**Memristor** – čtvrtá základní elektrotechnická součástka (po odporu, cívce a kondenzátoru). Měla by realizovat vztah mezi nábojem a magnetickým indukčním tokem. Teoreticky ji předpověděl Leon Chua v roce 1971. Realizována byla až ve druhém desetiletí 21. století. Magnetický odpor součástky není konstantní, ale závisí na historii procházejícího náboje.

**ReRAM** – rezistivní paměť RAM, která uchovává uloženou informaci i po odpojení od zdroje energie. Tato paměť by měla vykazovat hysterezi v odporu, tj. uchovávat hodnotu elektrického odporu. V současnosti (2014) je vyvíjena více společnostmi (Rambus, Panasonic, Crossbar), je založena na perovskitech, oxidech kovů, oxidu křemíku nebo chalkogenitech. Paměť tohoto typu se chová jako memristor, čtvrtá základní elektrotechnická součástka.

Jednotlivé dvojice obvodových veličin jsou propojeny jednoduchými vztahy. Zdroj: limgur.

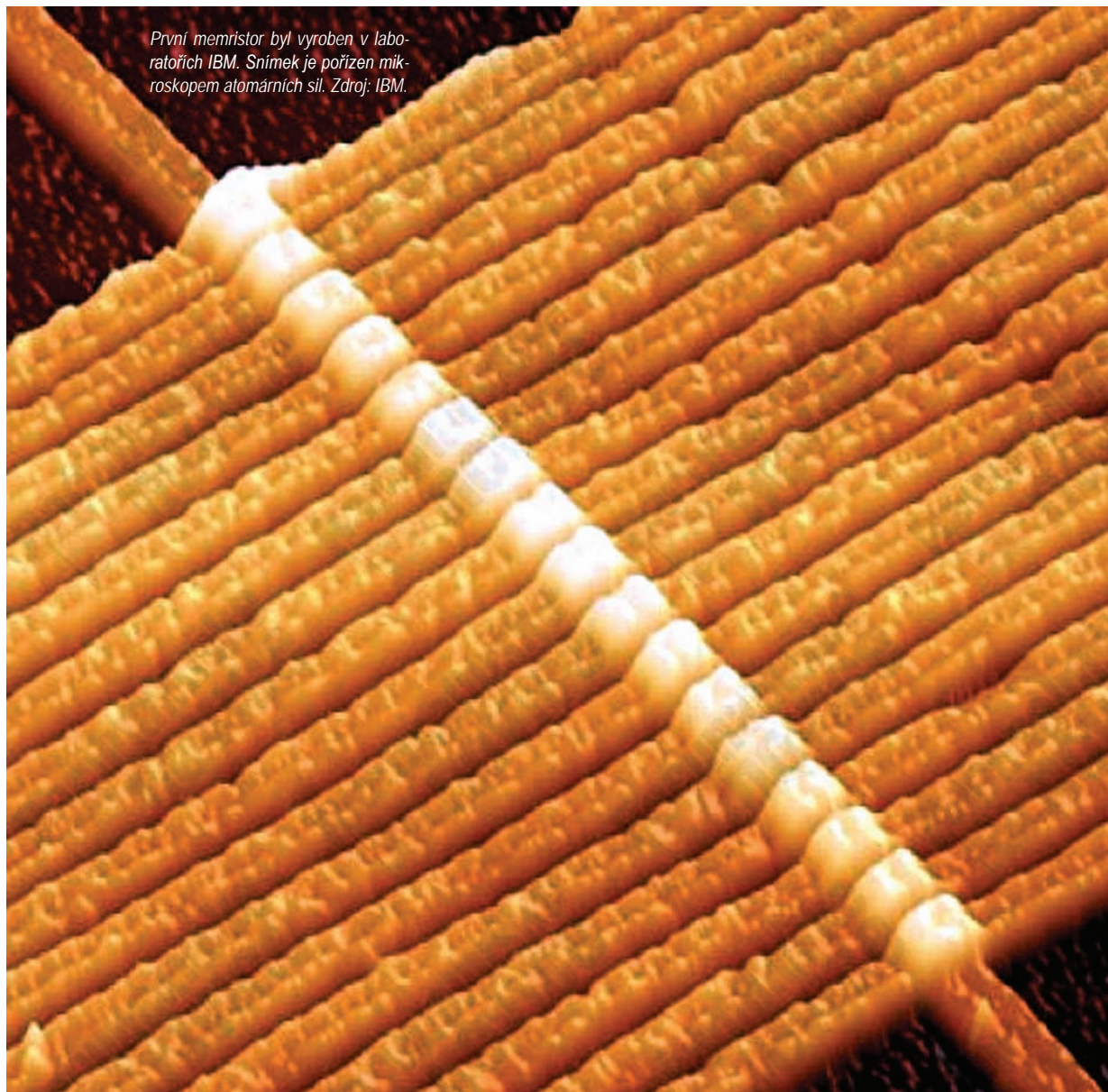


Tato zatím pro nás atypická součástka byla poprvé vytvořena v roce 2008. Memristoru tehdy mnozí věřili zářivou budoucnost v mnoha aplikacích. Jak vypadá situace dnes? Výzkumníci uplynulých šest let rozhodně neproskali. Počítače, který by simuloval pomocí memristoru ukládání informací v neuronech, jsme se zatím nedočkali. Na memristorech založený disk, na který bychom si uložili soukromé fotografie, si v obchodě zatím také nekoupíme. Dle marketingových prohlášení různých firem ale přesně takové disky budou na trhu „již brzy“. Mezitím Panasonic uvedl první generaci mikropočítačů s ReRAM pamětí, která dosahuje slibných parametrů. Oproti současné generaci flash paměti má především zvýšenou životnost (počet přepisovacích cyklů) a uspoří energii při zápisu...

### Historie

První zmínku o memristoru lze nalézt v práci Leon Ong Chua z roku 1971, ve které memristor představil jako čtvrtou základní elektrotechnickou součástku – spolu s již známým odporem, kondenzátorem a cívkou (rezistorem, kapacitorem a induktorem). Chua, v té době profesor na Kalifornské univerzitě v Berkeley, se zabýval symetrií základních veličin v elektrických obvodech. Memristor realizuje vztah magnetického toku a náboje, který nelze vytvořit kombinací zbývajících třech základních součástek. V sedmdesátých letech byl memristor pouze hypotetickou součástkou. Aby mohl Chua změřit jeho základní parametry a otestovat jeho chování, musel sestavit náhradní zapojení z aktivních prvků (součástky potřebující ke své činnosti externí napájení) v kombinaci s nelineárním odporem.

V roce 2008 si výzkumníci z IBM laboratoří všimli trvalé hystereze vodivosti projevující se v nanovrstvách (s tloušťkou 50 nm)  $\text{TiO}_2$  složených ze dvou oblastí – dotované (s nízkým odporem) a nedotované (s vysokým odporem). Tento jev byl na různých materiálech pozorován již dříve, v IBM si ale jako první uvědomili, že realizovali memristor. Magnetický tok je v této nanostruktuře indukovan pohybem náboje (v tomto případě volných elektronů kyslíku), tak jak předpověděl ve své práci profesor Chua.







několika desítek tisíc prepisovacích cyklů. Řadiče flash paměti musí s tímto faktem počítat, používat samoopravné kódování a vyvažovat opotřebení rovnoměrně mezi bloky.

### Mikroprocesor MN101L\* firmy Panasonic

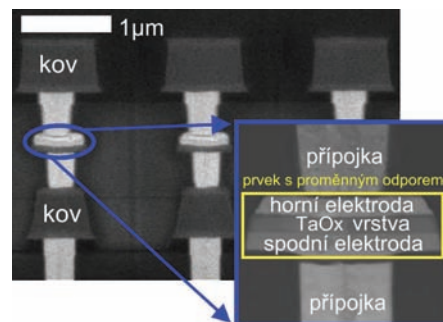
Panasonic začal jako první vyrábět a především prodávat mikroprocesor s ReRAM pamětí. Ta v procesoru zastává roli trvalé paměti a nahrazuje tak flash paměť. Jedná se „pouze“ o osmibitový mikroprocesor s 16 bitovým adresováním a taktováním kolem 10 MHz. Obsahuje 4 KiB RAM paměti a 64 KiB ReRAM paměti pro uložení programu i dat. Panasonic slibuje u procesoru MN101L možnost až 100 tisíc prepisovacích cyklů (u flash paměti pouze 10 tisíc), prepis dat během 10 ns (1/5 času u flash paměti) a z toho plynoucí 50 % úspory energie (procesor může delší dobu spát). Čip je vyráběn 180 nm CMOS procesem, doba udržení dat v ReRAM paměti je odhadována minimálně na 10 let (dle dokumentace, marketingové materiály uvádějí 100 let).

Tento mikroprocesor Panasonic je určen pro aplikace, kde je nedostatek energie k napájení. Například drobná zařízení napájená baterií, nebo Peltierovým článkem.

Dostupné materiály bohužel neobsahují obvodové schéma řadiče ReRAM paměti. Lze tak jen odhadovat, jak vývojáři vyřešili, aby proud potřebný pro čtení paměťové buňky nezměnil uloženou informaci. Jak ale ukazuje výzkum týmu Meng-Fan Chang z National Tsing Hua University na Taiwanu, pokud je napětí na memristoru menší než 300 mV, jeho hodnota se protékajícím proudem nemění. Řadič paměti pak ale musí pracovat s nízkým proudem, čtení informace je pomalejší (vzhledem k parazitním kapacitám) a je potřeba získat přesné referenční napětí pro komparátor.

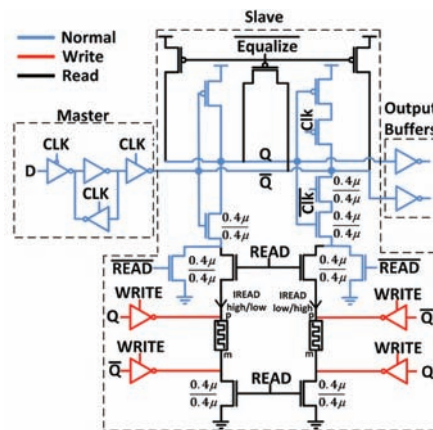
### Švýcarský návrh trvalé SRAM paměti

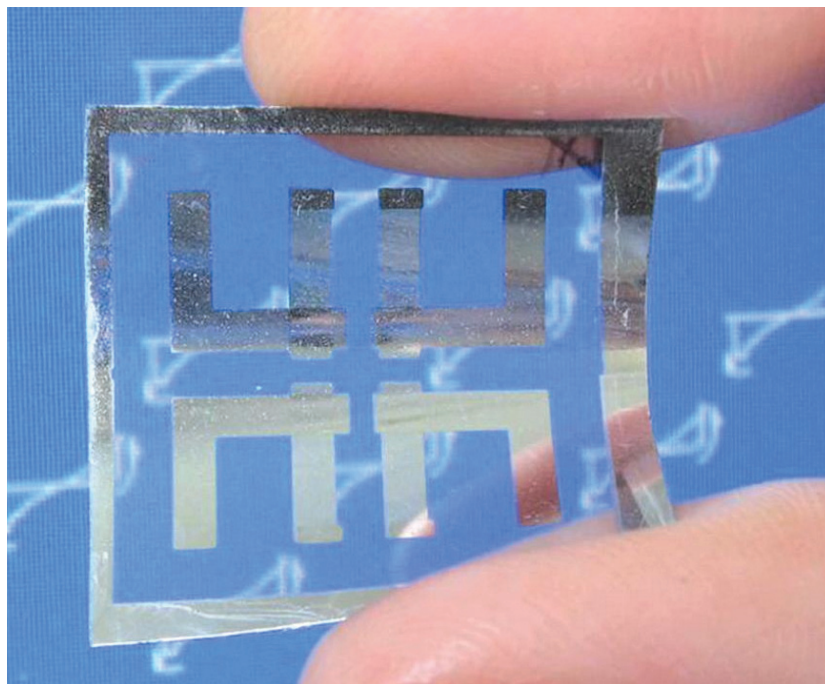
Programy vestavěných systémů jsou většinou navrženy tak, že se snaží držet procesor co nejdéle ve stavu spánku. Pokud přijde nějaká zajímavá událost (přerušení od časovače, změna napětí na vstupu), je procesor probuzen, program událost zpracuje a procesor opět uspí. Tím je dosahováno co nejnižší spotřeby. Pokud ale úloha vyžaduje udržovat nějaký stav, je potřeba během doby spánku ponechat napájenou RAM paměť, nebo tento stav uložit do trvalé paměti. Záleží samozřejmě na konkrétní aplikaci, ale často není jiná možnost než RAM ponechat za-



Snímek paměťové buňky v mikroprocesoru řady MN101L. Vyroben je standardním 180 nm CMOS procesem. Jako základ memristoru je použit oxid tantalů. Zdroj: Panasonic.

Zapojení trvalého klopného obvodu. Informace je v období, kdy je součástka bez napájení, uložena do memristoru. Zdroj: Ibrahim Kazi a kol.





Ohebný a průhledný čip s memristorovým chováním, který vyvinuli na Univerzitě v Rice. Zdroj: Rice University.

pnutou. To je i mnohem pohodlnější pro programátora.

Právě s takovou motivací byl veden výzkum na univerzitě Lausanne ve Švýcarsku. Jeho výsledkem je klopný obvod pamatující si svůj stav i po odpojení napájení. Čip vyrobili 100 nm CMOS technologií, memristory vytvořili z  $\text{TiO}_2$ . Čas potřebný pro zapsání hodnoty do memristoru je 10 ns. S použitím RAM paměti složené z takovýchto klopných obvodů by hypotetický procesor dosahoval úspory energie, pokud by prodlevy v nečinnosti (kdy by byla RAM paměť vypnutá) byly delší než 1,47 s.

### Závěr

Můžeme jen hádat, zda někdy budeme ukládat do ReRAM paměti data v osobních počítačích. Spo-

lečnost Elpida (nyní Micron) v roce 2012 oznámila, že má k dispozici první testovací vzorek o kapacitě 8 MiB (64 megabitů) a pracuje na vývoji čipu o kapacitě 128 MiB. Taková kapacita je jistě zajímavá z pohledu vestavěných zařízení. Proti současným SSD diskům založených na flash pamětech se ale stále jedná o kapacitu nižší o tři řády. Vývoj samozřejmě probíhá na mnoha frontách. Jednou z cest k rychlejším pamětím s větší životností je použití grafenu jako materiálu plovoucího hradla v buňkách flash paměti. Pro smazání takové buňky je potřeba menší napětí než u současných řešení. To jsme ale trochu odbočili od memristorů.

■ Lukáš Karas, 7. 3. 2014, AB 10/2014

## Revoluční objev spinové kapaliny

Myšlenka existence látky, ve které by spiny divoce měnily svůj směr, a přesto byly jejich stavy provázané i na dálku – obdobně jako je tomu v kapalině – pochází od amerického fyzika Phillipa Warena Andersona. Anderson za své práce v oblasti polovodičů, supravodivosti a magnetizmu získal Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1977. Spinovou kapalinu (QSL, *Quantum Spin Liquid*), jak se jím navrženému stavu hmoty začalo říkat, vymyslel v roce 1973. Od té doby se spíše zdálo, že jde jen o teoretickou konstrukci a připravit takový neobvyklý materiál je nemožné. O to větší bylo překvapení, když se po roce 2010 v různých laboratořích světa začali vědci tomuto cíli postupně přibližovat.

### Magnetizmus

Magnetizmus vzniká při pohybu nabitých částic. Pokud protéká vodičem elektrický proud, vytvoří se kolem něho magnetické pole. I samotný letící elektron generuje magnetické pole, a pokud letí po kruhové dráze, generuje dokonce elektromagnetickou vlnu. Magnetické pole je způsobeno i samotným spinem částic. Dokonce může jít o neutrální částici, například neutron. Každý spin se chová jako elementární magnet a v magneticky aktivních materiálech vytvářejí spiny pravidelné struktury uspořádané na velké vzdálenosti. Typickým příkladem je feromagnetikum, ve kterém je energeticky výhodné, aby sousední spiny měly shodný směr. Při vysokých teplotách jsou díky velkým teplotním fluktuacím spiny orientovány náhodně a látka jako celek nemá magnetické chování. Ochlazujeme-li vzorek, dojde při tzv. Curieově teplotě k fázovému přechodu. Vzniknou oblasti shodně orientovaných spinů, kterým říkáme Weissovy domény, a materiál se začne navenek chovat jako magnet.

V antiferomagnetiku je naopak energeticky výhodné, aby sousední spiny měly opačný směr. Při nízkých teplotách vznikají periodické struktury opačně orientovaných

**Feromagnetikum** – materiál, ve kterém je energeticky výhodné, aby sousední elementární magnety (magnetické momenty) měly shodný směr. Tyto látky, například železo, jsou schopné značné magnetizace ve vnějším magnetickém poli. Po odstranění magnetického pole si ponechávají permanentní magnetizaci, tj. zůstávají zmagnetizované i bez vnějšího magnetického pole. Typickým příkladem je krystalické železo, kobalt či oxid chromičitý  $\text{CrO}_2$ .

**Antiferomagnetikum** – systém spinů ve kterém je energeticky výhodné, aby sousední magnetické momenty měly opačný směr. Při nízkých teplotách se vytvářejí periodické struktury opačně orientovaných momentů. Příkladem antiferomagnetika může být supravodič  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ , dále chróm, slitina železa a manganu nebo oxid niklu  $\text{NiO}$ .

**Spinové sklo** – magnetický materiál, který má za nízkých teplot chaotickou orientaci magnetických momentů. Jejich uspořádání připomíná klasické sklo. Vazbová energie sousedních magnetických momentů se mění náhodně místo od místa.

Jednoduchá představa spinové kapaliny.  
Zdroj: Francis Pratt/iSIS/STFC.





**Spinová kapalina** – magnetický materiál, který má za nízkých teplot chaotickou orientaci elementárních magnetů (magnetických momentů či spinů). Jejich uspořádání připomíná klasickou kapalinu. Na malých vzdálenostech se nevytváří žádné pravidelné struktury, nicméně kvantové stavy jsou propleteny i na velké vzdálenosti. Chaotické chování spinů zůstává, na rozdíl od jiných kapalin, i při velmi nízkých teplotách.

**Curieova teplota** – viz strana 93.

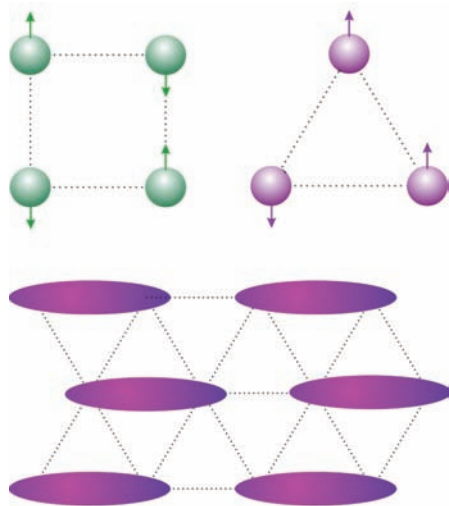
spinů. Vlastnosti spinu v jednom místě souvisí s vlastnostmi jiného spinu, který může být i ve velké vzdálenosti. Hovoříme o tzv. korelaci na velkou vzdálenost. Teplota přechodu mezi touto uspořádanou fází a vysokoteplotní neuspořádanou fází se nazývá Néelova teplota podle francouzského fyzika Louise Néela. Antiferomagnetika se využívají v dnešních harddiscích, kde jev obří magnetorezistence umožnil mnohem hustší zápis informací než v předchozí generaci harddisků. Při nízkých teplotách se běžné objemové antiferomagnetikum stane tzv. Mottovým izolátorem. Ke zcela odlišnému chování by podle teorie mělo dojít ve dvojrozměrných mřížích spinů.

### Podstata spinové kapaliny

V roce 1973 Phillip Anderson teoreticky zkoumal vlastnosti dvojrozměrné mříže spinů s antiferomagnetickým chováním (preferovaná je opačná orientace sousedních spinů). Uvažujme nejprve čtvercovou mříž. V základním stavu s nejnižší energií mají všechny sousední spiny opačný směr. Pokud je ale mříž trojúhelníková, mohou mít v elementární buňce mříže opačný směr jen dva spiny, třetí už bude s některým ze spinů shodný.

Počet základních stavů trojúhelníkové elementární buňky je značný: každá strana trojúhelníku může hostit shodnou dvojici spinů buď s orientací „vzhůru“ nebo s orientací „dolů“. Celkový počet stavů s nejnižší energií je tedy 6. Pokud budeme z elementárních buněk vytvářet celou rovinu, budou se dvojice opačně orientovaných spinů z různých elementárních buněk párovat tak, aby výsledný spin základního stavu byl nulový. Počet takových základních stavů je obrovský, při velmi nízké teplotě by se měl realizovat jeden jediný. Anderson ale poukázal na to, že v kvantové teorii je možná superpozice těchto stavů, která bude také základním stavem s nejnižší energií. Pokud by se realizovala kvantová superpozice mnoha základních stavů, v níž by každý stav byl zastoupen se stejnou amplitudou, může orientace každého jednotlivého spinu při nízké teplotě kvantově fluktuovat, přitom bude jeho stav kvantově propletený se stavy všech ostatních spinů. Výsledkem je chování obdobné kapalině, i při teplotě blízké absolutní nule dochází v každém místě k divokým fluktuacím jednotlivých spinů, systém je ale přesto v nejnižším možném energetickém stavu. Anderson předpokládal, že takové látky by mohly být klíčem k vysvětlení vysokoteplotní supravodivosti a mohly by být využity v mnoha nových techno-

Nahoře: 2D mříže spinů. Dole: základní stav na trojúhelníkové mříži spinů, fialově jsou označeny dvojice vázaných, opačně orientovaných spinů. Kresba autor.



logiích. Za hlavní důkaz vzniku spinové kapaliny se považují exotické excitace, které by měly mít racionální kvantová čísla.

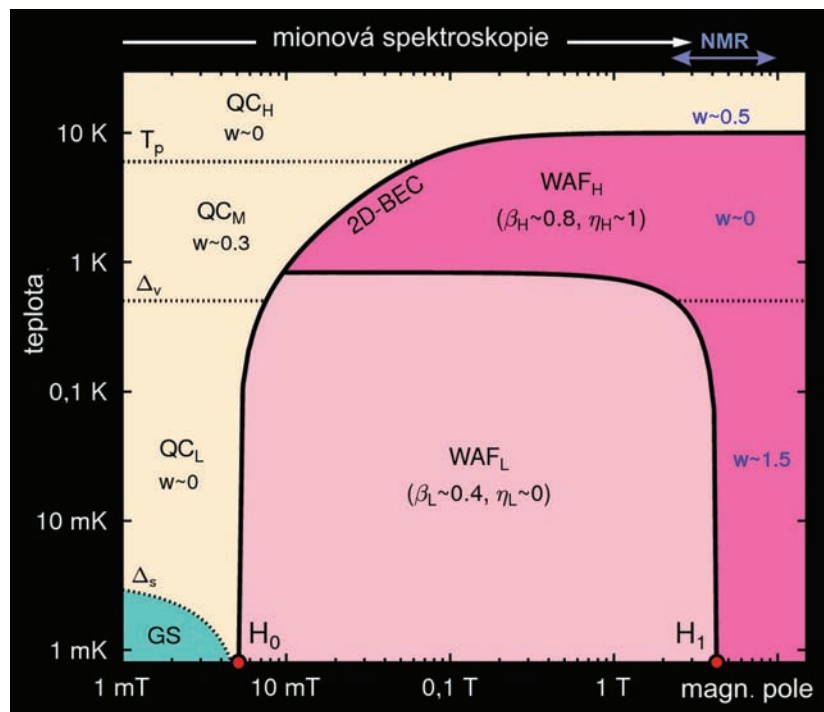
## Hledání spinové kapaliny

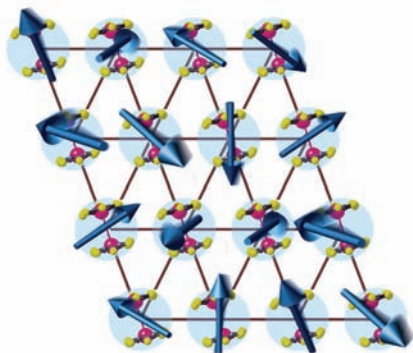
Experimentální potvrzení či vyvrácení existence spinových kapalin se dlouho nedařilo. Teprve v roce 2010 přišel první dílčí úspěch. Při spolupráci univerzit ve Stuttgartu a ve Würzburgu se podařilo teoreticky ukázat, že by chování spinové kapaliny mohla mít i plošná šestiúhelníková struktura obdobná grafěnu. Hlavními kandidáty se staly organické soli s trojúhelníkovou mříží –  $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ ,  $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  nebo vzácný minerál herbertsmitit s šestiúhelníkovou mříží ( $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ ). V roce 2011 připravil tým Ivana Borovice z Brookhavenské národní laboratoře umělý materiál ze střídajících se vrstev oxidů mědi (kuprátů) a oxidů lanthanu. Mezilehlé lanthanové vrstvy omezily interakci vrstev oxidu mědi, jejichž vzdálenost byla pouhých 0,66 nm. Vlastnosti nanesených vrstev byly zkoumány ve švýcarském Institutu Paula Scherera, tamní skupinu vedl Elvezio Morenzoni. Za pomoci speciálně vyvinuté mionové spektroskopie se ukázalo, že vzorky s více než třemi vrstvami vykazují klasické antiferomagnetické chování a při nízké teplotě mají vlastnosti Mottova izolátoru. Vzorky s jednou nebo dvěma vrstvami oxidu mědi ale vykazovaly divoké fluktuační spinů, které se zvětšovaly s klesající teplotou. Vše nasvědčovalo tomu, že by mohlo jít o spinovou kapalinu.

V témže roce (2011) zkoumal kolektiv vedený Francisem Pratterem ve Velké Británii malý vrstevnatý vzorek  $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ . Tyto experimenty byly vyvrhozením práce trvající celých pět let.

**Obří magnetorezistence** – ovlivnění elektrického odporu látky interakcí spinu elektronu s magnetizací materiálu. Je-li materiál nanesen v několika nanovrstvách, může měnit se magnetizace některé z vrstev podstatnou měrou ovlivnit elektrický proud protékající obvodem. Toho lze využít například ke čtení informace zapsané na harddisku. První čtecí hlava založená na tomto principu byla vyrobena v roce 1997.

Zkoumaný vzorek vykazoval dva důležité fázové přechody. V levé dolní oblasti diagramu je vzorek v základním stavu GS (Ground State), kde má chování spinové kapaliny. Při vyšších teplotách přechází do kvantové kritické fáze QC (Quantum Critical) a při vyšších polích do slabé antiferomagnetické fáze označované WAF (Weak Antiferromagnetic). Zdroj: Nature.





Teoretická představa spinové kapaliny. Zdroj: Science.

V kolektivu byli odborníci z neutronového a mionového zdroje ISIS Appletonovy-Rutherfordovy laboratoře, z Oxfordské univerzity a ze švýcarského Institutu Paula Scherera. Za pomoci mionové spektroskopie se jim poprvé podařilo pořídit fázový diagram chování vzorku pro teploty od 1 mK do 10 K a pro vnější magnetické pole od 1 mT do 10 T.

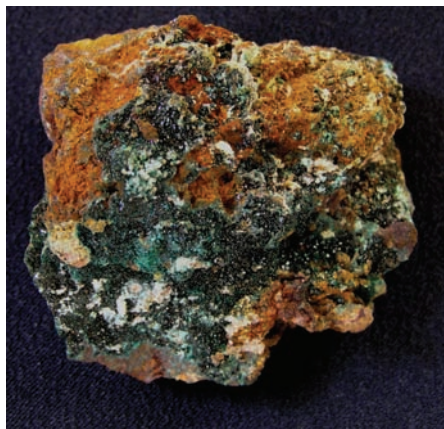
V roce 2012 se podařilo vědcům z Pařížské univerzity a dalších pracovišť prokázat chování spinové kapaliny u vzorku připraveném z *kapelasitu* (antiferomagnetická látka polymorfni s herbertsmitem). K největšímu úspěchu došlo na přelomu roků 2012 a 2013, kdy se vědeckému týmu z MIT pod vedením profesora Yanga Lee podařilo po desetiměsíčním úsilí uměle připravit relativně velký vzorek herbertsmitu o rozměrech  $3 \times 6 \times 0,8$  mm. Ve vzorku se střídaly vrstvy měděných atomů se spinem  $1/2$  oddělené od sebe vrstvami obsahujícími nemagnetické zinkové atomy. Vzorek byl pečlivě zkoumán neutronovou a rentgenovou diffraktometrií (v NIST) a laserovou spektroskopií se střední vlnovou délkou 800 nm. Při nízkých teplotách byla prokázána fáze spinové kapaliny se zcela odlišným chováním od Mottova izolátoru. Práce týmu MIT je považována za nejprůkaznější důkaz existence spinové kapaliny.

## Závěr

Objev spinových kapalin s sebou pravděpodobně přinese revoluci v uchování počítačových dat, ovlivní vývoj magnetických senzorů, kvantových počítačů, kvantové kryptografie a dalších technologií. Po feromagnetikách a antiferomagnetikách se objevuje třetí forma magnetických látek se zcela výjimečnými vlastnostmi. Chování spinových kapalin je blízké vysokoteplotní supravodivosti, a proto mohou spinové kapaliny přispět k objasnění vysokoteplotní supravodivosti a umožnit přípravu nových materiálů supravodivých za vysokých teplot. Aplikační možnosti spinových kapalin lze v tuto chvíli jen obtížně předpovědět.

■ Petr Kulhánek, 4. 10. 2013, AB 30/2013

Přirodní minerál herbertsmitt. Zdroj: Kaygeedeeminerals.



## Americká anabáze

Naše cesta do Spojených států na sklonku prázdnin 2013 byla expedicí k počátkům. Jednak k počátkům vesmíru – v Brookhavenské národní laboratoři na Long Island totiž dokáží vytvořit stav látky, která byla ve vesmíru do první desetiny mikrosekundy. A také k počátkům kosmonautiky – ve Spojených státech jsou v různých muzeích uchovány unikátní díly prvních družic, návratové kabiny lodí Apollo, lunární moduly, které už nemohly letět na Měsíc z důvodu krácení rozpočtu, raketoplány, letadla, rakety, skafandry, přístroje a další cenné exponáty. Snad následující vzpomínky poněkud odlehčí náročné čtení, kterým jsi se, milý čtenáři, probojoval až do tohoto místa.

*Kompletní expedice pózující před dipólovým magnetem z urychlovače RHIC v Brookhavenské národní laboratoři na Long Island.*







New York. Jeden z mnoha pohledů na Manhattan.

Letadlová loď Intrepid zakotvená v New Yorku na řece Hudson.



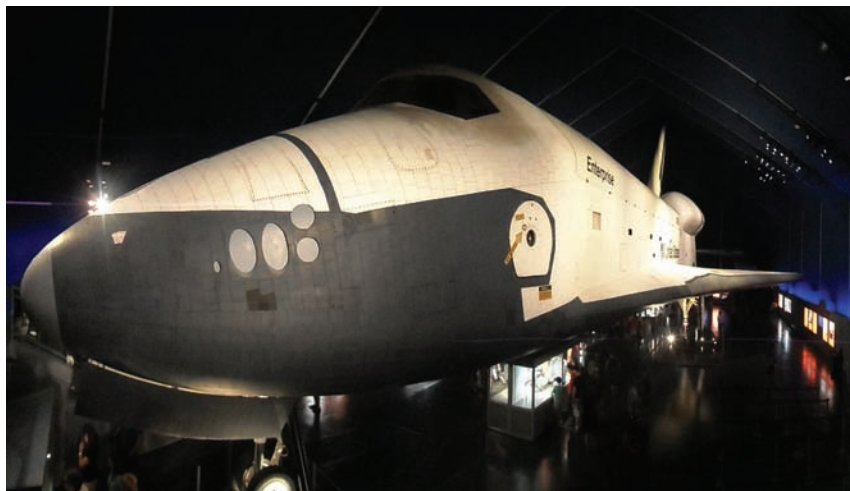
Expedice se zúčastnily dvě desítky fantastů a snílků, které už málokdy něco překvapí. Na druhou stranu o různé „nestandardní situace“ nebývá na našich cestách nouze, většinou ale až v cílové zemi. Tentokrát nás poněkud vykojelo z rovnováhy už francouzské letiště v Nice, kde jsme přestupovali jak cestou tam, tak zpět. Na mezinárodním letišti, kde se vyskytuje mnoho cizinců, hovoří naprostá většina personálu jen francouzsky. Je vlastně jedno, jak hovoří, protože vás stejně dokážou jen poslat za někým jiným. Po výstupu z letadla narazíte na cedulky „*Connecting Flights*“. Pokud si myslíte, že podle nich naleznete cestu k dalšímu letadlu, mýlíte se. To je jen začátek bojovky, kterou připravil letištní personál. Po mnoha cedulích a 700 metrech vláčení kabinových zavazadel dorazíte ke dveřím, na kterých je jiná cedulka, tentokrát s nápisem „*Closed*“. Možná, že personál nemluvící anglicky ani netuší, co je na cedulích napsáno a považuje je pouze za vhodnou dekoraci mezinárodního letiště. Chcete si po náročné cestě odpočinout v pohodlné sedačce v letištní hale? Zapomeňte na to, je jich tu jako šafránu, válet se ale klidně můžete na trávniku před letištěm. Pokud chcete zažít atmosféru létání z dob našich předků, nemusíte cestovat ani do Afriky, ani do Jižní Ameriky nebo do zemí bývalého Sovětského Svazu. Skvělou atrakci a dokonce zdarma máme v podstatě za humny.

## New York

New York je rušné město doslova nabitě neopakovatelnou atmosférou. Černoši tančící v metru, běžci v Central Parku, barevný Times Square, Brooklynský most a samozřejmě Empire State Building a Socha Svobody. Ubytování jsme byli v relativně levném hostelu v Harlemu. Hostelu vévodila korpulentní černoška Líza. Za ubytování jsme platili stodolarovými bankovkami a Líza předvedla nádhernou kejklířskou show. Při počítání obnosu létaly bankovky vzduchem stejně jako sviští karty v rukou kouzelníka. A na závěr jedna stodolarovka jako mávnutím proutku zmizela. Líza hledala i pod kobercem, ale stodolarovka nikde. Tenhle příběh měl šťastný konec pro obě strany. Líza byla spokojená, že vydělala 100 dolarů. A my také, protože jsme shlédli nádherné vystoupení a o nic nepřišli. Ptáte se, jak je to možné? Líza byla sice zručná kouzelnice, ale mizerná počtářka. A tak chyby v součtech bohatě vykompenzovaly finanční transakci po černošsku.

Naším hlavním cílem přímo v New Yorku byla válečná loď Intrepid s raketoplánem Enterprise. Letadlová loď USS Intrepid třídy Essex

byla zařazena do služby 16. srpna 1943 v tichomoří. Účastnila se bojů na Kwajalein, Paulských ostrovech i Okinawě. Byla celkem třikrát vážně zasažena letouny kamikadze, jedenkrát torpédem. Tím si vysloužila titul nejčastěji zasahované lodi piloty kamikadze. Během své služby zničila 600 nepřátelských letadel. Krátce po překlasifikaci na „*anti-submarine carrier*“ byla nasazena ve třech turnusech ve válce ve Vietnamu. Počátkem roku 1965 pracovala také pro NASA v programu Gemini. Dne 23. března 1965 vyvolila posádku Gemini 3, druhého pilotovaného letu USA. V březnu 1974 byla vyřazena z činné služby. V srpnu 1982 zakotvila v New York City na řece Hudson a stala se tak plovoucím muzeem. A konečně v roce 2011 se stala domovem pro raketoplán Enterprise.



Raketoplán Enterprise.

Na palubě letadlové lodi je umístěno mnoho ukázek vojenské letecké techniky. Namátkou se nabízí k prohlídce A-12 Blackbird, F-15 Tomcat, helikoptéry Cobra ale i MiG-17. Málo známou epizodou z jejího života je služba pro FBI. Při útocích 11. září 2001 došlo ke zničení jednoho z důležitých center FBI. Proto se FBI obrátila na muzeum, zda by jim nezapůjčili letadlovou loď jako plovoucí velitelství. Na palubu se tak nalodilo kolem 5 000 příslušníků FBI a paluba sloužila i pro odlety vrtulníků. Součástí přístavního mola muzea je 97 metrů dlouhá kotvící ponorka USS-Growler (SGS-577) a legenda francouzsko-britského civilního letectví Concorde.

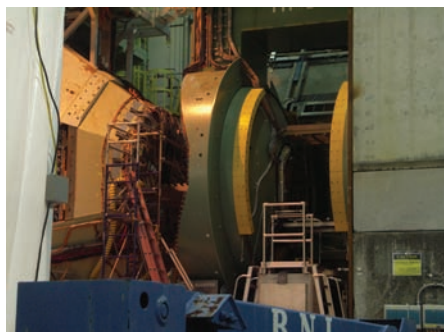
*Intrepid v číslech:* délka 265,8 m; šířka 30,8 m; ponor 8,7 m; výtlač 27 100 t; pancéřování 38 až 102 mm; počet letadel 90 až 100; posádka 2 600 osob.

### Brookhavenská národní laboratoř

Brookhavenská národní laboratoř na Long Island je jednou z deseti národních laboratoří Spojených států. Jde o vědecké městečko žijící

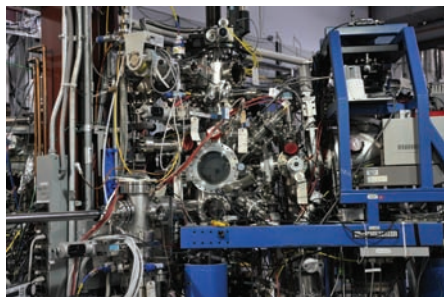
Brookhavenská národní laboratoř, urychlovač Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC).





Brookhavenská národní laboratoř, pohled do nitra detektoru Phoenix, ve kterém se zkoumá vesmírná pralátka. Celkový pohled na detektor je na straně 128.

Optická linka u Národního synchrotronového zdroje světla NSLS v Brookhavenské národní laboratoři.



vlastním životem, ne nepodobné evropskému středisku jaderného výzkumu CERN. K cestě jsme si museli zapůjčit automobily, kterými jsme se snadno dostali z New Yorku do cíle.

Poněkud nás ovšem rozčarovala americká GPS, kterou jsme si v půjčovně nechali dát do jednoho automobilu. GPS neustále kladla dotazy, na které bylo možné odpovědět jen binárně, tedy ANO, nebo NE: „Znáte toto město?“ „Chcete nakoupit v supermarketu?“ „Potřebujete k pumpě?“ „A co cukrárna, nešikla by se?“. Ukázalo se, že GPS je navržena tak, aby ji zvládnul obsluhovat žák pomocné školy, ale bohužel do ní nešlo zadat souřadnice, čímž nám byla zcela k nepotřebě. Cestu jsme nakonec zvládli i bez GPS. Při parkování u vchodu do Brookhavenské národní laboratoře jsem elegantně zacouval na místní parkoviště (v autě byla zpětná kamera, takže to byla hračka). Tento nevidaný čin zcela vyděsil místní policisty. Následující rozhovor byl ukázkou nepochopení na obou stranách: „Co jste to proboha udělal? Vy jste couval! Takový nebezpečný manévr.“ „Ano, couval, to my v Evropě děláme běžně...“ „My ve Spojených státech necouváme. To je neuvěřitelné, jak jste to mohl dokázat? Takové nebezpečí!“ V podobném duchu se hovor odvíjel několik minut, až se rozmělnil do ztracena.

Domluvená návštěva měla přesný harmonogram. Nejprve jsme si prohlédli *National Synchrotron Light Source* – zdroj elektromagnetických vln širokého rozsahu, které vznikají v synchrotronu. Využívají se k nejrůznějším experimentům, například k zobrazování složitých organických molekul. Komplikované optické lavice byly podobné těm, které jsme při expedici Aurora viděli na zařízení FLASH v německém DESY. Poté jsme šli do tunelu urychlovače RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*), ve kterém se zkoumá kvarkové-gluonové plazma vznikající při srážkách jader těžkých prvků (například zlata). Obdobný stav látky byl ve vesmíru v časech kratších než 10 mikrosekund. Třešničkou na dortu byla návštěva detektoru Phoenix, na kterém se tyto výzkumy provádějí. Na zpáteční cestě z laboratoře jsme neodolali a úspěšný den zakončili koupáním v Atlantiku na nádherné pláži.

## Cradle of Aviation Museum

Muzeum kolébky kosmonautiky a letectví je umístěno na Long Island a z New Yorku je nejrychlejší doprava vlakem LIRR (*Long Island Rail Road*) a poté místním autobusem. Bylo nás 20, a tak jsme se u kasy LIRR poptali, zda nemají nějakou skupinovou slevu. Paní za přepáž-



kou se zamyslela a vysvětlila nám, že na slevu nás musí být 30 a že 30 jízdenek stojí výrazně méně než 20 jízdenek. Takhle zvláštní matematika měla nepochybně své hluboké zákonitosti, které jsme nezkoumali. Prostě jsme koupili 30 jízdenek pro 20 pasažérů a jelo se.

Muzeum je obrovské, vstupné mírné, ve skupině vyšlo jen 8,5 USD na osobu. Naším hlavním cílem byl naprostý klenot kosmonautiky – lunární modul Apolla 18, který byl postaven, ale do vesmíru už z důvodů finančních škrťů

neletěl. Pokladní byla vlídná, ale na dotaz, zda jde o muzeum, kde je umístěn slavný lunární modul Apolla, odpověděla, že netuší, že v muzeu je spousta exponátů a nemůže si přece každý pamatovat. Nakonec nám podala seznam exponátů. V tu chvíli bylo jasné, že jsme na správném místě ve správnou dobu a lunární modul bude jen náš.

Nakonec šlo podle cedulky o lunární modul Apolla 19 (lety Apollo 18 až 20 byly z finančních důvodů zrušeny). Vidět na vlastní oči tento obří modul zblízka bylo jedním z nehlubších zážitků ve Spojených státech. Dokonce se dochoval jediný postavený trenažér, na kterém kosmonauti trénovali přistání na Měsíci. Prohlédli jsme si i zaprášené skafandry (s autentickým prachem z Měsíce), dobovou techniku a potraviny, kterými se cestovatelé na Měsíc živili. I kdybychom už neviděli nic jiného, tak pro tento okamžik stálo za to do Ameriky jet.

## Washington

Do Washingtonu jsme přejeli autobusem společnosti Megabus, cesta byla příjemná a zcela bezkonfliktní. Nebudu čtenáře unavovat popisem Washingtonu. Samozřejmě jsme se podívali na Bílý dům, navštívili



Lunární modul Apolla 19. Cradle of Aviation Museum, Long Island.

První družice – počátky kosmonautiky. Smithsonian National Air and Space Museum, Washington.







Ohořelá kabina Apolla 11. V ní se astronauté po úspěšném přistání na Měsíci vrátili zpět na Zemi.

Skafoandr, ve kterém se v roce 1971 procházel po Měsíci astronaut David Scott. Skafoandr má 22 vrstev a dodnes je na něm měsíční prach.



Kapitol, prohlédli si nesčetně památníků, Arlingtonský hřbitov i další zajímavosti, jako asi každý turista.

Ubytování na předměstí Washingtonu v dosahu metra jsme měli domluvené předem. Krásnému hostelu v zahradním domku vévodila Lorain. Odkvetlá kráska s poodhalenými prsy připomínala prostitutku z prvorepublikových filmů. Na úvod vychrlila desítky zákazů a příkazů, z nichž si pamatuji jen dva: Věci v lednici musí být popsané jménem a datem odjezdu a igelity v postelích na pokojích se nesmějí sundávat. První příkaz se ukázal jako zbytečný, jeden ze svérázných členů personálu vypil z lednice jakýkoli alkohol, ať označený, či neoznačený. Někdy se mu podařilo dojít na svůj pokoj, jindy cestu už nezvládl a ulehl přímo na schodech. Všichni doufáme, že mu chutnalo víno, které jsme upravené speciálně pro něho zanechali v lednici při našem odjezdu. Druhý příkaz – nesundávat igelity z postele – se ukázal jako prozíravý až moudrý. První noc jsem si s igelitem pod sebou připadal jako na nemocničním lůžku. Druhý den jsem proto porušil zákaz a igelit sundal. Vlastně jen poodhrmul. Zaschlé genetické stopy generací dávno minulých mě přinutily igelit rychle vrátit zpět.

Druhou noc v hostelu nás ve dvě ráno vzbudil hluk. Rozčilená hostel-mamá zavolala policii. Podstata problému byla banální, řešení po Americku pro nás fascinující. Ze zahrady totiž do bytu Lorain vlezl mýval. Lorain zavolala policisty a očekávala od nich pomoc. Policisté jí ale vysvětlili, že mýval je chráněné zvíře a pokud se mu zalíbil její pokoj, je to teď jeho obydlí a Lorain už ve svém bytě nebydlí. Takové řešení se ovšem Lorain nelíbilo a navrhla, že mývala vyžene. Policista ji upozornil, že pokud to udělá, dostane 10 000 dolarů pokutu. Hlasité handrkování o osudu Lorain a mývala pokračovalo ještě drahnou dobu a jeho výsledek bohužel neznáme. Znavení jsme šli pokračovat ve spánku. Na našich pokojích totiž žádná chráněná zvířata nebyla. A pokud by žila, vypořádali bychom se s ní bez policejní asistence.

### Národní muzeum letectví a kosmonautiky

Naším hlavním cílem ve Washingtonu byl Smithsonian Národní muzeum letectví a kosmonautiky. Toto muzeum patří do skupiny Smithsonianových muzeí provozovaných Smithsonovou nadací, proto je vstup do něho zcela zdarma. Část exponátů je umístěna v rozsáhlé budově v centru Washingtonu a část v obřím leteckém hangáru na periferii města. Doprava do druhé části je relativně komplikovaná, ale rozhod-

ně stojí za to. V muzeu jsou různé pozůstatky kosmických lodí a družic, například ohořelá kabina Apolla 11, druhý ze tří lunárních modulů Apollo, které z důvodu krácení rozpočtu k Měsíci neletěly, raketoplán Discovery, pouzdro sondy Stardust, které se vrátilo na Zemi, a mnoho dalších zcela unikátních exponátů. Z letadel se můžete obdivovat nadzvukovému letounu Blackbird, který dokáže letět rychlostí vyšší než 3 000 km/h, nebo si prohlédnout bombardér Enola Gay, který svrhl atomovou bombu na Hirošimu. V muzeu se můžete podívat i na slavnou raketu V2. Období studené války je zde zastoupeno jak sovětskou raketu SS 20, tak jejím americkým protějškem Pershing. Podrobná prohlídka všech exponátů by zabrala několik dní, my jsme věnovali jeden den části v centru Washingtonu a druhý leteckému hangáru na periferii.

### Pensylvánské státní parky

Na závěr pobytu jsme přejeli do malého pensylvánského městečka Wilkes-Barre, ze kterého jsme podnikali výpady do místní restaurace a národních parků. V různém složení jsme se zapůjčenými auty navštívili celkem tři parky. První z nich má poetický název *Moonlake State Park*, jde o malé jezero uprostřed lesa, které slouží jako chovný rybník s bahnitým dnem. Koupání je sice zakázáno, ale to nás neodradilo. Jde o minipark, který projdete za hodinu, je to krásná procházka krajinou připomínající jihočeské rybníky. Druhý park, *Ricketts Glen State Park*, je jinou třídou. Rozkládá se v okolí soutoku dvou potoků, na nichž je velké množství vodopádů. Nejvyšší z nich padá do hloubky asi 30 metrů. Cestu kolem vodopádů vybudoval místní hoteliér Bruce Ricketts kolem roku 1890. Podle něho byl později park pojmenován. V dolní části parku se nacházejí až 500 let staré stromy. Posledním navštíveným parkem byl *Worlds End State Park*, obří říční rokle s okolními lesy. Koupání v řece bylo příjemným zpestřením tohoto výletu.

### Zpátky domů

Necelé tři týdny strávené v Americe mně neumožnily pochopit odlišnou mentalitu tamních obyvatel. Nepochybně šlo ale o zajímavou zkušenost umocněnou skvělou partou lidí. Lunární modul, raketoplán a letadlová loď *Intrepid* patřily k mým nejsilnějším zážitkům. Splnil se mně jeden velký klukovský sen.

■ Petr Kulhánek, červen 2014



*Moon Lake State Park.*

*Rickett Glens State Park, jeden z desítek vodopádů.*



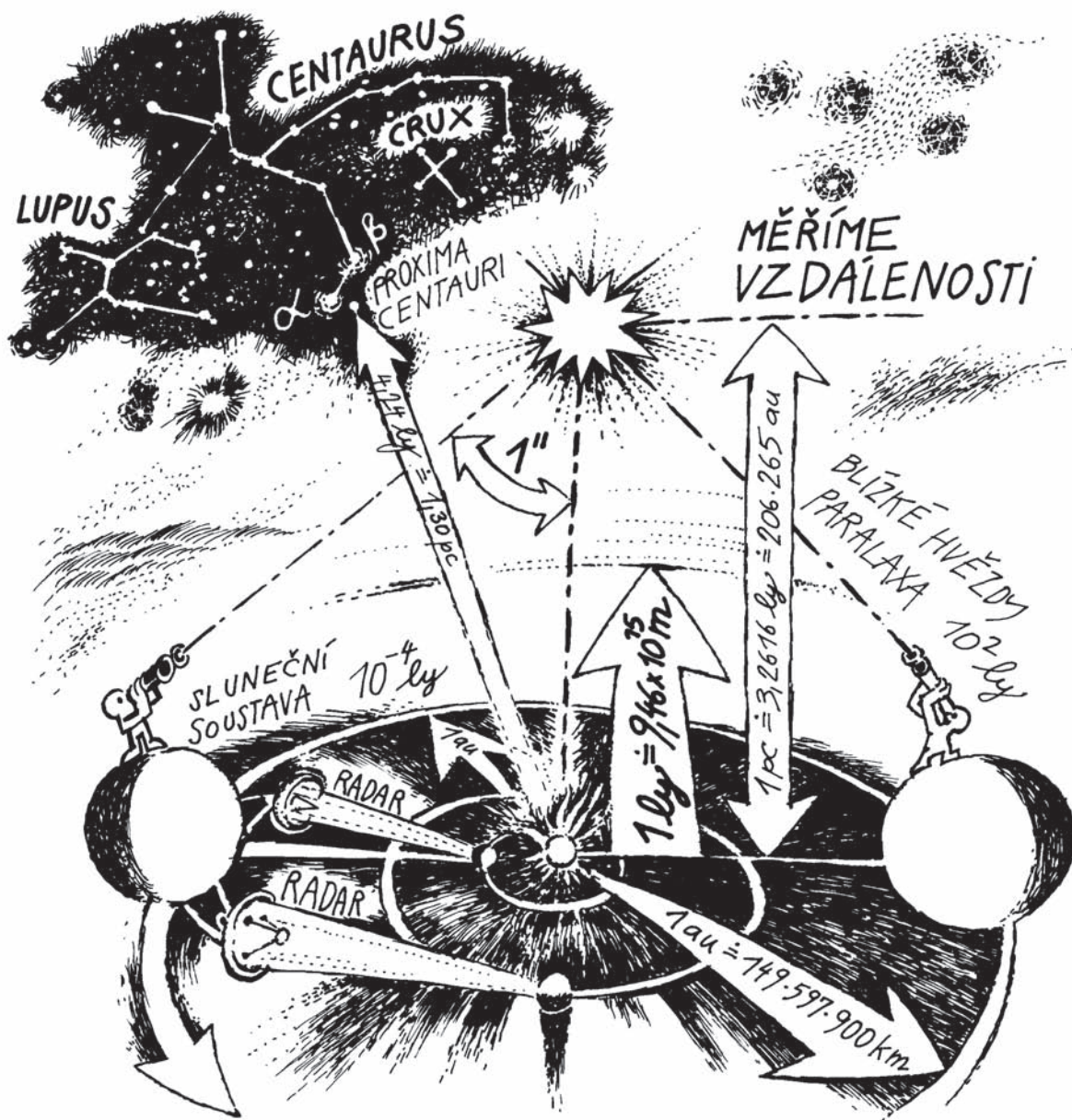


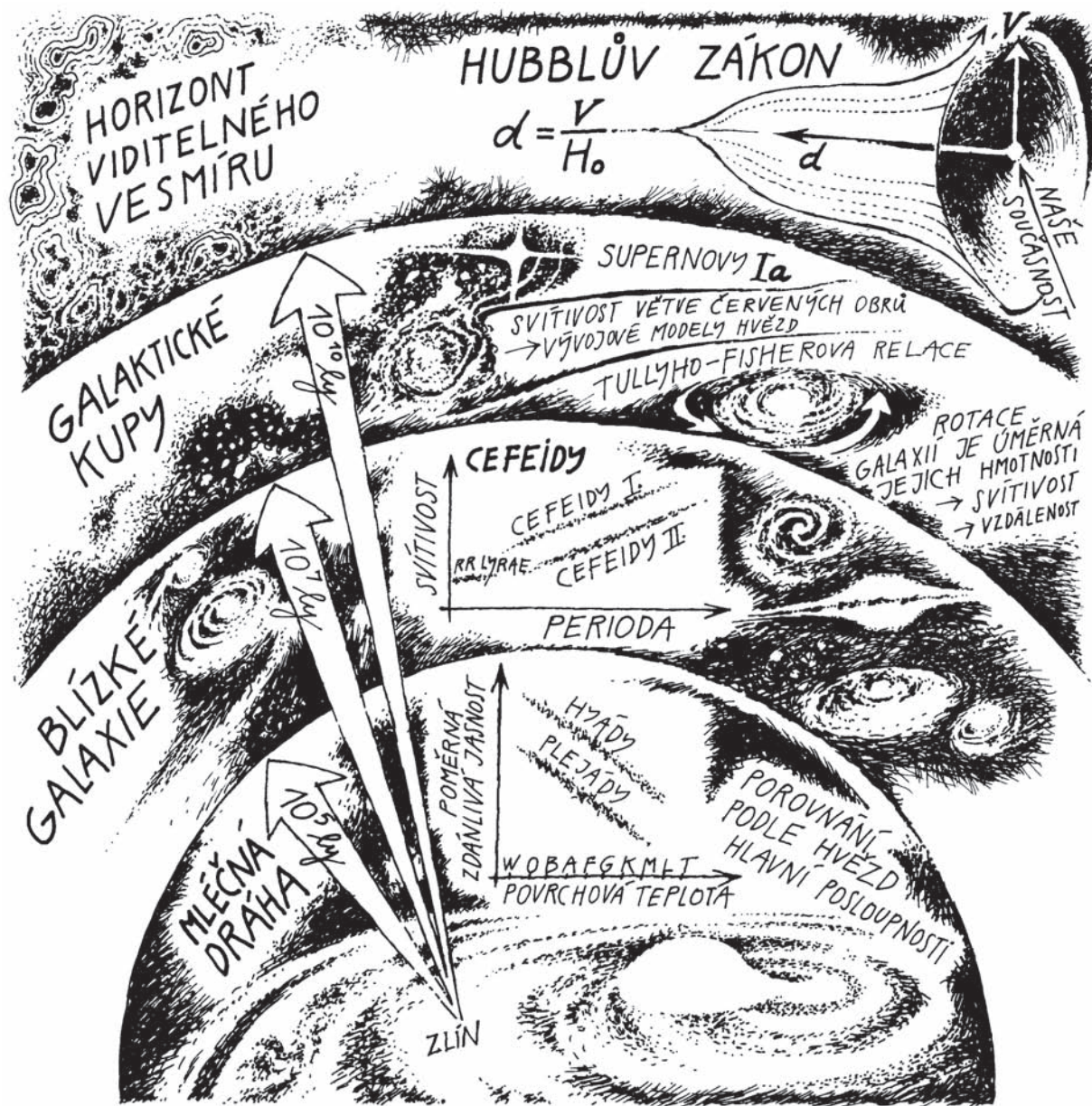




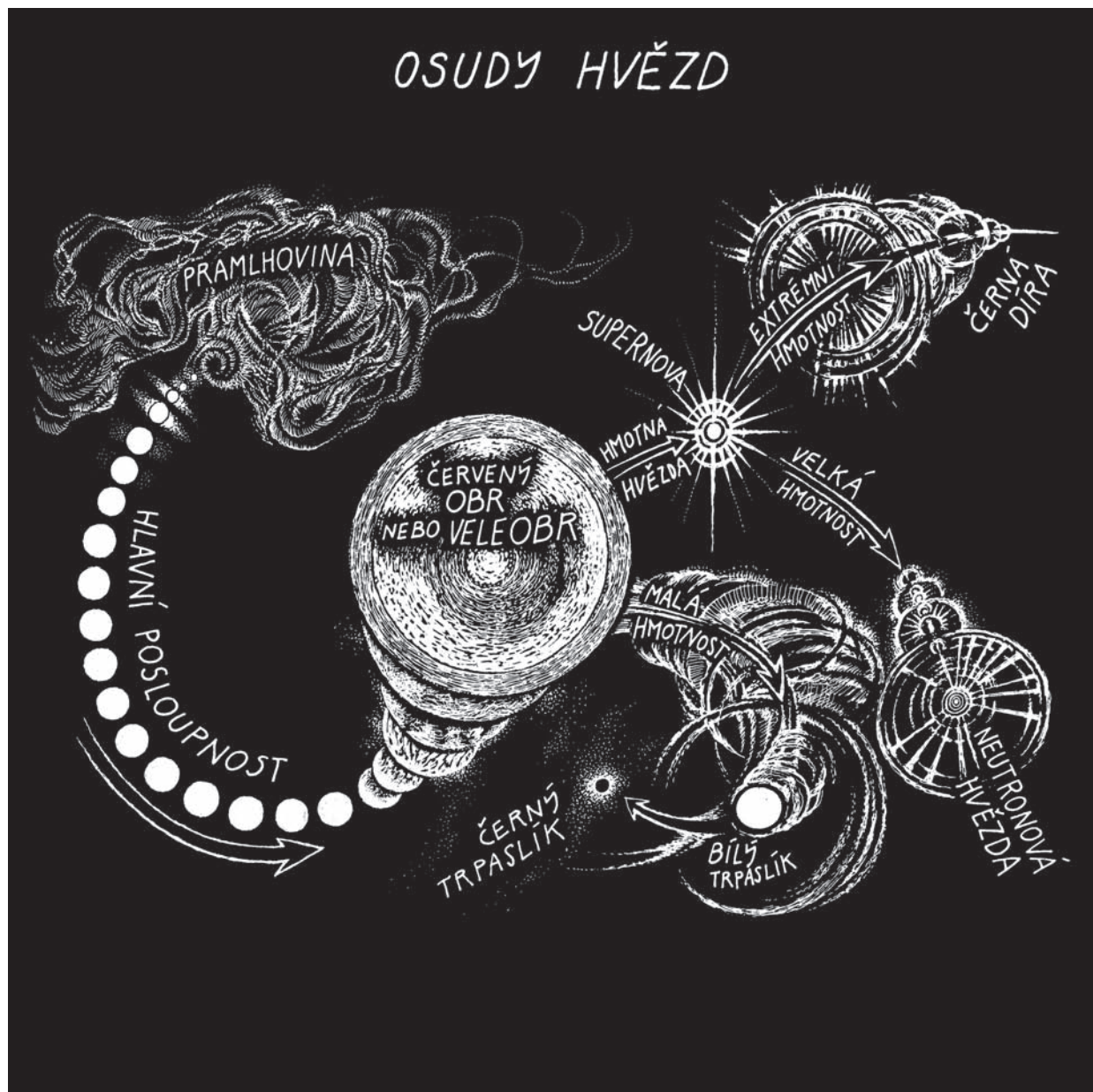
**PŘÍLOHY**



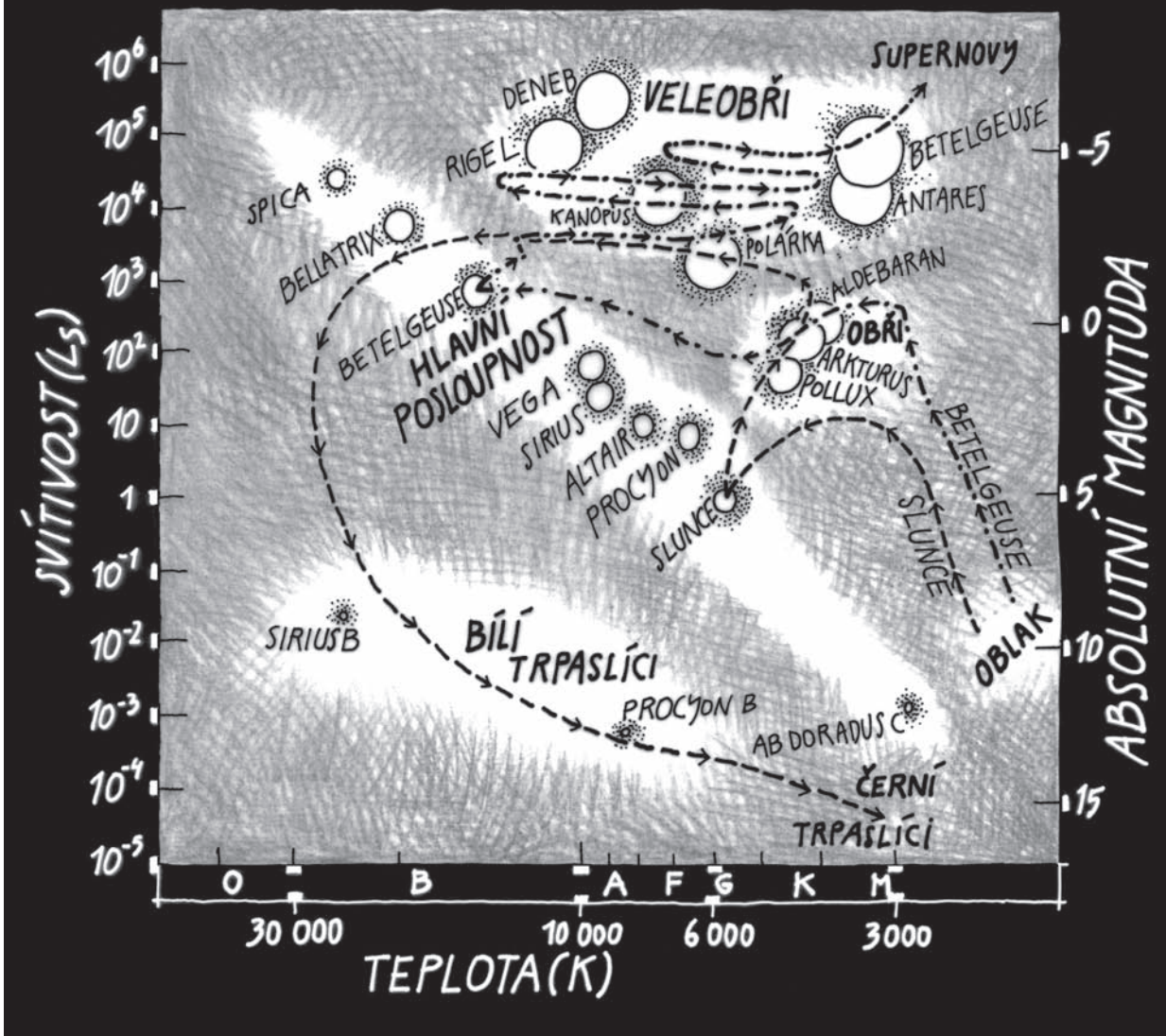








# HERTZSPRUNGŮV- RUSSELŮV DIAGRAM







# Rejstřík

## A

ACS 148  
Albedo 28  
Alfa efekt 57  
ALMA 79  
Antiferomagnetikum 327  
Antihmota 209  
Antiproton 217  
APEX 107  
Apocentrum 52  
Apollo 197  
Archea 42  
Ariane 231  
Asociace 89  
Astron. jednotka 29  
Atom 129  
ATLAS 135  
Atlas V 30  
Atraktor 161  
Aurorální ovál 72  
Axion 252

## B

Baktérie 43  
Baryonová látka 137  
Baryonové číslo 96  
Baryony 96  
Bílkoviny 45  
Bílý trpaslík 124  
Binární násobky 324  
Bit 318  
BLAST 81  
Blazary 198  
Bosony 277  
Byte 318

## C

Cannyho algoritmus 163  
Cassini 37

CCD 101  
CDF 136  
CERN 273  
CMOS 280  
CMS 135  
CNSA 197  
COBE 171  
Comptonův rozptyl 167  
COROT 85  
COSMOS 200  
Curiosity 21  
Curieova teplota 93  
CVD 313

## Č

Čerenkovo záření 221  
Čerenkovův detektor 210  
Černá díra 104  
Červený gravitační posuv 104

## D

D-Zero 136  
Deep Impakt 64  
Delta II 99  
DESY 69  
Délka vzestupného uzlu 53  
Diamant 311  
Disperze 304  
DNA 44

## E

Elektroakustický měnič 294  
Elektromagnetická interakce 97  
Elektron 16  
Elektronegativita 315  
Elektronvolt 100  
Elektrosprej 206

Entropie 245  
ESA 230  
Eukaryota 43  
EURECA 143  
Eutektická směs 42  
Excentricita 28  
Exoplaneta 84  
Expanzní funkce 152  
Extinkce 156

## F

Femtobarn 135  
Fermilab 216  
Fermiony 277  
Feromagnetikum 327  
Fonon 144  
Fotoelektrický jev 294  
Fotovoltaický článek 312  
Fotovoltaický jev 312  
Foton 144  
Fotonásobič 220  
Fraktál 163

## G

GALEX 112  
Gama faktor 272  
Gama záblesky 98  
Geminga 210  
Gemini 85  
Geosynchronní dráha 186  
Giotto 64  
GOODS 234  
GPS 244  
Gravitační čočka 147  
Gravitační interakce 251  
Gravitační vlna 168  
GRB 98  
GSO 225  
GYO 225

## H

HD televize 186

Herschelova vesmírná observatoř 82  
Hnědý trpaslík 311  
Holografický princip 247  
Holografie 246  
Horizont události 270  
HST (Hubble) 111  
Huygens 38  
Hypernova 132

## CH

Chandra 94  
Chaotická inflace 162  
Charakteristická časová konstanta 194

## I

Index lomu 303  
Inflace 162  
Informace 246  
Infračervené záření 83  
ISS 208  
Iontové kapaliny 206  
Izospin 134

## J

JAXA 181

## K

Kaon 16  
Keck 200  
Kentauři 61  
Kepler 86  
Klasický Kuiperův pás 58  
Kolider 216  
Koma 63  
Kometa 63  
Kosmické struny 163  
Kosmické záření 14  
Kosmický jeřáb 20  
Kosmologický posuv 102  
Kryovulkanizmus 40

Krystaly 142  
Křemík 265  
Kuiperův pás 25  
Kulový blesk 265  
Kupy galaxií 146  
Kvantové číslo, hlavní 259  
Kvantové číslo,  
magnetické 259  
Kvantové číslo, vedlejší  
259  
Kvantový stav 259  
Kvarkové-gluonové  
plazma 128  
Kvarky 95  
Kvazary 155

## L

Lagrangeovy body 198  
LASER 252  
Laser na volných  
elektronech 70  
LBNL 153  
LED 221  
LEO 225  
Lenseův-Thirringův jev  
168  
Leptonové číslo 96  
Leptony 97  
LHC 272  
Librace 42  
Litografie 304  
LSP 210

## M

Magnetar 92  
Magnetický monopol 163  
Magnetosféra 211  
Magnituda absolutní 110  
Makrosvět 249  
Mars 32  
MASER 254  
Memristor 322  
MEMS 205  
MEO 225

Metamateriál 302  
Metan 38  
Metanogen 44  
Meteorit 10  
Meteorit kamenný 11  
Mez stability 28  
Mezinárodní  
astronomická unie 29  
Mezony 97  
Měsíc 196  
Migrace 32  
Mikrosvět 249  
MIT 205  
Moorův zákon 280  
MOSFET 281  
MTU 304  
Multiplet 257

## N

NASA 295  
NASDA 21  
Neutrino 124  
Neutrino elektronové 219  
Neutrino mionové 219  
Neutron 93  
Neutronová hvězda 91  
New Horizons 30

## O

Obecná relativita 103  
Obří magnetorezistence  
329  
Oddělený disk 60  
Ohyb 13  
Omega efekt 57  
Oortův oblak 31  
Orbital 260  
Organická sloučenina 315  
Organické solární články  
313  
OSU 305  
Otevřená  
hvězdokupa 89  
Oxid 315

## P

Parametr  $w$  153  
Parametr  $\Omega$  153  
Parsek 109  
Penroseovo pokrytí 13  
Pentacén 254  
Pericentrum 52  
Perovskit 313  
Permeabilita 302  
Permitivita 303  
Piezoelektrický jev 183  
Pikosatelity 206  
Pion 15  
Planck 173  
Planckovy škály 272  
Planetka 260  
Planeta 27  
Planeta trpasličí 27  
Planetesimály 25  
Plazma 129  
Plutina 25  
Pluto 25  
Plutoidy 25  
Plutonium 193  
Počasí 262  
Podnebí 262  
Polarizace světla 169  
Polární záře 73  
Polyimidy 182  
Poyntingův vektor 296  
Pozitron 209  
Proton 217  
Předepnutý křemík 281  
Pulzar 92  
Pulzarová mlhovina  
209

## R

Radioizotopický  
generátor 192  
Regolit 47  
Reionizace 160  
Relace neurčitosti 278  
Reliktní záření 131

ReRAM 322  
Rezonance 32  
Rocheův lalok 120  
Rover 20  
Rozptýlený disk 61  
Rydbergův atom 258  
Rychlost 195  
Sacharovovy podmínky 97

## S

Saturn 35  
SDSS 158  
Seeing 28  
Serpentinizace 45  
Singletový stav 257  
Sklon dráhy 53  
Slabá interakce 97  
Slapová síla 46  
Sluneční plachetnice 180  
Sluneční záření 180  
Sol 20  
Specifický impulz 204  
Spektrum 267  
Spin 134  
Spinová kapalina 328  
Spinové sklo 327  
SPS 274  
SSC 307  
SST (Spitzer) 111  
Stardust 66  
Statistické zprac. dat 170  
Stimulovaná emise 254  
Struny 252  
STSI 153  
Sulfát 45  
Sunjajevův-Zeldovičův jev  
165  
Supernova 115  
Supernova typu Ia 116  
Supernova typu Ib 117  
Supernova typu Ic 118  
Supernova typu II 119  
Supravodivost 278  
Svítilivost hvězdy 78

Symetrie CP 133  
Symetrie P 133  
Symetrie rotační 10  
Symetrie translační 10

## Š

Štěrbinový kruhový  
rezonátor 305

## T

Tajkonaut 197  
Tekuté krystaly 182  
Tekutinové dynamo 55  
Temná energie 151  
Temná hmota 139  
Teplota absolutní 244  
Teraformace 23  
Terfenyly 255  
Tevatron 136  
Titan 34  
Tlak slunečního záření 180  
TOV mez 93  
Transneptunická tělesa 58  
Tripletový stav 257  
Trojané 200

## U

UCB 311  
UCLA 105  
Undulátor 70  
Uran 51  
Uzel 53

## V

Van Allenovy pásy 18  
Velký Magellanův oblak 79  
Veselagova čočka 302  
Viskózní relaxace 40  
VLBA 106  
VLBI 106  
Vlnový vektor 307  
VLT 105  
Voyager 52

## W

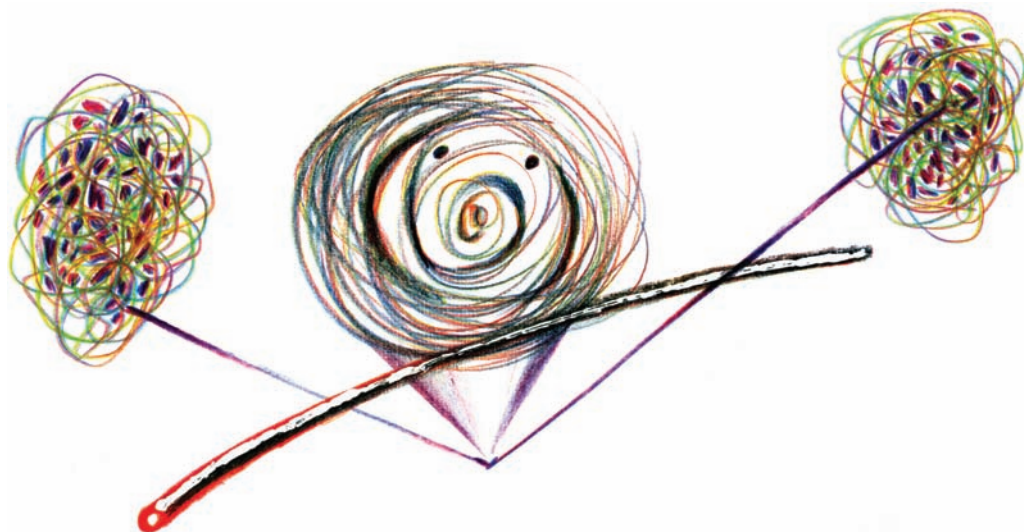
Waveletová transformace 163  
WFC 3 149  
WIMP 140  
WMAP 172

## X

XFEL 69  
XMM-Newton 95

## Z

Zdánlivý horizont 270  
Země 308  
Zrychlení 195





# Sky-Watcher®

*Pokročilé amatérské astronomické  
dalekohledy s plným GoTo  
systémem o průměru  
200 až 450 mm.*



*...hvězdám blíž*

*SUPRA Praha s. r. o.  
Mochovská 23/310*

*Minutku od metra B Hloubětín*

*[www.supra-dalekohledy.cz](http://www.supra-dalekohledy.cz)*



**SUPRA Praha**



## Soustředění

každým rokem pořádáme pro studenty Astrosoustředění s přednáškami a pozorováním

## Výuka

členové sdružení Aldebaran se podílejí na výuce na středních i vysokých školách

## Expedice

sdružení Aldebaran pořádá pravidelně expedice za zatměními Slunce, polárními zářemi a do zajímavých vědeckých pracovišť

## Server Aldebaran

15 let kvalitních informací a novinek z astronomie a fyziky a fórum pro výměnu názorů

## Nakladatelství AGA (Aldebaran Group for Astrophysics)

recenzované publikace a materiály z astronomie a fyziky



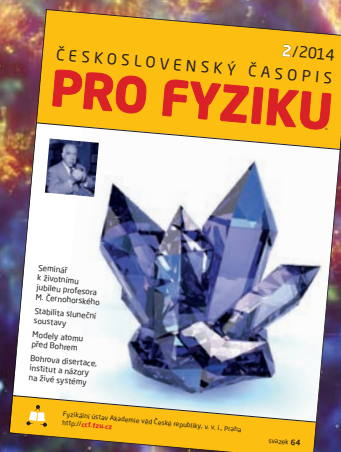
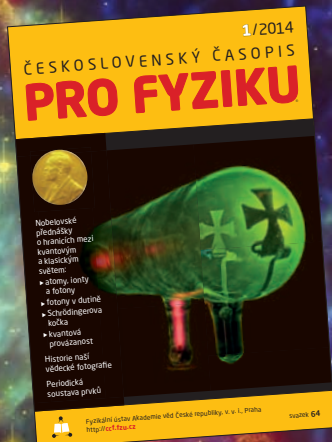
[www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)

# ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYZIKU

ČČF je časopisem nejen pro fyzikální badatele, studující fyziky, pedagogické pracovníky vyučující fyziku, ale i pro astrofyziky, matematiky, přírodovědce jiných oborů a poučené laiky.

vědecko-populární časopis českých  
a slovenských fyziků

Recenzovaný  
neimpaktovaný  
dvouměsíčník



Vědy o vesmíru jsou  
pravidelným tématem našeho časopisu.

ČČF si můžete objednat:

- na webu <http://ccf.fzu.cz>
  - e-mailem na [cscasfyz@fzu.cz](mailto:cscasfyz@fzu.cz)
  - poštou na adrese:
  - telefonicky na 266 052 152
- FZÚ AV ČR, v. v. i., Redakce ČČF, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

<http://ccf.fzu.cz>

UKÁZKOVÉ ČÍSLO  
ZDARMA

# **Astronomie a fyzika – svítání**

Petr Kulhánek a kolektiv autorů

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2014, 1. vydání.

Materiály převzaté z Wikipedie podléhají licenci CC BY-SA 3.0.

Žádná část této publikace nesmí být publikována a šířena žádným způsobem a v žádné podobě bez výslovného svolení nakladatelství 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](mailto:aldebaran@aldebaran.cz), [www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)

Tisk: EUROPRINT a.s.

**ISBN 978-80-904582-6-0**







ISBN 904582-6-0



[www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)

Publikace je doslova nabitá novinkami z astronomie, fyziky a nových technologií za poslední 4 roky. Název knihy naznačuje obrovský posun našich znalostí o vzniku a složení vesmíru. Střípky poznání se skládají do výsledné mozaiky a poprvé jakoby svítá. Kniha navazuje na úspěšné tituly této řady Na přelomu tisíciletí a Nové obzory. Kniha je určena široké veřejnosti zajímavější se o pokroky v přírodních vědách.

AGA  
2014