

# ASTRONOMIE A FYZIKA

## NOVÉ OBZORY



**Petr Kulhánek  
a kolektiv autorů**



ASTRONOMIE A FYZIKA  
NOVÉ OBZORY

# Astronomie a fyzika – nové obzory

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

Bc. Martin Batelka, RNDr. David Břeň, Ph.D., Ing. arch. Ivan Havlíček, MSc. Jiří Hofman, Ing. Miroslav Havránek, MUDr. Ing. Vítězslav Kříha, Ph.D., Ing. Michal Marčišovský, Filip Příbyl, Bc. Jakub Rozehnal, Jana Sainarová, Ing. Vladimír Scholtz, Ph.D., RNDr. Jiřina Scholtzová, Bc. Petr Sobotka, Pavel Suchan, Jaroslav Trnka, Zuzana Vidláková, Bc. Martin Zeman a Ing. Martin Žáček, Ph.D.

Obálka: Černá díra s průvodcem. NASA/JPL-Caltech.

Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics (AGA), 2010, 1. vydání.

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

Design: Bc. Jakub Rozehnal

Sazba: Bc. Martin Batelka

Doprovodná grafika: Ing. arch. Ivan Havlíček

Návrh obálky: Bc. Martin Batelka, Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.

Odborná redakce: Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.

Formát: 20×21 cm, 224 stran

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

Doporučená prodejní cena: 299 Kč

Tisk: Severografia a. s.

**ISBN 978-80-904582-0-8**

# Obsah

I. BLÍZKÝ VESMÍR	9
Ohřev sluneční korony.....	12
Odyseus již napotřetí Slunce obkružuje .....	15
Objevy zcela nových pohybů iontů v magnetosféře .....	19
Červené přízraky, elfové a pozemské gama záblesky .....	22
Magnetosféra Země vydává svá tajemství .....	26
Statický náboj na Měsíci se mění po 18 letech .....	32
Třicetiletá pouť vesmírem stále pokračuje.....	34
Model planetární migrace .....	37
Země se vzdaluje od Slunce .....	41
Epsilon Eridani je mladší verzí sluneční soustavy.....	45
<b>Bonus: Starověká astronomie.....</b>	<b>47</b>
II. VZDÁLENÝ VESMÍR	57
Mají hvězdy počasí?.....	60
Vznik velmi hmotných hvězd .....	62
Objev další relativistické laboratoře ve vesmíru .....	66
Alfvénovy vlny a vysoké energie v kosmickém záření.....	69
Mléčná dráha je jen dvojramenná .....	73
Tanec černých děr .....	76
Galaktické pronikání v Panně.....	78
Aktivní jádra galaxií .....	82
Majú čierne diery hornú hranicu svojej hmotnosti? .....	85
Temná hmota a projekt COSMOS.....	87
<b>Bonus: Hubbleův vesmírný dalekohled .....</b>	<b>90</b>

### III. PŘÍSTROJE A SONDY 97

Mise STEREO – prostorové sledování kosmického počasí .....	100
LABOCA otevírá nové okno do vesmíru.....	104
Detektory temné hmoty .....	109
ANTARES – největší podmořský detektor neutrin .....	113
Lasery na báze volných elektronů.....	117
Zobrazování malých objektů rentgenovým laserem.....	120
FAIR – urychlovač pro výzkum atomových jader.....	123
Miniaturní černé díry na urychlovači LHC.....	126
Mezinárodní lineární kolider .....	129
První plovoucí jaderná elektrárna je na cestě .....	132
Laser HiPER – další šance, jak získat fúzní energii.....	135
<b>Bonus: ISS – Mezinárodní vesmírná stanice .....</b>	<b>137</b>

### IV. NOVÉ TECHNOLOGIE 147

Zlaté nanohvězdičky.....	150
Nanovodiče.....	153
Metamateriály v infračervené oblasti.....	156
Hyperčočky.....	159
Spinom spínané světlo .....	162
Zajímavé vlastnosti uhlíku .....	163
Grafen – materiál, kde elektrony ztrácejí hmotnost .....	167
Organické polymery jako zdroj energie .....	171
Ferokapalinová zrcadla .....	175
Umíme nedestruktivně detekovat jednotlivé fotony? .....	177
<b>Bonus: Astronomická observatoř v Ondřejově .....</b>	<b>180</b>

V. BIOFYZIKA	185
Baktéria prežívajúca rádioaktívne žiarenie.....	188
Digitálna evolúcia .....	190
Dvadsať rokov trvajúca evolúcia .....	193
Živá hmota ve vesmíru? .....	196
Bakteriofág M13 v nanotechnológiách .....	200
Konec druhohorných potvor .....	203
<b>Bonus: Historie kilogramu – minulosť a budúcnosť.....</b>	<b>206</b>
 <b>Rejstřík</b>	 <b>217</b>





Milí čtenáři,

dostává se Vám do rukou knížka věnovaná nejnovějším objevů z astronomie a fyziky. Žádná knížka na toto téma nemůže být úplná, proto jsme se pro Vás pokusili vybrat ta nejzajímavější témata a nejžhavější novinky. Kniha, kterou máte před sebou, volně navazuje na dvojici knížek Astronomie a fyzika na přelomu tisíciletí, které vyšly v letech 2004 a 2005. Má podobný formát a vznikala obdobným způsobem. Parta nadšenců soustředěná kolem serveru Aldebaran píše již osm let krátké články o aktuálním dění v astronomii a ve fyzice. A právě tyto texty se staly základem naší knížky. Z posledních třech let jsme vybrali přibližně třetinu nejlepších článků, doplnili je o nejnovější informace a přidali obrazové přílohy, tabulky a vysvětlující texty, které najdete v bočním sloupci sazby.

Tematicky má knížka velmi široký záběr. V úvodní kapitole naleznete informace o blízkém vesmíru včetně nejnovějších informací o planetární migraci. To že Jupiter a Saturn pravděpodobně nevznikly tam, kde je dnes nacházíme, je velkým zásahem do vžitých představ o sluneční soustavě. Následující kapitola je věnována vzdálenému vesmíru, zejména galaxiím a mezigalaktickému prostoru. Třetí kapitola je věnována sondám, přístrojům, urychlovačům a detektorům, o kterých v budoucnosti zcela jistě uslyšíme a již nyní se tak můžeme těšit na zajímavé výsledky jejich práce. Čtvrtá kapitola je věnována fascinujícím technologiím v přední linii, které mění možnosti lidstva doslova před našima očima. Nové materiály s úžasnými vlastnostmi, nanotechnologie, ferokapaliny – to je jen několik z mnoha pojmů, o kterých se dočtete. Poslední kapitola je věnována bouřlivě se rozvíjející biofyzice. Zde byl výběr nejtěžší. U tak rozsáhlého oboru jde skutečně jen o několik zajímavostí, nikoli o uzavřený celek.

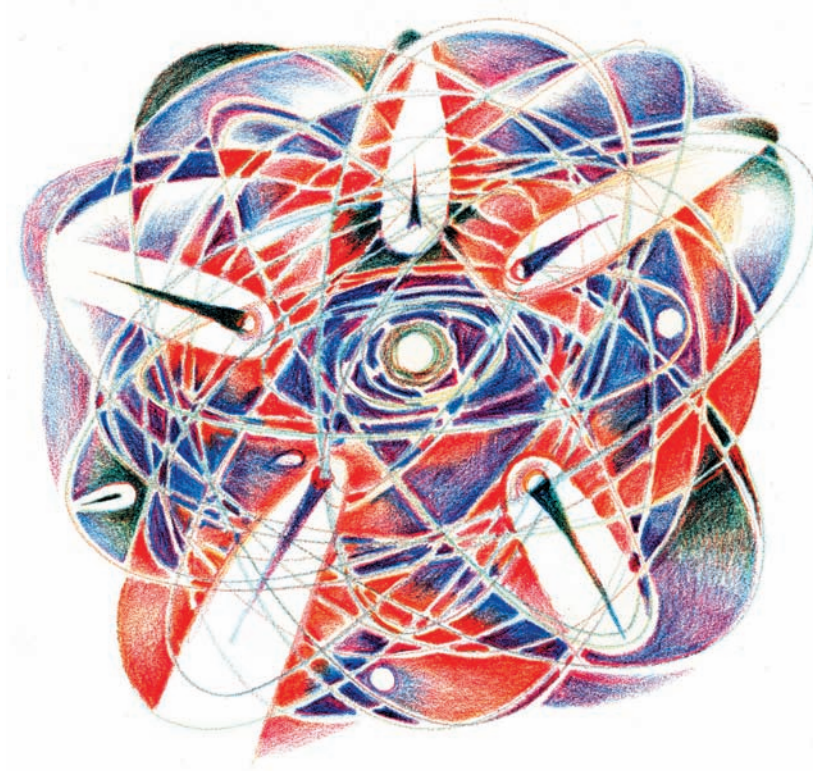
Každá kapitola končí bonusem – textem, který s kapitolou nesouvisí a snaží se náročnou četbu odlehčit. Společným jmenovatelem těchto textů je historie – vyprávění o starověké astronomii, o historii vzniku kilogramu, o budování Mezinárodní kosmické stanice, o životě Hubbleova dalekohledu a o založení Astronomického ústavu v Ondřejově.

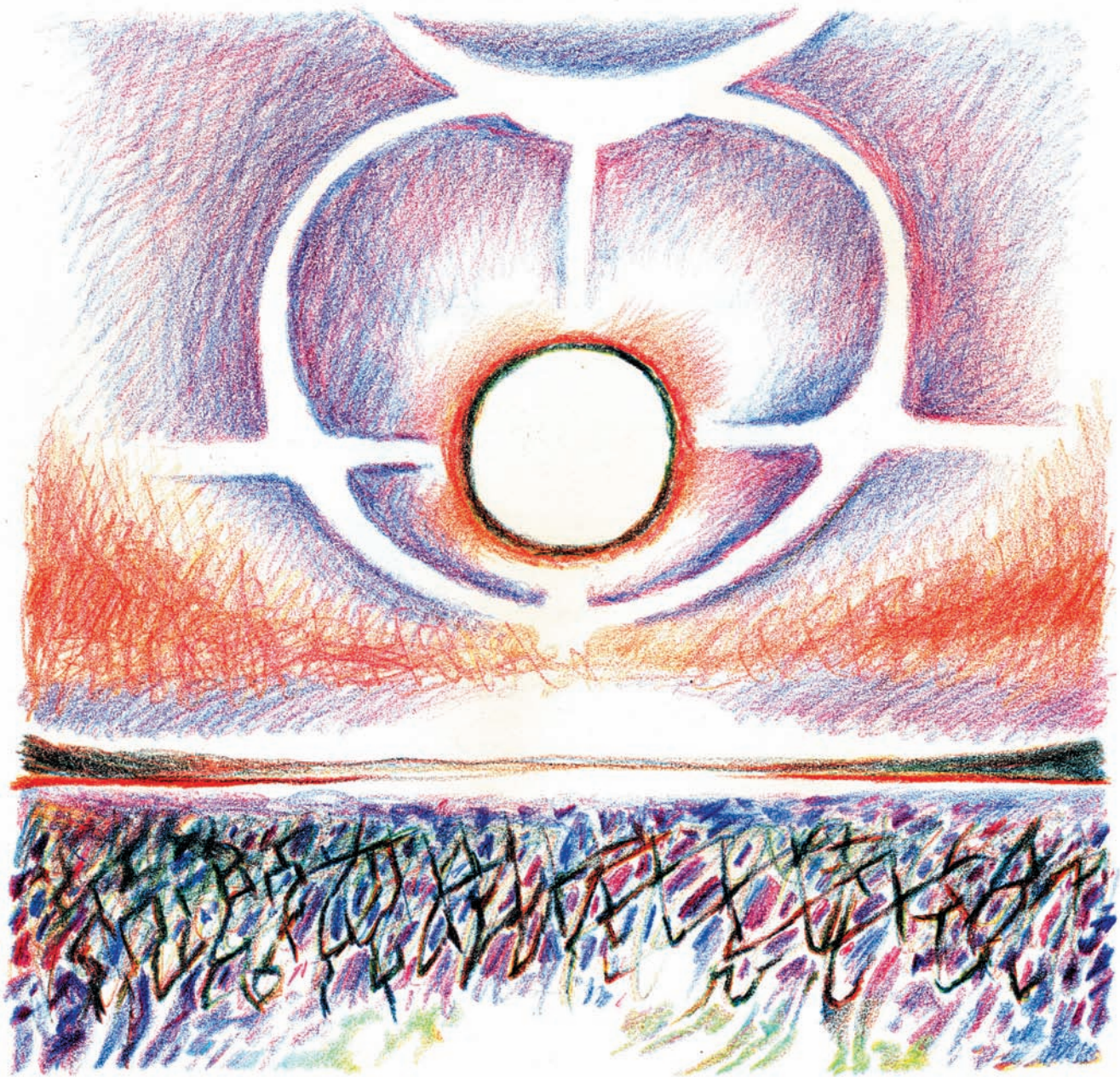
Rád bych poděkoval těm, kteří se podíleli na vzniku knížky – Martinovi Batelkovi za sazbu, Ivanovi Havlíčkovi za doprovodné obrázky, Rudovi Mentzlovi za jazykové korektury a samozřejmě autorům článků za pečlivě připravené rukopisy. Všichni dělali svou práci zdarma a s nadšením, což je v dnešní uspěchané a konzumní době přinejmenším nezvyklé. Vám čtenářům přeji příjemnou a ničím nerušenou četbu, pocit vzrušení z nových objevů a napětí při hledání odpovědí na záhady, které před lidstvo postavila jeho zvědavost.

V Praze 13. února 2010  
Petr Kulhánek



# I. BLÍZKÝ VESMÍR





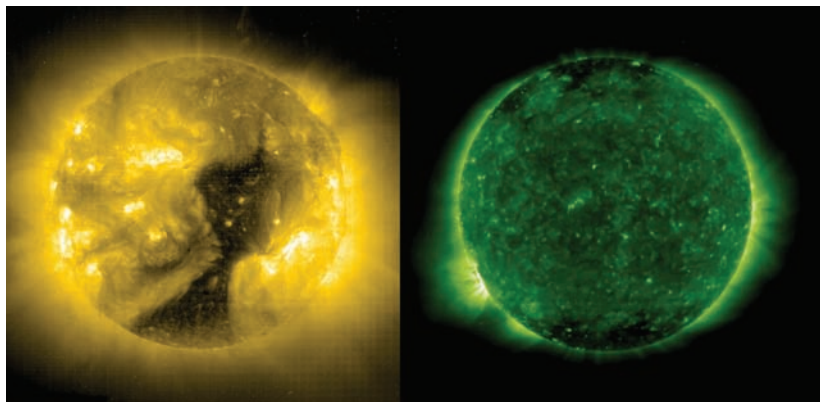


## Ohřev sluneční korony

**Slunce** – nám nejbližší hvězda, tzv. hvězda hlavní posloupnosti, která se nachází ve vzdálenosti  $149,6 \times 10^6$  km od Země. Jde o žhavou plazmatickou kouli s průměrem  $1,392 \times 10^6$  km, teplotou na povrchu 5 780 K, teplotou v centru přibližně  $15 \times 10^6$  K a zářivým výkonem  $3,846 \times 10^{26}$  W. Zdrojem energie je jaderná syntéza, při které se za každou sekundu sloučí v jádru Slunce 700 milionů tun vodíku na hélium.

**Korona** – vnější atmosféra Slunce volně přecházející do meziplanetárního prostoru. Teplota dosahuje až milionů stupňů Celsia, pravděpodobně je korona ohřívána rozpadem plazmových vln a lokálními rekonekcemi (přepojováním) magnetických silokřivek. K korona (kontinuum) je způsobena rozptylem slunečního světla na volných elektronech. F korona (Fraunhoferova) je způsobena rozptylem slunečního světla na prachových částicích padajících

Fotografie Slunce pořízené v extrémním ultrafialovém oboru sondou SOHO. V tomto oboru září horká korona a mimořádně energetické děje na povrchu. Nalevo: Koronálními děrami prosvítá temný a chladný povrch Slunce (2002). Napravo: Řada drobných erupcí pozorovaná při povrchu Slunce přístrojem EIT na vlnové délce 19,5 nm (1996). SOHO/EIT.



Slunce je naší životadárnou hvězdou. V jejím nitru vzniká termojadernou syntézou při teplotě 15 milionů kelvinů energie, která se šíří k povrchu nejprve zářením a poté prouděním. Teplota z nitra k povrchu postupně klesá až na 5 700 K na povrchu Slunce. Od povrchu dále ovšem teplota opět roste. Sluneční atmosféra (korona) má teplotu až několik milionů kelvinů, což je na první pohled překvapující. Vědci již mnoho desítek let hledají mechanismy ohřevu korony. Zdá se, že dnes je vysvětlení vysokých teplot v koruně již na dosah.

### Horká korona

Lidé od nepaměti spatřovali sluneční koronu jedině při úplných zatměních Slunce. Teprve ve 20. století začalo být možné koronu podrobně zkoumat specializovanými družicemi, jako je například SOHO. Při úplném zatmění Slunce, které proběhlo 7. srpna 1869 od Aljašky po severní Karolínu, byla ve spektru korony nalezena zcela atypická zelená čára. Vlnová délka čáry neodpovídala žádnému známému prvku, a tak se vyrojily domněnky, že jde o nový prvek, tzv. *korónium*. Pro domnělý prvek ale již nebylo v Mendělejevově periodické tabulce místo. Záhada byla vyřešena až po 70 letech. V roce 1939 W. Grotrian a B. Z. Edlén identifikovali tuto čáru jako spektrální čáru třináctkrát ionizovaného železa Fe XIV. Nešlo tedy o nový prvek, ale prvek důvěrně známý za neobvyklých podmínek. K tomu, aby bylo železo takto vysoce ionizováno, musí být v koruně extrémně vysoké teploty, řádově milion stupňů. Jedna záhada byla nahrazena jinou: Proč je korona tak horká?

### Možné mechanismy

Teorii o tom, co by mohlo způsobovat vysokou teplotu korony, se vynořila celá řada, přežilo jich ale jen několik. Až donedávna se zdálo, že na ohřevu korony se podílejí mikroerupce, Alfvénovy vlny a ohmický ohřev. Žádný z těchto mechanismů neposkytoval samostatně

dostatečný výkon k trvalému ohřevu korony. Pojďme se s těmito mechanismy seznámit.

**Sluneční mikroerupce.** Sluneční erupce jsou výrony plazmatu způsobené rekonekcí. Při průměrné erupci se uvolní energie  $10^{25}$  J, která zahřeje okolní plazma, vymrští ho a způsobí vzplanutí až v RTG oboru. Takových velkých erupcí je ale nesmírně málo na to, aby viditelně zahřály koronu. Podle teorie by mělo docházet i k tzv. mikroerupcím, jejichž energetická bilance je sice o dva řády nižší, ale jejich počet by měl být enormní a tak by měly mikroerupce přispívat k ohřevu korony významnou měrou. Energie se získává z drobných přepojení (tzv. mikrorekonekcí) magnetických silokřivek.

**Magnetoakustické vlny.** Zvuk se plazmatem šíří mnohem komplikovaněji než v běžném prostředí. Energie vibrujících iontů se přelévá mezi chaotickou složkou (tlakovou energií), uspořádanou složkou (kinetickou energií kmitajících iontů) a energií magnetického pole. Zvuk se šíří anizotropně ve třech vlnoplochách (rychlé, pomalé a Alfvénově). Asi nejjednodušší je Alfvénova vlna, kdy dochází k příčnému rozvlnění magnetických silokřivek a k přenosu energie zvukové vlny podél silokřivek tzv. Alfvénovou rychlostí  $v_A = B/(\mu\rho)^{1/2}$ , kde  $B$  je magnetická indukce,  $\rho$  hustota plazmatu a  $\mu$  permeabilita. Právě Alfvénovy vlny (pojmenované podle švédského fyzika Hannese Alfvéna) mohou vynášet energii v podobě zvukových vln z povrchu podél silokřivek až vysoko do korony. Podle prvních odhadů by ani tento mechanismus neměl být sám dostatečný k ohřevu korony.

**Ohmický ohřev.** Pohybující se nabitě částice znamenají různé elektrické proudy tekoucí plazmatem. Vzhledem k tomu, že plazma má konečnou vodivost, vždy bude docházet k disipaci energie Jouleovým ohřevem. Odhady opět ukazují, že samotný Jouleův ohřev je v řídké koruně málo účinný a nemůže být samostatně zodpovědný za ohřev korony.

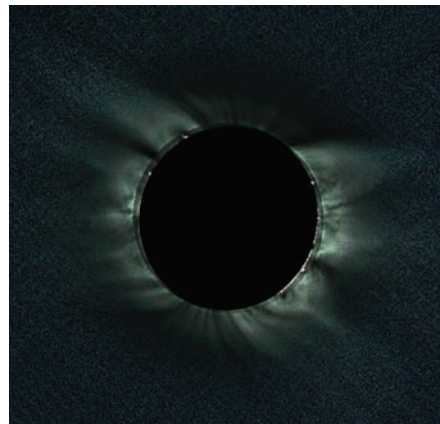
**Axiony.** Podle některých teorií by mohl být ohřev sluneční korony způsoben i částicemi temné hmoty, tzv. axiony. Pokud axiony existují, měla většina z nich vzniknout krátce po Velkém třesku. V současnosti by měly být ještě generovány v nitrech hvězd při rozptylu rentgenových fotonů na elektronech. Pro axiony vzniklé v nitru Slunce

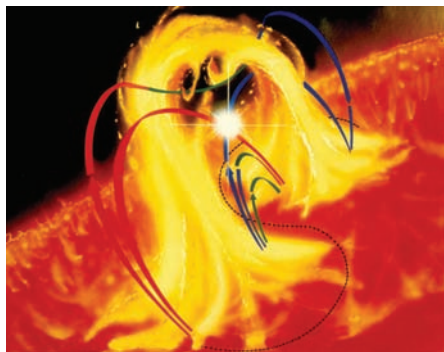
cích z meziplanetárního prostoru na Slunce, charakteristické jsou absorpční čáry. E korona (emisní) jsou emisní čáry způsobené přechody ve vysoce ionizovaných kovech. Tyto čáry jsou možné jen za vysokých teplot milionů kelvinů.

**Sluneční vítr** – proud nabitých částic ze Slunce, které zaplavují celou sluneční soustavu. Zejména jde o protony, elektrony a alfa částice (jádra hélia). Typická rychlost částic u Země je kolem 500 km/s (rychlost zvuku v tomto prostředí je 50 km/s), teplota 3 eV (30 000 K) a koncentrace několik protonů v  $m^3$ . Částice vylétávající v polárním směru mají vyšší rychlost (přibližně 750 km/s) a nazýváme je rychlý sluneční vítr. Sluneční vítr objevil anglický astronom Richard Carrington v roce 1859, kdy bylo za půl dne po slunečním vzplanutí narušeno magnetické pole Země.

**Rekonekce** – přepojení magnetických silokřivek, při kterém prudce změní svou dosavadní topologii do jiné, energeticky výhodnější podoby. Při tom dojde k uvolnění energie, která zahřeje okolní plazma. Někdy natolik, že plazma zazáří i v RTG nebo v gama oboru.

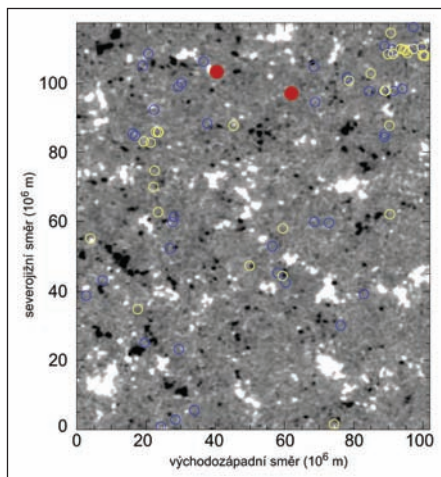
Korona při úplném zatmění Slunce v roce 2006 v Turecku. Snímek je počítačovou kompozicí z několika snímků. Viditelný posuv povrchu odpovídá posuvu Měsíce při zatmění. Expedice Aldebaran.





Princip erupce. V místě, kde silokřivky míří proti sobě (tzv. X bod), dojde k přepojení a uvolnění energie. Mikroerupce vypadají stejně, jen jsou menší. NASA/Marshall Space Flight Center.

Numerické vyhledávání nulových bodů magnetického pole. Modré kroužky jsou nulové body ve fotosféře, žluté v chromosféře a plně červené v koroně. Je zjevné, že v koroně je nulových bodů minimum a mikrorekonekce zde nemohou probíhat. Na pozadí je magnetogram z přístroje SOT na sondě Hinode. S. Régnier a kol., *Astronomy & Astrophysics*, 2008.



je sluneční plazma průhledné a tak se snadno dostanou ze slunečního jádra k povrchu. Zde by jejich část měla v silných magnetických polích zkonvertovat zpět na rentgenové fotony, které mohou zahřát sluneční koronu. Je třeba ovšem podotknout, že existence axionů dosud nebyla potvrzena a jde proto jen o zajímavou a poněkud exotickou hypotézu.

### Vítězné tažení Alfvénových vln

Nejprve byla silná magnetická pole při povrchu Slunce detekována pomocí Švédského slunečního dalekohledu SST (Swedish Solar Telescope). Poté tato pole podrobně zkoumala japonská sonda Hinode. V roce 2007 Hinode detekovala při povrchu intenzivní Alfvénovy vlny, podél nichž unikaly do vesmírného prostoru nabitě částice v podobě slunečního větru. Podle výpočtů, které provedl v lednu 2008 tým vedený B. Pontieuem z kalifornské laboratoře LMSAL (Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory) jsou Alfvénovy vlny natolik intenzivní, že *samy o sobě* postačí nejenom ke genezi slunečního větru, ale i k ohřevu korony na pozorované teploty! To bylo skutečným překvapením. Nezávisle na těchto výpočtech udělali američtí fyzikové J. Kasper, A. Lazarus a P. Gary rozbor dat pořízených za 14 let družicí WIND, která zkoumala sluneční vítr. Poměr iontů  $H^+$  a  $He^{2+}$  ve slunečním větru přesně odpovídá tomu, že jsou tyto částice vynášeny Alfvénovými vlnami a v podstatě nepřipouští jiný mechanismus. Konečný ortel zřejmě vyřknul tým skotských fyziků vedený S. Régnierem z Univerzity v St. Andrews. Vědci na základě měření magnetického pole sondou Hinode vyhledávaly tzv. *nulové body* magnetického pole, ve kterých může docházet k rekonkncím. Zatímco v blízkosti fotosféry jich našli značné množství, v koroně jich bylo minimálně. Tím fakticky vyloučili mikrorekonekce a mikroerupce jako dominantní mechanismus ohřevu korony.

■ Petr Kulhánek, 27. 2. 2009, AB 9/2009



# Odyseus již napotřetí Slunce obkružuje

Začátkem roku 2008, téměř rok po posledním průletu nad jižním slunečním pólem, euroamerická kosmická sonda Ulysses (Odyseus) dokončovala nad severním slunečním pólem svůj třetí oblet kolem Slunce. Podle zpráv z řídicího střediska bylo zřejmé, že mise nezadržitelně spěje ke konci díky nedostatku energie. Radioaktivní články, ze kterých sonda čerpala energii pro přístroje, již nebyly dost silné na to, aby udržely sondu ovladatelnou. Šlo zejména o polohování antény zajišťující komunikaci se Zemí. V lednu 2009 byla sonda stále ještě aktivní, ale 30. června 2009 byl tento vynikající projekt definitivně ukončen.

## Základní informace o misi

Odyseus byl společným projektem ESA a NASA s cílem studovat Slunce a jeho magnetické pole na dráze téměř kolmé k rovině ekliptiky. Sonda se tak dostala i nad oba sluneční póly, jejichž studium bylo doposud nemožné. Sondou vynesl do vesmíru raketoplán Columbia dne 9. 10. 1990. Nejprve byl Odyseus naveden k Jupiteru, jehož gravitace ho 8. února 1992 vrhla zpět ke Slunci. Po průletu kolem Jupiteru letěl Odyseus po heliocentrické dráze se sklonem  $80,2^\circ$  ke slunečnímu rovníku, s oběžnou dobou 6,2 roku, aféliem 5,4 AU a perihéliem ve vzdálenosti 1,34 AU od Slunce. První průlet proběhl nad jižním pólem Slunce a zhruba po roce následoval průlet nad pólem severním. Tvůrci projektu chtěli, aby sonda setrvala v polární oblasti (nad sedmdesátým stupněm heliografické šířky) vždy alespoň 150 dní. Ve skutečnosti trvaly první čtyři průlety nad polárními oblastmi dohromady o 468 dní déle, což předčilo očekávání.

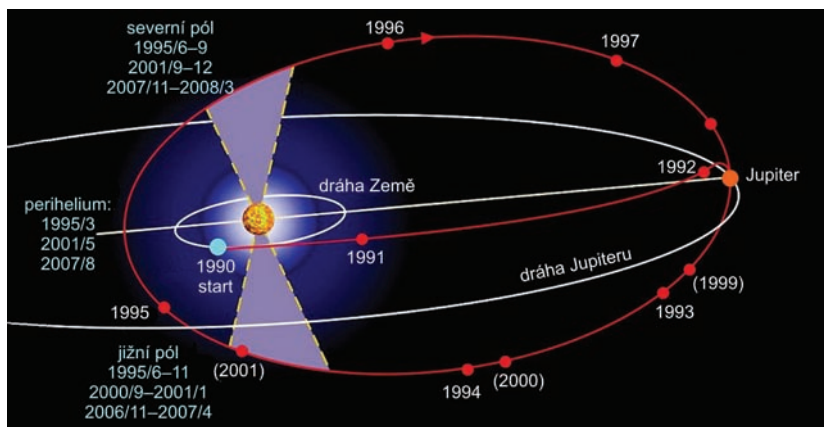
Odyseus byl vybaven množstvím vědeckých přístrojů navržených ke studiu velmi širokého spektra dějů souvisejících se sluneční činností: slunečního magne-

**Heliosféra** – oblast magnetického vlivu Slunce. Heliosféra není kulová, jak by se mohlo zdát z jejího názvu. Je od Slunce v různých směrech různě vzdálená, zhruba 110–160 AU. Uvnitř heliosféry se nachází plazma slunečního větru. Heliosféra končí hraniční vrstvou, jejíž vnější část se nazývá heliopauza.

**Terminační vlna** – jiným názvem rázová vlna slunečního větru je oblast, ve které rychlost slunečního větru klesá na podzvukovou rychlost. Tato oblast má tvar povrchu koule a je vzdálena přibližně 90–95 AU od Slunce.

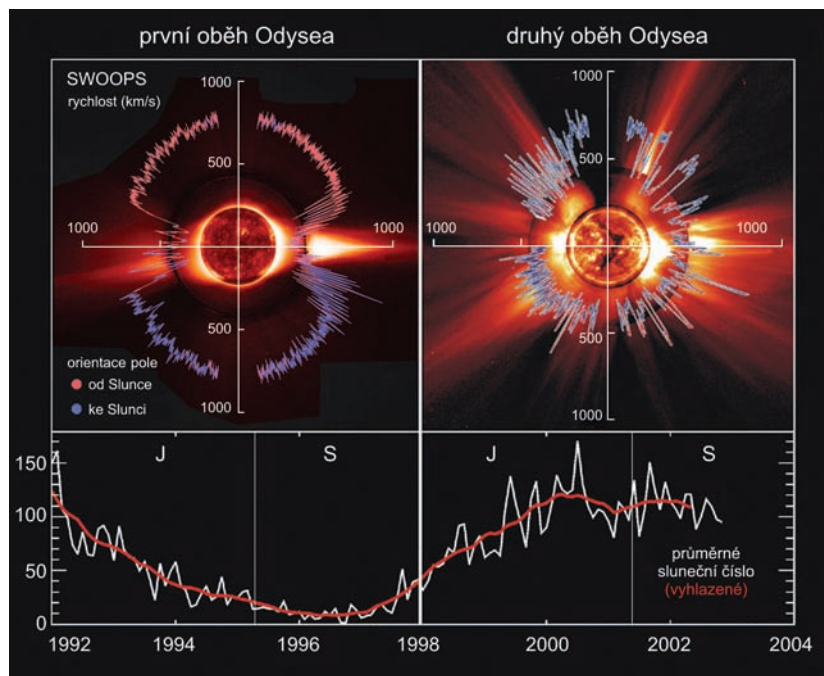
**CME** – Coronal Mass Ejection, výron koronální hmoty, plazmatu s vmrznutým magnetickým polem, do meziplanetárního prostoru způsobený rekonekcí magnetických siločar. K výronům CME dochází pravidelně, jejich četnost odpovídá sluneční aktivitě – v minimu dochází k CME přibližně jednou za den, v maximu dochází k CME až třikrát denně.

Sonda Odyseus na dráze kolem Slunce, ESA.



**Plazma** – kvazineutrální soubor nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Lidsky to znamená, že se v dané látce nachází alespoň malé množství elektricky nabitých částic, které jsou 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 ionizační molekul. S plazmatem se můžeme setkat v elektrických výbojích (blesky, zářivky), v polárních zářích, ve hvězdách, ve slunečním větru a v mezihvězdných mlhovinách.

Rychlost slunečního větru (červená a modrá křivka) v období dvou průletů Odysea (pohled od Země). Snímky na pozadí: SOHO (EIT, 19,5 nm, LASC – bílé světlo), Mauna Loa (700–950 nm). Dole je vyznačena sluneční aktivita. McComas a kol., *Geophys. Res. Lett.*, 2003.



tického pole, plazmových vln z povrchu Slunce a z korony, slunečního rentgenového záření a vlivu slunečního větru na nejrůznější částice meziplanetární hmoty. Další přístroje byly navrženy k vyšetřování kosmického prachu, mezihvězdného neutrálního plynu, galaktického kosmického záření a gama záblesků.

## Poznatky získané o Slunci

Již při prvním obletu Slunce byly získány komplexní údaje o slunečním větru a meziplanetárním prostředí. Radiální rychlost slunečního větru vztahovaná k poloze sondy byla naměřena v rozmezí 350–800 km/s. Vyzářování urychlovaných částic ze Slunce mělo periodu 26 dní. Se stejnou periodou se také měnil tlak slunečního větru.

Zajímavá byla závislost intenzity měřeného kosmického záření na aktuální orientaci a intenzitě magnetického pole Slunce (to tvoří přirozený ochranný obal sluneční soustavy před galaktickým kosmickým zářením). V experimentech byla proměřována polarita magnetického pole a ukázalo se, že profil přicházejícího kosmického záření kopíruje vyzařování slunečních nízkenergetických částic. Poměrně malé byly výkyvy v intenzitě kosmického záření vzhledem k heliografické šířce. Patrná byla zvýšená intenzita galaktického záření v oblasti pólů oproti hodnotám získaným nad rovníkem. Nízká intenzita v letech 1992 až 1993 je interpretována jako dočasný jev zapříčiněný doznívajícím maximem sluneční činnosti a blížícím se nástupem slunečního minima.

Mise trvala více než 18 let, což je déle než jedenáctiletý sluneční cyklus. Odissey za tu dobu nashromáždil data z období minimální i vysoké sluneční aktivity. Při prvním průletu nad polárními oblastmi bylo Slunce aktivní jen

velmi málo, druhý průlet probíhal v době slunečního maxima, poslední opět v období klidného Slunce. Rychlost slunečního větru byla měřena aparaturou SWOOPS (Solar Wind Observations Over the Poles of the Sun). V období minima měl sluneční vítr dvě výrazné složky – pomalou v rovníkové oblasti a rychlou v polární oblasti. V období maxima takovéto rozdělení neexistovalo.

Kombinací sluneční rotace a vyzářování slunečního větru různými rychlostmi do meziplanetárního prostoru vzniká prostředí velmi různorodých vlastností. Na obrázku vpravo dole je počítačové vyobrazení heliosféry v období sluneční bouře. Meziplanetární magnetické pole je zde vykresleno modrými a červenými liniemi. Modrá barva značí orientaci pole směrem ke Slunci, červená od Slunce. Z rozvíjejících se spirálových struktur je zřejmé, že Slunce rotuje v kladném smyslu – zobrazení je vykresleno při pohledu na severní sluneční pól. Malá černá tečka na azimutu  $\sim 320^\circ$  značí polohu Země. Šípkami jsou vyznačeny směry, v nichž bychom našli sondy Voyager 1 (vzdálenost 93 AU) a Voyager 2 (vzdálenost 73,2 AU).

Observatoř Odysseus neměla žádný dalekohled v klasickém optickém zobrazovacím oboru. Nedočkali jsme se tedy snímků slunečních pólů, které by nám ukázaly, jak vypadá Slunce tam, kam se nám prozatím nepodařilo pohlédnout. Nešlo jen o studium samotného Slunce, ale zejména o nejrozsáhlejší projekt výzkumu meziplanetárního prostředí zaměřený na vliv Slunce, který byl dosud uskutečněn. Mise Odysseus byla experimentem zaměřeným na studium velmi rozsáhlých oblastí. Její výsledky budou použity ke zpřesnění prostorových modelů meziplanetárního prostředí vysoko nad a pod ekliptikou. Vlastnosti této oblasti byly dosud jen velmi mlhavě odhadovány, protože veškerá experimentálně získaná data pocházela od sond pohybujiících se v rovině oběžných drah planet.

### Poznatky získané o meziplanetární hmotě

Sonda Odysseus nebyla přímo určena pro studium komet. Nicméně již v květnu roku 1996 prolétla neplánovaně chvostem komety Hyakutake (C/1996 B2). Jádru komety bylo v té době ve vzdálenosti 3,5 AU od sondy. Pomocí aparatury SWICS (Solar Wind Ion Composition Spectrometer) byly nalezeny změny obvyklé hladiny ionizace slunečního větru. Tyto změny byly původně přičítány slunečním erupcím, ale podle složení iontů se nakonec ukázalo, že mají kometární původ.

**Apocentrum** – bod na eliptické dráze kolem centrálního tělesa, který je tomuto tělesu nejdále.

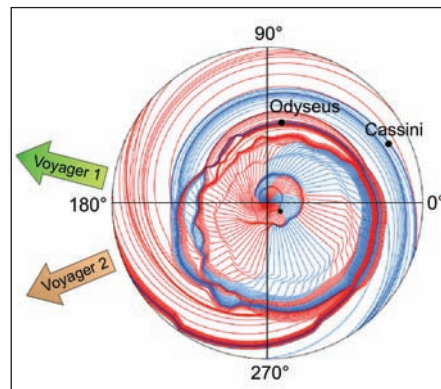
Pro Slunce se používá výraz afélium, pro Zemi apogeum, pro Měsíc apoluna, pro hvězdu apoastrum.

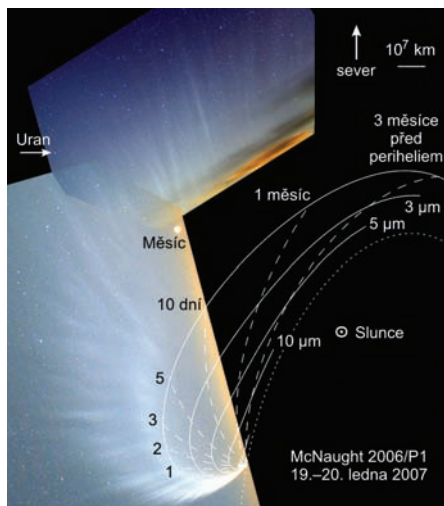
**Pericentrum** – bod na eliptické dráze kolem centrálního tělesa, který je tomuto tělesu nejbližší.

Pro Slunce se používá výraz perihélium, pro Zemi perigeum, pro Měsíc periluna, pro hvězdu periastrum.

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

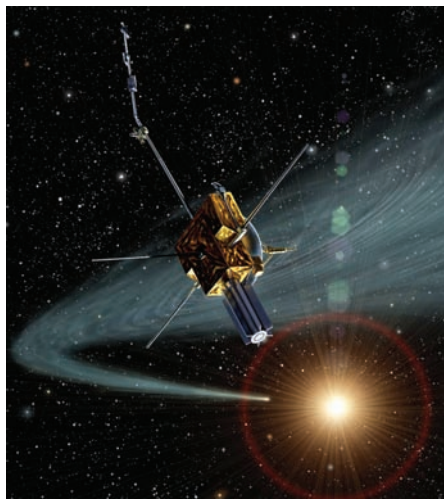
Sluneční magnetické pole dne 6. 11. 2003. ESA. Slunce je v počátku souřadnicové soustavy. Poloměr ohraničujícího kruhu je 10 AU (zhruba oběžná dráha Saturnu). ESA.





Kometa McNaught C/2006 P1 na večerím nebi počátkem roku 2007. V protáhlém chvostu komety právě prolétá sonda Odisseus. M. Fulle/INAF, S. Deiries/ESO.

Sonda Odisseus prolétá chvostem komety Hyakutake v roce 1996. ESA.



Kometární ohon je bohatý na ionty kyslíku a uhlíku, ale oproti slunečnímu větru je zde minimum iontů dusíku a neonu. Dráha Odissea se v té době velmi blížila dráze komety Hyakutake a byla proto výhodná pro studium kometárního ohonu. O dva roky později byla pořízení měření dodatečně porovnávána s protonovou emisí slunečního větru. Podle výpočtů by transport částic kometárního ohonu od jádra komety k sondě slunečním větrem trval zhruba 8 dní. Následné porovnání protonové emise s daty získanými sondou potvrdilo, že Odisseus prolétl ohonem komety interagujícím se slunečním větrem. Prozatím jde o nejrozsáhlejší kometární ohon pozorovaný ve sluneční soustavě.

Na konci roku 2000, kdy byl Odisseus nejvýše nad jižním slunečním pólem, byla měřena interakce ohonu komety McNaught-Hartley (C/1991 T1) s rychlým slunečním větrem. Původně byla vzájemná poloha komety a sondy pro měření nevýhodná, ale neočekávaný koronální výron sluneční hmoty (CME) zanesl materiál kometárního chvostu až k dosahu sondy. Z polárních oblastí mohou být CME vystřelovány rychlostí až 2 000 km/s. Podobný průlet kometárním ohonem byl ještě zaznamenán u komety SOHO (C/2000 S5). V únoru 2007 prolétala sonda po dobu pěti dnů chvostem komety McNaught (C/2000 P1).

Meziplanetární prostředí není vyplněno jen občas prolétávajícími kometami, jejichž materiál nasměruje Slunce svými výtrysky plazmatu do detektorů kosmických sond. V heliosféře bylo pomocí Odissea objeveno také prostorové rozložení prachu, jehož pohyb závisí na sluneční aktivitě. V době slunečního minima je většina prachu nahromaděna nad slunečními póly. V období maxima sluneční činnosti bylo naopak nejvíce prachu zaznamenáno velmi blízko Slunce, v rovině planetárních drah.

Mise získala nejrozsáhlejší soubor dat o meziplanetárním prostředí, který byl v tomto rozsahu kdy pořízen. Je možné, že některé souvislosti budou nalezeny teprve po pečlivé analýze a porovnání s poznatky jiných projektů zkoumajících heliosféru. Zde se zejména nabízejí měření sond Voyager I a II, které již překročily terminační vlnu a získaly data z okrajových částí sluneční soustavy. Odisseus byl prozatím jednou z nejdělsích a nejuspěšnějších misí kosmického výzkumu vůbec. Celkově byla sonda aktivní 6822 dní (18 roků a 246 dní).

■ Ivan Havlíček, 10. 7. 2009, AB 11-13/2008

## Objevy zcela nových pohybů iontů v magnetosféře

Čtveřice evropských družic Cluster, která zkoumá magnetosféru Země, chrlí jeden objev za druhým: přímé pozorování rekonekce magnetických silokřivek, víry na bocích magnetosféry, ultranízkořekvenční rozvlnění magnetických silokřivek, vlny v magnetickém ohonu Země, atd. Při zpracování dat z let 2001 až 2003 byly nalezeny tři zcela nové typy pohybů nabitých částic: únik kyslíkových iontů polárními oblastmi, únik vodíkových iontů do magnetického ohonu a urychlené toky nabitých částic mířících k Zemi. Zdá se, že naši magnetosféru teprve začínáme poznávat. Bez prostorových měření, jaká umožňují družice Cluster, to dříve nebylo možné. Enormní objem naměřených údajů vyžaduje dlouhodobé zpracování, a tak již nikoho nepřekvapí, že objevy jsou zpravidla ohlašovány až několik let po pořízení dat.

### Dlouhodobý únik kyslíku z atmosféry Země

V magnetosféře Země nacházíme především částice slunečního větru (elektrony, protony a alfa částice). Již dlouho se ale ví i o přítomnosti iontů pocházejících ze zemské atmosféry. Na konci dvacátého století zjistily některé družice přítomnost kyslíkových iontů v polárních oblastech magnetosféry. Se vzdáleností od Země jejich naměřená rychlost rostla! To nutně znamená, že jsou ionty kyslíku nějakým neznámým mechanismem urychlovány. Část z nich může získat i vyšší než únikovou rychlost a opustit Zemi. Teprve prostorová měření čtveřice družic Cluster z let 2001 až 2003 umožnila objasnění této záhady. V roce 2008 přinesla vysvětlení skupina fyziků vedená Hansem Nilssonem ze Švédského ústavu vesmírné fyziky (Swedish Institute of Space Physics) v Kiruně, který leží hluboko za polárním kruhem a dlouhodobě se věnuje výzkumu magnetosféry Země a polárních září.

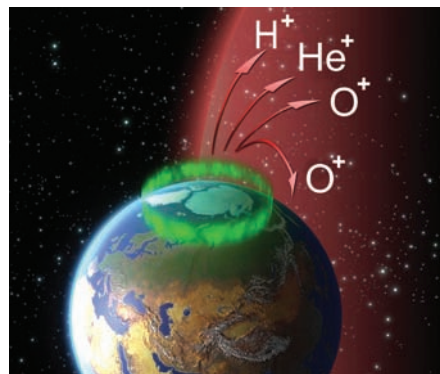
Částice slunečního větru zachycené zemským magnetickým polem putují v polárních oblastech podél silokřivek až do horních vrstev atmosféry. Zde společně s ultrafialovým zářením Slunce excitují a ionizují neutrální atomy. Excitované atomy charakteristicky září a vytvářejí známé polární záře. Ionizované atomy jsou zachyceny magnetickými silokřivkami a volně se podél nich pohybují. To vše bylo známo již dávno. Zde ale nastupují data z Clusteru. Ukázalo se, že se magne-

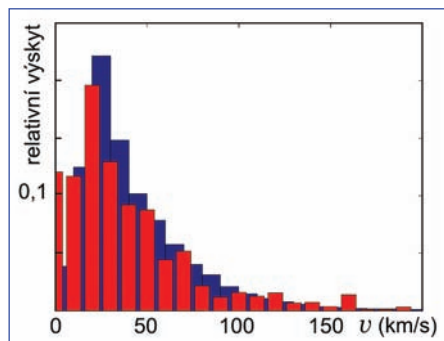
**Cluster** – čtveřice stejných družic pojmenovaných podle latinsko-amerických tanců (Rumba, Salsa, Samba a Tango) vypuštěných v roce 2000 Evropskou kosmickou agenturou. Kolem Země letí ve vzájemné formaci ve vrcholech čtyřstěnu (vzdáleny 5 000 až 20 000 km) a provádějí dosud nejdetailejší prostorová měření parametrů slunečního větru a jeho interakce s magnetosférou Země. Cluster poprvé detekoval plazmové vlny v magnetopauze, přepojení magnetických silokřivek, pohyby rázové vlny pod náporu slunečního větru a vytvořil první třírozměrný obraz magnetosféry Země.

**Magnetosféra Země** – oblast magnetického vlivu naší Země. Dipólové magnetické pole je vytvářeno v jádru Země elektrickými proudy o řádové hodnotě  $10^9$  A. Toto pole je deformováno interakcí se slunečním větrem do charakteristického tvaru.

**Polární kasp** – nálevkovitá oblast v blízkosti magnetických pólů planety, kterou pronikají jako obrovským vírem nabitě částice do atmosféry. Název pochází z anglického „cusp“ (roh, cíp).

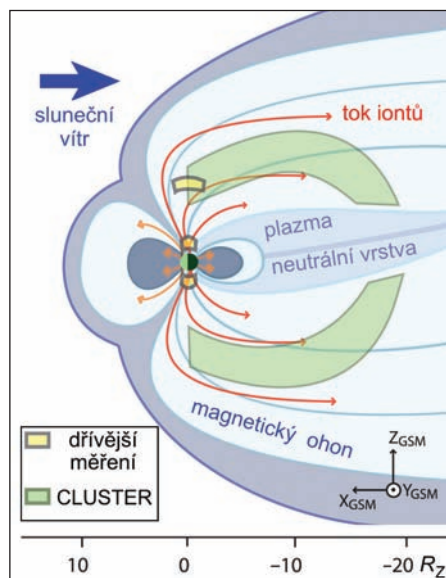
Únik iontů polárními oblastmi. ESA.





Podélné rychlosti iontů (modře měřené hodnoty, červeně vypočítané z Nilssonova mechanismu). *European Geosciences Union, 2008.*

Únik vodíkových iontů do magnetického ohonu Země. Cluster měřil poprvé tok chladných iontů i ve velkých vzdálenostech od Země. Diagram je v tzv. GSM souřadnicích (osa x míří ke Slunci, osa z kolmo na rovinu oběhu Země kolem Slunce). *Nature Geoscience, 2009.*



tické silokřivky různě vlní. Základní mód je způsoben otáčením Země. Silokřivky blízké k Zemi mají přibližně dipólový charakter a otáčejí se spolu se Zemí (pro vzdálenější silokřivky to neplatí, jsou protaženy do magnetického ohonu). Na denní straně jsou blízké silokřivky slunečním větrem stlačeny více k zemskému povrchu, na noční straně jsou tytéž silokřivky dále od Země. Tím vzniká kmitání silokřivek způsobené rotací Země. Silokřivka se může rozvlnit i dalšími způsoby. Těžké ionty jsou na silokřivce zavěšeny jako závažíčka na houpačce se struně, která se mohou volně pohybovat podél struny. Některým iontům předá pohybující se silokřivka značnou energii a jsou (podobně jako prakem) vymrštěny z polární oblasti buď na vyšší silokřivku, nebo z dosahu gravitačního pole Země. Uvedený mechanismus poprvé vysvětluje vysoké rychlosti iontů podél silokřivek zemského pole (tzv. paralelní rychlosti).

Dr. Hans Nilsson odhaduje, že Země takto ztratila za několik miliard let mezi 3 až 18 procenty současné zásoby kyslíku, což je z dlouhodobého hlediska zanedbatelné. Kyslík je velmi reaktivní prvek (vzpomeňte si na rez) a dlouhodobě by se tak jako tak v atmosféře neudržel. Je zde neustále doplňován činností živých organismů. I když tedy tento mechanismus není pro složení atmosféry Země rozhodující, je dobré poznávat nové typy interakce slunečního větru, magnetosféry a atmosféry Země, kde probíhá řada dosud nepoznaných jevů.

### Únik vodíkových iontů magnetickým ohonem

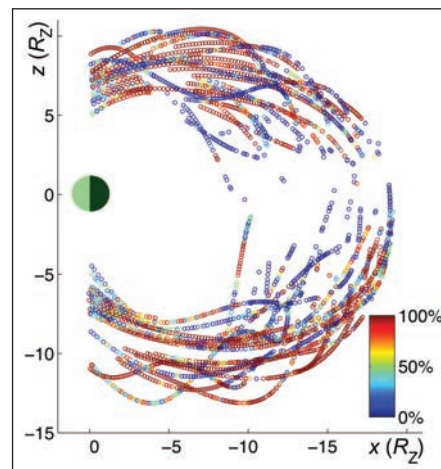
Další zajímavý výsledek získal Erik Engwall se spolupracovníky z univerzity v Upsalle (Švédsko). Skupina analyzovala data z Clusteru z období mezi červencem a říjnem 2002. Vědci vyvinuli novou analýzu dat, která umožnila nepřímou detekovat i chladné vodíkové ionty (pod 1 eV, tj. přibližně pod 10 000 K) ve velkých vzdálenostech od Země. Metoda je založená na vyhodnocení rozdílu hodnot elektrického pole naměřeného dvěma různými přístroji. Rozdíl hodnot je způsoben přítomností chladných iontů. Tyto částice nebylo možné dosud detekovat, protože je jejich potenciál menší než potenciál družice v elektromagnetickém záření Slunce. Z analýzy vyplynulo, že značná část vodíkových iontů uniká podél magnetických silokřivek do magnetického ohonu Země a na noční straně ji podél otevřených silokřivek opouštějí. Z analýzy vyplynulo, že jde o  $10^{26}$  iontů za sekundu, což odpovídá množství několika tisíců tun ročně. Poprvé tak byl měřen tok vodíkových iontů

ve větších vzdálenostech od Země. Žádný z předchozích družicových experimentů nebyl schopen tok chladných iontů měřit. Změření toku chladných vodíkových iontů je důležité pro pochopení formování a vývoje planetárních atmosfér. Upsallská skupina publikovala objev na počátku roku 2009.

### Zpětné toky iontů urychlené směrem k Zemi

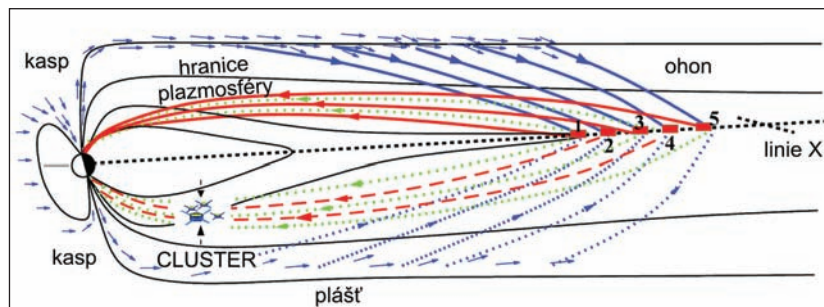
A ještě do třetice jeden zajímavý objev. Ohlásil ho na konci roku 2007 Lev Zelenyj z ruského IKI (Institut Kosmičeskich Issledovanij). Již v 80. a 90. letech 20. století byly detekovány na noční straně Země toky iontů mířící směrem k nám. Existovalo několik teorií, jak by mohlo k urychlování docházet. Zdá se, že Zelenyj na základě dat pořízených čtveřicí Cluster rozhodl jednoznačně ve prospěch jednoho z navržených mechanismů vzniku těchto svazků. Většina částic slunečního větru obtéká Zemi. Malá část se ale polárními kaspami dostane do blízkosti magnetických pólů, kde je magnetickými zrcadly odražena do pláště magnetosféry. Částice poté pronikají v magnetickém ohonu směrem k neutrální vrstvě magnetického pole. Pokud se částice dostanou do tzv. rezonančních oblastí (na obrázku jsou vyznačeny červenými obdélníky), jsou urychleny zpět směrem k Zemi a s vysokou rychlostí se vracejí do polárních oblastí. V datech zaznamenaných v letech 2001 až 2003 našel Zelenyj 90 takových událostí urychlení. Možná existují i jiné mechanismy urychlování částic směrem k Zemi, ale tento byl čtveřicí Cluster definitivně potvrzen.

Čtveřice družic Cluster Evropské kosmické agentury v posledních letech nemalou měrou přispěla k poznání magnetosféry Země, zejména k poznání jevů probíhajících mezi atmosférou, ionosférou a magnetosférou Země. Možnost měřit elektrická pole, magnetická pole a koncentrace částic ve čtyřech blízkých místech magnetosféry je zcela jedinečná. Výsledky, které získává čtveřice družic Cluster, nemůže v tuto chvíli poskytnout žádná jiná současná družice.



Graf měření podél dráhy družice CLUSTER III. Každý bod odpovídá desetiminutovému úseku dat. Barva představuje relativní výskyt chladných iontů zjištěný Engwallowou metodou. Graf je opět v GSM souřadnicích. *Nature Geoscience*, 2009.

Trajektorie částic slunečního větru, které jsou urychlovány na neutrální vrstvě zpět k Zemi. ESA.



■ Petr Kulhánek, 20. 3. 2009, AB 12/2009

## Červené přízraky, elfové a pozemské gama záblesky

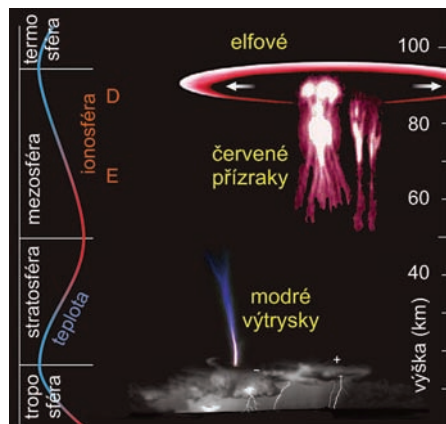
**Troposféra** – nejnižší vrstva atmosféry, ve které se tvoří počasí. Troposféra sahá od povrchu Země až do 7 km v polárních oblastech a 17 km okolo rovníku. Teplota troposféry klesá s nadmořskou výškou.

**Stratosféra** – vrstva atmosféry nad troposférou. Sahá přibližně do 50 km. Teplota s nadmořskou výškou roste.

**Mezosféra** – vrstva atmosféry nad stratosférou, přibližně do 80 až 85 km. Teplota s nadmořskou výškou klesá.

**Termosféra** – horní vrstva atmosféry, sahá od konce mezoféry přibližně do vzdálenosti 640 km od povrchu. Teplota s nadmořskou výškou stoupá.

Různé typy výbojů v horní atmosféře. Pravá stupnice znázorňuje výšku. Levá křivka odpovídá teplotě (nanášené na vodorovnou osu) v závislosti na výšce (na svislé ose). Dolní okraj vrstvy D v ionosféře je charakterizován prudkým nárůstem koncentrace elektronů. Právě v této oblasti se nacházejí hlavy červených přízraků a elfové. Evropská kosmická agentura.



Dnes víme, že bouře je mnohem komplikovanějším jevem, než jsme si dosud mysleli. Elektrické výboje mezi mraky nebo mezi mrakem a zemí, které známe jako běžné blesky o energii  $10^7$  až  $10^{10}$  J, jsou jen jedním průvodním jevem. Není to tak dávno, co se ukázalo, že některé typy výbojů mohou směřovat i vzhůru, z horních částí mraků směrem do ionosféry. Na přelomu tisíciletí byly také objeveny pozemské gama záblesky doprovázející rozsáhlejší bouřkovou aktivitu. Vědci tyto jevy ještě ne zcela pochopili a jsou proto předmětem rozsáhlého vědeckého výzkumu.

### Červené přízraky, elfové a modré výtrasky

Záznamy o tom, že piloti letadel občas vidí výrazně barevné záblesky, (červené nebo modré), jsou velmi staré. Nikdo jim však nepřikládal většího významu. Teprve po nafilmování těchto atypických výbojů kamerami na raketoplánu se situace změnila a od roku 1990 započal jejich intenzivní vědecký výzkum. Za bouřek se z horních vrstev mraků ve výškách kolem 15 kilometrů občas vyvinou modré výtrasky (blue jets) mířící do horních částí stratosféry, do výšky 45 až 50 kilometrů. Dalším druhem výbojů jsou červené přízraky (red sprites) objevující se na dolním okraji ionosféry. Na fotografiích vypadají jako visící příšerky s hlavou zakotvenou v ionosféře. Kolem těchto výbojů se vytváří zářící kruhové oblasti, snad expandující prstence či disky, kterým se začalo říkat elfové (někdy také přízračná haló).

### Pozemské gama záblesky

Gama záblesky pocházející ze Země byly objeveny v roce 1994 rentgenovou družicí COMPTON. Přístroj BATSE na této družici pozoroval přibližně 10 záblesků za rok až do zániku družice v roce 2000. Brzy se ukázalo, že v oblastech, ze kterých gama záblesky pocházejí, byla vždy intenzivní bouřková činnost. V angličtině se tyto záblesky označují TGF (Terrestrial Gamma-ray Flashes). K jejich intenzivnímu výzkumu přispěla také družice RHESSI. Ukázalo se, že energie gama záblesků může být i přes 10 MeV, tedy jde o energetičtější fotony, než přicházejí ze záblesků slunečních. Záblesk trvá obvykle stovky mik-



rosekund až několik milisekund a míří od země směrem do vesmíru. Po gama záblesku následuje zpravidla běžný blesk směrem k zemi. Mechanismus tedy musí souviset se silným elektrickým polem, které je v mraku přítomno před vytvořením klasického blesku.

Fyzikální mechanismus vzniku gama záblesků není znám do detailů, ale většina odborníků se přiklání k názoru, že jde o průraz způsobený relativistickými elektrony. Pokud má elektron běžnou tepelnou energii, nemůže být v mraku urychlen na relativistické rychlosti potřebné ke vzniku gama záblesku. Jeho urychlení brání četné srážky s atmosférou. Stačí ale přítomnost jednoho jediného elektronu s velkou počáteční rychlostí. Takové elektrony vznikají jako sekundární částice při interakci kosmického záření s atmosférou. Je k tomu zapotřebí primární částice o energii  $10^{18}$ – $10^{19}$  eV. Rychlý elektron totiž s atmosférou interaguje výrazně méně, jeho střední volná dráha umožní další urychlení až na hodnotu  $10$ – $20$  MeV.

Jak je to možné? Představte si pomalý elektron prolétávající kolem iontu v určité vzdálenosti. Jeho dráha bude elektrickou silou zakřivena. Pokud ve stejné vzdálenosti proletí rychlejší elektron, zakříví se jeho dráha méně. Tedy rychlejší elektrony s látkou reagují méně. Správně bychom měli říct, že účinný průřez interakce klesá a střední volná dráha roste. A právě takové rychlé (tzv. runaway, ubíhající) elektrony jsou výrazně urychlovány elektrickým polem v mraku, které má hodnotu  $50$ – $400$  kV/m. Na své cestě takový energetický elektron vytváří další energetické elektrony schopné urychlení. Vytvoří se tak úzce směřovaný kužel s vrcholovým úhlem několika stupňů směrem vzhůru. Kužel je dlouhý cca  $2,5$  km. Nějakým mechanismem je svazek takto urychlených elektronů vymrštěn z horní hrany bouřkových mraků (cca  $10$  až  $20$  kilometrů) do výšky nad  $30$  kilometrů. Může jít o nějaký typ nestability, uvažuje se například o hvizdech nebo o nestabilitě vytvořené relativním driftem pomalých a rychlých elektronů. Ve výšce nad  $30$  kilometrů tyto elektrony svou energií vyzáří brzděným zářením a vzniklý úzce směřovaný gama záblesk opustí Zemi. Do jaké míry souvisí tyto gama záblesky s vytvářením červených

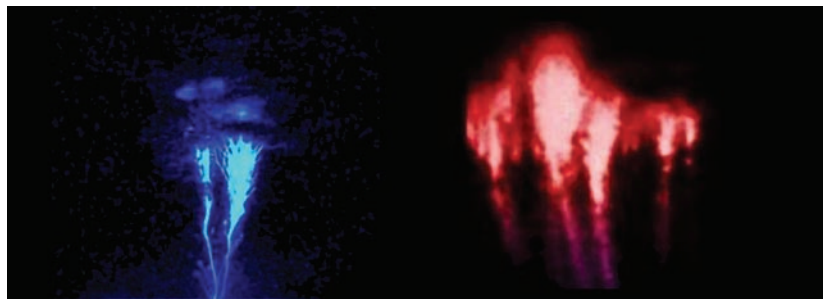
**Ionosféra** – slabě ionizovaná oblast atmosféry Země, dělí se na vrstvy E ( $60$ – $90$  km), D ( $90$ – $150$  km), F ( $150$ – $800$  km). Přes den se vrstva F dělí na F1 a F2. Ve výšce  $300$  km je koncentrace  $10^6$  částic v jednom  $\text{cm}^3$ .

**Van Allenovy pásy** – jde o nabitě částice (elektrony, protony a ionty  $\text{O}^+$ ,  $\text{He}^+$ ) zachycené v okolí Země ve vzdálenosti  $1,2$  až  $4 R_Z$  magnetickým polem Země. Tyto částice září. Jejich energie je od  $1$  keV do  $100$  MeV. Pásy objevil James van Allen z University of Iowa na základě měření družice Explorer 1 a 2.

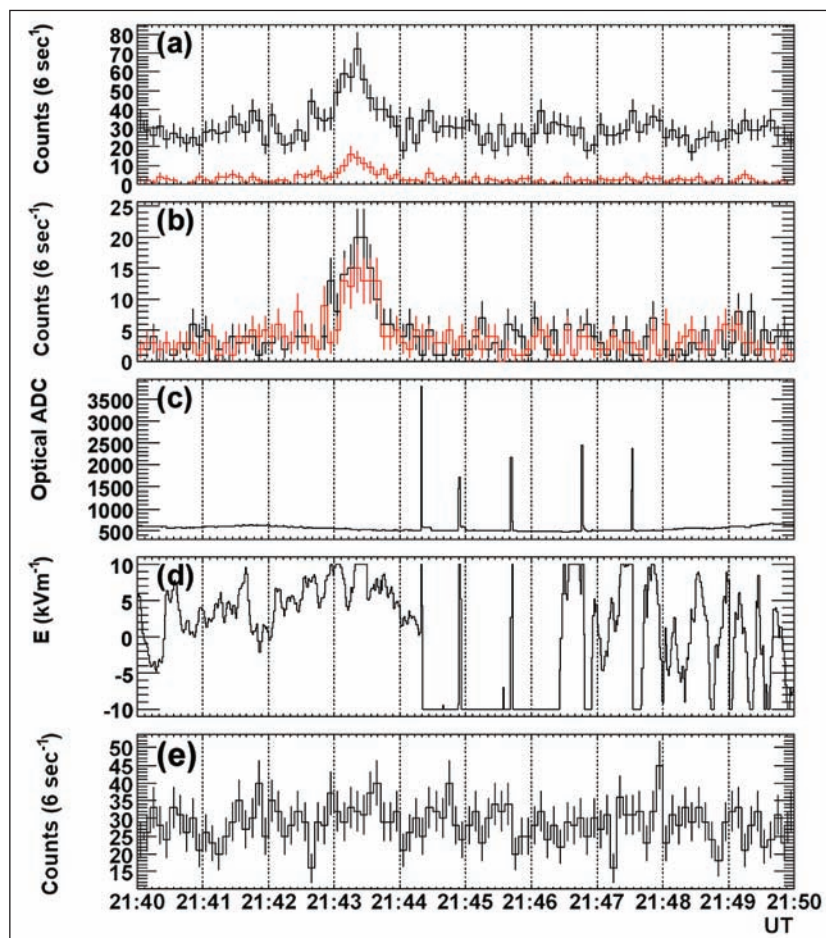
**Hvizdy** – nízkofrekvenční elektromagnetické vlny ( $300$  Hz až  $30$  kHz) šířící se podél magnetických silokřivek. Charakteristické je krátkodobé trvání s postupně klesající frekvencí vlny. Jde o modifikaci tzv. R vln. Poprvé byly pozorovány v kanálech blesků na Zemi Barkhausenem v roce 1919.

**R vlna (pravotočivá vlna)** – elektromagnetická vlna šířící se plazmatem podél magnetického pole. Elektrický vektor opisuje kružnici ve směru shodném s pohybem elektronů kolem silokřivek magnetického pole. Je-li frekvence oběhu elektronů shodná s frekvencí elektromagnetické vlny, dochází k tzv. cyklotronní rezonanci.

Červené přízraky se vyskytují ve větších výškách než modré výtrasky. Nalevo: modrý výtrask. Napravo: Červené přízraky. V. Pasko, Penn State Electrical Engineering.



Historicky první komplexní nahrávka bouřkového gama záblesku doplněná nahrávkou optického senzoru a senzoru elektrického pole. Horní dvě nahrávky jsou ze scintilačních detektorů (energie gama fotonů  $> 3$  MeV). Nahrávka (c) je z optického senzoru a je na ní patrný záznam pěti blesků. Nahrávka (d) je ze senzoru elektrického pole, patrný je pokles pole souvisící s blesky. Poslední nahrávka je z plastového scintilátoru a zaznamenávala fotony s energií nad 1 MeV. H. Tsuchiya a kol., arXiv:0708.2947v1, 2007.



přizraků, elfů a modrých výtrysků není dosud známo. Také není jasné, zda mohou elektrony urychlené výše popsaným mechanismem plnit vnitřní van Allenův radiální pás, ve kterém byly elektrony o energii 10 až 20 MeV detekovány.

### Japonské pozorování gama záblesku ze Země

Dne 6. ledna 2007 byl v Japonsku při silné bouřce pozorován zcela výjimečný gama záblesk přímo ze země. Výjimečný byl z několika

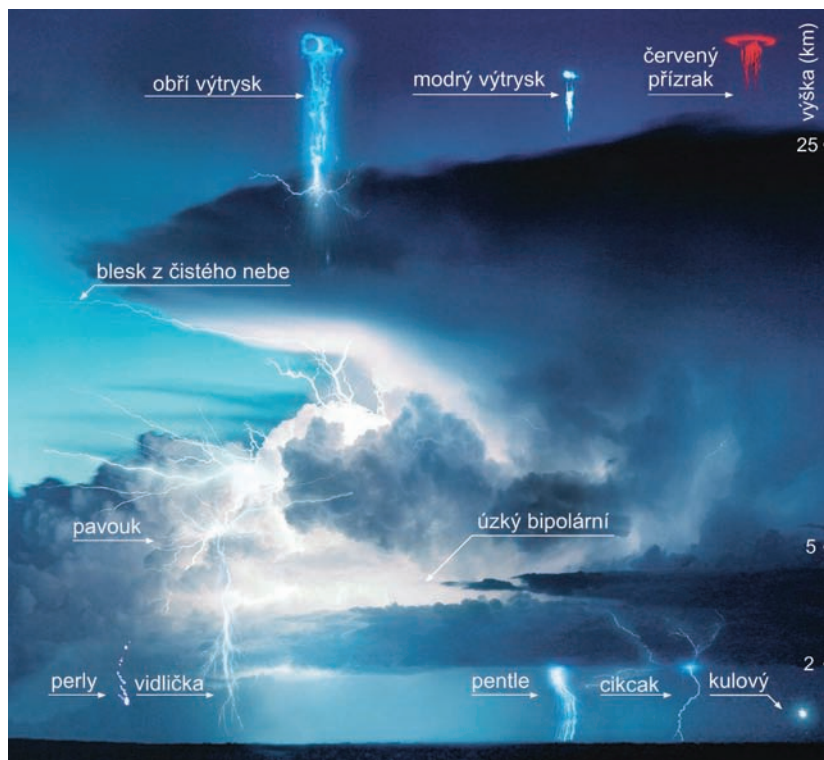
hledisek. Poprvé byl pozorován mimořádně přesnými přístroji se směrovou citlivostí a současně byla pořízena nahrávka v optickém oboru. Záblesk zcela zjevně mířil k zemi, na rozdíl od záblesků pozorovaných na oběžné dráze. Největší záhadou je ovšem délka trvání záblesku přes 40 sekund! Všechny záblesky pozorované z vesmíru mají maximální délku několik milisekund.

Gama záblesk pozorovala skupina vedená Harafumi Tsuchiyou z Laboratoře kosmického záření, která patří japonskému vědecko-výzkumnému centru RIKEN, dne 6. ledna v 21:43 světového času. Soustava několika scintilačních a optických detektorů byla umístěna na střeše jaderné elektrárny Kashiwazaki-Karima. Jeden typ detektorů byl schopen měřit v rozmezí energií  $0,04\div 10$  MeV a druhý  $0,6\div 80$  MeV. Na střeše byl také umístěn senzor elektrického pole a optický senzor. Všechny gama detektory zaznamenaly 40 sekund trvající záblesk s energetickým spektrem fotonů až do 16 MeV.

Energetické spektrum bylo mocninné, tj. počet gama fotonů byl úměrný  $E^\beta$  s koeficientem  $\beta \approx -1,6$ . Optický senzor následně zaznamenal 5 píků, které vědci interpretovali jako blesky, z nichž první následoval necelou minutu po gama záblesku. Vybití mraku bleskem způsobilo otočení polarizace elektrického pole na měřicím senzoru. Jde o první a zatím jediné takto komplexní proměření gama záblesku vzniklého při bouři. Doufáme, že obdobná měření budou následovat a přispějí k pochopení mechanismů odehrávajících se vysoko nad našimi hlavami. Snad k tomu přispěje i Evropskou kosmickou agenturou plánovaný výzkum výbojů v horní atmosféře na Mezinárodní kosmické stanici.

Na závěr připomeňme, že gama záblesky pozorované při bouřkové činnosti nijak nesouvisí s gama záblesky pozorovanými od 60. let 20. století z vesmíru. Poprvé byly sledovány sítí špionážních družic VELA a pozorování byla odtajněna v roce 1973. Tyto záblesky mohou vznikat při zhroutení velmi hmotných hvězd na černé díry nebo při splynutí dvou neutronových hvězd či černých děr a označujeme je GRB (Gamma Ray Burst). Další druh gama záblesků vzniká při rekonekci magnetických siločar magnetarů a má označení SGR (Soft Gamma Repeater). Nepochybně existují i další, dosud nepoznané mechanismy vzniku gama záblesků z prostorných hlubin vesmíru.

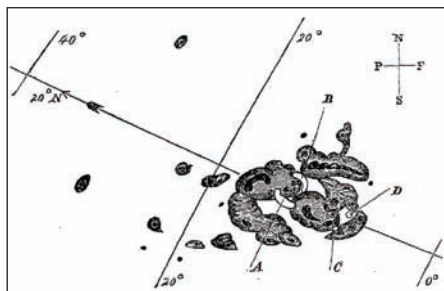
■ Petr Kulhánek, 5. 10. 2007, AB 39/2007



Při pozorování bouřkové činnosti ze země vidíme jen malou část bouřkových jevů, přibližně do výšky dvou kilometrů. K nejvyšším jevům patří červené přízraky, které jsou pozorovány i ve výškách kolem 80 kilometrů. Časopis Wired.

**Elektronvolt (eV) – 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 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 ( $E = mc^2$ ) a teplota ( $E = kT$ ). Teplota 1 eV odpovídá teplotě přibližně 11 600 K.

## Magnetosféra Země vydává svá tajemství



Carringtonovo pozorování slunečních skvrn a vzplanutí (A, B, C, D) ze dne 1. 9. 1859.

Sluneční vítr není jen neustálým poklidným proudem nabitých částic. Vykazuje poruchy podobné skutečnému větru a čas od času s ním k Zemi přichází chuchvalce plazmatu (plazmoidy) spolu s vlečeným (zamrzlým) magnetickým polem. Ze Slunce jsou plazmoidy vyvrhovány například při koronálních výronech hmoty. Pokud plazmoid doletí k Zemi a výrazněji naruší její magnetické pole, říkáme, že došlo k magnetické bouři. Intenzita magnetické bouře je většinou posuzována podle tzv. Dst indexu. Existuje ale i mnoho dalších indexů a koeficientů geomagnetické aktivity.

První magnetickou bouří pozorovali pravděpodobně Anders Celsius (1701–1744) spolu se svým asistentem Olofem Hiorterem (1696–1750) v roce 1741. Zjistili, že v průběhu polární záře je stříška kompasu velmi neklidná a nepravidelně se komihá. Právě to je typické pro magnetické bouře a polární záře jsou jejich častým doprovodným jevem. V historii bylo zaznamenáno několik mimořádně silných magnetických bouří, jejichž popisem začneme naše vyprávění.

### 1859 – Carringtonovo vzplanutí

V roce 1859 došlo k zatím nejintenzivnější zaznamenané magnetické bouři vůbec. Tato magnetická bouře byla pozorována 2. září 1859, méně výrazné změny magnetického pole byly patrné již od 28. srpna. Na několik hodin byla vyřazena z provozu většina z 200 000 kilometrů tehdejších telegrafních linek v Evropě a Severní Americe. V té době šlo o jediný možný způsob komunikace na větší vzdálenosti, a proto měla událost celosvětový význam. Na některých místech došlo k obloukovému výboji a následným rozsáhlým požárům. Chování magnetického pole Země bylo nahráváno prvními magnetometry umístěnými v blízkosti Londýna a v Indii (observatoř Colaba, Mumbai). Po několik hodin byly pozorovány kvaziperiodické oscilace magnetického pole s několikaminutovou periodou. Tyto ultranízko-frekvenční změny pole nazýváme dnes ULF (Ultra Low Frequency) vlny. Obdobně jako kytarista rozezvučí struny kytary, sluneční vítr rozvlní magnetické siločáry natažené mezi oběma póly. Celá bouře souvisela s rentgenovým vzplanutím na Slunci, které pozoroval 1. září 1859 anglický amatérský

Polární záře pozorovaná v Antarktidě (na pozadí je hora Mt. Erebus) při britské expedici British Imperial Antarctic Expedition vedené zkušeným polárním badatelem Ernestem Shackletonem (1874–1922) v letech 1907 až 1909.



astronom Richard Christofer Carrington (1826–1875) a nezávisle další anglický amatérský astronom Richard Hodgson (1855–1905). Carrington zaznamenal vzplanutí jako bílou svítící plošku při rutinním zakreslování slunečních skvrn na soukromé observatoři v Redhillu. Přibližně 18 hodin (17 hodin a 40 minut) po pozorování vzplanutí se objevila intenzivní magnetická bouře. Carrington správně předpokládal, že obě události spolu souvisí. Narazil ovšem na zcela odmítavý postoj svých současníků a sklídl jen jejich posměch. Z prodlevy mezi vzplanutím a vzniklou magnetickou bouří můžeme snadno určit rychlost šíření rázové vlny od Slunce na 2 380 km/s. Vzniklá bouře byla doprovázena polárními zářemi i v nízkých zeměpisných šířkách, dokonce až na 23° geomagnetické šířky. Dst index této dosud největší zaznamenané magnetické bouře se odhaduje na  $-1\,760$  nT.

Při velkých slunečních vzplanutích vytvářejí protony dopadající do horních vrstev atmosféry nitráty, které zanechávají stopy v ledovcích. V roce 1992 byly nalezeny stopy souvisící se vzplanutím z roku 1859 v grónských ledových krách. Obdobné otisky zde zanechala i dřívější vzplanutí, o kterých ovšem nemáme písemné záznamy.

### 1909 – polární záře v Singapuru

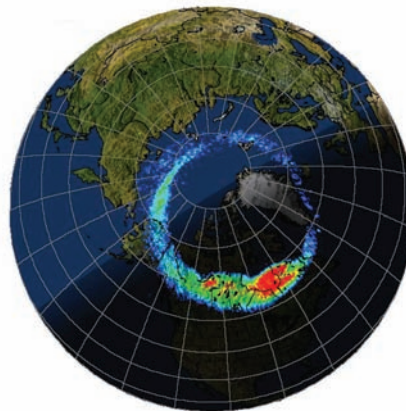
Další velmi významná geomagnetická bouře se odehrála v roce 1909. V té době již o souvislosti magnetických bouří a slunečních vzplanutí nikdo nepochyboval. V roce 1905 proběhla na toto téma diskuze v Královské astronomické společnosti v Londýně a Edward Walter Maunder (1851–1928) spolu s Josephem Larmorem (1857–1942) podali přesvědčivé argumenty. Maunder předložil statistickou analýzu souvislosti mezi vzplanutími a geomagnetickými bouřemi. Larmor argumentoval nedávným objevem elektronu (1897). Správně předpokládal, že svazky elektronů ze slunečního vzplanutí nějakým způsobem ovlivňují magnetické pole Země.

V roce 1909 tedy již nikoho souvislost obřích geomagnetické bouře se slunečním vzplanutím nepřekvapila. Joseph Norman Lockyer (1836–1920) pozoroval spektrograficky výrazné sluneční vzplanutí dne 24. září 1909 mezi desátou a jedenáctou dopolední hodinou světového času. Vzplanutí ve viditelném oboru zaznamenal v téže době také anglický astronom Edwin Holmes (1842–1919). Následný koronální výron hmoty způsobil rozsáhlou geomagnetickou bouří dne 25. září 1909. Důsledkem této bouře byly polární záře viditelné až v blízkos-

**Dst** – *Disturbance Storm Time*, jeden z indexů popisujících narušení magnetického pole Země. Jde o hodinový průměr odchylky vodorovné složky pole, měřený v blízkosti rovníku pozemními magnetometry. Měření se provádějí v blízkosti rovníku proto, že zde vodorovná složka pole dominuje. Odchylky od normální hodnoty jsou vždy záporné a jsou způsobeny prstencovým proudem elektronů a protonů. Tyto částice driftují v magnetosféře v rovině rovníku napříč zemským silokřivkám. Driftování je způsobeno zakřivením silokřivek a změnou velikosti magnetického pole ve vzdálenosti od Země. Výsledný elektrický proud teče od východu k západu.

**Aurorální ovál** – plošný výboj zářící v okolí 70. geomagnetické rovnoběžky. Je způsoben excitací atomů atmosféry pronikajícími nabitými částicemi slunečního větru. Při zvýšeném přísunu částic se aurorální ovál rozvine do polárních září.

*Aurorální ovál. Obrázek byl pořízen v ultrafialovém oboru americkou družicí Polar v roce 1997. Na pozadí je snímek Země ve viditelném oboru. George Parks (University of California), Ching Meng (JHU/APL).*



**Nestabilita KH** – Kelvinova-Helmholtzova nestabilita rozvíjející se na rozhraní dvou prostředí s různou rychlostí (například vítr na vodní hladině). Někdy dochází k vytváření typických virů. Nestabilitu poprvé popsal Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894) v roce 1868 a nezávisle na něm lord Kelvin (1824–1907) v roce 1871. Kompletní řešení pro nestlačitelné kapaliny našel v roce 1961 Subramanyan Chandrasekhar. V roce 1963 zobecnil toto řešení pro ideální magnetohydrodynamiku Amiya K. Sen, o rok později našel i řešení pro stlačitelný případ, které v roce 1968 zobecnil Richard A. Gerwin a v téže roce ještě David John Southwood pro magnetopauzu.

ti geomagnetického rovníku, dokonce v Singapuru a v Jakartě. V Austrálii došlo půlhodinovému přerušení telegrafního spojení Perth–Kalgoorlie a Perth–Albany. V obou případech šlo o mnohastakilometrové vzdálenosti. Dst index, který by odpovídal této události se odhaduje na  $-1\ 500$  nT.

Magnetická bouře měla opět za následek narušení telekomunikačních systémů. Mladý doktorand David Stenquist ze Stockholmské univerzity popsal ve své disertační práci z roku 1914 případ, kdy telefonní operátorka ve švédském Lulee dne 25. září 1909 po zdvihnutí mikrofonu dostala takovou elektrickou ránu, že nebyla schopna pohnout rukou. Mikrofon i její ruka byly obklopeny zářícím výbojem, jiskrami a rozptýleným světlem. Jiskry vytvořily na ruce drobné puchýře.

## 1989 – potemnělá Amerika

V Evropě se rozpadaly poslední bašty socialismu, na obloze osmým rokem pozorovala družice Dynamics Explorer aurorální ovál polárních září a vědci měli pocit, že je magnetosféra Země již nedokáže překvapit. Dne 13. března ale došlo k mimořádné události s Dst indexem  $-589$  nT. K Zemi dolétl oblak nabitých částic, který způsobil velmi prudké změny magnetického pole. Indukované elektrické napětí zapříčinilo vyhoření hlavního transformátoru hydroelektrárny s výkonem 21 000 MW v kanadské provincii Quebec. Centrální síť s pěti hlavními vedeními do Montrealu se zhroutila během necelé minuty. Zbytek sítě zkolaboval do 25 sekund. Totální výpadek energetické sítě zasáhl Ontario i Britskou Kolumbii. Lokální výpadky byly v Pensylvánii, New Yorku, Kalifornii a dokonce i Švédsku. Šest milionů lidí bylo bez energie po devět i více hodin. Čtyři navigační družice námořnictva Spojených států byly vyřazeny z provozu na celý týden. Nad ochromenou Amerikou se rozzářily nádherné polární záře...

Na základě této události se začalo kosmické počasí systematicky sledovat. Fluktuace magnetického pole mohou indukovat elektrické proudy nejenom ve vedeních vysokého napětí, ale i v dlouhých potrubích, například ropovodech a plynovodech a způsobovat jejich mimořádně silnou korozi. Průtokoměry poskytují navíc v průběhu geomagnetické bouře zcela nesmyslné údaje. Dalším problémem jsou kontrolní systémy kosmických lodí. I přes různé automatické ochrany dochází k mimořádným událostem způsobeným geomagnetickými bouřemi. Bezpečně se nemohou před geomagnetickými bouřemi cítit ani jader-

*Transformátor zničený v průběhu geomagnetické bouře v elektrárně v New Jersey, 1989.*



né elektrárny. Při události z 13. 3. 1989 se díky indukovaným polím přehřál jeden ze tří generátorů švédské jaderné elektrárny Oskarshamn.

Geomagnetické bouře opět předcházelo mimořádně jasné bílé sluneční vzplanutí (klasifikované jako X15) pozorované 7. až 10. března mnoha přístroji v aktivní oblasti skvrn označované číslem 5935. Koronograf družice SMM zaznamenal koronální výron hmoty, který doletěl k Zemi 13. března. Dne 16. srpna téhož roku došlo k ještě většímu vzplanutí (klasifikované jako X20), uvolněný oblak plazmatu ale naštěstí nemířil směrem k Zemi.

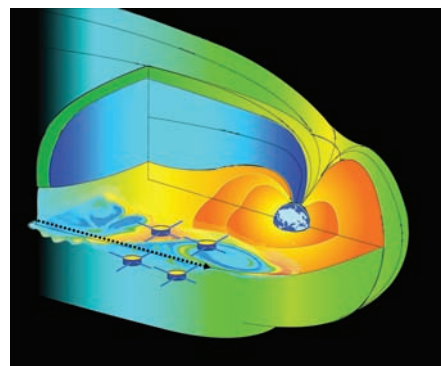
Sluneční rentgenová vzplanutí se podle intenzity dělí do několika tříd. Nevýrazný rentgenový pík s intenzitou nižší než  $10^{-6}$  W/m<sup>2</sup> se označuje jako třída B. Následuje třída C (malé vzplanutí) a D (střední vzplanutí). Nejintenzivnější je třída X, pro kterou je vyzařovaná intenzita vyšší než  $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>.

## 21. století – obří víry na boku magnetosféry

V 21. století probíhá především systematický družicový průzkum magnetosféry. Kolem Země se nachází velké množství družic se specializovanými přístroji pro průzkum magnetického pole a nabitých částic v magnetosféře. K nejvýznamnějším patří čtveřice družic Cluster Evropské kosmické agentury fungující od roku 2000. Tyto družice poprvé pořizují prostorová data ze čtyř pozorovacích míst. Dráha družic je volena tak, že procházejí čelní rázovou vlnou, polárními kaspami i plazmosférou, tedy všemi klíčovými místy zemské magnetosféry.

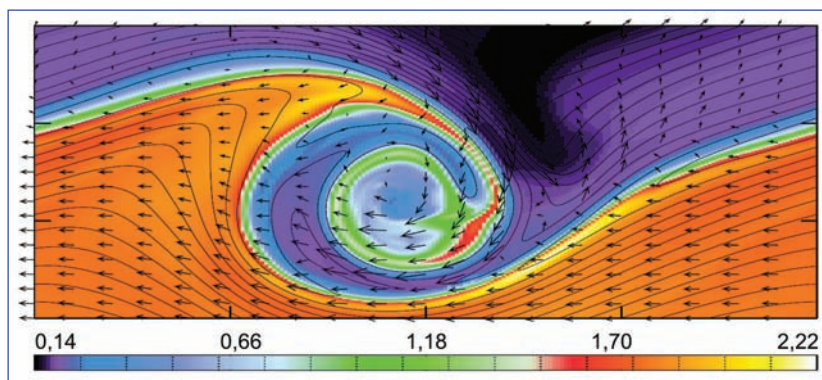
Po roce 2000 došlo k několika magnetickým bouřím, u žádné z nich ale Dst index nepoklesl pod hodnotu  $-500$  nT, která je považována za hranici velkých geomagnetických bouří. Při geomagnetické bouři z 30. 10. 2003 (Dst bylo  $-342$  nT) došlo v 20:07:15 UT k výpadku dodávky elektrické energie ve švédském Malmö. Odpojeno bylo 130 kV vedení a 50 000 lidí zůstalo bez elektrické energie po dobu 20 až 50 minut.

Některé menší magnetické bouře ale výrazně přispěly k naše-



Čtveřice družic Cluster prolétá v blízkosti hranice magnetosféry, kde vlivem Kelvinovy-Helmholtzovy nestability dochází ke vzniku obřích vírů. Směr letu družic je naznačen čárkovanou čarou. ESA/Cluster.

Numerická simulace vzniku KH nestability na boční hranici magnetosféry. Barevně je kódována hustota plazmatu (fialové odpovídá sluneční vítr, oranžové hustota magnetosférického plazmatu). Šípkami je znázorněna rychlost částic a šedými čarami magnetické siločkovky. ESA/Cluster.



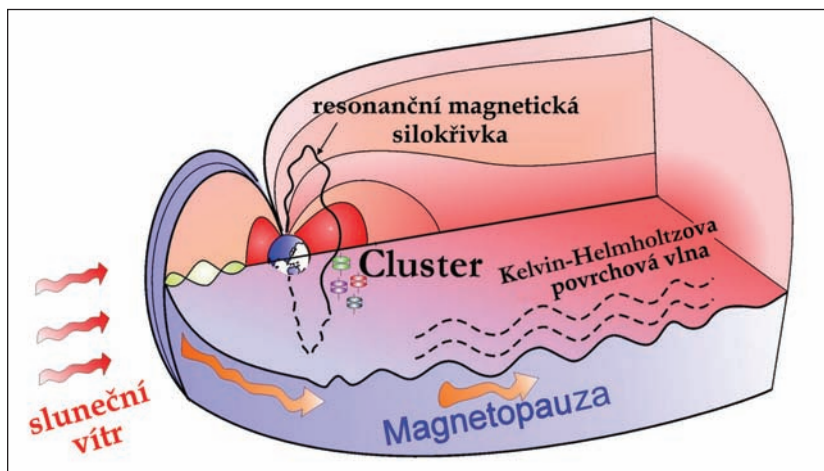
mu poznání magnetosféry. Dnes víme, že k přepojení magnetických silokřivek dochází na třech místech magnetosféry. Prvním místem, kde často dochází k přepojení silokřivek je zemský ohon. V jeho středu je oblast nulového magnetického pole. Nad a pod touto oblastí míří magnetické silokřivky opačným směrem a zde většinou dochází k jejich přepojování.

Druhým místem je čelo magnetosféry, kde zemské silokřivky míří trvale severním směrem (severní magnetický pól je na jižní polokouli). K přepojení se silokřivkami meziplanetárního pole dochází v situaci, kdy má meziplanetární pole jižní směr, tedy opačný než zemské pole. Po propojení silokřivce pronikají nabitě částice slunečního větru do magnetosféry Země. V případě, že meziplanetární pole je orientováno jižně, míří silokřivky obou polí souhlasně a přepojení je krajně nepravděpodobné. Dlouho je známo, že i v této situaci pronikají nabitě částice nějakým způsobem do vnitřních částí magnetosféry. Tento mechanismus byl objeven až čtveřicí družic Cluster.

Dne 3. července 2001 prolétly sondy oblastí na boku magnetosféry, kde se nacházely obří víry. Ukázalo se, že právě tyto víry jsou klíčem k záhadnému pronikání částic do magnetosféry Země. Na bocích magnetosféru obtéká sluneční vítr a je zde proto rozhraní dvou prostředí s různou rychlostí částic. Na takovém rozhraní dochází k rozvoji Kelvinovy-Helmholtzovy (KH) nestability. Klasickým případem KH nestability je vznik vln na vodní hladině za větru. Většinou na hranici zemské magnetosféry vznikají Kelvinovy-Helmholtzovy nestabilitou obří víry o velikosti 40 000 km až 55 000 km. V těchto vírech se mísí plazma slunečního větru s plazmatem magnetosféry. Při tomto mísení se silokřivky meziplanetárního pole, přenášené slunečním větrem, dostávají do protisměru se silokřivkami magnetosféry. V takové situaci dochází k přepojení silokřivek a po vzniklé silokřivce pronikají částice slunečního větru do vnitřní magnetosféry.

**Polární záře** – světelné úkazy vznikající podél 70° geomagnetické šířky ve výškách 70 až 900 kilometrů. Jejich původcem jsou elektrony (výjimečně protony) slunečního větru. V období zvýšené sluneční aktivity nebo při výronu sluneční hmoty se do magnetosféry Země dostane velké množství těchto nabitých částic, které pronikají až do horních vrstev zemské atmosféry. Zde excitují atomy a molekuly kyslíku, dusíku i dalších prvků. Nejznámější je zelená čára kyslíku na vlnové délce 557,7 nm. Polární záře stejného typu vznikají v severní i jižní polární oblasti naší planety a rozprostírají se podél tzv. aurorálního oválu. Typicky vyzařují také v ultrafialové oblasti. Mechanismus vzniku polárních září poprvé objasnil norský vědec Kristian Birkeland v roce 1896. Na počátku 20. století konal experimenty s malou napodobeninou Země, tzv. terellou. Aurorální ovál byl jako celek poprvé vyfotografován družicí Dynamics Explorer v roce 1981. Dnes jsou polární záře předmětem výzkumu mnoha družic, sond a pozemských vědeckých stanic.

Vznik ultra nízko frekvenční vlny v zemské magnetosféře. ESA/Cluster.



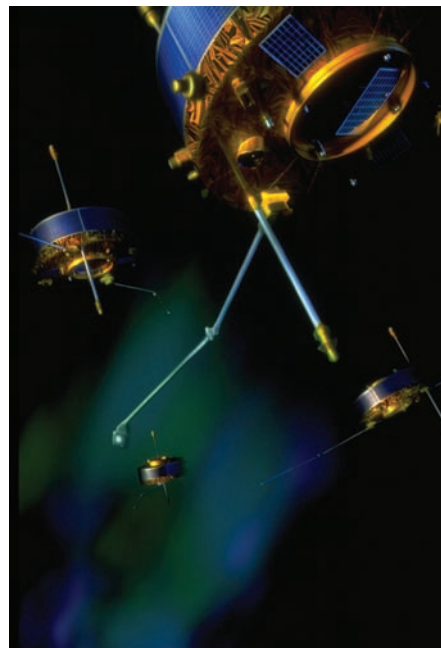


Nahrávka průletu družic Cluster víry na boku magnetosféry a následné přepojení magnetických siločárek byla sice pořízena v roce 2001, nicméně k jejímu zpracování a publikaci došlo až v roce 2004. Detailní vysvětlení mechanismů bylo podáno K. Nykyriem a dalšími až v roce 2006.

Dalším velmi zajímavým jevem v magnetosféře jsou ultranízko-frekvenční vlny (ULF) magnetického pole poprvé pozorované při obří magnetické bouři v roce 1859. Dnes se zdá, že začínáme chápat mechanismus jejich vzniku. Přispěla k tomu zejména měření družic Cluster ze 3. července 2001, 25. listopadu 2001 a 31. října 2003. Vždy šlo o situaci, při které byly na bocích magnetosféry detekovány obří víry. Pro studium vzniku vln byla mimořádně příznivá situace 25. listopadu 2001. Šlo o období menší geomagnetické bouře, při které byly družice Cluster na boku magnetosféry ve výšce 110 000 km. V té samé době byla družice POLAR ve výšce 58 000 km a současně byla pořízena detailní data na povrchu Země magnetometrem CARISMA. K analýze byla využita data z družic Goes 8, Goes 10 a Geotail. Rychlost slunečního větru byla kolem 750 km/s, tedy výrazně nad normální hodnotou 500 km/s. Počáteční zvlnění hranice magnetosféry se KH nestabilitou vyvinulo do vírové struktury, následně vznikla povrchová vlna šířící se do nitra magnetosféry. Tato vlna rezonovala s magnetickými siločárkami zemského pole a rozvlnila je na frekvenci  $1,5 \div 1,6$  mHz, tj. s periodou přibližně 11 minut. Období od pořízení dat po jejich komplexní analýzu trvá vždy několik let. Proto byla například analýza nahrávky z 31. října 2003 publikována až v roce 2009 a nezávisle potvrdila scénář z 25. listopadu 2001. V roce 2003 byly ULF vlny detekovány ve vnějším van Allenově pásu.

Rozvlněné siločárky magnetického pole se chovají jako pomalu kmitající napjaté struny. Magnetometry sond v takové situaci detekují pomalu se měnící hodnotu magnetického pole. Vzniklá ULF vlna je schopná urychlovat elektrony na velmi vysoké energie. Tyto elektrony jsou velmi nebezpečné jak pro provoz družic (zejména telekomunikačních družic na geosynchronní dráze), tak pro kosmonauty. Anglicky se nazývají *killer electrons* (zabijácké elektrony) a jejich výzkum je do budoucna velmi významným úkolem dnešní fyziky.

■ Petr Kulhánek, 20. 3. 2009, AB 12/2009



*Cluster. Jde o čtveřici evropských družic z roku 2000, které znamenají výrazný průlom ve studiu magnetosféry Země, zejména jejího prostorového uspořádání. Za téměř desetiletí činnosti učinily tyto družice mnoho významných objevů. ESA/Cluster.*

## Statický náboj na Měsíci se mění po 18 letech

**Měsíc** – přirozený satelit Země, rotuje tzv. vázanou rotací (doba oběhu a rotace je shodná). Díky tomu stále vidíme přibližně jen přivrácenou polokouli Měsíce. Měsíc je prvním cizím tělesem, na kterém stanul člověk (Neil Armstrong, 1969, Apollo 11). Voda na Měsíci byla objevena v stinných částech kráterů a pod povrchem (Lunar Prospektor, 1998). Povrch Měsíce je pokryt regolitem (drobná drť s vysokým obsahem skla). Malé pevné jádro je obklopené plastickou vrstvou (v hloubce 1 000 km pod povrchem). Velké množství kráterů má rozměry od milimetrů po stovky kilometrů. Několik z nich je pojmenováno i po českých osobnostech (například kráter Anděl).

Doba v hodinách, kterou Měsíc stráví za kalendářní měsíc v magnetosféře Země, se mění v osmnáctiletých cyklech. Mike Hapgood, Rutherforddova Appletonova laboratoř.

Magnetické pole chrání Zemi před nabitými částicemi z vesmíru a umožňuje udržení života na naší planetě. Zároveň by ale jeho působení na měsíční povrch mohlo ohrozit lidské výpravy na Měsíc plánované na konec druhého desetiletí. Prach na měsíčním povrchu se totiž nabíjí statickou elektřinou. Nabíjení se periodicky opakuje, když Měsíc prolétá magnetosférou Země. Kvůli parametrům oběžné roviny Měsíce se nabíjení navíc zvyšuje a zase snižuje každých 18 let. Maximum vyjde právě na období, kdy více států ohlásilo záměr návratu člověka na Měsíc.

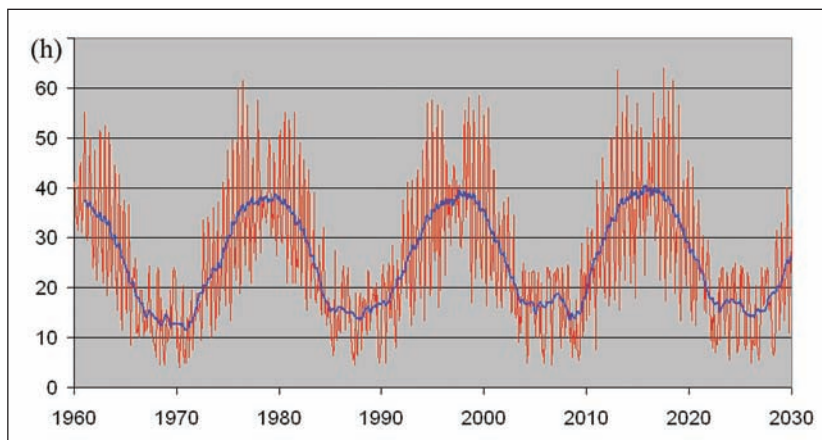
### Základní mechanismus

Většinu času tráví Měsíc mimo zemskou magnetosféru. Ta ale nemá pravidelný kulový tvar. Naopak, působením slunečního větru je značně protažená směrem od Slunce do charakteristického ohonu. Náš nejbližší vesmírný soused jednou měsíčně tímto ohonem prolétá.

Měsíc se tak dostává do místa s množstvím elektronů, které při průletu naráží na měsíční povrch. Ten je doslova poset prachem a elektrony ho dokážou nabít. Nabíjení měsíčního prachu statickou elektřinou poprvé pozorovala sonda Lunar Prospector v roce 1998. Statická elektřina je potenciálním problémem pro elektronické přístroje budoucích měsíčních kolonistů. Vlivem statické elektřiny by se dokonce mohly prachové částice vznášet nad povrchem Měsíce a zvýšit tak třeba riziko průniku do skafandru.

### Osmnáctiletý cyklus

Množství nabitých částic na povrchu Měsíce závisí na době nabíjení. Čím déle se pohybuje Měsíc v ohonu magnetického pole Země, tím více částic dopadne na jeho povrch. Měsíční dráha nemá tvar



kružnice a je navíc skloněná k ekliptice. Někdy proto Měsíc prolétá nad magnetosférou, jindy pod ní. Proces nabíjení může být v určitém období i dvakrát až třikrát vyšší než obvykle. Proces nabíjení počítali odborníci z anglické Rutherfordovy Appletonovy laboratoře na základě Tsyganěnkova modelu magnetického pole Země. Ukázalo se, že charakter měsíční dráhy způsobuje změny nabíjení povrchu s periodicitou 18 let. V letech 2016 až 2018 bude Měsíc prolétat magnetosférou nejčastěji a povrch bude mít největší náboj. Během letů Apollo byl měsíční povrch nabit na nejmenší možnou míru. Naopak výpravy, které by se k Měsíci vydaly roku 2018, naleznou povrch Měsíce nabitý na nejvyšší hodnotu.

### Co dál?

Přesný vliv nabitých částic na měsíční prach dnes ještě není znám. Někteří odborníci se obávají velkých problémů, jiní si myslí, že prach se sice bude lepít na kovové součástky, ale velké škody nezpůsobí. Vědci se snaží problém vyřešit v dostatečném předstihu před obnovením letů člověka na Měsíc. Svou roli může sehrát i sluneční záření, které s nabitým prachem interaguje. Větší riziko pro přístroje i člověka se očekává během měsíční noci.

■ Petr Sobotka, 25. 5. 2007, AB 21/2007

**Lunar Prospector** – Sonda NASA, která po mnoha letech od programu Apollo měla za cíl zkoumat Měsíc. Od roku 1998 mapovala povrch Měsíce a měřila gravitační a magnetické pole. V ednu 1999 byla mise prodloužena o 7 měsíců. Po vyčerpání paliva byla loď v roce 1999 nasměrována do jednoho kráteru v blízkosti jižního pólu Měsíce. Dopadem se měl uvolnit pozorovatelný oblak vodní páry a otvrdit tak existenci vody na Měsíci. Nic takového se ale nestalo.

**Apollo** – americký program pilotovaných vesmírných letů probíhající v letech 1961 až 1972. Vyvrcholením bylo přistání člověka na Měsíci (Neil Armstrong, 21. 7. 1969). K cestě na Měsíc byla používána dosud největší nosná raketa Saturn V. Kosmonauté posledních misí využívali k pohybu po povrchu Měsíce speciální pohyblivé vozítko.

**Saturn V** – největší nosná raketa dosud vyrobená člověkem. Raketa Saturn V byla použita v programu Apollo a bezpečně dopravila člověka na Měsíc. Jedná se o třístupňovou raketu. První stupeň (5 motorů F1) využívá jako palivo kerosin a kapalný kyslík, hoří 150 sekund a celkový tah má 34 MN. Druhý stupeň (5 motorů J2) má jako palivo kapalný vodík a kyslík, hoří 360 sekund a tah má 5 MN. Třetí stupeň má jediný motor J2 s tahem 1 MN a zapaluje se dvakrát, poprvé na 165 sekund a podruhé na 335 sekund. Celková výška rakety je 111 metrů, průměr 10 metrů, hmotnost 3 000 tun. Při 13 startech rakety nedošlo nikdy k žádné havárii.

## Třicetiletá pout' vesmírem stále pokračuje

**Radioizotopový termoelektrický generátor** – zdroj energie, který využívá tepla vzniklého rozpadem radioaktivních prvků. Soustava termočlánků pak převede tepelnou energii na elektrickou. Radioizotopový generátor byl s výhodou použit i pro napájení sond Voyager, kde jako radioaktivní materiál slouží oxid plutonia 238.

Start rakety Titan III-E Centaur se sondou Voyager 2 v nákladovém prostoru.



Je tomu již více než třicet let, kdy se jedny z nejúspěšnějších sond v historii kosmonautiky vydaly zkoumat planety sluneční soustavy. Jejich mise však stále trvá. Ano, jedná se o dvojici sond Voyager 1 a Voyager 2. Mise poslední jmenované sondy začala 20. srpna 1977 na Mysu Canaveral na Floridě. Raketa s Voyagerem 1 odstartovala ze stejného místa o šestnáct dní později. Nyní však již obě sondy mají hlavní část mise za sebou a letí prostorem vstříc jiným světům. Pojdme se tedy podívat na jejich neobyčejný příběh podrobněji.

### Průzkum vnějších planet

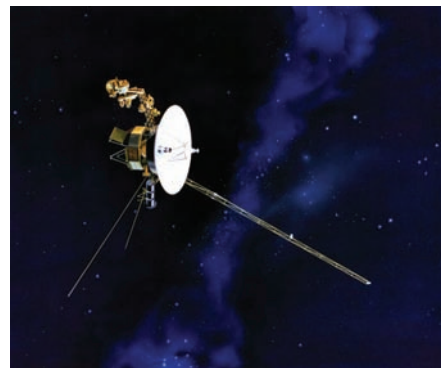
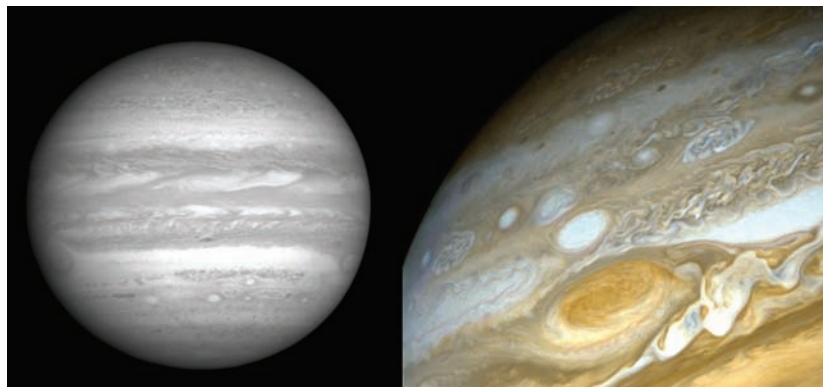
Hlavním úkolem Voyagerů bylo prozkoumat planety Jupiter a Saturn. Obě sondy disponují stejnými přístroji, mezi které patří magnetometry, kamery, částicové detektory a detektory vln v plazmatu. Přestože sonda Voyager 1 odstartovala ze Země později než Voyager 2, dorazila k Jupiteru o čtyři měsíce dříve, v březnu roku 1979. Voyagery zde pořídily celkem 52 000 snímků Jupiteru a jeho měsíců. Zajímavým objevem bylo pozorování celkem devíti aktivních vulkánů na měsíci Io. Bylo to vůbec první pozorování sopečné aktivity na jiném objektu sluneční soustavy než na Zemi. Materiál je při sopečných erupcích vyvrhován rychlostí až 1 km/s. Dalším překvapením bylo objevení Jupiterova nepříliš výrazného prstence. Jeho průměr je přibližně 258 000 kilometrů, což je méně než dvojnásobek Jupiterova průměru. Tloušťka prstence dosahuje maximálně několika kilometrů. Sondy poslaly na Zemi data o velmi zvláštní magnetosféře Jupiteru, která je největší magnetosférou sluneční soustavy. Její ohon sahá až k dráze Saturnu. Planeta Jupiter má největší magnetický moment ze všech planet sluneční soustavy. Zajímavé bylo pozorování spektrálních čar v magnetosféře, které odpovídají několikanásobně ionizovaným atomům síry a kyslíku. Nic takového však nebylo pozorováno sondami Pioneer 10 a Pioneer 11, které zde prováděly měření v letech 1973 a 1974. Sondy Pioneer sice zaznamenaly plazma v magnetosféře, avšak dominantní byly spektrální čáry vodíku. Síra je vyvrhována spolu s dalším materiálem při erupcích na měsíci Io, čímž vzniká okolo Jupiteru (podél oběžné dráhy Io) plazmový torus. Vzhledem k neshodám v naměřených datech sond

Voyager a Pioneer je možné se domnívat, že sopečná aktivita na Io má časově proměnlivý charakter. Voyagery detekovaly okolo Jupiteru v plazmovém toru větší hustotu nabitých částic, než se předpokládalo. Proto byly sondy odkloněny z dráhy, která měla vést právě skrze plazmový torus. Přesto však průletem okolo Jupiteru Voyagery absorbovaly dávku radiace ekvivalentní tisíci smrtelných dávek pro člověka. Všechna zařízení na sondách však fungovala bez problému dál.

Po prozkoumání Jupiteru se stal objektem zájmu Saturn. Voyager 1 se přiblížil k Saturnu v listopadu 1980 a Voyager 2 v srpnu 1981. Sondy potvrdily podobné složení atmosféry Saturnu a Jupiteru, hlavní složky tvoří vodík a helium. Bylo pořízeno velké množství fotografií Saturnových prstenců, měsíců a dokonce i polární záře. Sondy objevily několik nových měsíců. Data z magnetometrů ukázala shodu magnetické a rotační osy Saturnu, jejich vzájemný úhel nepřevyšuje jeden stupeň. Podobné výsledky naměřil také Pioneer 11, který proletěl kolem Saturnu v září roku 1979. Průzkumem Saturnu měla původně skončit mise obou Voyagerů, avšak vzhledem k jejich bezproblémovému provozu NASA rozhodla o jejím prodloužení.

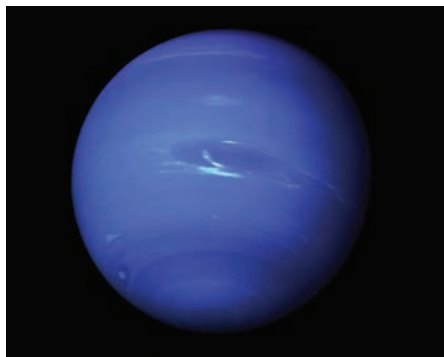
Zatímco Voyager 1 po opuštění Saturnu zamířil ven ze sluneční soustavy, Voyager 2 se vydal na pouť k dalším dvěma neméně zajímavým planetám – Uranu a Neptunu. Zde sonda provedla podobná měření, jako u předchozích dvou planet. Voyager 2 byl navigován k Uranu s přesností 100 km, přičemž je třeba si uvědomit, že použité technologie pocházejí z počátku sedmdesátých let. Zajímavostí je, že Voyager 2 vyfotografoval deset měsíců této planety, o jejichž existenci předtím nikdo nevěděl.

V létě roku 1989 se Voyager 2 přiblížil na pouhých 5 000 km k nejvzdálenější planetě sluneční soustavy – Neptunu. Sonda Voyager 2 jako první v historii fotografovala povrch Neptunu a studovala jeho magnetosféru. Průletem okolo Neptunu Voyager 2 ukončil výzkum planet sluneční soustavy a vydal se obdobně jako Voyager 1 vstříc okraji sluneční soustavy.



*Voyager, dobře patrná je směrová anténa a magnetometr.*

*Atmosféra Jupiteru má pásovou strukturu. Na rozhraní pásů s různými rychlostmi proudění vznikají mohutné atmosférické víry. Některé z nich jsou stabilní pouze několik dní, jiné pozorujeme již několik století. Příkladem může být velká červená skvrna napravo.*



Modrá barva atmosféry Neptunu je dána množstvím metanu, který pohlcuje červenou složku spektra.

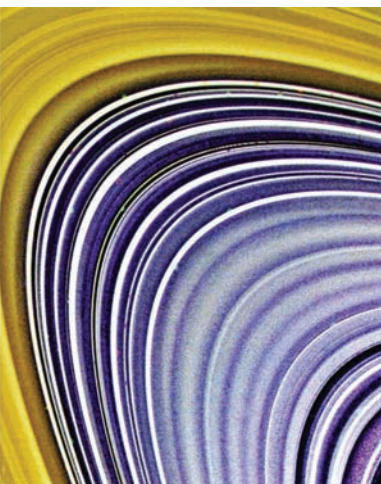
Nalevo je fotografie Saturnu s jeho měsíci pořízená sondou Voyager 2 ze vzdálenosti 34 milionů kilometrů. Napravo vidíte Saturnovy prstence v nepravých barvách odpovídajících rozdílnému chemickému složení.



## Za hranice sluneční soustavy

Sondy monitorovaly po celou dobu letu částice slunečního větru a nízkoenergetickou složku kosmického záření. Velmi zajímavé jsou údaje z těchto detektorů v průběhu průletu Voyageru 1 terminační vlnou na konci roku 2004. Jde o místo, kde dochází k prudkému poklesu rychlosti částic slunečního větru a následnému zvýšení jejich hustoty. Tímto procesem vznikne okolo sluneční soustavy kulová „slupka“ nazývaná terminační vlna. Voyager 2 prošel terminační vlnou v srpnu 2007.

Nyní se Voyager 1 nachází přibližně 110 AU a jeho dvojče 89 AU (červen 2009) daleko od Slunce. Voyager 1 je nejvzdálenějším objektem, který člověk stvořil. Voyager 1 se pohybuje od Země rychlostí 32,3 km/s a Voyager 2 rychlostí 26,5 km/s. Obě sondy napájí trojice radioizotopových termoelektrických generátorů, jejichž výkon plynule klesá od doby prvního spuštění. Radioizotopové generátory jsou však stále schopny dodat dostatek energie (280 W, červen 2009) pro provoz několika zařízení sond i pro přenos dat pomocí elektromagnetických vln, které se šíří vesmírem z antény Voyageru 1 k Zemi více než 14 hodin. Přestože výkon rádiového vysílače Voyageru 1 je „pouhých“ 23 W, stále dokážeme na více než 15 miliard kilometrů vzdálené Zemi detekovat vysílaný signál. Většina měřicích přístrojů na sondách je již z energetických důvodů odpojena. Aktivní jsou pouze magnetometry a detektory částic. Energie pro provoz alespoň jednoho zařízení by měla Voyagerům vydržet alespoň do roku 2020. Do té doby by Voyager 1 mohl dosáhnout heliopauzy, oblasti na hranici heliosféry, kde již dominují magnetické pole a částice mezihvězdného prostoru. Oba Voyagery na sobě nesou informace o životě na Zemi a o poloze naší mateřské planety ve vesmíru pro případ kontaktu s mimozemskou civilizací. Tato událost je však velmi málo pravděpodobná.



■ Miroslav Havránek, 12. 8. 2009, AB 34/2007

## Model planetární migrace

Teorii vzniku sluneční soustavy můžeme právem považovat za jednu z nejdéle se vyvíjejících astrofyzikálních teorií. Poté, co Mikuláš Koperník (1473–1543) vzal Zemi její výsadní postavení ve vesmíru, založené na základech více než 1 000 let starého Ptolemaiovského geocentrického modelu, Galileo Galilei (1564–1642) roku 1610 objevil přirozené satelity Jupiteru a William Herschel (1738–1822) objevil v pořadí sedmou planetu sluneční soustavy, začali mnozí badatelé uvažovat o tom, jakým způsobem sluneční soustava vznikla, a jak se od svých počátků vyvíjela. Průchod novým myšlenkám umožnily mimo jiné právě objevy Galileiho a Herschela, kteří výsledky svých výzkumů vyvrátili přes jeden a půl tisíce let staré Aristotelovské paradigma neměnnosti nebeské sféry. Vynález dalekohledu dramaticky rozšířil obzory lidského chápání vesmíru a odhalil existenci těles a objektů, o kterých lidé dříve neměli ani potuchy.

### Klasické představy

První novodobé úvahy o vzniku sluneční soustavy najdeme v díle *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, které roku 1755 vydal Immanuel Kant (1724–1804). Je zde načrtnuta teorie, podle které byly všechny objekty sluneční soustavy na počátku tvořeny „elementární pralátkou“. Významného filozofa k tomuto závěru vedl poznatek, že všechny planety obíhají přibližně v jedné rovině a dále fakt, že všechny planety, jejichž rotace byla tehdy známa, rotují ve stejném smyslu, v jakém obíhají Slunce. Na Kantovy filozofické úvahy navázal Pierre Simon de Laplace (1749–1827), který roku 1796 ve své knize *Exposition du système du Monde* poprvé představil matematicky a fyzikálně formulovanou nebulární teorii vzniku sluneční soustavy.

Přestože se některé závěry původní hypotézy ukázaly nesprávné, na což poukázal James Jeans (1877–1946), když představil vlastní „katastrofickou“ teorii střetu Slunce s jinou hvězdou, prodělala nebulární teorie svou renesanci. Na počátku druhé poloviny 20. století byly provedeny první kvantitativní výpočty struktury pramlhoviny, které provedli Otto Juljevič Šmidt (1891–1956) a později Viktor Sergejevič Safronov (1917–1999). Přes dlouhý vývoj, který nebulární teorie prodělala, dnes máme za to, že její základy, vytvořené před více než dvěma staletími, jsou v zásadě kvalitativně správné.

**Planeta** – nebeské těleso, které 1) obíhá okolo Slunce. 2) má dostatečnou hmotnost, aby jeho gravitace překonala vnitřní síly pevného tělesa (a tedy dosáhne kulatého tvaru odpovídajícího hydrostatické rovnováze). 3) vyčistí okolí své dráhy od drobnějších těles. Planetami jsou Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran a Neptun.

**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.

**Planetezimála** – dnes již pravděpodobně neexistující tělesa z raných fází vývoje sluneční soustavy. Mateřská tělesa většiny planetek a tedy i meteoritů, kde docházelo k procesům diferenciace hmoty a vzniku minerálních asociací typických pro jednotlivé druhy většiny známých meteoritů.



**Hlavní pás planetek** – oblast sluneční soustavy mezi drahami Marsu a Jupiteru, ve které se nachází značné množství planetek. Největší z nich, Ceres, byla objevena již v roce 1801 Giuseppem Piazzim a má průměr 974 kilometrů. Větších těles je zde ale jen několik, ostatní mají rozměry výrazně menší. Gravitační vliv Jupiteru v této oblasti zabránil vzniku většího tělesa.

**Kuiperův pás** – jedná se o jakési úložiště planetezimál (malé kamenné nebo ledové tělísko zformované při zrodu sluneční soustavy). Vnitřní okraj pásu se nachází ve vzdálenosti asi 30 AU a vnější asi ve vzdálenosti 600 AU od Slunce. Je „položen“ do roviny ekliptiky. Odhaduje se, že obsahuje na 700 000 tělísek a v dnešní době jich známe více než 700. Průměry těles nepřesahují (až na ojedinělé výjimky) 100÷300 km.

**Oortův oblak** – také Oortovo-Öpikovo mračno. Jedná se o jakousi zásobárnu kometárních jader, která se nachází ve vzdálenosti zhruba 20 000 ÷ 100 000 AU od Slunce. Podobně jako transneptunické objekty obsahuje také Oortovo mračno mnoho nepravidelných těles s nejrůznějšími drahami. Jedná se většinou o zmrzlé úlomky hornin, které se dostávají do blízkosti Slunce vlivem gravitačních poruch. Jejich počet se odhaduje na jeden bilión při celkové hmotnosti 100  $M_{\oplus}$ .

Francouzská observatoř v Nice.



## Planetární migrace

Přes staletí trvající vývoj názorů se naše znalosti o vzniku planetárních systémů za posledních 15 let dramaticky změnily. Za vůbec nejdůležitější poznatek posledních let lze zřejmě pokládat fakt, že planety nevznikaly tam, kde je dnes nacházíme, ale naopak se v důsledku migrace mohou nacházet i několik astronomických jednotek od místa svého vzniku. V nedávné době byla představena dosud nejspěšnější teorie vývoje sluneční soustavy až do fázi 1 miliardu let po svém vzniku. Tento model dynamického vývoje vnějších oblastí sluneční soustavy ukazuje, že planetární soustava s počátečními kvazicirkulárními a koplanárními drahami mohla být předchůdcem dnešní sluneční soustavy. Jedním z hlavních požadavků správného vývojového scénáře podle tohoto modelu je průchod Jupiteru a Saturnu rezonancí oběžných dob v poměru 1:2, který nastal díky migraci způsobené interakcí planet s planetezimálními diskem. Uvedený model bývá také označován jako *Nice model*, podle místa svého vzniku na observatoři v Nice.

Planetární migrace je podle všeho přirozeným důsledkem vzniku a vývoje planetárních systémů. Poté, co vznikly obří planety a ze zárodečného oblaku byly vypuzeny zbytky primordiální mlhoviny, sestávala sluneční soustava ze Slunce, planet a chladného disku drobných těles, planetezimál, jež se akrecí nespojily do větších celků. Tento disk byl gravitačním působením planet postupně dynamicky erodován, což mělo za následek časté vybočení planetezimál z kruhových drah. Docházelo tak k jejich srážkám či vypuzení z původního planetezimálního disku. Z fyzikálního hlediska je planetární migrace důsledkem výměny momentu hybnosti mezi planetami a částicemi planetezimálního disku. Numerické simulace ukazují, že Jupiter byl tímto mechanismem tlačěn do vnitřních partií sluneční soustavy, zatímco planety Saturn, Uran a Neptun migrovaly směrem ven.

Vlastní idea planetární migrace je stará více než 25 let, kdy Julio Angel Fernandez z Uruguaye a Wing-Huen Ip z Taiwanu popsali ve své práci z roku 1984 interakci Jupiteru, Saturnu, Uranu a Neptunu s remanentními tělesy planetezimálního disku. Význam této práce však nebyl doceněn až do doby objevů četných těles Kuiperova pásu. Malhotra (1993, 1995) poprvé ukázal, že existence těchto těles je zřejmě důsledkem migrace Neptunu, který se před začátkem migrace mohl nacházet i pod hranicí 20 AU, zatímco prvotní planetezimální disk se rozprostíral až do vzdálenosti přibližně 30÷35 AU.



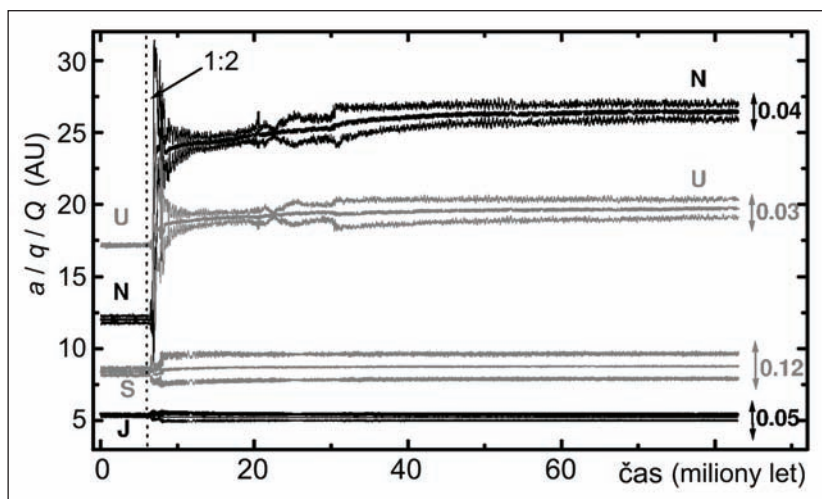
## Numerické simulace

Fenomén planetární migrace byl studován pomocí numerických simulací, jejichž počáteční podmínky byly nastaveny tak, že velká poloosa Jupiteru byla  $a_j = 5,45$  AU a Saturn byl umístěn o několik desetín AU blíže ke Slunci, k hranici rezonance 1:2 s Jupiterem ( $a_{1:2} \approx 8,65$  AU). Počáteční velké poloosy ledových obrů Uranu a Neptunu byly nastaveny v rozmezích  $11 \div 13$  AU resp.  $13,5 \div 17$  AU, přičemž byla stanovena minimální vzájemná vzdálenost 2 AU. Ve všech případech byly dráhy takřka kruhové a koplanární (v řádu  $10^{-3}$ ). V simulacích byl uvažován hmotný disk planetezimál o hmotnosti  $30 \div 50 M_Z$  (hmotnost Země) sestávající z 1 000 ÷ 5 000 těles stejné hmotnosti, jehož vnitřní okraj začínal těsně za drahami planet a vnější okraj se rozprostíral do vzdálenosti  $30 \div 35$  AU od Slunce. Simulace byly prováděny s pomocí  $N$  částicových integrátorů SyMBA a MERCURY s krokem  $0,25 \div 0,5$  roku.

Typický vývoj, získaný simulací vidíte na grafu v pravo dole. Po 6,6 milionu let dlouhé pomalé migraci na téměř kruhových drahách projdou Jupiter a Saturn rezonancí 1:2. V tomto okamžiku došlo ke zvýšení jejich excentricit k hodnotám blízkým těm, které dnes pozorujeme. Tento náhlý skok v excentricitách Jupiteru a Saturnu měl dramatický dopad na planety Uran a Neptun. Sekulární perturbace, kterými Jupiter a Saturn na další dvě planety působily, zapříčinily vysoký nárůst jejich excentricit. Díky „kompaktnosti“ systému se planetární dráhy staly chaotickými a začaly se křížit, důsledkem čehož docházelo krátce po průchodu Jupiteru a Saturnu rezonancí 1:2 k blízkým přiblížením planet. To mělo za následek i zvýšení jejich sklonů. Navíc byli oba ledoví obři vytlačeni směrem do planetezimálního disku, což zvýšilo tok malých těles směrem k Saturnu a Jupiteru a zvětšilo rychlost jejich migrace. Během této rychlé fáze migrace došlo k pozvolnému poklesu excentricit a sklonů planet v důsledku dynamického tření. Planetární

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

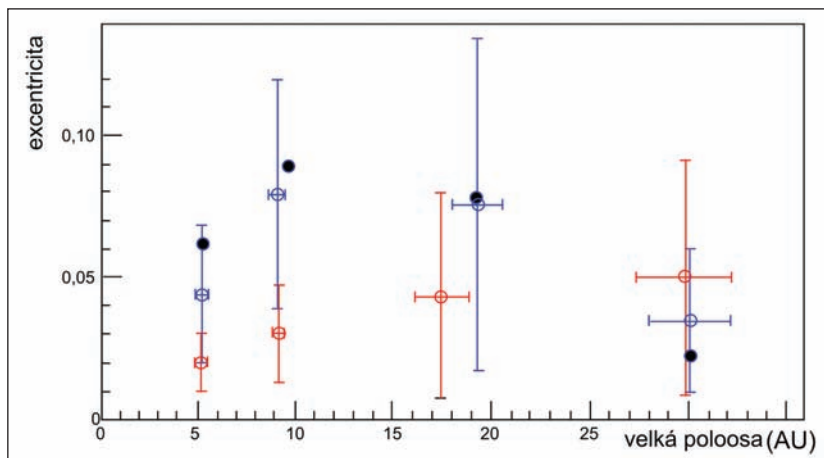
Časový vývoj velké poloosy ( $a$ ), perihelia ( $q$ ) a afelia ( $Q$ ) obřích planet. Po 6 milionech let pomalé migrace způsobené interakcí s planetezimálním diskem procházejí Jupiter a Saturn orbitální rezonancí 1:2, což má za následek prudké vychýlení drah Uranu a Neptunu a přehození jejich pořadí vzdálenosti od Slunce. Následná circularizace jejich drah je opět důsledkem interakce mezi planetami a planetezimálami. Vyznačeno je rovněž porovnání výsledků simulace se skutečnými excentricitami planet. *Nature 2005.*





Julio Angel Fernandez (1946), uruguayský astronom, jeden z autorů modelu planetární migrace.

Porovnání výsledků se skutečnými hodnotami. Černý kruh označuje skutečné hodnoty. Modře jsou vyznačeny výsledky v kompatibilní konfiguraci, v níž došlo k výraznější interakci ledového obra se Saturnem, červeně jsou vyznačeny výsledky „volnější“ konfigurace. *Nature* 2005.



migrace ustala poté, co byl původní planetezimální disk téměř úplně rozptýlen a planetární systém byl stabilizován.

Jak ukazuje níže uvedený graf, nejen velké poloosy, ale i excentricity výsledných drah modelovaných planet jsou blízké současným hodnotám. Podoba výsledných drah planet závisí na vývoji systému bezprostředně po průchodu planet rezonancí. Přestože bylo v počátečních podmínkách mnoho volných parametrů, ukázalo se, že finální konfigurace je nejvíce citlivá na počáteční orbitální separaci ledových obrů ( $\Delta a_{II}$ ) a vzdálenosti mezi Saturnem a vnitřním ledovým obrem ( $\Delta a_{IS}$ ). V provedených simulacích bylo  $\Delta a_{II}$  měněno v rozpětí 2÷6 AU a  $\Delta a_{IS}$  v omezení 2,5÷5 AU.

Pro  $\Delta a_{II} < 3$  AU roste pravděpodobnost, že Saturn destabilizuje dráhu jednoho z obrů tak, že bude křížit dráhu Jupiteru a ledový obr je vypuzen ze systému. K takovému chování došlo ve 33 % simulací. Ve zbylých 67 % případech dosáhly všechny čtyři planety stabilních drah. V těchto běžích simulace byla nastavena hodnota  $\Delta a_{IS} = 5$  AU, což znamená, že se jednalo o nejméně kompaktní počáteční konfigurace. Tam, kde byla nastavena počáteční hodnota  $\Delta a_{IS} 3,5$  AU, došlo k blízkému přiblížení mezi ledovými obry, pro  $\Delta a_{IS} < 3,5$  AU docházelo rovněž k blízkým setkáním Saturnu s ledovým obrem.

Obě skupiny simulací vykazují dobré výsledky, nicméně druhá varianta (interakce se Saturnem) je evidentně lepší. Finální orbitální separace Jupiteru a Saturnu závisí na hmotnosti planetezimálního disku.

Ačkoli se zvyšující se hmotností disku roste jeho schopnost stabilizovat celý systém, ukazuje se, že pro hmotnosti větší než 35÷40  $M_Z$  je finální vzdálenost Jupiteru a Saturnu větší než dnes pozorovaná.

Zde popsaný vývojový scénář by zcela jistě nemohl být pokládán za pravděpodobný, pokud bychom ve sluneční soustavě nenalezli dostatek argumentů, jež by správnost *Nice modelu* podpořily.

■ Jakub Rozehnal, 27. 3. 2009, AB 13/2009

## Země se vzdaluje od Slunce

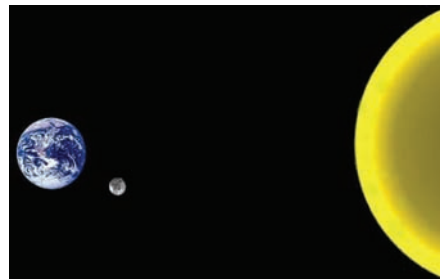
Z experimentálních faktů i počítačových simulací je dnes zřejmé, že některé planety nevznikaly tam, kde se nyní pohybují kolem Slunce, ale v jiných oblastech, a do svých současných drah se dostaly později. Jde zejména o migraci velkých planet, o které jste se dočetli v předchozím článku. Dráha Země se na první pohled zdá z dlouhodobého hlediska neměnná, ale není to pravda. V roce 2004 prokázali G. A. Krasinsky a V. A. Brumberg (na základě radiometrických měření poloh vnitřních planet), že vzdálenost Země od Slunce roste přibližně o 15 centimetrů za rok. V průběhu několika následujících let se objevila řada pokusů o vysvětlení této hodnoty. Za úspěšné lze dnes považovat jen dva mechanismy: 1) postupná ztráta hmotnosti Slunce daná vyzařováním a únikem slunečního větru; 2) výměna momentu hybnosti mezi Sluncem a Zemí prostřednictvím slapových sil. Na zvětšování vzdálenosti Země od Slunce se v současnosti více podílí mechanismus druhý, v budoucnu ale převládne mechanismus první.

### Neúspěšné mechanismy

*Změna gravitační konstanty.* O možnosti proměnné gravitační konstanty poprvé uvažoval Paul Adrien Maurice Dirac v časopise *Nature* v roce 1937. Jeho hypotéza se nazývá *LNH* (Large Number Hypotheses, hypotéza velkých čísel). Dirac si povšiml, že z některých velkých čísel lze vytvořit bezrozměrné kombinace a ve svém dopise časopisu *Nature* poukazuje na dvě z nich. Prvním je podíl stáří vesmíru a doby průchodu světla atomem  $N_1 \sim t_0/(e^2/m_e c^3) \sim 10^{40}$ . Druhým bezrozměrným číslem je podíl elektrické a gravitační síly mezi protonem a elektronem  $N_2 \sim e^2/(Gm_p m_e) \sim 10^{39}$ . Obě čísla dávají řádově srovnatelnou hodnotu. První z nich se ale mění se stářím vesmíru. Dirac přišel s myšlenkou, že by podobnost obou čísel nemusela být náhodná, ale obě by mohla v poměru tvořit přirozenou malou konstantu. To by ale znamenalo proměnnost druhého čísla s časem a tím i proměnnou gravitační konstantu, která by byla nepřímo úměrná stáří vesmíru. Dirac dále ukázal, že by to znamenalo například proměnný poloměr dráhy Měsíce. Z dnešních pozorování víme, že pokud se gravitační konstanta mění s časem, je její relativní změna menší než  $10^{-9}$  % za rok a v žád-

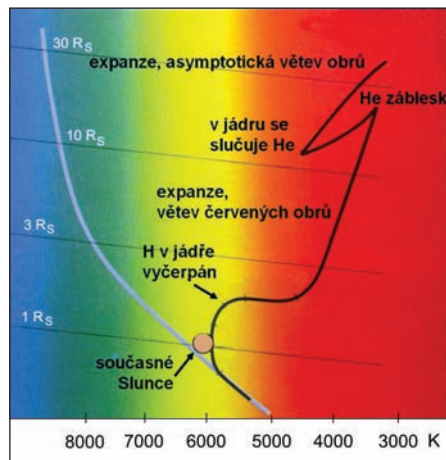
**Země** – největší z planet zemského typu. Je jedinou planetou v celém vesmíru, o které víme, že na ní existuje život. Má dostatečně hustou atmosféru, dostatek kapalné vody v povrchových oceánech. Kolem Země obíhá jediný měsíc s vázanou rotací. Při pozorování Země z kosmu vidíme hlavně modrou barvu 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 0,4 TPa. Magnetické pole Země má přibližně dipólový charakter, je deformováno slunečním větrem do typického tvaru.

Země, Měsíc a Slunce. Vzdálenosti a velikosti nejsou ve skutečném poměru.



**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 na postupné vzdalování Měsíce. Obdobná slapová vazba existuje mezi Zemí a Sluncem a je pravděpodobně hlavní příčinou současného vzdalování Země od Slunce.

Hertzsprungův Russelův diagram vývoje Slunce. Po vyčerpání vodíku v jádře Slunce opustí hlavní posloupnost a přesune se do větve červených obrů, ve které dojde ke slučování helia na těžší prvky. Zažehnutí této reakce se nazývá heliový záblesk. P. Schroder, Univ. of Sussex.



ném případě nemůže být zodpovědná za pozorovanou změnu dráhy Měsíce kolem Země nebo Země kolem Slunce.

*Expanze vesmíru.* Často panuje představa, že spolu s expanzí vesmíru dochází ke zvětšování rozměrů sluneční soustavy i jednotlivých těles. Objekty jako je Země jsou drženy pohromadě elektromagnetickými silami a rozměry Země jsou dány pevností těchto elektromagnetických vazeb. S expanzí vesmíru se nerozpíná ani Země, ani dřevěný či kovový metr, kterým měříme vzdálenosti ve vesmíru. Soudržnost látek s expanzí vesmíru nijak nesouvisí. Představte si korálky nebo kancelářské sponky navěšené na gumové šňůrce. Šňůrku natáhnete snadno na pětinašobek její délky. Zvětší se přitom korálky pětkrát? Obdobná situace je i u lokálně vázaných gravitačních systémů, jakým je sluneční soustava. Tady jsou rozměry systému dány gravitační vazbou a tedy hodnotou gravitační konstanty a ta se při expanzi nemění. Nemění se tedy ani rozměry sluneční soustavy. Takové tvrzení ale neplatí o vlnové délce světla samotného, to expanzi sleduje, protože mezi hřebeny vln nepůsobí žádné vnitřní síly, které by je k sobě vázaly. Například reliktní záření mělo v době svého vzniku (400 000 roků) vlnovou délku ve stovkách nanometrů a dnes (13,7 miliardy let po vzniku vesmíru) je v milimetrové oblasti.

Samozřejmě, že byla prováděna řada výpočtů pohybu těles v centrálním poli za předpokladu expanze vesmíru, žádný z těchto pokusů ale nebyl úspěšný při vysvětlení vzdalování Země od Slunce.

## Úspěšné mechanismy

*Změna hmotnosti Slunce.* Hmotnost Slunce se pomalu zmenšuje. Naše hvězda ji ztrácí vyzařováním (zářivý výkon Slunce je  $3,846 \times 10^{26}$  W) a slunečním větrem. Přibližně za 7 miliard let dojde v nitru Slunce ke slučování helia na těžší prvky a Slunce se stane červeným obrem, u kterého je únik hmoty ještě větší. Poloměr Slunce se zvětší z dnešních 700 000 kilometrů na 172 milionů kilometrů a na první pohled by se mohlo zdát, že Země se octne pod povrchem Slunce, ale není tomu tak. Podle různých modelů ztratí Slunce v této fázi pětinu až čtvrtinu původní hmotnosti. To se samozřejmě výrazně projeví na dráze všech členů sluneční soustavy. Země se postupně přesune na dráhu s poloměrem 220 milionů kilometrů, tedy na dráhu přibližně o 50 % větší než dnes. Tato dráha odpovídá současné dráze Marsu, ten se ale přesune na dráhu ještě vzdálenější. Země sice neskončí v tomto období pod povr-

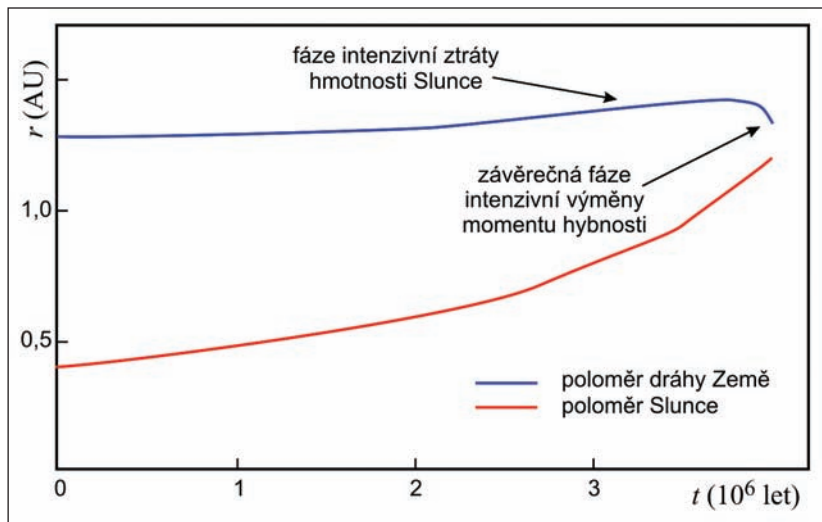
chem Slunce, ale podmínky pro život již na Zemi nebudou snesitelné. Sluneční žár odpaří veškeré oceány a život na Zemi nebude možný. Mechanismus ztráty hmotnosti Slunce ovlivní dráhu naší Země dominantně až v budoucnosti, dnes se na postupně změně dráhy Země také podílí, ale zatím jde o minoritní mechanismus.

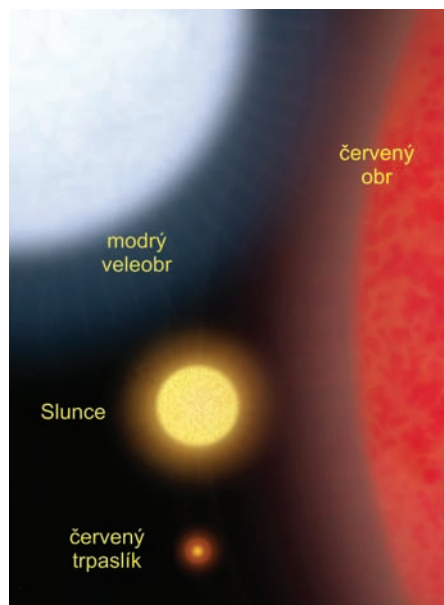
*Výměna momentu hybnosti.* V dnešní době je mnohem podstatnější výměna momentu hybnosti mezi planetami a Sluncem. Pokud bychom uvažovali v prvním přiblížení jen jedinou planetu a Slunce, musí být součet rotačního momentu hybnosti Slunce (je daný jeho rotací) a orbitálního momentu planety (je dán oběhem planety kolem Slunce) konstantní. Vlastní rotační moment planety je vzhledem k orbitálnímu zanedbatelný. Mezi planetou a Sluncem působí slapové gravitační síly, které deformují Slunce a způsobují zmenšování jeho rotační periody. To je ale natolik malé, že není současnými prostředky měřitelné – souhrnná změna momentu hybnosti od všech planet by měla zpomalovat rotační periodu Slunce o přibližně 3 milisekundy za století. Nicméně i nepatrná ztráta rotačního momentu hybnosti Slunce způsobuje narůstání orbitálního momentu planet a tedy i Země a její pomalé vzdalování od Slunce. Jde o nejpravděpodobnější vysvětlení současné měřené změny dráhy Země o  $15 \pm 4$  cm za rok. Poznamenejme, že k výměně momentu hybnosti mezi tělesy může docházet také prostřednictvím magnetického pole.

Obdobný mechanismus působí mezi Měsícem a Zemí, slapové síly Měsíce způsobují příliv a odliv na Zemi a vzniklé slapové „tření“ zpomaluje rotaci Země. S tím souvisí narůstání orbitálního momentu hybnosti Měsíce a jeho vzdalování o  $3,82 \pm 0,07$  cm/rok. Této hodnotě odpovídá zpomalování rotační periody Země o cca 2 ms za století. Pozorované zpomalení rotační periody Země za období 2700 roků je 1,7 milisekundy za století, což je v relativně dobrém souhlase, uvá-

**Moment hybnosti** – vektorový součin polohového vektoru a hybnosti (hmotnost  $\times$  rychlost) tělesa. V uzavřené soustavě se moment hybnosti všech těles zachovává. Důsledkem zachování momentu hybnosti je například vyšší rychlost pohybu planety v periheliu než v afeliu. Kvantitativně tuto skutečnost vyjadřuje tzv. druhý Keplerův zákon. K výměně momentu hybnosti dochází při slapovém působení dvou těles, například Země a Měsíce nebo Země a Slunce.

Posledních několik milionů let před splynutím Země se Sluncem. Křivky končí u stáří Slunce 12,2 miliardy let. Vzdálenost je měřena pomocí dnešní hodnoty astronomické jednotky. P. Schroder, Univ. of Sussex.





Porovnání velikostí hvězd. NASA/ESA.

žíme-li, že neznáme přesně rozložení hmoty uvnitř Země a tím její moment setrvačnosti.

Je zřejmé, že v období, kdy se Slunce stane červeným obrem, budou významné oba výše zmíněné mechanismy. Snižování hmotnosti Slunce bude velmi výrazné, což povede ke vzdálení Země od středu Slunce, ale Slunce se nafoukne a jeho povrch nebude daleko od dráhy Země. To povede ke zvýšené výměně momentu hybnosti, ale tentokrát opačného charakteru. Slunce bude natolik „blízko“, že sluneční vítr spolu s magnetickým polem bude brzdit oběh Země a intenzivní výměna momentu hybnosti povede v závěrečné fázi k prudkému poklesu poloměru dráhy Země a jejímu finálnímu splynutí se Sluncem. Není bez zajímavosti, že kdyby byla dnes Země o pouhých 15 % dále od Slunce, tomuto nelítostnému osudu unikne.

### Astronomická jednotka

Astronomickou jednotku zpravidla chápeme jako průměrnou vzdálenost Země od Slunce. Ta ale kolísá, v perihéliu je menší než v aféliu a navíc nyní víme, že dlouhodobě roste. Již v roce 1976 byla Mezinárodní astronomická unií přijata „nezávislá“ definice: *Astronomická jednotka je poloměr kruhové dráhy infinitesimálně malého tělesa, které se kolem Slunce pohybuje s úhlovou rychlostí 0,017 202 098 95 radiánu za den*. Definice je to zcela jistě hezká, ale zjevně závislá na hmotnosti Slunce a s časem se hodnota takto definované astronomické jednotky v metrech mění. Navíc ji řada astronomů nerespektuje a do astronomické jednotky se snaží zahrnovat i vzdalování Země od Slunce způsobené výměnou momentu hybnosti. Řešením vzniklého chaosu je buď vztahovat měření k astronomické jednotce z určitého období, nebo ji redefinovat tak, aby byla zcela nezávislá na Slunci i Zemi – jednou z možností je „zamražení“ její hodnoty v metrech.

■ Petr Kulháněk, 19. 6. 2009, AB 24/2009

## Epsilon Eridani je mladší verzí sluneční soustavy

Sluneční soustavu kolem hvězdy Epsilon Eridani ( $\epsilon$  Eri) tvoří, vyjma centrální hvězdy a tří planet, ještě dva zřetelně odlišené soustředné pásy planetek a vnější ledový pás komet. Výsledek nových pozorování byl oznámen týmem Spitzerova vesmírného dalekohledu v říjnu roku 2008 a tomuto systému je stále věnována velká pozornost. Epsilon Eri je dosud nejbližší známá hvězda, u níž byla objevena extrasolární soustava. Systém je vzdálen od Slunce 10,5 světelných roků a stáří centrální hvězdy je odhadováno na 850 miliónů roků.

### Popis soustavy

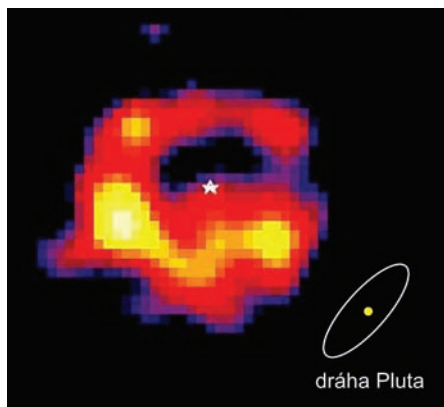
Epsilon Eri je mladší a trochu chladnější verzí našeho Slunce. Doteď zde byly známy dvě extrasolární planety a vnější prstenec ledových komet podobný Kuiperovu kometárnímu pásu v naší sluneční soustavě. Epsilon Eri je hvězdou čtvrté hvězdné velikosti (3,73 mag) třídy K2V, je to trpasličí hvězda spalující vodík. Co se týče vzdálenosti, jde o jednu z deseti Zemí nejbližších hvězdných soustav. Povrchová teplota hvězdy je 5 080 K ( $0,88T_{\odot}$ ) a její svítivost dosahuje jen 34 % svítivosti sluneční. Vypovídá to o nižší hmotnosti (jen  $0,83 M_{\odot}$ ). Hvězda Epsilon Eri rotuje pravděpodobně obdobně jako Slunce a v budoucnu se bude její aktivita také značně podobat aktivitě Slunce. Epsilon Eri je jednou z prvních hvězdných soustav, ke které v šedesátých letech minulého století zaměřil svůj rádiový teleskop Frank Drake ve snaze nalézt signály mimozemských civilizací.

Tým Spitzerova dalekohledu objevil, že systém Epsilon Eri obsahuje dva pásy planetek. První se nachází v podobném místě jako vnitřní (někdy označovaný jako hlavní) pás planetek v naší sluneční soustavě. Druhý je hustší a leží

**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. Jen do srpna 2009 bylo objeveno 365 exoplanet. Většinou jde o velká tělesa s hmotností a velikostí jen o málo menší než mají hnědí trpaslíci.

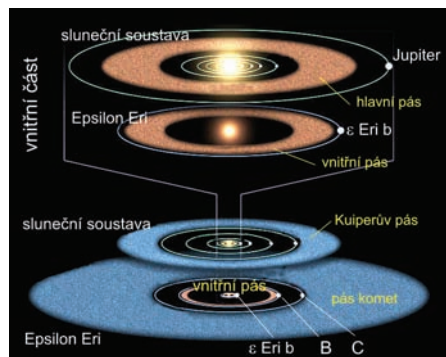
*Takto nějak by mohl vypadat sluneční systém kolem hvězdy Epsilon Eri při pohledu z vnitřního okraje vnějšího pásu planetek. Na obrázku jsou zřetelně nakresleny všechny tři známé planety. Velikost planet neodpovídá realitě. V měřítku zobrazení odpovídajícím skutečným vzdálenostem by šlo jen o svítilící body podobné hvězdám v pozadí.*





Snímek prachového disku kolem hvězdy Epsilon Eri pořízený submilimetrovou kamerou SCUBA na Maxwellově dalekohledu v roce 1998. Měřítko snímku je zřetelné z elipsy zobrazující rozměry dráhy Pluta.

Srovnání sluneční soustavy se systémem Epsilon Eridani. Horní část obrázku ukazuje vnitřní pás planetek, spodní polovina kresby znázorňuje periferie soustavy. Měřítko je možné odvodit ze známých vzdáleností oběžných drah planet sluneční soustavy.



mezi předchozím a vnějším kometárním ledovým pásem. Soustavu zřetelně oddělených pásů planetek udržují pravděpodobně dosud neobjevené planety, které by se měly pohybovat na okraji rozhraní mezi vnějším pásem planetek a ledovým pásem komet. Prozatím je bezpečně prokázána existence jedné planety, která byla objevena v roce 2000. Jde o těleso hmotnostně srovnatelné s Jupiterem. Dle oběžné doby 6,85 roků byla její hmotnost spočítána na  $1,55 M_J$ . Planeta byla označena „Epsilon Eri b“, nebo dnes také dle značení Spitzerovým týmem planeta A. Pohybuje se na velmi výstředné dráze se střední vzdáleností 3,4 AU, vůči Epsilon Eri se ale může přibližovat a vzdalovat v intervalu 1–5 AU. Druhý planetární kandidát (podle týmu Spitzerova dalekohledu planeta C) je předpovězen ve vzdálenosti 35 AU, na vnitřním okraji ledového kometárního pásu, který by se mohl rozprostírat nejméně do vzdálenosti 80 AU. Planeta C by měla dosahovat téměř Jupiterovy hmotnosti, doba jejího oběhu by se měla pohybovat kolem 50 roků. V pořadí od hvězdy druhou planetou, Spitzerovým týmem označenou jako planeta B, by mělo být těleso na vnějším okraji druhého pásu planetek ve vzdálenosti 20 AU.

Ve srovnání s naší sluneční soustavou jsou evidentní zejména rozdílné vzdálenosti v rozložení pásu planetek. Planetky jsou tvořeny těžkým materiálem. Jde o kameny a prach, z nichž mohou být později vytvořeny kamenné planety podobné Zemi. V pozdějším stádiu vývoje planetárního systému by pak v těchto prstencích měly skončit zbytky meziplanetární hmoty, která na tvorbu kamenných planet spotřebována nebyla. Systém Epsilon Eridani je velmi nápadně podobný sluneční soustavě, ve které žijeme. Podrobným výzkumem této soustavy se možná podaří odpovědět na otázky týkající se minulosti naší vlastní sluneční soustavy. Soustava Epsilon Eri je soustavou velmi mladou. Pozorujeme ji v době, ve které astronomové očekávají konec tvorby velkých planet provázený vymetáním zbylého materiálu na periferii soustavy. Mohlo by tedy, s rozvojem očekávané pozorovací techniky nového tisíciletí, jít v budoucnu o přímé pozorování tvorby planetární soustavy v bezprostřední blízkosti.

■ Ivan Havlíček, 13. 2. 2009, AB 7/2009



## Starověká astronomie

*Asi jsou věci, které se od dávných vyznavačů Slunce nikdy nenaučíme.*

Thor Heyerdahl

S obdivem začínáme rozumět orientačním schopnostem, které vedly stavitele v období mladší doby kamenné k budování velkých svatyní Slunce. Dávno zaniklé astronomické observatoře našich předků přesvědčivě dokazují mimořádné schopnosti stavebně-orientační v čase i prostoru již v 5. tisíciletí před n. l. Skutečnost, že Slunce bylo nejvyšším božstvem, dokazují četné památky od mladší doby kamenné až po dobu slovanskou. Nové směry při výzkumu starých památek nám pomohou odpovědět na řadu otázek, které souvisí s orientací megalitických staveb a kalendářní astronomií. Doklady orientačních schopností člověka, od doby kamenné až po středověk, nás často nutí pozměnit či rozšířit názor na historii.

Konec doby ledové v Evropě sebou přináší i příznivější podmínky pro osídlení. Lidé mladší doby kamenné začínají chápat Slunce jako přirozenou součást vlastní existence, začínají k němu vzhlízet ve zbožné úctě. Orientace staveb a hrobů od doby kamenné až po středověk jsou tak přímým dokladem o naplnění kultu. Souvislosti tisíce let staré nyní teprve s úžasem objevujeme, že Slunce bylo významným božstvem, dokazují četné památky i na našem území. Od neolitických hrobů ze 6. tisíciletí př. n. l. po velkomoravské hroby z konce 1. tisíciletí n. l. Stejně tak astronomicky orientované kruhové svatyně Slunce, tzv. rondely z 5. tisíciletí př. n. l., přes rondeloidy z doby bronzové, obdélné svatyně Keltů – Bójů, slovanské rotundy a kostely, až po pražské baziliky orientované ke Slunci v den patrona (sv. Jiří, sv. Vít).

Současný výzkum pravěkých pozůstatků naznačuje, že tzv. informačně-kalendářní architektura byla v období neolitu rozšířena mnohem více, než se donedávna předpokládalo. Avšak než se budeme podrobněji věnovat některým významným archeoastronomickým lokalitám, uvedu několik základních poznatků a předpokladů pro další úvahy.



**Glaciál** – doba ledová. Poslední doba ledová nastoupila před 80 000 lety a skončila přibližně 10 000 let před naším letopočtem.

Doba kamenná – jedno z období pravěku (cca 3 miliony let př. n. l. až 4. tisíciletí př. n. l.). Dělí se na paleolit (starší dobu kamennou, cca do 11. tisíciletí př. n. l.), mezolit (střední dobu kamennou, cca do 8. tisíciletí př. n. l.), neolit (mladší dobu kamennou, cca do 5200 př. n. l.) a eneolit (pozdní dobu kamennou, cca do 3500 př. n. l.).

**Neolit** – mladší doba kamenná, pravěké období od 10. tisíciletí př. n. l. do 5. tisíciletí př. n. l. Namísto dosavadního lovu a sběru se stává hlavním zdrojem obživy zemědělství. Typická je výroba keramiky, kamenných nástrojů, stavba domů a výroba oděvů.

**Eneolit** – doba měděná. Jde o závěrečnou fázi doby kamenné. Přichází po neolitu a plynule přechází v dobu bronzovou.

**Doba slovanská** – období, kdy na našem území žijí Slované. Mělo by jít o časový úsek začínající v 6. až 7. století, kdy se při tzv. druhé etapě stěhování národů slovanské kmeny přesunuly z východu do střední, východní a jihovýchodní Evropy. Jazyk Slovanů patří mezi indoevropské jazyky.

**Středověk** – označení dějinné epochy mezi pádem Západořímské říše v roce 476 a objevením Ameriky Kryštofem Kolumbem roku 1492.



Hlava Kelta z období 200 let př. n. l. Mšecké Žehrovice.

**Megalit** – velký opracovaný kámen. Slovo pochází z řeckého *megos* (velký) a *lithos* (kámen). Tyto kameny sloužily pravděpodobně jako kultovní objekty nebo astronomické stavby. Objevují se od mladší doby kamenné.

**Menhir** – osamocené stojící, do země uměle zapuštěný kámen. Druh megalitu.

**Rondel** – prehistorická stavba s kruhovým nebo oválným půdorysem.

Východ slunce 20. května 2007 z rondelu Byseň. Silueta sopečných kuželů Bezdězu je nalevo od slunečního kotouče. Foto Jaroslav Trnka.



U nejstarších staveb z období mladší doby kamenné můžeme potvrdit jejich orientaci k severu. Jakým způsobem však předkové dokázali určit světové strany, jestliže ve středu otáčení hvězdné oblohy nebyla žádná jasná hvězda? Jakou technickou pomůckou museli neolitické astronomové použít, aby mohli určit zdánlivý a neviditelný střed zdánlivé rotace hvězd a s tím spojený zeměpisný směr? Za předpokladu že byla známa skutečnost, že některé hvězdy zapadají a jiné krouží dokola, nabízí se možnost využití jednoduché pozorovatelny s výhledem na severní obzor. Cílem pozorovatelny bylo vytvořit umělý horizont ve výšce, kde neolitické astronomové tušili střed otáčení oblohy, na 50° severní šířky ve výšce 50° nad ideálním obzorem. K vytvoření umělého horizontu vyhovuje obyčejné břevno v dostatečné délce upevněné na kůlech. Oko pozorovatele a břevno tvoří rovinu pro průchod některé z jasných hvězd v blízkosti rotačního středu oblohy. Těsně po setmění pozorovatel zaznamená vybranou hvězdu na úrovni břevna vrubem do umělého horizontu. Před svítáním zaujme vybraná hvězda druhou mezní polohu, kde bude opět zaznamenána vrubem. Střed obou mezních poloh zaznamenaných na břevnu brány určoval zeměpisný sever. Způsob určení severu se jeví velmi jednoduše, avšak vyžaduje značné pozorovatelské zkušenosti. Založení takto astronomicky orientované pozorovatelny více než dva tisíce let před stavbou pyramid vyžaduje od stavitelů výjimečné znalosti. Dokladem orientace podle světových stran mohou být neolitické hroby skrčenců z 6. tisíciletí před n. l., tvar rondelů – kruhových svatyní Slunce z 5. tisíciletí před n. l., jejichž čtyři kolmé vchody bývají obvykle ve směru světových stran.

U mnoha megalitických staveb založených okolo roku 2000 př. n. l. se setkáváme s orientací k zeměpisnému východu. Poloha astronomické observatoře umožňuje pozorovat východ slunečního kotouče nad některou z významných dominant přirozeného obzoru v období, kdy Slunce má deklinaci blízkou 0°. Z poziční astronomie je okamžik nulové deklinace Slunce významný tím, že nastává rovnodennost. Slunce vychází na zeměpisném východu a zapadá přesně na zeměpisném západu. Rovnodennost však může být i významným okamžikem v kalendářní astronomii, kdy přibližně rozděluje počet dnů v roce.

V dávné minulosti lidé pravděpodobně vystačili jen s dělením na období teplé a studené, či suché a vlhké. Přírodní děje v jejich okolí byly vymezovány pouze tzv. ekologickým časem. S pozdějším plánováním činností se vyskytla nutnost synchronizace pozorovaných jevů na nebi, pohybu Slunce a Měsíce, se střídáním klimatických období. Trpěliví pozorovatelé mohli časem zjistit, že pomalý posun míst východu a západu slunečního kotouče se opakuje v cyklech přímo související se střídáním klimatických období.

Jestliže byl znám opakující se sluneční cyklus, byly známy i krajní pozice Slunce, slunovraty. Pokud bylo vybráno místo pro stavbu sluneční observatoře tak, aby slunovratové pozice Slunce byly fixovány nějakou významnou dominantou na obzoru, bylo možné předpovídat nástup pravidelných klimatických změn. Přesto však mezní slunovratové pozice Slunce viditelné při obzoru nejsou vhodné pro přesné určení počtu dní v cyklu. Slunce pozorované v období kolem slunovratu totiž mění svůj azimut východu jen nepatrně. Několik dnů po sobě vychází sluneční kotouč na obzoru téměř na stejném místě. Výhodněji se v tomto směru jeví období rovnodennosti. Tehdy právě Slunce zaznamenává nejrychlejší pohyb po obzoru v celém svém cyklu, proto bude určení okamžiku rovnodennosti výrazně jednodušší. Půlení cesty Slunce byla i nejjednodušší a nejpoužívanější metoda, jak určit rovnodennost. Lidé se pravděpodobně naučili určovat dny slunovratů s přesností snad až na jeden den už v době, kdy zjistili, že se Slunce pravidelně vrací k rovnodennosti a kdy uměli počítat do sta a dělit dvěma. Stačilo uvědomit si, že Slunce se za určitou dobu vrací a slunovrat je za polovinu této doby. Potom zbývalo jen spočítat, za kolik dní se Slunce vrátí na totéž místo na obzoru a počet dnů dělit dvěma. Takto bylo možné určit pouze nepřesný den rovnodennosti či slunovratu. Proč ale nepřesný, vždyť se vše zdá tak jednoduché a elegantní? Při řešení problému jsme však nepočítali s tím, že slunovraty a rovnodennosti nedělí rok na čtyři stejné díly.

V tabulce na pravo můžeme porovnat slunovraty a rovnodennosti v letech 2005 až 2007. Jarní a podzimní rovnodennost odděluje 187 resp. 186 dnů a nikoliv 182 či 183 dnů, polovina roku. Mezi zimním slunovratem a jarní rovnodenností napočítáme 89 dní a ne čtvrtinu roku, 91 nebo 92 dnů. Metodou půlení cyklu tedy dochází k chybě o dva až tři dny. Takto určená tzv. neolitická rovnodennost odpovídá deklinaci Slunce  $+3/4^\circ$ .

**Slunovrat** – okamžik, kdy má Slunce maximální nebo minimální deklinaci (úhlovou vzdálenost od světového rovníku). Slunce se poté „vrací“ ke světovému rovníku (odtud název). Při letním slunovratu je to obvykle 21. 6., při zimním slunovratu 21. 12.

**Rovnodennost** – okamžik, kdy je Slunce při svém zdánlivém ročním pohybu na světovém rovníku. Při přechodu Slunce z jižní polokoule na severní nastává jarní rovnodennost (kolem 21. března); při přechodu ze severní na jižní polokoule nastává podzimní rovnodennost (kolem 23. září).

**Jarní bod** – je jedním ze dvou průsečíků ekliptiky se světovým rovníkem. Jedná se o bod na nebeské sféře, kde se Slunce nachází v okamžiku jarní rovnodennosti. Dříve byl v souhvězdí Berana, přibližně od počátku letopočtu se nachází v souhvězdí Ryb.

20. 3. 2005	JR	93	187	365	
21. 6. 2005	LS	94			
23. 9. 2005	PR	89	178		
21. 12. 2005	ZS	89			
20. 3. 2006	JR	93	187		366
21. 6. 2006	LS	94			
23. 9. 2006	PR	90	179		
22. 12. 2006	ZS	89			
21. 3. 2007	JR	89			

**Azimut** – úhel, který svírá svislá rovina procházející tělesem a zenitem s rovinou místního poledníku. V astronomii se azimut měří od jihu směrem k západu. Následkem otáčení nebeské sféry se mění azimut v závislosti na čase.

**Hodinový úhel** – úhel mezi místním poledníkem a objektem měřený ve směru zdánlivého pohybu hvězd, tj. od jihu k západu. Udává se v hodinách (azimut vyjádřený v hodinách).

**Zenitový úhel** – úhlová vzdálenost tělesa od zenitu (průsečíku svislice s nebeskou sférou nad hlavou pozorovatele).

**Deklinace** – oblouk mezi světovým rovníkem a hvězdou měřený po deklinační kružnici hvězdy ve stupních. (světový rovník  $0^\circ$ , severní světový pól  $90^\circ$ , jižní světový pól  $90^\circ$ ).

**Rektascenze** – oblouk mezi jarním bodem a deklinační kružnicí hvězdy měřený ve stupních nebo v hodinách.

Důvodem proč mezi jarní a podzimní rovnodenností není přesně půl roku, je kolísání oběžné rychlosti Země mezi  $29,27 \text{ kms}^{-1}$  a  $30,28 \text{ kms}^{-1}$ . Země se kolem Slunce pohybuje po eliptické dráze nerovnoměrně. V období zimního slunovratu kdy je Země v tzv. přísluní obíhá naše planeta podle druhého Keplerova zákona rychleji, proto pro severní polokouli platí, že zimní období je tímto v našich středních zeměpisných šířkách kratší. Naopak léto je delší, protože Země v létě kolem tzv. odsluní obíhá pomaleji.

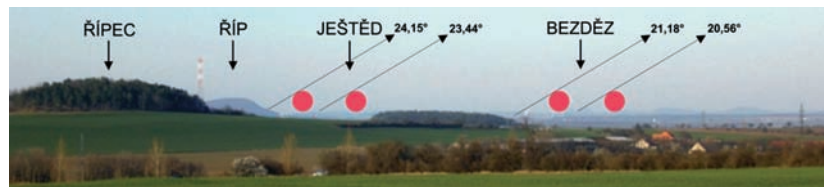
Dokladem slunovratové orientace staveb je východ či západ Slunce za významnou dominantou na obzoru v době založení stavby. Slunce vycházelo či zapadalo o dva až tři sluneční kotouče blíže k pólu než pozorujeme dnes. Zdá se nám, jako by stavba byla orientována severněji. Příčinou je vliv precesního pohybu zemské osy, který při výzkumu nemůžeme zanedbat. Současná deklinace Slunce o letním slunovratu je  $+23,44^\circ$  (o zimním  $-23,44^\circ$ ). 2700 let před n. l. byla  $24,00^\circ$  a 4500 let před n. l.  $24,15^\circ$ .

Příkladem typické neolitické lunisolární observatoře je rondel v obci Byseň 4 km západně od města Slaný. Rondel byl objeven při první hluboké orbě za účelem založení chmelnice v roce 1952. Na místě byla odkryta část velké kruhové dávno zaniklé stavby s dvojími příkopy a také několik hrobů. Rondel byl založen na jihovýchodním svahu a zřejmě záměrně umístěn tak, aby o letním slunovratu vycházelo tehdy Slunce na úpatí hory Říp (459 m) a nedalekého kopce Řípec (312 m). V době stavby rondelu (asi 4500 př. n. l.) se první paprsek při letním slunovratu objevil na pravém úpatí Řípu. Nyní ve vzdálenosti o  $1,32^\circ$  větší, tj. téměř o 2,5 slunečního kotouče vpravo. Slunce při východu o letním slunovratu tak nyní ozařuje obzorovou siluetu Ještědu.

Den letního slunovratu nebylo z místa rondelu možné předpovědět, protože se Slunce k slunovratové pozici blíží stále pomaleji a při slunovratu vychází téměř deset dnů téměř na stejném místě na úpatí hory Říp. Pro kalendářní účely rondelu bylo nutné ztotožnit cestu Slunce po obzoru s výraznými dominantami obzoru. Kromě jiných se zde nabízí daleký výhled na dvojici sopečných kuželů Bezdězu.

Dosavadní výzkum rondelů byl zaměřen pouze na azimuty Slunce dané dvěma body stavby. U ronde-

Východ slunečního kotouče v období letního slunovratu a lunární měsíc před a po letním slunovratu. Vliv precesního pohybu zemské osy, zmenšení deklinace Slunce při východu za obzorovým vizírem v průběhu 6500 let. Foto Jaroslav Trnka.



lu v Bysni se setkáváme s prokazatelným příkladem fixace azimutu Slunce pomocí přírodního vizíru. První paprsek se objevuje v sedle Bezdězu lunární měsíc před slunovratem (23. května) a zákonitě i měsíc po slunovratu (čili 59 dnů ve shodné deklinaci Slunce). I v době stavby rondelu se Slunce vracelo stejně za dva lunární měsíce do sedla sopečných kuželů. To umožňovalo určit přesnou předpověď slunovratu, začátku roku. Takto mohla být stanovena i vlastní délka roku. Z výpočtu plyne, že po čtyřech letech za  $365 \times 4 = 1\,460$  dnů se Slunce opozdí o jednodenní krok, zhruba takový, jaká je vzdálenost vrcholků Bezdězu ( $20'$ ), za 40 let tedy o  $3^\circ$ , tj. o 5,6 sluncí. Při načasování začátku roku podle Slunce v sedle Bezdězu, nemusel být znám počet dnů v roce, ani přestupné roky s 366 dny a kalendář byl a zůstává takřka věčně přesný. Pozoruhodná je navíc skutečnost, že rondel Byseň, kalendářně-kultovní svatyně a pozorovatelná Slunce, byla založena více než tisíc let před Stonehenge! Podrobný archeoastronomický průzkum rondelu Byseň byl provedený v 90. letech našim předním odborníkem ing. Zdeňkem Ministrem.

S prvními poznatky z geometrie a geometrickou terminologií se setkáváme v období 4500 let před n. l. Mezi ty nejjednodušší astronomické přístroje patří gnómón. Ve svém principu je používán už několik tisíciletí. Gnómón je název pro komplexní astronomicko-geodetické zařízení, které hrálo ústřední úlohu ve vývoji přírodních věd. S takovým zařízením mohlo být přímo určeno pět úhlů nautického trojúhelníka: geografická délka místa pozorování, deklinace Slunce, hodinový úhel Slunce (pravý sluneční čas), azimut Slunce a zenitový úhel Slunce. Pomocí gnómónu bylo možno určovat polohu nebeských těles na obloze. Gnómón není v podstatě nic jiného, než obyčejná tyč upevněná ve svislé poloze. Například v Praze sloužil jako gnómón (sloup určující polohu Slunce) Mariánský sloup na Staroměstském náměstí. Postaven byl v roce 1648, socha na něm byla vztyčena 26. září 1650, stržen byl 3. listopadu 1918. V dlažbě jej připomíná tzv. pražský meridián, kovové zobrazení jeho poledního stínu.

Zakladatelé staveb museli vytvořit sluneční kalendář ještě před založením samotné stavby. K tomu jako základní astronomický přístroj využívali jednoduchý gnómón. Pozorovatelské zkušenosti s východy a západy Slunce na vzdáleném obzoru jim umožňovaly vytipovat vhodné místo pro budoucí observatoř.

Další významnou archeologickou lokalitou jsou Makotřasy. Ma-



*Keltské naleziště u Mšeckých Žehrovic, na kterém byla objevena známá keltská hlava. Dobová fotografie výkopových prací pořízená v roce 1943.*

*Lidské pozůstatky umístěné na dně příkopu čtvercového ohrazení jsou výsledkem nám dosud neznámých náboženských obřadů. Lokalita Makotřasy.*

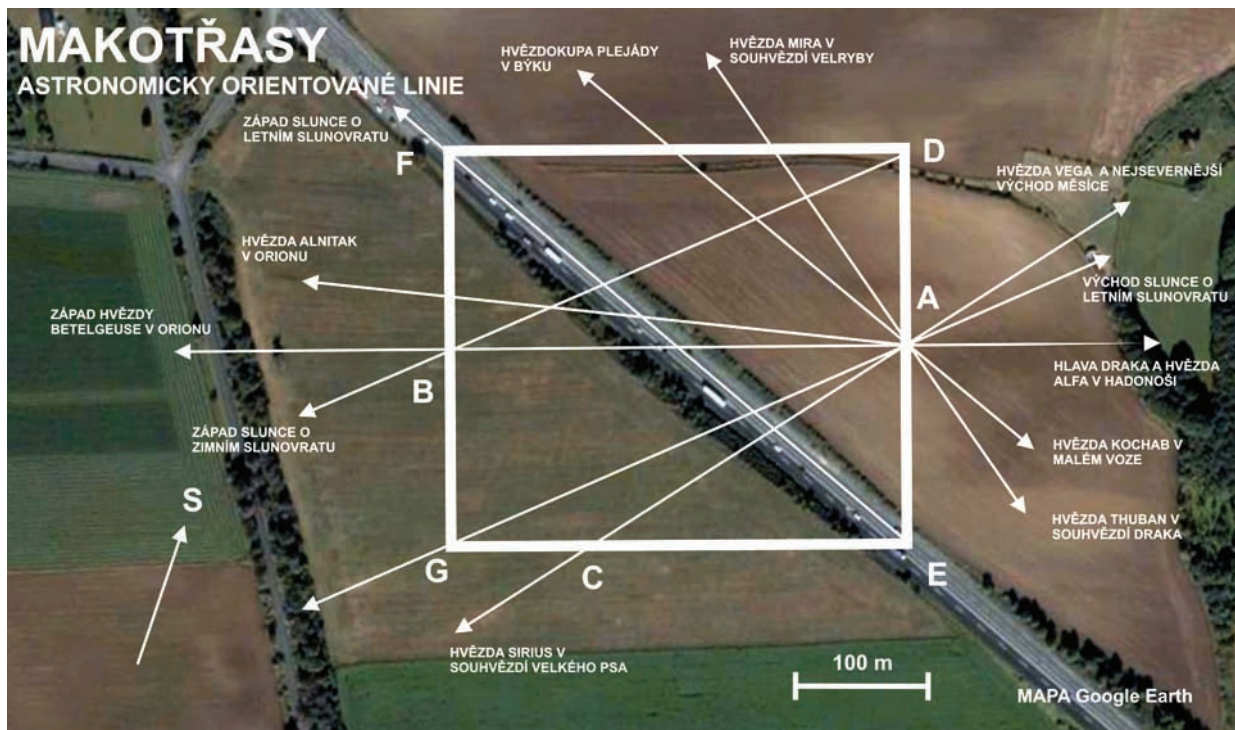


**Perihelium** – přisluní, bod na eliptické dráze kolem Slunce, který je Slunci nejbliže. Obdobně perigeum je stejný bod na orbitě kolem Země a periluna na orbitě kolem Měsíce.

**Afelium** – odsluní, bod na eliptické dráze kolem Slunce, který je Slunci nejdále. Obdobně apogeum je stejný bod na orbitě kolem Země a apoluna na orbitě kolem Měsíce.

**Gnómón** – nejjednodušší astronomický přístroj. Jde o tyč zaraženou svisle do Země. Z délky jejího stínu lze určit výšku Slunce nad obzorem a ze směru stínu azimut Slunce.

koťasy je obec 9 km východně od Kladna. Při záchranném výzkumu v průběhu výstavby rychlostní silnice byla východně od vsi na malé vyvýšenině nad soutokem Dolanského a Lidického potoka objevena eneolitická osada lidu nálevkovitých pohárů z období kolem roku 3500 př. n. l. Pocházejí odtud nejstarší doklady zpracování kovů na našem území (čtyři do země zapuštěné okrouhlé pece, kusy mědi, měděné strusky a zlomek hliněného tavicího tyglíku). Bylo zjištěno ohrazení čtvercové plochy o straně 300 metrů s nejasným, snad kultovním účelem, podle některých autorů astronomicky orientované. Astronom dr. Zdeněk Horský řadí čtvercové ohrazení se dvěma protilehlými branami na východní a západní straně k nejstarším evropským dokladům o pravěkých astronomických znalostech. Základní orientační stavby údajně měl být směr spojnice dvou bran A–B pro pozorování jasné hvězdy Betelgeuse v souhvězdí Orionu. Z bodu A do bodu B mělo být vyneseno 365 megalitických yardů, což mělo vyznačovat počet dnů



v roce. Na souvislost jednotné pravěké míry a poznatků týkající se kalendáře mají však někteří autoři odlišný názor. Podle dr. Horského měl být pak pomocí trojúhelníku A–B–C získán směr nejsevernějšího východu Měsíce C–A. Tvzení je odvážné, protože nejsevernější východ Měsíce měl být odvozen podle západu hvězdy Betelgeuse s použitím Pythagorova trojúhelníku. Navíc pro bod C v trojúhelníku nebyla zatím doložena žádná základna, patrně zde prý mohla být vyšší stavba, tak aby byla vidět zdola přes návrší z bodu A. Další spojnice G–A má být ve směru východu Slunce o letním slunovratu a spojnice E–B ve směru západu Slunce o zimním slunovratu. Celkově se zdá, jakoby stavba pro astronomická pozorování byla umístěna nevhodně, protože pro každý pohled základními body stavby je nutné zbudovat věžový vizír. Otázkou zůstává, proč observatoř nebyla založena jen o několik stovek metrů západně, kde by komplikace s horizontem nesužovala stavitele? Proč byla stavba založena na svahu a ne nad ním, na rovném a plochém hřbetu sprašového návrší? Například pro pozorování východu Slunce o letním slunovratu z horního jižního rohu čtverce G na vrstevnici 310 m, by musel být dole pod svahem věžovitý vizír A vysoký 13,5 m, tak aby byl v úrovni horizontu. Podobná situace je při pohledu z bodu E do bodu F, kde můžeme pozorovat zapadající Slunce o letním slunovratu. Střed čtverce je na vrstevnici 308 m a oba rohy jsou v úrovni 302 m. Čili i zde by bylo pozorování nemožné, pokud by v rozích nestály vysoké věže. Ing. Zdeněk Ministr po léta zkoumal tento zajímavý objekt u Makotřas. Ve svých závěrech, na rozdíl od dr. Horského, naznačil možné, byť málo pravděpodobné možnosti kalendářního využití.

Při putování oblastí severozápadních Čech mezi Vltavou, Labem, Ohří a Beroučkou můžeme narazit na celou řadu významných megalitických památek. I když zde chybí přesvědčivý důkaz toho, že patří do rodiny megalitů, evidujeme u nás především megality menhirového typu. Důvod pochybnosti spočívá v tom, že není určena doba jejich vztyčení, či je nevyjasněný jejich smysl a funkce. Datovat archeologicky dobu jejich vztyčení se zatím u českých menhirů nepodařilo. U českých menhirů je otázkou, zda mohou být považovány za pravěké (megalitické) nebo dokonce za středověké památky. Takže soudit na určitou kulturu je příliš odvážné a téměř nemožné. Dr. Milan Špůrek se po léta zabýval otázkou, zda české menhiry vytvářejí nějaký smysluplný soubor, gigantickou makrostrukturu, síť vzájemně souvisejících



*Ohrazení u Makotřas byla náhodou odkryta při záchranném výzkumu, který těsně předcházela výstavbě nové dvouprohové silnice Praha – Slaný v roce 1961.*

*Dnešní podoba menhiru u Klobuk. Fotografie Aldebaran.*



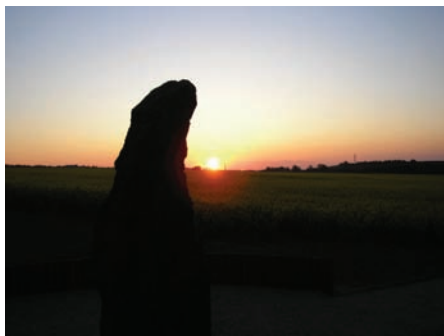


*Detail východu slunce nad horou Říp pozorovaný z menhiru u Klobuk 30. dubna 2007. Foto Jaroslav Trnka.*

bodů vzdálených desítky kilometrů. Použitím přesných zeměpisných souřadnic a počítače zjistil jednak pozoruhodnou možnost přesného propojení jednotlivých objektů do trojic přímkami, jednak konstantní vzdálenosti naměřené mezi dvojicemi u většiny z nich. To byly první překvapivé výsledky jeho geometrické analýzy vzájemných poloh kamenů. Potom našel ještě další zajímavé vazby: u pěti trojic lze přý proložit přímkou, a to se značnou přesností na poměrně velké vzdálenosti a dále zjistil u sedmi dvojic přímkou spojujících dva objekty vždy stejnou vzdálenost 22 km. Některé spojnice přý naznačily astronomickou orientaci: vedle směru poledníkového a rovnoběžkového, tedy hlavních světových stran, byly nalezeny i směry slunovratové; jakoby celek tvořil nějaký řád vedoucí k hypotéze o relativně stejném stáří menhirů. To by naznačovalo, že celek nebyl budován staletí, ale že musel vzniknout pravděpodobně v poměrně krátké době jako součást předem naprogramovaného záměru. Oponenti projektu důmyslné struktury megalitů však namítají, že podobnou makrostrukturu, jakou tvoří menhiry, by ovšem bylo možné vytvořit i z našich hradů, kostelů či božích muk. Bylo by snadné zadat počítači jejich souřadnice a zjišťovat různé korelace a astronomicky významné směry.

Deset kilometrů od Slaného, severozápadně od obce Klobuky, vpravo od silnice do obce Telce se nachází největší a nejznámější česká megalitická památka – tzv. Kamenný muž. Menhir je pískovcový blok o výšce 3,5 metru a hmotnosti kolem 5 tun. Je tmavě zbarven příměsí železitých sloučenin a pochází z místní horniny. Stejně tak jako kloboucký menhir, tak i celá sestava menhirů v severozápadních Čechách, nese rysy keltského obzorového kalendáře. Svatyně Keltů – Bójů jsou obvykle orientovány k východu či západu Slunce 40. den po podzimní rovnodennosti (2. listopadu) k začátku roku Keltů (Samainu), při záporné deklinaci Slunce  $-14,5^\circ$ . Výjimečně je svatyně orientována ke Slunci při deklinaci  $+14,5^\circ$ , tedy 40. den po jarní rovnodennosti 30. dubna, kdy začínal teplý půlrok Keltů, v den zvaný Beltine, kdy se uctíval bůh Slunce Belenos či Grannos. Zřejmě měl v různých krajinách různá jména, ale uctíván byl všude v tutéž roční dobu, 40. den po jarní rovnodennosti. Při pohledu z klobouckého menhiru se celý sluneční kotouč objevil 30. dubna 2007 při deklinaci  $+14,5^\circ$  nad pradávnou kultovní horou Říp. Slunce se vrací zpět nad Říp opět 13. srpna, tedy za 106 dnů při téže deklinaci jakou má 30. dubna, přičemž letní slunovrat nastane za  $106/2 = 53$  dnů. Jestliže tedy  $40 + 53 = 93$ ,

*Východ slunce nad horou Říp pozorovaný z menhiru u Klobuk 30. dubna 2007. Foto Jaroslav Trnka.*





je délkou jarního období, pak se velmi dobře shoduje s délkou astronomického jara 92,8 dne.

Menhir u Klobuk je vzácnou ukázkou velmi přesného načasování slunečního kultu, čili velmi přesného umístění menhiru v krajině tak, aby Slunce vyšlo 40. den po jarní rovnodennosti nad kultovní horou Říp. Podle názoru ing. Zdeňka Ministra byl dnem letního kultu Keltů – Bójů, přicházejících i z dalekého okolí k menhiru u Klobuk, den návratu Slunce nad Říp 13. srpna. Den odpovídá době uctívání římské Diany, která nahradila starší tzv. panenská božstva.

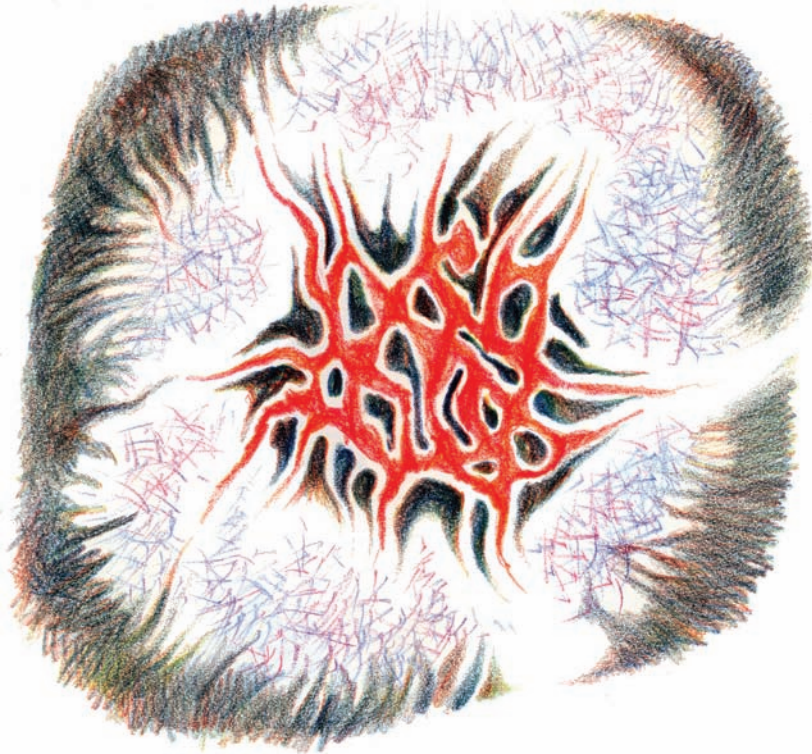
O rovnodennosti vychází Slunce při pohledu od tohoto menhiru nad nevýrazným návrším Na Háji a nad návrším Kuřidla (313 m, 3,5 km). Návrší mohla sloužit jako obzorový kalendář v době okolo rovnodenností. Východ slunce nad Řípem (kultovní horou zřejmě už od 5. tisíciletí od doby rondelů) společně z nedalekého rondelu nad obcí Byseň, by mohl být důkazem významných souvislostí.

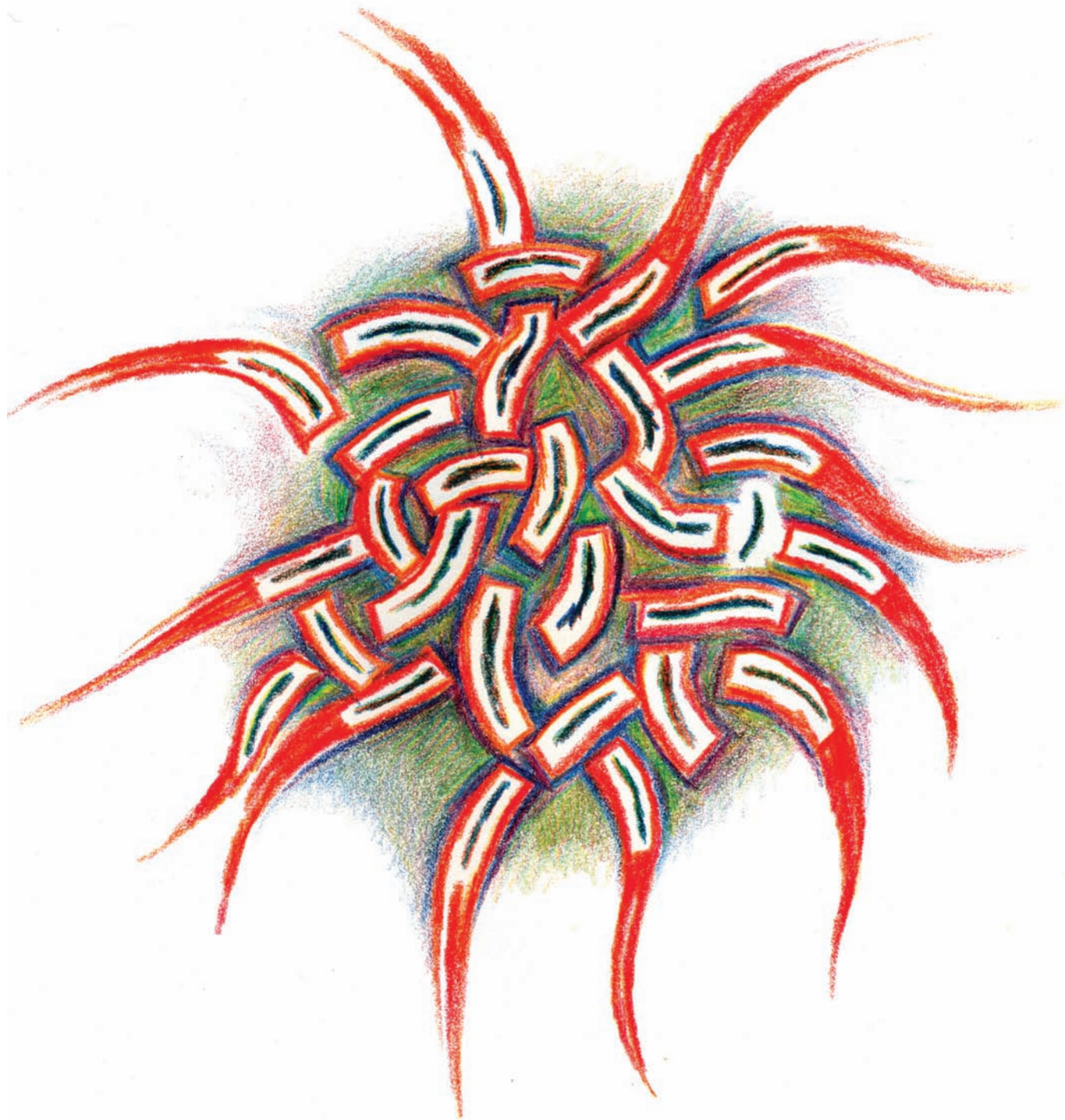
Keltové zřejmě dovedli pomocí gnómónu předpovídat den letního slunovratu a znali i způsob určení dnů rovnodennosti. Možná že i oni věděli, že mezi jarní a podzimní rovnodenností není půl roku, ale 186 dnů, neboť mezi Beltinem 30. dubna a Samainem 2. listopadu je také 186 dnů, aniž by znali příčinu. Dokonce lze předpokládat, že už kalendář Keltů znal přestupné roky s 366 dny, neboť kdyby měl trvale jen 365 dnů, tak už za čtyřicet let by Slunce nevycházelo v zákrytu svatyně, ale o 5° mimo tuto osu.

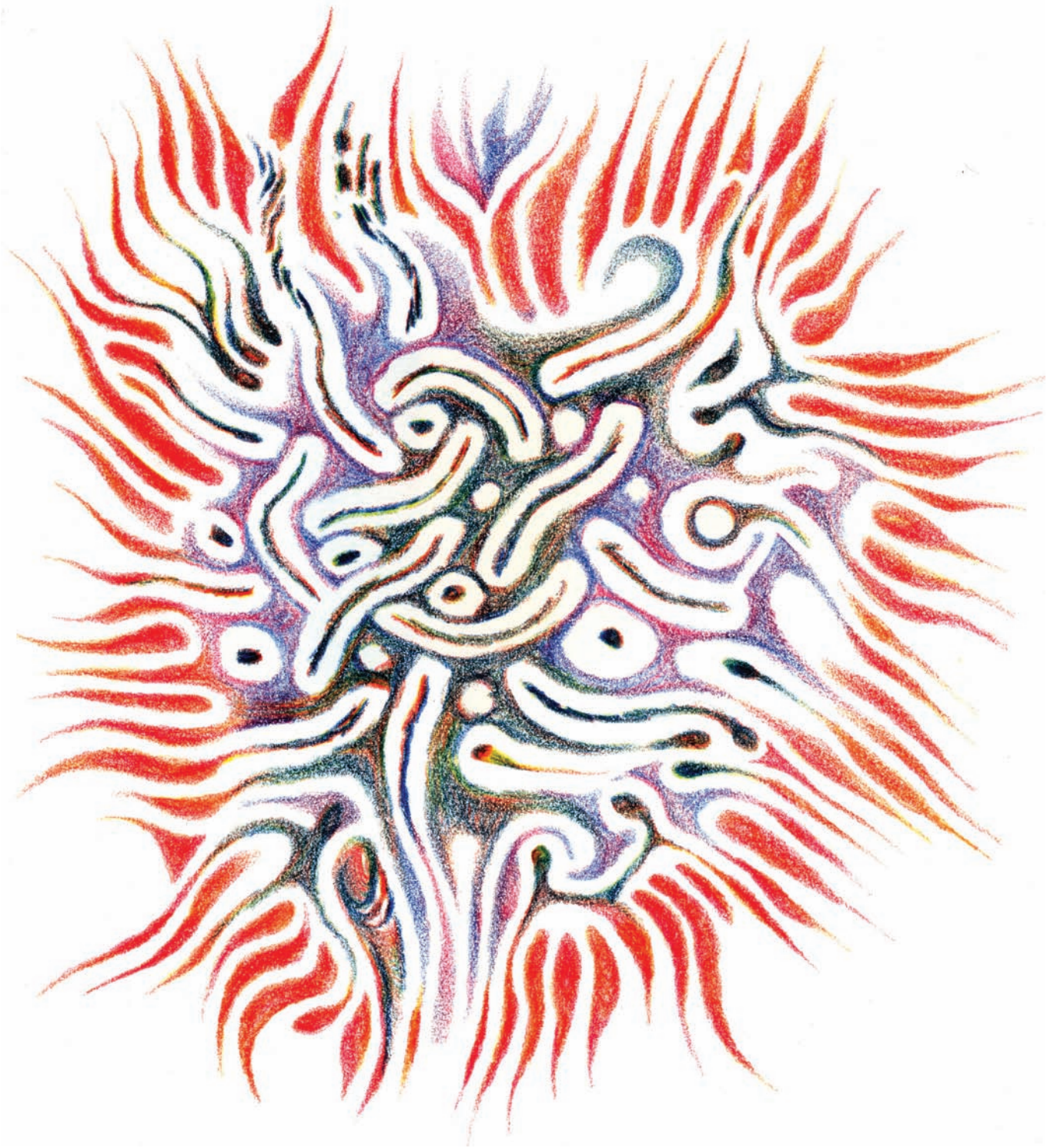
■ Jaroslav Trnka, 22. 6. 2007, AB 24/2007



## II. VZDÁLENÝ VESMÍR







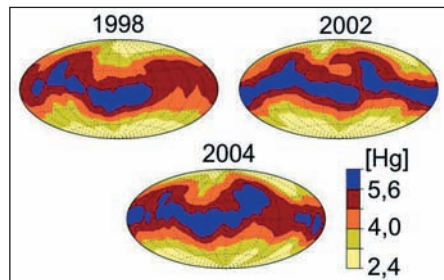
## Mají hvězdy počasí?

**Sirrah** – nejjasnější hvězda ze souhvězdí Andromedy (Alfa And), někdy se nazývá Alpheratz. Jde o spektroskopickou dvojhvězdu s orbitální periodou 96,7 dne, vzdálenou 97 světelných roků. Svitivější složka má spektrální třídu B8 a povrchovou teplotu 13 800 K. Druhá komponenta je o dvě magnitudy slabší, má spektrální třídu A3 a povrchovou teplotu 8 500 K.

**Spektrální třída** – rozdělení hvězd podle charakteristik jejich spekter do základních tříd W, O, B, A, F, G, K, M, L, T. Nejteplejší, modrofialové hvězdy mají spektrum označené W, nejchladnější hvězdy spektrálních tříd M, L a T jsou červené. Spektrální třída odpovídá zejména povrchové teplotě hvězdy.

**Dopplerův jev** – změna frekvence vlnění při vzájemném pohybu zdroje a pozorovatele. Přibližuje-li se pozorovatel ke zdroji, naměří vyšší frekvenci, než když se vzdaluje. Může jít o zvukové, elektromagnetické i jakékoli jiné vlnění. Jevo popsal rakouský matematik a fyzik Christiaan Doppler (1803–1853), který část svého krátkého života strávil jako profesor ČVUT v Praze.

Rozložení rtuťových oblaků na povrchu hvězdy Sirrah. Tmavší oblasti reoprezentují vyšší koncentraci rtuťi, která je vynášena v logaritmické škále relativně vzhledem ke sluneční hodnotě  $[Hg] = \log(N_{Hg}/N_H) - \log(N_{Hg}/N_H)_{Slunce}$



Do roku 1995 jsme hvězdy na obloze mohli vidět pouze jako body. Toho roku se poprvé podařilo vyfotografovat povrch hvězdy Betelgeuse Hubbleovým vesmírným dalekohledem. To jsme ještě netušili, že o necelou desetku let později bude možné sledovat na hvězdách i počasí. Na povrchu hvězdy Sirrah, přibližně stovku světelných roků vzdálené, byla objevena pohybující se oblaka rtuťových par. Jedná se o první pozorování tohoto druhu, které by mohlo objasnit formování struktur na povrchu hvězd.

### Oblaka rtuti na povrchu hvězdy Sirrah

Alfa Andromedae, vlastním jménem Sirrah neboli Alpheratz, je hvězda spektrální třídy B, která je od Země vzdálena 97 světelných roků. Sirrah je také spektroskopickou dvojhvězdu a zároveň nejjasnější představitelkou skupiny manganovo-rtuťových pomalu rotujících hvězd. Sirrah se otočí kolem své osy jednou za 57 hodin. Vykazuje anomálně vysoké množství rtuťi, galia, manganu a europia ve své atmosféře a napopak nízké koncentrace jiných prvků.

Pracovní skupina vedená Olegem Kochukhovem z university v Upsale ve Švédsku v červnu 2007 oznámila, že Sirrah je první hvězdou, na které byly objeveny jevy odpovídající počasí v atmosférách planet. Nad povrchem hvězdy se totiž vznášejí plující a měnící se oblaka rtuťi. Nejde však o obdobu slunečních skvrn, které jsou vázané na magnetické pole. U hvězd velikosti Sirrahu se předpokládá, že hvězdy postrádají proudění látky, které by zasahovalo až k povrchu, a tedy nefunguje tekutinové dynamo generující magnetické pole. Takové hvězdy mají magnetické pole jen velmi slabé. Skvrny rtuťi proto musejí vznikat jiným mechanismem než dosud pozorované skvrny na hvězdách.

„Na vině“ by měly být fluktuační rovnováhy mezi gravitací hvězdy stahující rtuť směrem do centra a mezi tlakem záření, který působí opačným směrem. Rtuť se tak hromadí v tenké vrstvě ve svrchní atmosféře, kde se síly téměř vyroší. Levitující atomy rtuťi jsou náchylné k minutovým externím poruchám. Jak uvádí Kochukhov, pokles efektivní gravitace o 1,3 % způsobený odstředivou silou na rovníku Sirrah odpovídá třináctnásobnému zvýšení množství rtuťi. Tímto fluktuacním mechanismem mohou vznikat plující oblaka a pásy rtuťi odpovídající jevu počasí na planetách.

## Jak probíhalo pozorování

Skupina Olega Kochukhova se studiu povrchu hvězdy věnovala sedm let. Pozorování se uskutečnila za pomoci 1,2m dalekohledu observatoře DAO (Dominion Astrophysical Observatory) v Kanadě a šestimetrového dalekohledu observatoře SAO (Spectral Astrophysical Observatory) v Rusku. Vědci zaznamenávali změny v šířce, intenzitě a tvaru nejjasnější rtuťové čáry v emisním spektru během rotace hvězdy. Konkrétně šlo o čáru jedenkrát ionizované rtuti s vlnovou délkou 398,4 nm.

Pro analýzu naměřených údajů byla použita technika dopplerovského zobrazování založená na tom, že se různé části povrchu rotující hvězdy pohybují s různou relativní rychlostí vůči Zemi. V důsledku Dopplerova jevu má příspěvek ke spektrální čáře od různých míst povrchu různou vlnovou délku a tím vzniká charakteristický profil spektrální čáry. Skvrny na povrchu se projeví při otáčení hvězdy jako „vybouleniny“ nebo „prohlabeniny“ pohybující se po profilu spektrální čáry.

Objev počasí na hvězdách by mohl objasnit rozdíly mezi množstvím rtuti a dalších těžkých prvků na površích u hvězd podobných Sirrah. Vzhledem k tomu, že se jedná o stejný typ hvězd, lze očekávat přibližně stejná množství tohoto prvku, ve skutečnosti se tato čísla liší až řádově. Počasí by tyto rozdíly mohlo vysvětlit, v různou dobu by bylo pozorovatelné různé množství rtuti (nebo jiných prvků). Jev počasí se očekává i u dalších hvězd, jako je například AR Aurigae, kde by mohla vznikat plující oblaka stroncia, yttria nebo platiny.

■ Jana Sainerová, 20. 7. 2007, AB 28/2007

**Počasí** – stav atmosféry v daném místě a čase popsany souborem fyzikálních veličin (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, atp. 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“.

**Tekutinové (magnetohydrodynamické) dynamo** – tekutinová varianta klasického dynamo. Při pohybu plazmatu nebo tekutého kovu vznikají elektrické proudy a generují magnetické pole.

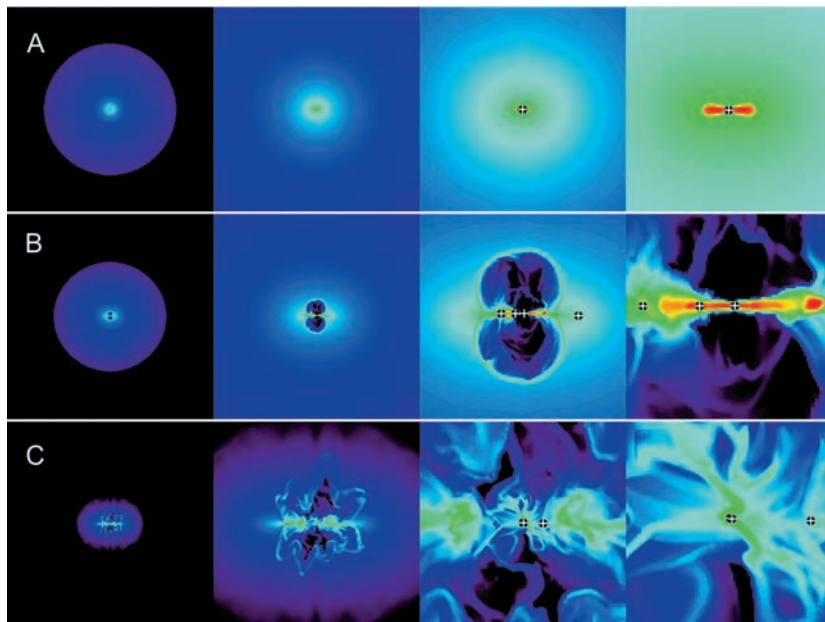
Poloha hvězdy Sirrah na mapě souhvězdí.



## Vznik velmi hmotných hvězd

**Jeansova hustota** – kritická hodnota hustoty pro samovolný hydrodynamický kolaps oblaku plynu (bez magnetických polí a nabitých částic). Po jejím překročení vzniká v oblaku protohvězda. Kritickou hodnotu odvodil James Jeans (1877–1946).

Tři snímky simulace v časech A) 17 500, B) 34 000, a C) 55 900 let. V každém řádku jsou čtyři řezy hustoty v rovině podél rotační osy. Nalevo je oblast o velikosti 0,3 pc, na každém dalším snímku se rozměry oblasti zmenšují vždy čtyřikrát a poslední ukazuje oblast 966 AU. Barva představuje logaritmickou škálu  $10^{-19}$  +  $10^{-12}$  g/cm<sup>3</sup>. Křížky ukazují polohy hvězd (pro názornost jsou zobrazeny vždy jen ve dvou nejpodrobnějších obrázcích). M. Krumholz/UCSC.



Velmi hmotné hvězdy až donedávna skrývaly velké tajemství. Nebylo totiž zcela zřejmé, jak takové hvězdy mohou vlastně vznikat. Obrovské hvězdy o hmotnostech desítek Sluncí totiž září tak hodně, že při smršťování původního, kulově souměrného nerotujícího oblaku plynu, by měl při hmotnostech nad  $20 M_{\odot}$  ( $4 \times 10^{31}$  kg) převážit tlak záření nad gravitační silou. Hvězdy jako Éta Carinae, Pistolová hvězda nebo LBV 1806-20 by neměly vůbec existovat, a pokud ano, tak by měly vznikat pouze za výjimečných podmínek, například rázovými vlnami, které prvotní oblak pomohly stlačit.

### Skuteční obři

*Éta Carinae.* Jde o zářivého modrého proměnného hyperobra o hmotnosti 100 až 150 Sluncí, který se nachází v souhvězdí Lodního kýlu ve vzdálenosti asi 7 500 až 8 000 světelných roků. V astronomicky blízké budoucnosti by měla vybuchnout jako supernova nebo hypernova. Je součástí dvojného hvězdného systému. V dubnu 1843 se náhle

zjasnila a byla po Síriu druhou nejjasnější hvězdou na obloze. Od té doby hvězdu obklopuje mlhovina Homunculus.

*Pistolová hvězda.* Jde o zářivého modrého proměnného hyperobra o hmotnosti přes 100 Sluncí, který se nachází nedaleko galaktického centra v souhvězdí Střelce ve vzdálenosti asi 25 000 světelných roků. Zářivý výkon hvězdy je asi 1,7 milionu Sluncí. Obklopuje ji Pistolová mlhovina o délce čtyři světelné roky, která vznikla asi před 5 000 lety poté, co hvězda odvrhla asi desetinasobek hmoty Slunce. Hvězda je od Slunce viditelná jen v infračerveném oboru, protože ji zastiňují mezihvězdná mračna prachu.



Hvězda *LBV 1806-20*. Jde o zářivého modrého proměnného hyperobra o hmotnosti 130 až 150 Sluncí, který se nachází nedaleko galaktického centra v souhvězdí Štřelce ve vzdálenosti asi 40 000 světelných roků. Zářivý výkon hvězdy je až 5 milionů Sluncí. Hvězda je od Slunce viditelná jen v infračerveném oboru, protože ji zastiňují mezihvězdná mračna prachu. Je možné, že jde o dvojhvězdu. Je součástí klastru hvězd Cl\* 1806-20, skupiny mnoha podivných hvězd.

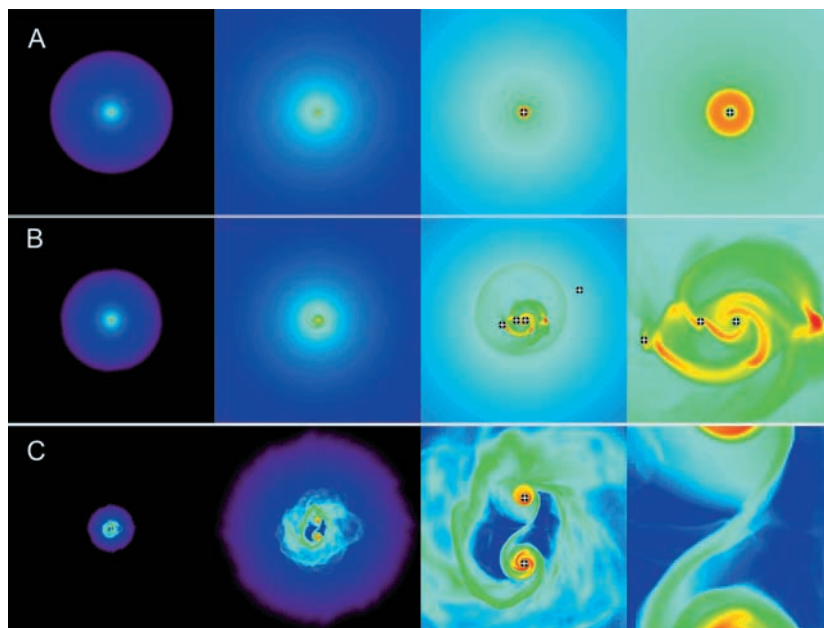
**Tlak elektromagnetického záření – tlak,** který vyvolává dopadající elektromagnetické záření. V případě, že se záření na povrchu tělesa pohlcuje, změna hybnosti tělesa po dopadu jednoho fotonu je rovna hybnosti tohoto fotonu. Pokud se foton odrazí, je změna hybnosti dvojnásobná. Tlak slunečního záření je roven jedné třetině hustoty energie tohoto záření.

## Numerické simulace

Simulacemi vzniku velmi hmotných hvězd se zabývá tým z Kalifornské univerzity v čele s profesorem Markem Krumholzem. První dvojrozměrné, osově souměrné simulace předpovídaly, že hvězdy s hmotností nad  $40 M_{\odot}$  svým zářením zcela znemožní akreci disku i v rotujících systémech. To je ale v rozporu s pozorováním. Tým se pustil do trojrozměrného, prostorově nesouměrného modelování. V takovém modelu se mohou vytvářet Rayleighovy-Taylorovy nestability, které rostou mnohem rychleji a do větších útvarů než v dvojrozměrném případě. Z takových nestabilit mohou v systému vznikat další tělesa.

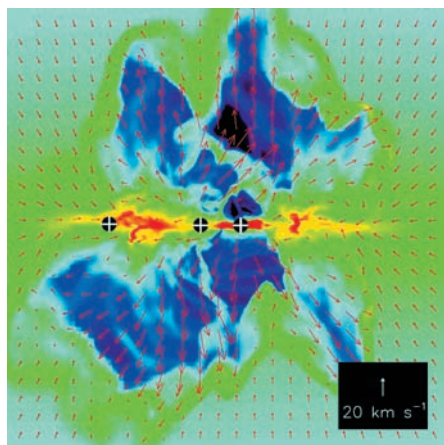
Na počátku simulace velmi pomalu rotoval oblak plynu o hmotnosti stovky Sluncí, poloměru desetiny parseku (zhruba 20 000 AU) a teplotě 20 K. Tyto hodnoty odpovídaly měřením prováděným na skutečných oblacích plynů. Již předechozí simulace ukázaly, že výsledek se příliš nezmění ani pro jiné naměřené hodnoty. Proto byl model zjednodušen – nebyly uvažovány počáteční turbulence. Nejmenší buňky modelu byly velké 10 AU. Kdykoli se během simulace objevila oblast s hustotou vyšší než Jeansovou, byla na toto místo dosazena protohvězda, která začala zářit podle evolučního modelu protohvězd.

Tři snímky simulace v časech A) 17 500, B) 34 000 a C) 55 900 let. V každém řádku jsou čtyři obrázky sloupcové hustoty v rovině kolmé na rotační osu. Nalevo je oblast o velikosti 0,3 pc, na každém dalším snímku se rozměry oblastí zmenšují vždy čtyřikrát, poslední tedy ukazuje oblast 966 AU. Barva představuje logaritmickou škálu  $10^{-1} \div 10^3 \text{ g/cm}^2$ . Křížky ukazují polohy hvězd (pro názornost jsou zobrazeny vždy jen ve dvou nejpodrobnějších obrázcích). M. Krumholz/UCSC.



**Nestabilita RT** – Rayleighova-Taylorova nestabilita vznikající na rozhraní dvou tekutin s různou hustotou, které se nacházejí v gravitačním poli (řidší tekutina je „pod“ hustší). Malé poruchy se budou zvětšovat, hustší (těžší) tekutina bude klesat do řidší (lehčí) tekutiny a dojde k charakteristickému mísení. V astronomii je ji možno pozorovat při prostupu záření hvězd skrze plynová oblaka. Nestabilita se vyvíjí do podoby tzv. Rayleighových-Taylorových prstů, střídajících se hustších a řidších oblastí, ve kterých tekutiny proudí opačným směrem. Nestabilitu poprvé popsal lord Rayleigh (1842–1919) a později zobecnil Geoffrey Ingram Taylor (1886–1975).

Snímek oblasti o velikosti 6 000 AU v řezu podél rotační osy v čase 51 100 let. Barva kóduje hustotu v rozpětí  $10^{-20} \div 10^{-14} \text{ g/cm}^3$  (černá nejnižší, červená nejvyšší). Křížky označují polohy hvězd. Šípky znázorňují rychlost plynu v různých místech. Na snímku je vidět, jak plyn uniká skrze bubliny v polárních oblastech a vrací se ke hvězdám skrze akreční disk. M. Krumholz/UCSC.



Oblak začal okamžitě kolabovat a první protohvězda se objevila již po 3 600 letech. Dalšíh 17 000 let se protohvězda zvětšovala akrecí osově symetrického disku. Vyrostla z ní tímto způsobem hvězda o hmotnosti  $11 M_{\odot}$  a zářivém výkonu zhruba  $10\,000 L_{\odot}$ . Záření tak ještě nebylo dostatečně silné, aby se projevilo. Po přibližně 20 000 letech se stal disk gravitačně nestabilním a vytvořila se v něm dvě výrazná ramena. Akrece materiálu disku pokračovala až do času asi 25 000 let, kdy hvězda dosáhla hmotnosti  $17 M_{\odot}$  a zářivého výkonu téměř  $50\,000 L_{\odot}$ . Nad svými póly hvězda začala odfukovat plyn a vytvořily se zde velké bubliny vyplněné zářením. Akreci to ale nezastavilo. Materiál, který dopadl na stěnu těchto bublin, se nakonec přesunul do disku. Mohl tak být pohlcen hvězdou. Kromě toho ale také způsobil nestability v disku, který přestal být osově symetrickým. V disku se objevila řada malých protohvězd, které se kvůli tření o plyn v disku časem většinou srazily s centrální hvězdou. Akrece se tak stala nepravidelnou, ale v průměru pokračovala nezměněným tempem.

Okolo 35 000. roku simulace se v disku několik menších druhotných hvězd srazilo a vytvořilo tak hvězdu dostatečně hmotnou na to, aby odolala tření a nepadla na hvězdu centrální, která byla stále podstatně hmotnější. Obíhající hvězda ale postupně získávala většinu materiálu přicházejícího z akrečního disku. Díky tomu si tato hvězda vytvořila vlastní akreční disk a dosáhla hmotnosti více než poloviny hmotnosti prvotní hvězdy. Disk se i nadále rozpadal, ale již podstatně nižším tempem. Příděl materiálu se rozdělil téměř spravedlivě mezi dvě největší hvězdy. Třetí, malá hvězda, která v disku ještě zůstala, byla vymrštěna na velmi protáhlou dráhu, ale později byla stejně znovu zachycena a pohlcena. Rychlost akrece materiálu disku se periodicky měnila, ale v průměru stále zůstávala zhruba stejná jako před vytvořením dvojhvězdy. Bubliny záření byly značně nestabilní a neustále měnily svůj tvar. Pomalu se přitom zvětšovaly.

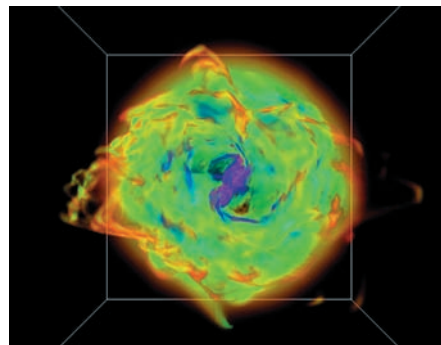
Simulace byla zastavena po 57 000 letech (asi 40 dnech výpočtů na počítači s 256 procesory), po té, co se binární systém již asi 20 000 let kvalitativně nevyvíjel. Složky dvojhvězdy dosáhly hmotností  $41,5 M_{\odot}$  a  $29,2 M_{\odot}$  a byly od sebe vzdáleny 1 590 AU. Dohromady zářily s výkonem asi  $500\,000 L_{\odot}$ . Hlavní poloosa oběžné dráhy byla dlouhá 1 280 AU při excentricitě 0,25. To odpovídá pozorování mladých hvězd spektrální třídy O, z nichž nejméně 40 % jsou vizuální dvojhvězdy se složkami vzdálenými cca 1 000 AU. Protože v disku zůstalo

ještě téměř  $30 M_{\odot}$  plynu a akrece stále probíhala nezměněným tempem, nebyly tyto hodnoty jistě konečné.

V porovnání s dvourozměrnými simulacemi vznikly mnohem větší hvězdy. Podobné byly naopak počáteční fáze akrece, v obou simulacích vznikly nad polárními oblastmi bubliny záření, protože v obou modelech záření unikalo hlavně podél rotační osy. Při dvourozměrných simulacích tyto bubliny ale způsobovaly výrazné zpomalování akrece a disk byl nakonec zářením odfouknut. Naproti tomu v trojrozměrných simulacích se bubliny staly nestabilními, jakmile mělo dojít k poklesu rychlosti akrece. To způsobovalo zahuštění některých částí oblaku, které zformovaly útvary podobné prstům, skrze něž mohl materiál k hvězdám proudit navzdory velkému průměrnému tlaku záření. To odpovídá Rayleighovým-Taylorovým nestabilitám, stačí si jen za lehčí tekutinu dosadit záření. Moment hybnosti plynu způsobil, že plyn nepadal rovnou na hvězdu, ale nejprve na akreční disk. Tak se mohly druhotně vytvořit další hvězdy. Nejméně 40 % plynu dorazilo do akrečního disku právě tímto způsobem. Asi 25 % plynu spadlo přímo na vnější disk. Zbývajících přibližně 35 % plynu sklouzlo do disku podél stěn bublin. Právě to, že se na disk dostával stále nový materiál, způsobilo, že i hvězdy z něj mohly získávat stále další materiál nezměněnou rychlostí. Přitom hmotnost, kterou hvězdy získaly během akreční fáze díky kolizím s druhotnými protohvězdami, byla velmi malá. Větší z hvězd tak získala hmotnost pouze  $1,8 M_{\odot}$  a menší  $1,2 M_{\odot}$ , nepočítaje počáteční kolize, při kterých vznikla.

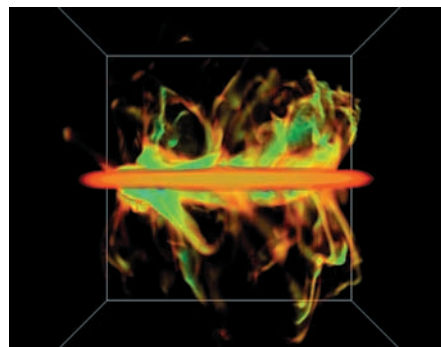
Model ukázal účinnost akrece původního oblaku plynu až 70 %. Ve skutečnosti by vzhledem k dalším únikům plynu ze systému, které nebyly v modelu zahrnuty, dosahovala jen asi 50 %. Model prokázal, že tlak záření by tuto účinnost nezmenšil. Únik plynu by naopak pomohl zredukovat účinek tlaku záření, přestože by díky němu nemohl být využit všechnen materiál původního oblaku. Také další jevy by mohly pomoci tlak záření omezit. Takové důsledky by mohla mít například magnetizace plynu. Výsledky simulace prokázaly, že tlak záření nemůže znemožnit vznik velmi hmotných hvězd a navíc neočekávaně vysvětlily, proč jsou tyto hvězdy často součástí vícečetných hvězdných systémů.

■ Jiří Hofman, 10. 4. 2009, AB 15/2009



Prostorové zobrazení hustoty v krychli o hraně 4 000 AU v čase simulace 55 000 let. Barva představuje logaritmickou škálu  $10^{-16,5} \div 10^{-14} \text{ g/cm}^3$ . Pohled je ve směru rotační osy. Rayleighovy-Taylorovy prsty jsou pro tuto nestabilitu typické. Dodávají hmotu rovinnému akrečnímu disku a na snímku z simulace jsou jasně viditelné. M. Krumholz/UCSC.

Prostorové zobrazení hustoty pro stejnou situaci jako na horním obrázku. Jde o pohled v rovníkové rovině.



## Objev další relativistické laboratoře ve vesmíru

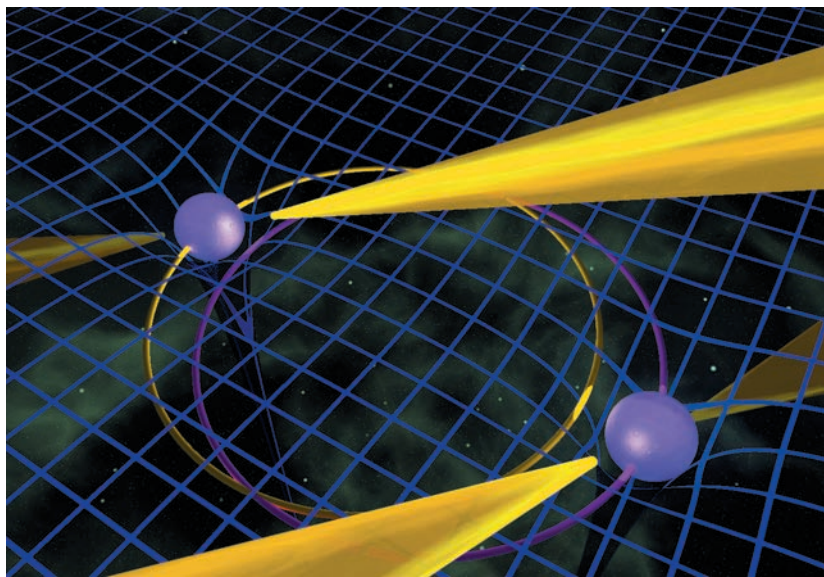
**Obecná relativita** – teorie gravitace publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1916. Její základní myšlenkou je tvrzení, že každé těleso svojí přítomností zakřivuje prostor a čas ve svém okolí. Ostatní tělesa se v tomto pokriveném světě pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách.

*Model PSR J0737–3039. V okolí pulzarů je časoprostor deformován podle zákonů obecné relativity. R. Breton, McGill University.*

Stalo se již tradicí, že podvojně kompaktní objekty (jejich složkami jsou bílí trpaslíci, neutronové hvězdy nebo černé díry) jsou vynikajícími fyzikálními laboratořemi, které přinášejí mnoho nových objevů. Je to celkem pochopitelné. Jde o dvě hvězdy stěsnané do velmi malé oblasti, často menší, než jsou rozměry našeho Slunce. V takové soustavě je možné pozorovat jevy speciální i obecné teorie relativity v rozsahu, který je ve sluneční soustavě zcela vyloučený. Jako první se proslavil podvojný pulzar 1913+16 objevený radioteleskopem v Arecibu v roce 1974, kde jedna z neutronových hvězd byla pulzarem. Stáčení eliptické oběžné dráhy těles, předpovězené obecnou relativitou, zde například činí  $4^\circ$  za rok (stejný efekt ve sluneční soustavě u Merkuru činí pohybů 43" za století). Nově objevený systém PSR J0737–3039 je zcela výjimečným objektem, ve kterém jsou obě složky radiové pulzary částečně vyzářující i v rentgenovém oboru. Můžeme se proto těšit na pozorování zcela ojedinělých fyzikálních jevů.

### PSR J0737–3039

Unikátní podvojný pulzar byl objeven v roce 2003 týmem pracovníků univerzity v Manchesteru (M. Burgay, A. G. Lyne a další) na Parkesově radioteleskopu v Austrálii. Jde o první objevenou dvojici neutronových hvězd, které se obě projevují jako pulzary. Soustava leží 1 700 světelných roků od Země v souhvězdí Velkého psa a pulzary obíhají kolem společného těžiště jednou za 144 minut (2,4 hodiny). Obě složky jsou radiové pulzary a mají kolem sebe látku zachycenou magnetickým polem. Složka A má rotační periodu 22,7 ms, složka B se otáčí mnohem pomaleji, její



rotační perioda je plných 2,77 sekundy. U energetičtější složky A lze očekávat intenzivní relativistický hvězdný vítr, u méně energetického souputníka je zase pravděpodobný vznik rozsáhlé magnetosféry. Na soustavu se díváme téměř z roviny oběhu složek a tak je možné pozorovat zákryty složky A ionizovaným plynem v okolí složky B.

V rentgenovém oboru zkoumala soustavu poprvé observatoř Chandra v roce 2004. Detailní průzkum byl proveden v roce 2006, kdy po dobu 64 hodin sledoval oba pulzary rentgenový dalekohled XMM-Newton. Ukázalo se, že pulzary září i v rentgenovém oboru. Ze složky A přicházejí měkké rentgenové pulzy neteplné povahy. Ze složky B bylo na části dráhy detekováno tepelné rentgenové záření odpovídající teplotě 350 000 K (30 eV). Mohlo by jít o ohřev složky B způsobený hvězdným větrem složky A. V rentgenovém spektru byl nalezen i slabší tepelný signál odpovídající teplotě 1 500 000 K (130 eV). Ten by mohl odpovídat ohřevu polárních oblastí nabitými částicemi pohybujícími se podél silokřivek magnetického pole u některé ze složek. Nebyly nalezeny žádné známky rentgenového záření z čelních rázových vln, které by měly vznikat interakcí magnetosféry libovolného z pulzarů s hvězdným větrem druhé složky a mezihvězdným prostředím.

Zcela jistě lze očekávat, jako u jiných podvojných pulzarů, výzkum jevů ověřujících naše znalosti procesů v extrémních gravitačních polích. Nicméně u této soustavy bude možné zkoumat i magnetosféry obou složek (její existence je pravděpodobnější u pomalé složky B), magnetohydrodynamické jevy související s prouděním plazmatu v soustavě a v neposlední řadě stavovou rovnici velmi husté látky, ze které jsou složeny neutronové hvězdy. Málo z toho by bylo možné sledovat u osamocené neutronové hvězdy, která není pulzarem.

### Zákryty PSR J0737–3039 a další test obecné relativity

Po celé čtyři roky sledovali dvojici pulzarů René Breton a Victoria Kaspi z McGillovy univerzity radioteleskopem v Green Banku. Pozorovali zejména unikátní zákryty složky A magnetosférou složky B. Radiový signál složky A je částečně pohlcen ionizovaným plynem v magnetosféře složky B a z tvaru signálu je možné zjistit sklon složky k oběžné dráze. Breton a Kaspi našli precesi (kývání rotační osy) složky A, která je ve velmi dobré shodě s dosud neověřenou předpovědí obecné relativity. Objev byl publikován v časopise Science v červenci 2008 a sklídl mimořádný ohlas. Podruhé v historii tak bylo k ověření před-

**Neutronová hvězda** – těleso tvořené degenerovaným neutronovým plynem o hmotnosti menší než cca 3  $M_{\odot}$ . Typický průměr neutronové hvězdy činí desítky kilometrů, průměrná hustota  $10^{11}$  kg/m<sup>3</sup> dosahuje hodnot hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobrů nebo při výbuchu supernovy typu II. Neutronové hvězdy byly teoreticky předpovězeny ve 30. letech 20. století.

**Pulzar** – neutronová hvězda, jejíž magnetická a rotační osa nemají shodný směr. Oblasti magnetických pólů září a díky rotaci vytvářejí pro pozorovatele majákovým efektem pulzy, zpravidla radiové, výjimečně až rentgenové či gama. První pulzar byl objeven v roce 1967 Jocelyne Bellovou pod vedením Anthony Hewishe.

**GBT** – Green Bank Telescope, radioteleskop Roberta C. Byrda v Green Banku v Západní Virginii (79° 50' 23,42" z. d., 38° 25' 59,26" s. š.). Průměr antény je 100 m. Radioteleskop je největším pohyblivým zařízením tohoto druhu na světě. Lze tak snímat celou oblohu od výšky 5° nad obzorem. Na rozdíl od většiny klasických antén je jeho talíř asymetrickým výřezem z paraboloidu o průměru 208 m a optická osa prochází 4 m od okraje antény. Na místě stojí již druhá verze radioteleskopu. První radioteleskop o průměru 92 metrů se v Green Banku zřítíil vlastní vahou dne 15. 2. 1988.

Stometrový radioteleskop v Green Banku. NRAO.





*Chandra. Družicová observatoř NASA zkoumající vesmír v rentgenovém oboru. Byla vypuštěna v roce 1999. Napalubě observatoře je rentgenový dalekohled o průměru 1,2 m a ohniskové délce 10,05 m. Je tvořen soustavou čtyř souosých parabolicko-hyperbolických zrcadel, jejichž délka je 0,85 m. Zorné pole observatoře je  $1,0^\circ$  a rozlišení  $0,5''$ .*

*Rentgenová observatoř XMM-Newton (X ray Multi Mirror). Jde o rentgenový dalekohled na oběžné dráze (Evropská rentgenová observatoř). Jeho hlavní součásti jsou tři systémy soustředných pozlacených zrcadel o celkové ploše  $120 \text{ m}^2$ . Evropská kosmická agentura (ESA) vypustila do vesmíru observatoř XMM-Newton 10. prosince 1999 z paluby rakety Ariane 5.*



povědi obecné relativity využito zákrytu jednoho nebeského tělesa jiným. Poprvé se tak stalo již v roce 1919, kdy Eddingtonova expedice prokázala při úplném zatmění Slunce ohyb paprsku hvězd v blízkosti slunečního disku.

## Závěr

Obecná relativita se v průběhu téměř sta let své existence stala jednou z nejvýznamnějších teorií, kterou lidstvo objevilo. Jde o zatím jedinou funkční teorii gravitace, pomocí níž se podařilo vysvětlit řadu jevů. Jmenujme namátkou gravitační čočky, jejichž existenci předpověděl Albert Einstein v roce 1936. První gravitační čočka byla objevena v roce 1979, šlo o dvojitý obraz kvazaru QSO 0957+561. Dnes gravitační čočky rutinně pozorujeme v mnoha kupách galaxií. Obecná relativita dala astronomii i celou třídu nových objektů – černé díry. Oprávněně se domníváme, že jsou součástí jader většiny galaxií a že jako černá díra končí řada velmi hmotných hvězd. Obecná relativita nám umožňuje správně popsat stáčení drah binárních systémů, červený gravitační posun, kosmologický posun a mnoho dalších jevů.

Existují ale dva jevy, jež jsou předpovězeny, ale jejichž existence byla dosud prokázána jen nepřímou. Jde o gravitační vlny a strhávání časoprostoru rotujícím tělesem (Lenseův-Thirringův jev). Zde se naskýtá pole působnosti pro mnoho budoucích experimentů. Relativistické laboratoře, jakou bezesporu binární pulzar J0737–3039 je, nám umožňují podrobně testovat naše představy o gravitační interakci a ověřovat závěry obecné relativity s vysokou přesností.

■ Petr Kulhánek, 18. 7. 2008, AB 30/2008

## Alfvénovy vlny a vysoké energie v kosmickém záření

Nedávno se ukázalo, že Alfvénovy vlny jsou pravděpodobně zodpovědné za ohřev sluneční korony. Jejich relativistická varianta by mohla způsobovat i urychlování některých částic kosmického záření. Dosud navrhované mechanismy mají různé problémy, navíc je zřejmé, že nepůjde o mechanismus jediný, neboť energetické spektrum kosmického záření má v různých oblastech energií různý charakter. Alfvénovy vlny by mohly být vhodným procesem urychlení pro nejvyšší energie.

### GZK mez

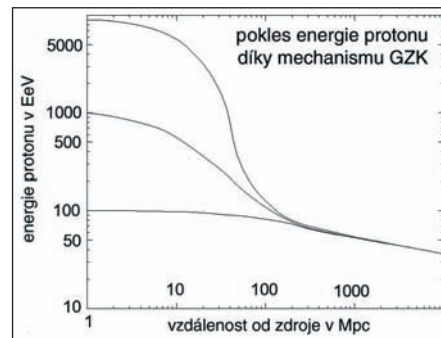
Protony kosmického záření s energií vyšší než  $6 \times 10^{19}$  eV by měly interagovat s fotony reliktního záření pozadí. V klidové soustavě protonů se při těchto energiích jeví fotony reliktního záření jako fotony tvrdého gama záření, se kterými protony interagují za vzniku pionů:



GZK mez je dána prahovou energií pro vznik částic  $\Delta$ . Tyto procesy probíhají až do okamžiku, kdy energie protonů klesne pod prahovou energii vzniku pionů. V roce 1966 (pouhý rok po objevu reliktního záření) spočítali nezávisle na sobě Kenneth Greisen, Vadim Kuzmin a Georgiy Zatsepin, že protony ze vzdálenosti větší než 50 Mpc budou mít dostatečnou volnou dráhu na to, aby tímto mechanismem rychle ztratily podstatnou část své energie. Na Zemi by proto neměly být pozorovány protony ze vzdálených zdrojů s energiemi většími než  $6 \times 10^{19}$  eV. Počet blízkých zdrojů do 50 Mpc je ale velmi omezený. Paradoxem je, že takové protony (UHECR – Ultra High Energy Cosmic Rays) se pozorují v některých experimentech (například AGASA). Existují ale naopak experimenty, ve kterých se v roce 2008 zdálo, že nad hranicí GZK protonů výrazně ubývá (Auger, GLAST, HiRes). K potvrzení nebo vyvrácení existence GZK meze bude zapotřebí dalších experimentů, například EUSO, jenž má být umístěn na Mezinárodní kosmické stanici v roce 2009. V každém případě bude ale třeba nalézt uspokojivé urychlovací mechanismy pro protony z okolí GZK meze (a obdobně i pro těžká jádra).

**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 je majoritním zdrojem antihmoty na naší planetě. Zdrojem mohou být supernovy, pulzary, aktivní galaktická jádra, atd. Naprostá většina kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, přibližně 10 % jsou jádra hélia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření má naprosto nejširší spektrum energií ze všech dodnes známých jevů. Mnohé částice, které se dnes vědci pokoušejí nalézt v moderních urychlovacích, se mohou nacházet právě v kosmickém záření. Kosmické záření bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Viktorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 500 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal V. Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku.

*Pokles energie protonu díky mechanismu GZK. R. Šmída, M. Prouza, Vesmír 87, 2008.*

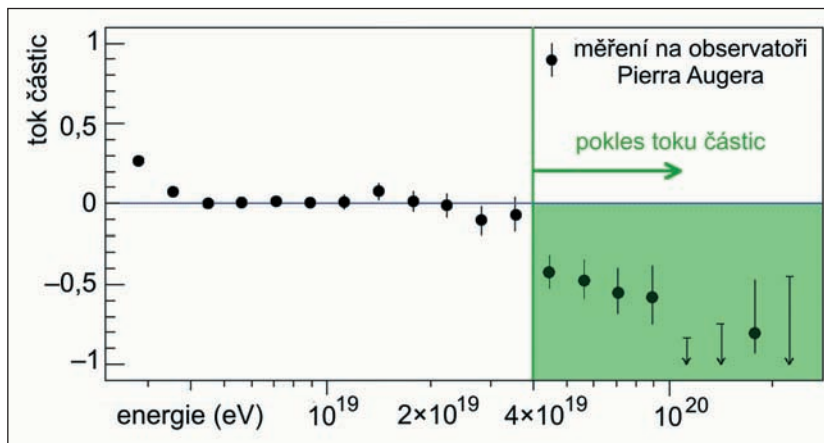


**Magnetozvuková vlna** – obdoba zvukové vlny šířící se v ionizovaném prostředí za přítomnosti magnetického pole. Vlna se šíří anizotropně, a to ve třech vlnoplochách (rychlé, pomalé a Alfvénové). Dochází k přelévání energie mezi kinetickou energií částic, tlakovou energií látky a energií magnetického pole. Nejznámější magnetozvukovou vlnou je Alfvénova vlna, ve které se magnetické siločáry rozvíjí napříč směru šíření. Vlna se šíří Alfvénovou rychlostí  $B/(\mu\rho)^{1/2}$ .

**Frekvence plazmová** – charakteristická frekvence oscilací a vln v plazmatu, která souvisí s pohyby nabitých částic. Plazmová frekvence závisí na koncentraci částic, je dána vztahem  $(nQ^2/m\epsilon_0)^{1/2}$ . Rozlišujeme plazmovou frekvenci elektronů a iontů (protonů).

**Frekvence cyklotronní** – frekvence spirálovitého (Larmorova, gyračního) pohybu elektronů kolem magnetických siločárek. Důležitá je tzv. cyklotronní rezonance, při které je vlna absorbována na této frekvenci. Z cyklotronní rezonance lze určit magnetické pole plazmatu. Cyklotronní frekvence je rovna  $QB/m$ .

Spektrum kosmického záření v oblasti nejvyšších energií pozorované na Observatoři Pierra Augera.



## Urychlování protonů

K nejčastěji uvažovaným mechanismům urychlení protonů kosmického záření na vysoké energie patří:

- rozpad velmi hmotných exotických částic na protony,
- urychlení na relativistických rázových vlnách,
- urychlení na magnetických zrcadlech (Fermiho mechanismus),
- urychlení v magnetickém poli magnetarů,
- urychlení v blízkosti černých děr,
- urychlení v blízkosti aktivních galaktických jader.

První „exotická“ možnost může souviset s rozpadem různých reliktních částic přetrvávajících z období Velkého třesku. Může jít také o neutrina s vysokou energií (ta mohou přicházet i z velmi vzdálených zdrojů!), která anihilují s reliktními neutriny za vzniku Z bozonů, jež se záhy rozpadnou na vysokoenergetické protony. Energetické spektrum těchto událostí ale neodpovídá měřenému mocninnému spektru skutečných protonů. Ostatní mechanismy se při vysokých energiích potýkají s velkými ztrátami způsobenými změnou směru pohybu částice a následným synchrotronním vyzařováním. Pisin Chen a Kevin Reil se spolupracovníky ze SLAC navrhli, že by těžké nabitě částice mohly být urychlovány podélnou (brázdovou) složkou elektrického pole v Alfvénových vlnách. Takový mechanismus není zatížen synchrotronním vyzařováním; jde o obdobný mechanismus jako při urychlování v plazmové vlně vzniklé při průchodu intenzivního laserového pulzu plynným prostředím v laboratoři. Některé protony by stochasticky mohly být urychleny až na energii  $10^{21}$  eV. Vhodné Alfvénovy vlny se mohou například vyskytovat ve výtryscích mířících z aktivních galaktických jader.

## Urychlení vlnou

Myšlenka urychlování částic magnetozvukovou vlnou není až tak úplně nová, poprvé ji nastínil již



V. N. Tsytovich v roce 1973. Podrobnější propočty ale provedli až P. Chen, T. Tajima a Y. Takahashi v roce 2002 a pro silná magnetická pole výpočty rozšířili v roce 2008 F. Chang, P. Chen a další. Ukázalo se, že v disperzní relaci (vztah mezi úhlovou frekvencí a vlnovým vektorem) pro plazma složené z elektronů a protonů, které se nachází v magnetickém poli, existují dvě superluminózní vlnoplochy elektromagnetické vlny a dvě subluminózní vlnoplochy elektromagnetické vlny s fázovou rychlostí podstatně nižší, než je rychlost světla. Jedna z nich odpovídá hvizdům a druhá klasické Alfvénově vlně. V případě, že se plazma pohybuje relativistickou rychlostí (například výtrysk z aktivního jádra galaxie), změní se chování obou subluminózních módů – budou se šířit „téměř“ rychlostí světla. Obdobná situace nastane i v silném magnetickém poli. Oba módy (většinou se jednotně nazývají Alfvénovy) mohou sloužit jako brázdová vlna urychlující nabitě částice na vysoké energie. Jde o obdobnou situaci, jako když surfař získává energii z pohybující se vlny a nebo částice získává energii v brázdovém poli šířícím se za čelem laserového paprsku pronikajícího materiálem. Podstatné je, že za šířícím se vzruchem (například vlnovým balíkem hvizdů nebo rázovou magnetoakustickou vlnou ve výtrysku) vzniká podélné (tzv. brázdové) elektrické pole se slabě podsvětelnou fázovou rychlostí. Právě toto pole při vhodné fázi nalétávající částice může nabitou částici značně urychlit. I při statistickém chování může dojít podle provedených PIC simulací (Particles in Cells, jedna ze základních numerických metod využívaných ve fyzice plazmatu, zde byl použit programový balík ENZO) u podstatné části částic k urychlení až na energii  $10^{21}$  eV.

## Závěr

Z výpočtů plyne, že pro parametry kosmického plazmatu lze mechanismus považovat za bezesrážkový. Nakolik je tento mechanismus relevantní pro skutečné částice kosmického záření ukáží až další experimenty a numerické simulace, jde však o nadějněho kandidáta pro získávání protonů s vysokou energií, který nemá nemoci ostatních mechanismů a dává mocninné energetické spektrum, podle něhož počet částic klesá jako  $1/E^2$ .

**Pierre Auger** – dosud největší projekt pro sledování kosmického záření, pojmenovaný podle objevitele spršek kosmického záření. Observatoř obsahuje celkem 24 fluorescenčních detektorů a 1 600 Čerenkovových detekčních stanic pokrývajících území 3 000 km<sup>2</sup>. Jako vhodné místo byla zvolena Argentina, oblast Pampa Amarilla, což je polovypřahlá planina v blízkosti města Malaragüe. Do projektu, jehož realizace započala v roce 2005, je zapojena i Česká republika. Observatoř je v plném provozu od roku 2007.

**Subluminózní** – s fázovou rychlostí nižší, než je rychlost světla.

**Superluminózní** – s fázovou rychlostí převyšující rychlost světla.

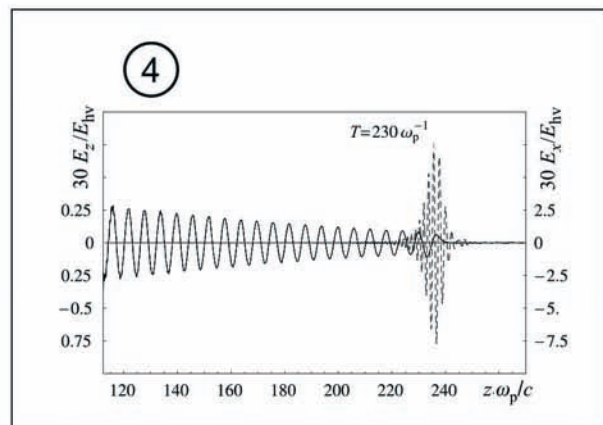
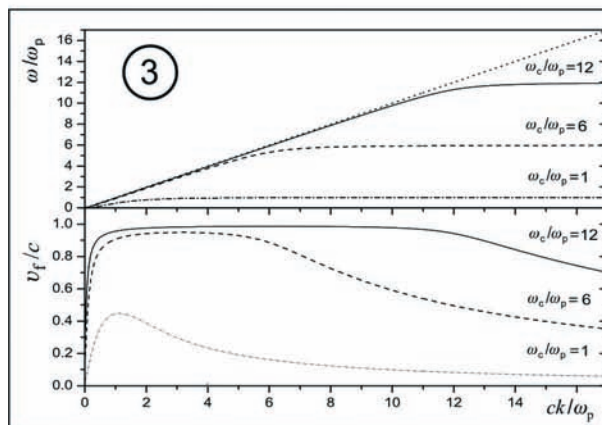
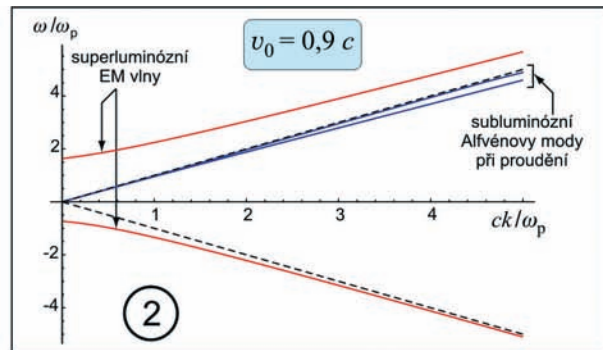
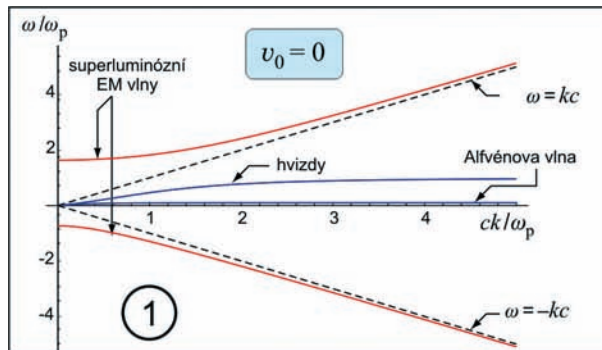
**Disperzní relace** – vztah mezi vlnovým vektorem a úhlovou frekvencí. Nelineární vztah vede k závislosti rychlosti šíření vlny na vlnové délce (tzv. disperzi).

**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.

**Úhlová frekvence** – změna fáze vlnění s časem. Pro monochromatickou vlnu je velikost vlnového vektoru rovna  $2\pi/T$ .

Šikovní surfař může získat v brázdě vznikající za rychle jedoucí lodí vysokou rychlost. Obdobně může „šikovní“ proton získat rychlost v brázdovém elektrickém poli vzniklém za Alfvénovou rázovou vlnou nebo za vlnovým balíkem pohybujícím se podél magnetických siločar.





1, 2. Disperzní relace elektromagnetických vln v plazmatu pohybujícím se v magnetickém poli. Čárkovaně je vyznačena disperzní relace šíření světla ve vakuu (tzv. světelný kužel). Červeně jsou označeny superluminózní módy a modře subluminózní. Na levém obrázku (1) je nepohybující se plazma a oba subluminózní módy mají nízkou fázovou rychlost (jsou „daleko“ od světelného kužele). Na pravém obrázku (2) se plazma pohybuje rychlostí  $0,9 c$  a subluminózní módy mají slabě podsvětelnou rychlost. Na obou osách jsou bezrozměrné jednotky vztahované k plazmové frekvenci  $\omega_p$ . Orientace vektorů: vlnový vektor  $k$  (směr pohybu vlny) míří ve směru magnetického pole  $B_0$ . Porucha magnetického pole je orientována kolmo na směr šíření ( $B_0$ ). Vzniklé elektrické pole má kromě složky kolmé na směr šíření i složku podél směru šíření (brázdovou) a právě ta způsobuje urychlování. *Phys.Rev.Lett.* 89 (2002) 161101.

3. V horní části je disperzní relace Alfvénova módu pro různě silné magnetické pole. Plazma se nepohybuje. Bezrozměrným parametrem pro indukci magnetického pole je podíl plazmové a cyklotronní frekvence. Pro silná pole je disperzní relace přimknuta ke světelnému kuželu a vlny mají slabě podsvětelnou rychlost vhodnou pro urychlení částic v brázdovém poli. V dolní části grafu jsou znázorněny pro stejnou situaci fázové rychlosti. *arXiv:0808.0223v1* (2008).

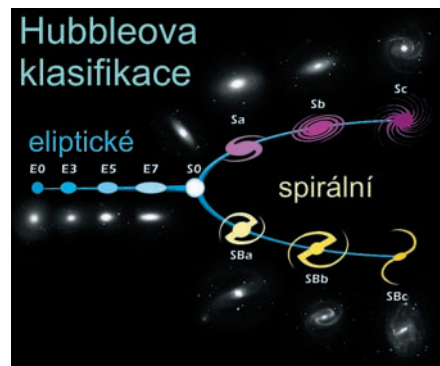
4. Elektrické pole vzniklé při numerické simulaci za vlnovým balíkem hvězdu. Pole má jak brázdovou složku ( $E_z$ ), tak složku kolmou na směr šíření a magnetické pole ( $E_x$ ). Vzdálenost na ose  $z$  i složky pole jsou vyjádřeny v bezrozměrných jednotkách. *arXiv:0808.0223v1* (2008).

## Mléčná dráha je jen dvojramenná

Donedávna astronomové jen odhadovali, jak naše Galaxie přesně vypadá. Před zhruba stoletím bylo velkým objevem, že Mléčná dráha není celým vesmírem a že se ani sluneční soustava nenachází poblíž středu této struktury. Mlhoviny byly rozpoznány jako velmi rozličné útvary a u některých z nich bylo zjištěno, že jde o cizí velmi vzdálené světy podobné tomu našemu – Galaxii. Tyto jiné galaxie astronomové ponejprv klasifikovali podle tvaru. Nejznámější je dnes stále užívaná klasifikace podle Edwina Hubblea, který použil tři tvarové skupiny: galaxie eliptické (E), spirální (S) a spirální s příčkou (SB). Jednotlivé tvarové varianty jsou označovány malými písmeny dle rozvinutí příslušné morfologie. Typ SO je přechodový s výraznou centrální výdutí. Pozdější výzkum v rozšířených spektrálních oborech, zejména v astronomii pracující v infračerveném (IR) oboru, tyto klasifikace pro nejrůznější účely modifikoval, nicméně toto základní rozřazení je používáno dodnes.

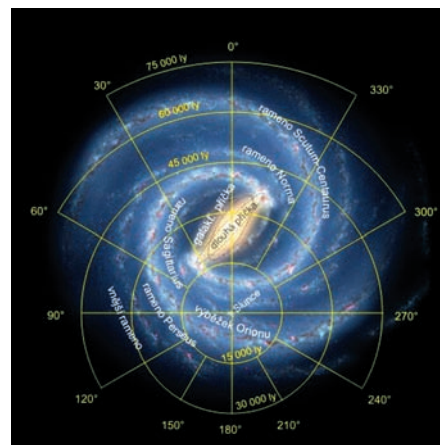
### Radiové mapování

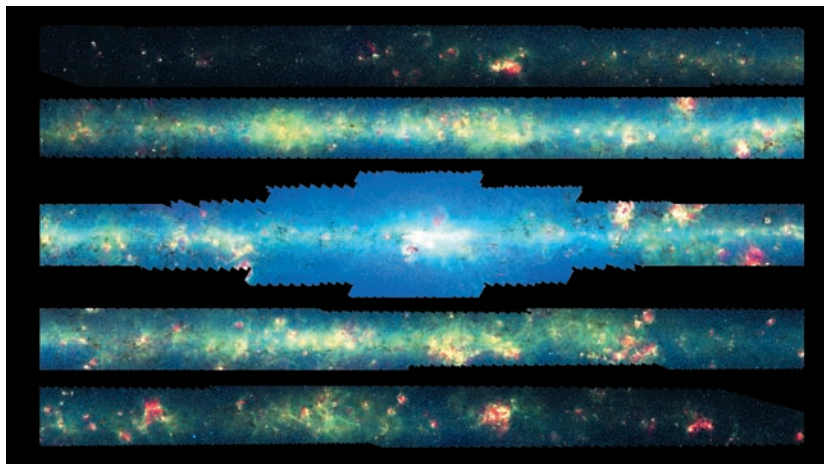
Díky radiovému mapování Mléčné dráhy byla objevena v druhé polovině minulého století spirálová struktura Galaxie a v tomto mapování se dnes pokračuje s neustále se zvyšující přesností. Radiové mapování má ale svá omezení, a co se týče přehlídkového snímkování galaktické roviny se zaměřuje zejména na rozložení vodíkových oblastí. Prvotní předpoklad, na kterém je toto mapování založeno, je souvztažnost koncentrovaných vodíkových oblastí ke koncentracím mezihvězdného prachu a k oblastem bohatým na hvězdy. Vzdálenost je zde určována pomocí Dopplerova jevu, tedy ze změny vlnové délky, která je interpretována jako funkce polohy zdroje v galaktické rovině. Předpokládáme, že rychlost vzdalování či přibližování zdroje radiového signálu je vázána na absolutní polohu vůči jádru. Oblasti jádru blízké se pohybují jinak než oblasti vzdálenější a tangenciální složka oběžné rychlosti je pro danou vzdálenost od jádru v příslušném spirálním rameni zhruba jednotná. Těchto předpokladů, z nichž vzejde prostorová struktura Galaxie, je však příliš mnoho a i když máme dnes velmi přesné výsledky v zobrazení do roviny kolmé na směr pozorování, odhady vzdáleností



Hubbleova klasifikace galaxií z roku 1926.

Struktura Galaxie podle snímkování SST. Dvě výrazná spirální ramena vycházejí z konců příčky ve vzdálenosti téměř 15 kpc od galaktického jádru. NASA.





K vytvoření této mozaiky bylo použito více než 800 000 snímků postupně získaných od roku 2005. Mléčná dráha je rozřezána na pět pruhů a zobrazena v kompozici tří vlnových délek. Modrá odpovídá 3,6  $\mu\text{m}$ , zelená 8  $\mu\text{m}$  a červená 24  $\mu\text{m}$ . Zeleně svítí organické molekuly, zejména polycyklické aromatické uhlovodíky, které ozařují blízké hvězdy. Tepelná emise prachových mračen je zobrazena červeně. Oblasti nově vznikajících hvězd kolotají žlutou a červenou barvou, která odpovídá horkému prachu, v němž vznikají organické látky. V modré, přecházející v bílou, svítí staré hvězdy a centrální galaktická výduť, která je na hvězdy starých populací bohatá. SST.

**SST (Spitzer Space Telescope)** – 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 3–180  $\mu\text{m}$ . Odahdovaná životnost byla tři roky, družice však bez jakýchkoliv problémů stále pracuje. Program družice má na starosti California Institute of Technology.

jsou přeci jen velmi spekulativní a samotné rádiové pozorování k určení struktury Galaxie nestačí.

### Infračervené mapování

Spitzerův vesmírný dalekohled (SST) pracuje ve vesmíru od roku 2003 a je určen pro spektrální oblast 3–180  $\mu\text{m}$ . Může snímat vyzařování v IR oblasti, ve které svítí chladná prachová mračna. Pomocí SST byly pozorovány vznikající hvězdy, vznikající zárodky planetárních soustav, galaktická jádra skrytá v prachových obálkách,

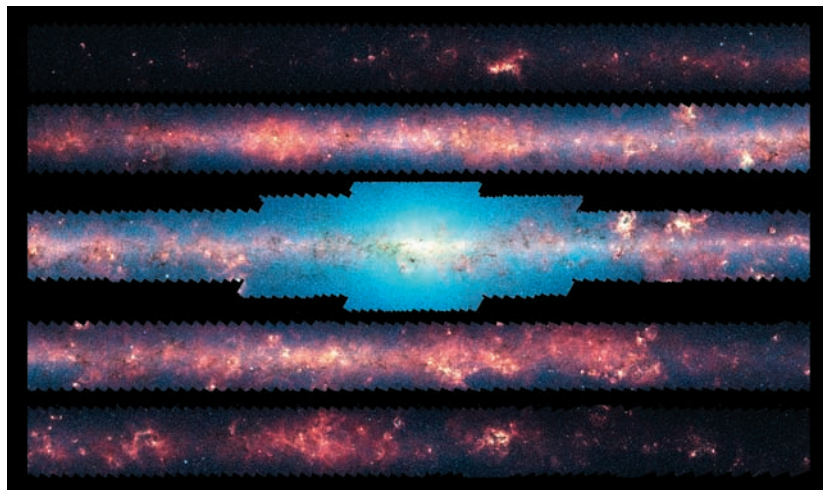
vzdálené galaxie jejichž svit je posunut až do IR oblasti a objekty v extrémních vzdálenostech objevivší se při vzniku našeho vesmíru. Jelikož infračervené světlo proniká hustými oblastmi látky v galaktické rovině a zároveň jde o světlo vyzařované prachem, lze pomocí SST zobrazit do velké vzdálenosti i materiál a děje, které jsou pro rádiové snímkování neviditelné.

Prvotní modely struktury Galaxie založené na rádiovém snímkování již od padesátých let minulého století postupně určily spirálovou strukturu Galaxie a rozlišily čtyři výrazné prostorové koncentrace galaktického plynu. Koncentrace byly ztotožněny se spirálními galaktickými rameny. Jde o ramena označovaná podle souhvězdí, kam se nám promítají jejich nejhustší oblasti: rameno Norma (Pravítko), Scutum-Centaurus (Štít – Kentaur), Sagittarius (Střelec) a rameno v Perseovi. K tomu je nutno přiřadit ještě koncentraci centrální galaktické výduť. Naše sluneční soustava leží mezi ramenem ve Střelci a ramenem Perseovým v řídkém rameni Orionově (Orion Arm), někdy také označovaném jako výběžek Oriona (Orion Spur).

Tým pod vedením Roberta Benjamina z univerzity ve Wisconsinu pracoval od roku 2005 pomocí observatoře SST na zobrazení centrální galaktické oblasti a cílem jejich práce bylo poznání struktury galaktické příčky. O existenci galaktické příčky astronomové věděli již na základě rádiového snímkování v projektu CGPS od konce devadesátých let minulého století.

Výsledky snímkování galaktické roviny observatoří Spitzerovým vesmírným dalekohledem (SST) byly uveřejněny 3. června 2008 a v kombinaci s rádiovým snímkováním jde o průlom v mapování Galaxie a určení její struktury. Galaxie je velmi pravděpodobně strukturou jen se dvěma výraznými spirálovými rameny vycházejícími z konců dlouhé příčky, kterou odhalil až SST. Velká ramena jsou rameno Scutum – Centaurus a rameno Perseovo. Obě tyto struktury jsou plné mladých jasných hvězd a také starších obřích červených hvězd v závěrečné vývojové fázi. Druhé dvě spirální struktury ve Střelci (Sagittarius) a v Pravítku (Norma) sestávají hlavně z plynu a malého množství mladých hvězd.

■ Ivan Havlíček, 13. 6. 2008, AB 25/2008



*K vytvoření tohoto zobrazení bylo poskládáno více než 444 580 snímků a vznikl tak portrét oblastí, v nichž bouřlivě vznikají nové hvězdy. Jde o kompozitní obraz poskládaný ze čtyř vlnových délek: modrá odpovídá 3,6  $\mu\text{m}$ , zelená 4,5  $\mu\text{m}$ , oranžová 5,8  $\mu\text{m}$  a červená 8,0  $\mu\text{m}$ . Červená mlha vzniká nasvícením organických molekul světlem vznikajících obřích mladých hvězd. Na Zemi bychom našli obdobné látky ve výfukových plynech automobilů nebo při opékání vuřtů, tedy všude tam, kde jsou nedostatečně spalovány uhlíkaté molekuly. Tmavé oblasti jsou natolik husté, že je neprohlédne ani bystrozraký SST. Oblasti hvězdných líhní, v nichž dochází ke zrodu nových hvězd, jsou zobrazeny světlou až bílou barvou. Modrá uprostřed odpovídá opět starým hvězdám centrální galaktické výdutě. SST.*

## Tanec černých děr



Kresba jádra podvojného systému tvořeného černými děrami v daleké galaxii. P. Marenfeld/NOAO/AURA/NSF

Hledání dvojhvězdy v jádru vzdálené cizí galaxie, kterou by tvořily černé díry, lze připodobnit hledání jehly v kupce sena. Takovou dvojici našli astronomové z NOAO (National Optical Astronomy Observatory) v Tucsonu. Znamená to, že takové binární systémy skutečně mohou existovat a lze je přímo pozorovat.

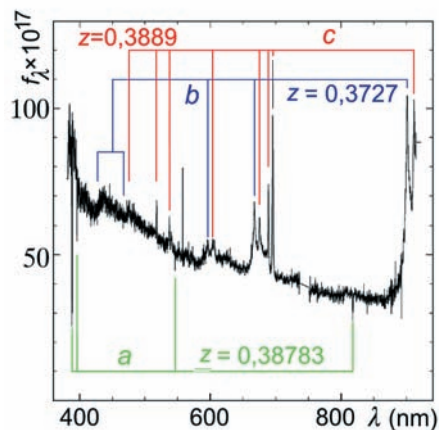
### Binární černá díra

Nově objevené černé díry kolem sebe obíhají ve vzdálenosti pouhé desetiny parseku, což je mnohem blíž, než je ze sluneční soustavy k nejbližší jiné hvězdě. Nový objev dvojice černých děr může rozšířit naše znalosti o vývoji galaxií, zejména o tom, jak se utváří galaktické jádro a jakou roli přitom hrají extrémně hmotné objekty. Po zformování galaxie se v jejím jádru vytvoří velmi hmotná černá díra. Mnoho galaxií však nacházíme ve skupinách, kde spolu mohou splývat, a předpokládáme, že přitom splývají také černé díry v jejich jádrech.

Tyto extrémně hmotné objekty by zde, podle teorie, měly postupně narůstat do obřích rozměrů. Při tomto procesu ale nepadá matérie do jícnu černé díry přímo. V její blízkosti je strhávána rotací gravitačního pole a vytváří rotující zářivý talíř – akreční disk. Právě díky záření akrečního disku, výtryskům tvrdého záření podél rotační osy a dalším jevům spojeným s pohlcováním hmoty je pak možné černou díru identifikovat. Při vyhledávání takového objektu je ale nutné velmi pečlivě rozlišit světlo domovské galaxie, v níž se systém nachází, a zároveň systém rozložit na jednotlivé složky.

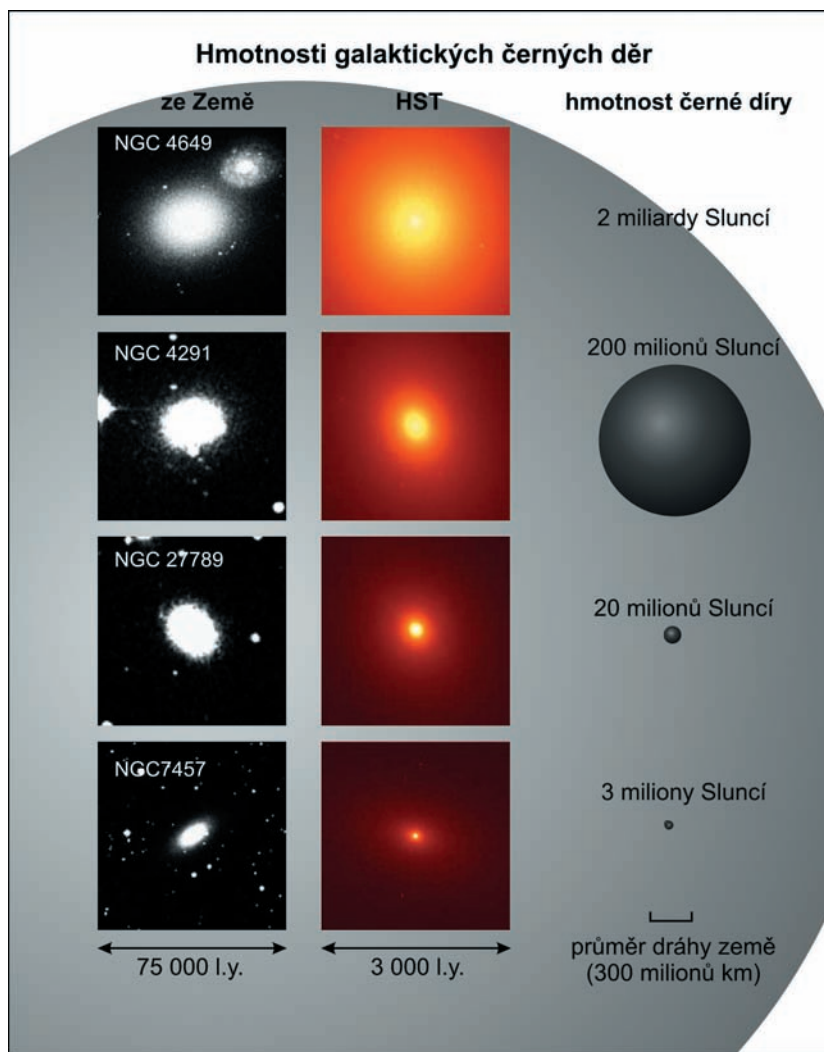
Na obrázku vlevo vidíte spektrogram z archivu SDSS kvazaru SDSS J153636.22+044127.0. Lze na něm rozlišit tři, vzájemným pohybem posunuté, systémy. Systém označený červeně pro kosmologický posuv  $z = 0,3889$  má spektrum typické pro kvazary s malým posuvem čar, zahrnující Balmerovu sérii a silné zakázané čáry [O II], [O III], [Ne III] a [Ne V]. Systém b označený modře s kosmologickým posuvem  $z = 0,3727$  ukazuje pouze širokou škálu Balmerovy série a UV emisi železa Fe II. Třetí systém má  $z = 0,38783$ , je vyznačen zeleně a je rozlišen jako šestice jinak nevysvětlitelných absorpčních linií: dublet Mg II (279,6 nm; 280,3 nm), čára Mg I (285,2 nm), Ca II K (393,4 nm), a dublet Na D (589,1 nm; 589,7 nm). Čára na vlnové délce 557,7 nm je pozůstatek slabé záře noční oblohy.

Spektrogram kvazaru SDSS J153636.22+044127.0.



Červený kosmologický posuv sledovaných spekter domovských galaxií u obou kompaktních objektů byl vyhodnocen jako jedna a tatáž galaxie. Jde o kvazar SDSS J153636.22+044127.0. V jeho jádru je tedy nejspíše binární systém složený ze dvou černých děr. Rozdvojení spektrálních linií centrálního objektu by mělo být jasnou známkou, že objekty jsou dva. Ze spektra lze také vyčíst, jak rychle kolem společného těžiště černé díry obíhají a jak jsou hmotné. Jelikož v takové soustavě probíhá – na kosmická měřítka ovšem – vše velmi rychle, bude možné v horizontu několika málo roků sledovat, jak se systém vyvíjí.

Černé díry mají rozdílné hmotnosti. Menší z nich je srovnatelná s 20 milióny Sluncí a druhá má 800 miliónů slunečních hmotností. Vzájemná rychlost spektrálních linií jednotlivých složek byla určena na 3 500 km/s. Černé díry by se tak mohly pohybovat okolo společného těžiště rychlostí 6 000 km/s a jejich oběžná doba je vypočtena na 100 roků. Jde o černé díry skutečně obří. V naší Galaxii – Mléčné dráze – se hmotnost centrální černé díry odhaduje na 2,5÷4 milióny Sluncí.



■ Ivan Havlíček, 12. 6. 2009, AB 23/2009

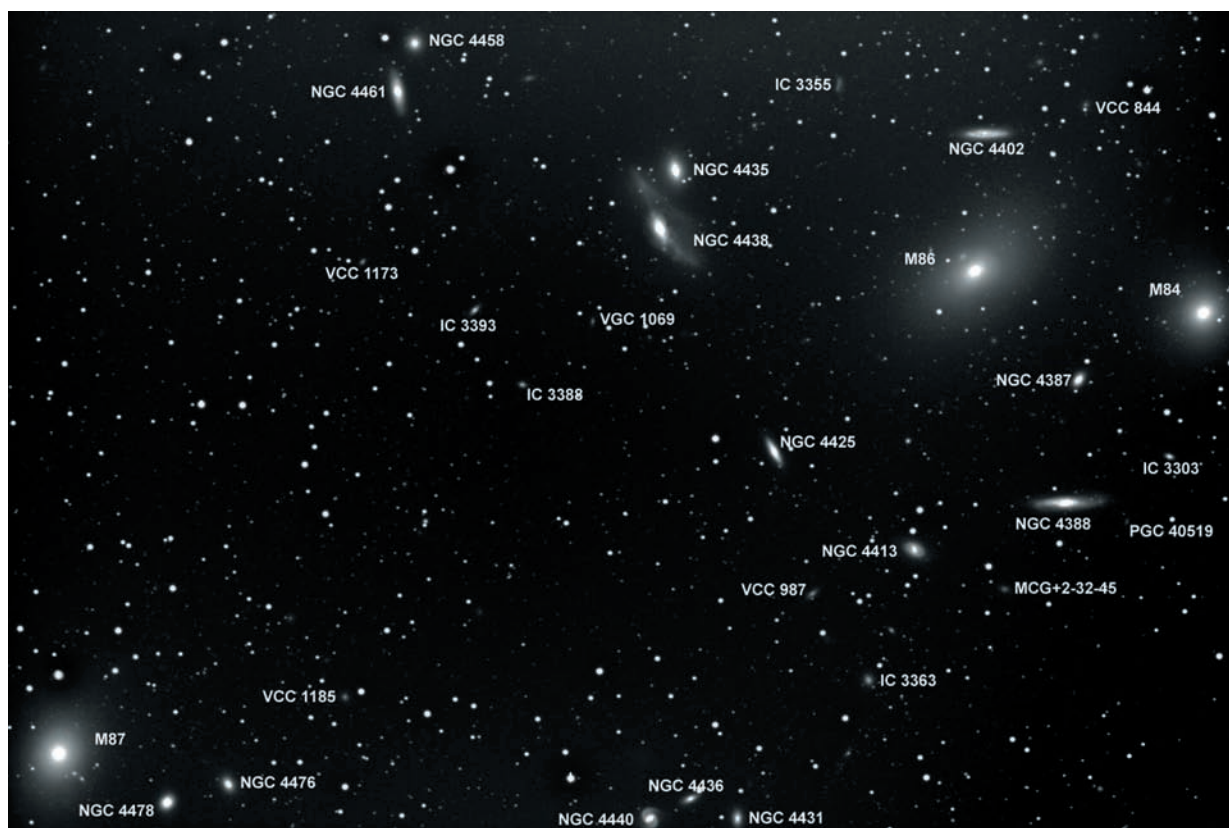
## Galaktické pronikání v Panně

**H alfa** – spektrální čára vodíku s vlnovou délkou 656,3 nm, která vzniká přechodem ze třetí energetické hladiny na druhou. Je součástí tzv. Balmerovy série spektrálních čar.

**Galaxie S0** – typ galaxie s jasnou centrální výduťí a výrazným diskem, ve kterém nejsou patrná spirální ramena. Tento typ se nazývá čočková galaxie.

Horké ionizované plazma je známkou aktivních procesů při galaktickém vývoji. Při přibližování galaxií, které lze také pojímat jako galaktickou srážku či galaktické slučování, je přítomnost horkého plazmatu chápána jako příznak právě probíhajícího procesu. V mnoha eliptických galaxiích je ale zřetelně pozorovatelná také  $H_{\alpha}$  emise. Záření  $H_{\alpha}$ , spolu s rentgenovým zářením z jádra galaxie, v takové galaxii její mezihvězdnou látku evidentně ochlazuje. Eliptická galaxie M86 se nachází poblíž jádra kupy galaxií v Panně. Tato nám nejbližší obří galaktická kupa čítá přibližně 160 členů velikostně srovnatelných s naší

Rodinný portrét kupy galaxií v Panně ve viditelném světle





Galaxií a v její centrální oblasti je, vyjma obřích eliptických galaxií, koncentrováno mnoho horkého mezigalaktického plynu. Předpokládáme, že vzájemným pohybem a prolínáním galaxií je z nich mezihvězdná látka vytrhována a postupně přechází do volného mezigalaktického prostoru, kde zvyšuje koncentraci látky mezi galaxiemi. Kupa je tedy tím starší, čím jsou eliptické galaxie v jejím středu větší (předpokládáme, že dorostly vzájemným slučováním menších jedinců) a čím více mezigalaktického plynu zde nalezneme.

M 86 je čočkovou eliptickou galaxií typu S0. V jádru kupy v Panně je usazena obří eliptická galaxie M 87, jeden z nejnápadnějších galaktických objektů na obloze, vůči níž se M 86 pohybuje rychlostí 1 350 km/s. Následující text popisuje jevy v mezigalaktickém prostředí probíhající mezi eliptickou galaxií M 86 a spirální galaxií NGC 4438 pozorované na rozdílných vlnových délkách.

Mezi jednotlivými galaxiemi v kupě se podařilo velmi složitým způsobem zobrazování pomocí zařízení MOSAIC na čtyřmetrovém dalekohledu Mayall na observatoři Kitt Peak rozeznat mezihvězdný plyn v mnohem detailnějším měřítku. Zobrazené detaily zde odpovídají kupám hvězd, či hvězdných koncentrací. Z prostorového rozložení naměřených rychlostí tohoto lze pak popisovat časový průběh mezigalaktických interakcí. Snímkování v širokém záběru mezi dvěma galaxiemi M 86 a NGC 4438 odhalilo komplikovanou strukturu vodíkových oblastí viditelnou v čáře  $H_{\alpha}$ , která se vůči oběma členům kupy pohybuje v různých místech rozdílnými rychlostmi. Je tak možné v tomto místě přímo pozorovat, nakolik je mezihvězdné prostředí ovlivňováno blízkostí galaxií i vysledovat, jakým způsobem je vývoj struktury ovlivňován gravitací.

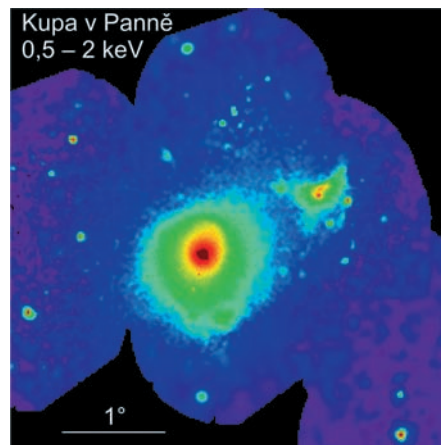
Obraz morfologie  $H_{\alpha}$  oblastí v M 86 je velmi ucelený. Jsou zde rozpoznatelné komplikované vláknité struktury s řadou podrobností, které jsou ale oproti očekávání chudé na H II oblasti, obdobu uzlových zhuštění. Očekávané H II uzlové oblasti jsou přitom obvykle zdroji FUV, a bývají identifikovány jako hvězdné líhně. Byly zde bezpečně rozpoznány čtyři velké  $H_{\alpha}$  oblasti, které vyplňují zobrazený mezigalaktický prostor. Nejsilnější  $H_{\alpha}$  emise pochází z jádra M 86 a excentricky se odtud rozpíná jižním směrem. Je rozměrově srovnatelná s centrální oblastí galaxie M 86 – úhlově jde o oblast 1' až 2'. Druhou je, ve viditelné oblasti s ničím nekorrespondující, rozšíření plynoucí z jádra NGC 4438 a pokračující západním směrem ke galaxii M 86 obří smyčkou

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

**Galaktické jádro** – nevnitřnější část galaxie, zpravidla má podobu centrální vřutě a obsahuje podstatnou část atomární látky galaxie. V mnoha galaxiích je v jádře obří kompaktní objekt, pravděpodobně černá díra.

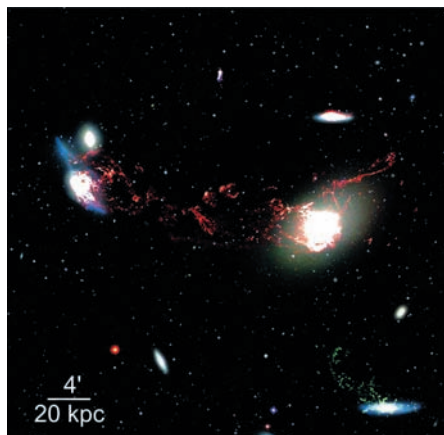
**Galaktická kupa** – galaktické kupy jsou jedněmi z největších struktur ve vesmíru, některé z nich dosahují hmotnosti až desetitisícnásobku hmotnosti naší Galaxie.

Kupa galaxií v Panně v rentgenovém světle, které vysílá horký mezigalaktický plyn. Nejvyšší koncentrace plynu (žlutozelené oko v centru snímku) je kolem centra kupy, v němž je usazena galaxie M 87. Další dvě plynné zhuštění, zobrazené žlutě, jsou kolem galaxií M 86 a M 84 v horní pravé části snímku. Snímek je orientován obdobně jako naproti uvedený rodinný portrét ve viditelném světle. ROSAT.



**H II oblasti** – část mezihvězdného prostoru, ve kterém se nachází ionizovaný vodík. Vodík je ionizován UV zářením z blízkých obřích hvězd spektrálního typu O a B. Tyto hvězdy mohou ionizovat vodík na vzdálenosti až stovek světelných let. Teplota H II oblastí se pohybuje v intervalu 10 000 K až 20 000 K a má koncentraci v řádu desítek atomů v centimetru krychlovém. Nejznámější H II oblasti je například velká mlhovina v Orionu M 42.

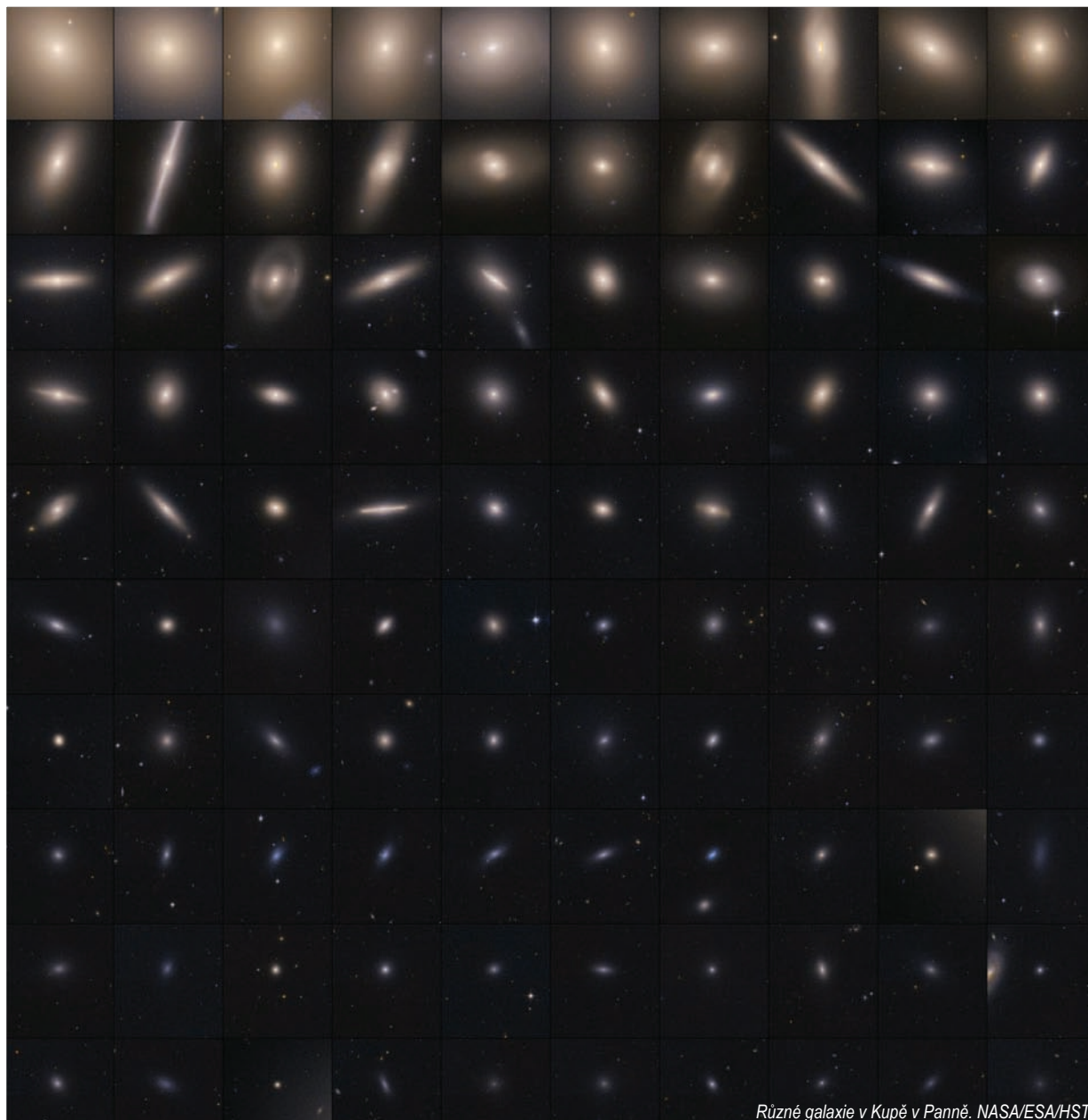
Snímek galaxií M 86 a NGC 4438 se zobrazenými vodíkovými oblaky svítícími v čárách  $H_{\alpha}$  [N II]. Jako podklad byl použit barevný snímek pořízený při přehlídce SDSS. Velmi slabě svítící  $H_{\alpha}$  emise byla zdůrazněna zvýšením kontrastu. Oblasti pohybující se malými rychlostmi (< 500 km/s) jsou zbarveny červeně, emise vysokých rychlostí (> 2 000 km/s) je zobrazena zeleně. Nízkorychlostní emise je přičítána plynu vytrženému z galaxie NGC 4438 kolidující s galaxií M 86, který je postupně ohříván. Vysokorychlostní oblaka plynu jsou pozorována poblíž NGC 4388 ve spodním pravém rohu snímku. Tento plyný most ale není protažen až k M 86 a z dosud provedených pozorování není prozatím jasné, co jej způsobuje. Zdroj: University of Chicago.



o velikosti 5'. Jde tedy o útvar velký jako celá NGC 4438 zobrazená ve viditelném světle. Tvarově však tyto oblasti, až na část poblíž jádra NGC 4438, sobě neodpovídají. Třetí oblastí je smyčka v rozsahu 2' až 8' (10 až 40 kpc) tryskající severozápadním směrem z jádra M 86. Smyčka je z jádra protažena jako velmi tenká vláknitá struktura v poměru průřezu k délce 1:50. Předpokladem pro vznik a udržení takového vlákna je minimální turbulence v této oblasti mezihvězdného prostředí. Tato smyčka odpovídá prostorově také RTG vyzářování a rádiovému záření neutrálního vodíku. Jako čtvrtá je rozeznatelná struktura táhnoucí se jako spojovací most mezi oběma galaxiemi. Velikostně jde o oblast velikou 23' neboli 120 kpc. Tato struktura vyzářující na  $H_{\alpha}$  se v různých místech pohybuje různě rychle a je zde zřetelně čitelný rychlostní gradient mezihvězdné látky mezi oběma galaxiemi.

Z uvedeného pozorování lze usuzovat, že v minulosti se obě galaxie proluly. Méně hmotná NGC 4438 prolétla obří spirální galaxií M 86 a pozorované emise  $H_{\alpha}$  jsou trosky mezihvězdné látky vytržené ze zborcené a rozkolísané galaxie NGC 4438. Hvězdný disk spirální galaxie NGC 4438 si sice podržel svoji celistvost, ale vnější spirální ramena jsou deformována slapovými silami natolik, že se dnes nacházejí evidentně mimo původní galaktickou rovinu. Mezihvězdná látka je zde oproti hvězdám z původní galaktické struktury vytržena a roztroušena a reprezentuje stopy této galaktické kolize. Je také možné, že se této kolize účastnila i galaxie NGC 4435, která se dnes nachází v těsné blízkosti galaxie NGC 4438. Pravděpodobný scénář celé události lze popsat následovně: galaxie NGC 4438 prolétla z našeho pohledu proti nám zpoza galaxie M 86. Galaktická jádra se přitom minula ve vzdálenosti ne větší než 10 kpc. Průnik obou struktur rychlostí kolem 1 000 km/s způsobil zpomalení galaktického plynu obou galaxií. Mezihvězdná látka postupně opouští hvězdné struktury galaxie NGC 4438 a galaktický plyn v galaxií M 86 se takto převzatou energií ohřívá a září v RTG. NGC 4438 tak mohla přijít až o  $5 \times 10^9 M_{\odot}$ . Galaktická kolize se tak stala podstatným zdrojem energie pro mezihvězdnou látku obřích galaxií M 86. Je možné, že v podobných srážkách takto získaná energie bývá nakonec soustředěna v centrální oblasti a stává se zdrojem vyzářování v obřích eliptických galaxiích s aktivním jádrem (AGN).

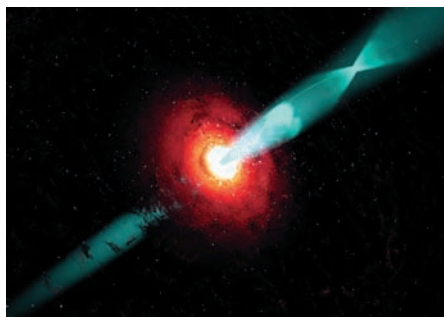
■ Ivan Havlíček, 16. 1. 2009, AB 3/2009



*Různé galaxie v Kupě v Panně. NASA/ESA/HST.*

VZDÁLENÝ VESMÍR

## Aktivní jádra galaxií



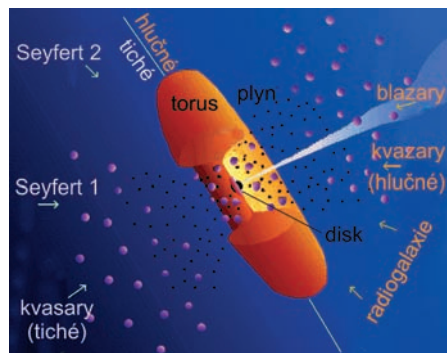
Magnetická trubice se zkroucenými silokřivkami. Dobře patrný je uzel vznikající při postupu částic urychlených rázovou vlnou. *Nature* 2008, A. Marscher.

Aktivní jádra galaxií jsou nejenergetičtějšími objekty ve vesmíru a jsou pozorována v různých podobách od 40. let dvacátého století. Svítivost těchto jader je podstatně vyšší než u ostatních galaxií buď v celém spektru nebo jenom v jeho některé části. Často dochází k nepravidelným zjasněním a zábleskům. Dnes se zdá, že všechny tyto jevy mají společný mechanismus – velmi hmotnou černou díru v centru galaxie a v okolí dostatek plynu nebo hvězd, které může černá díra „požírat“. Po „vyjedení“ materiálu z okolí jádra se aktivní galaxie stane normální galaxií. Různé pozorované typy galaxií s aktivními jádry jsou pravděpodobně tímtež druhem objektu, na který se jen díváme z různého úhlu pohledu.

### Základní mechanismus

K čemu dochází v okolí velmi hmotné černé díry? Plyn a prach padá pomalu po spirálách do černé díry a v jejím okolí vytvoří charakteristický disk. Jednotlivé vrstvy se o sebe třou a disk se zahřívá na vysokou teplotu. Pokud jsou v blízkosti hvězdy, jejich plazma je roztaženo slapovými silami a stává se součástí disku. Existence plynu, prachu a hvězd v okolí je základní podmínkou vytvoření horkého disku kolem hvězdy. Samotný disk intenzivně září i v rentgenovém oboru. Nabitě částice obíhající černou díru vytvoří silné magnetické pole kolmé na rovinu disku (silokřivky jsou rovnoběžné s rotační osou). Rekonexce magnetických silokřivek bude podporovat zahřívání disku. Rotace černé díry bude ovšem silokřivky kroutit a za některých situací vznikne zkroucená magnetická trubice podobná trysce nebo duté hadici, kterou proudí nabitě částice od černé díry. Magnetické pole směrem od černé díry slábne, a tak vzniká gradient magnetického tlaku urychlující částice ve směrech rotační osy. Vznikají dva charakteristické výtrysky, ve kterých mohou nabitě částice dosáhnout velmi vysokých relativistických rychlostí. Na konci výtrysků jsou urychlené částice brzděné mezihvězdným prostředím, plynem a prachem a vznikají zde charakteristické radiové laloky. Ty jsou patrné na snímcích v radiovém oboru. Pokud dojde v blízkosti černé díry k explozivnímu procesu (mechanismus není zatím znám), vznikne rázová vlna ženoucí nabitě částice magnetickou trubicí a fokusující je do jakéhosi uzlu, který se pohybuje podél trubice směrem od černé díry. Právě v tomto uzlu mohou části-

Z různých úhlů pohledu vidíme různé objekty. Torus látky kolem akrečního disku stíní oblast vzniku širokých čar. *BeppoSax*.



ce získat rychlosti blízké rychlosti světla. Experimentálně pozoroval obdobné chování tým vědců vedený Alanem Marscherem z americké Univerzity v Bostonu u objektu BL Lacertae, který je vzdálený 950 milionů světelných roků od Země. Data byla pořízená při záblesku, který nastal v roce 2005, ke zpracování došlo v roce 2007 a k publikaci výsledků v roce 2008.

Případný pozorovatel nemusí ale vidět oba dva výtrysky. Pokud se dívá přesně v rovině disku, může mít zakrytý výhled na podstatnou část výtrysků. Pokud se dívá mimo rovinu disku, bude relativistickými jevy potlačena intenzita vzdalujícího se výtrysku. Ve většině případů tak pozorovatel uvidí výtrysk jediný. Pokud by se pozorovatel díval přesně podél směru výtrysku, uvidí díky směřování občasné výrony enormního množství energie. Na úhlu pohledu také závisí šířka pozorovaných spektrálních čar. Pokud se díváme do blízkosti disku, jsou čáry široké, ve větších vzdálenostech od disku vznikají čáry úzké. Závislost na poloze pozorovatele je proto u černé díry s diskem a dvěma výtrysky značná. Dnes se zdá, že většina různých aktivních jader galaxií je stejným druhem objektu, která právě pozorujeme z různých směrů. Jediným skutečným odlišením fyzikálních procesů je potom fakt, zda objekt vyzařuje intenzivně v radiovém oboru (radiově hlučné kvazary, radiogalaxie, blazary) nebo zda v radiovém oboru vyzařuje zanedbatelně (radiově tiché kvazary a Seifertovy galaxie).

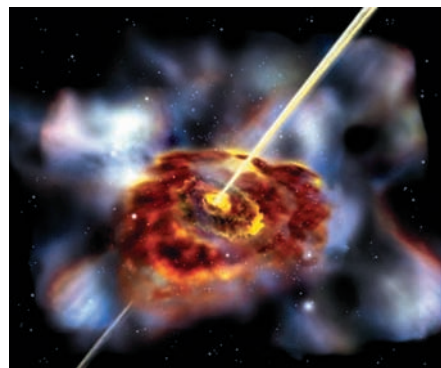
## Jednotlivé objekty

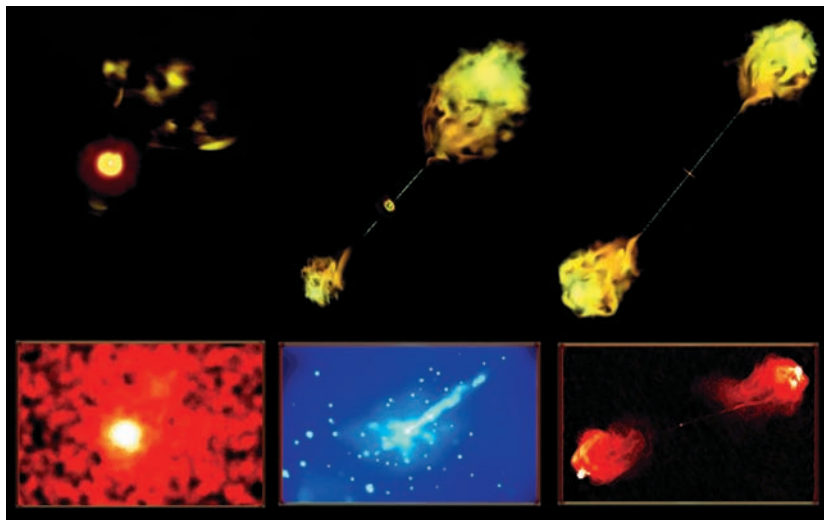
*Seifertovy galaxie a linery.* Tento typ aktivních galaxií objevil Karl Keenan Seyfert v roce 1943. Hostitelské galaxie jsou zpravidla spirální, a nebo nepravidelné. Září v optickém i rentgenovém oboru, někdy mají nevýrazné radiové výtrysky. Dělíme je na podtypy Seyfert 1 s charakteristickými úzkými i širokými emisními čarami ve spektru a Seyfert 2, který má jen úzké emisní čáry. Oblast vzniku širokých čar může být stíněna samotným torem látky kolem akrečního disku, takže při pohledu z blízkosti roviny disku široké čáry zmizí. Typickou Seyfertovou galaxií typu 2 je galaxie Circinus v souhvězdí Kružítko. Příbuznými objekty, které jsou také definovány typem spektra, jsou tzv. linery (Low-Ionization Nuclear Emission-Line Regions), obsahují spektrální čáry slabě ionizovaných a neutrálních atomů kyslíku, dusíku a síry. Příkladem může být galaxie Sombrero (M 104). Seyfertovy galaxie ani linery nezáří výrazně v radiovém oboru.

**Černá díra** – zkolabovaný objekt, ze kterého 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.

**Aktivní jádra galaxií** – jádra produkující ne-tepelné pulzní UV a RTG záření, v centru sídlí velmi hmotná černá díra obklopená akrečním diskem ( $n \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \sim 10^5 \text{ K}$ ,  $B \sim 0,2 \text{ T}$ ). Přepojení silokřivek magnetického pole je doprovázeno ohřevem elektronů až na  $10^9 \text{ K}$  a rentgenovým či gama zábleskem. Existuje celá řada galaxií s aktivními jádry, například Seifertovy galaxie, linery, blazary a kvazary. Tyto objekty se často označují AGN (Active Galactic Nuclei).

*Pohled na černou díru s akrečním diskem v umělecké vizi Aurore Simonnet z Univezity v Sonomě.*





Různé pohledy na aktivní jádro z předchozího obrázku. Nalevo: pohled ve směru výtrysku (v rámečku je blazar 3C 279). Uprostřed: pohled z obecného úhlu (v rámečku je radiogalaxie Cen A v RTG oboru z Chandry). Napravo: pohled z roviny disku (v rámečku je objekt Cyg A v radiovém oboru z VLA). NASA/Fermi.

**Radiogalaxie.** Černou díru v radiových galaxiích téměř výhradně hostí eliptické galaxie. Je pro ně charakteristické intenzivní vyzařování v radiovém oboru. Záření je synchrotronního původu a jsou za něho zodpovědné elektrony pohybující se v magnetickém poli. Charakteristické jsou také radiové laloky na konci výtrysků. K nejznámějším radiovým galaxiím patří relativně blízký zdroj Centaurus A (14 milionů světelných roků). Příbuznými objekty jsou radiově hlučné kvazary a blazary.

**Kvazary.** Kvazary jsou natolik vzdálené, že se jeví v běžných optických dalekohledech jako bodové objekty. Odtud vznikl jejich název, jde o zkratku z anglického QUASi-stellar radio source (jakoby hvězdný radiový zdroj). Byly objeveny na počátku 60. let 20. století a jejich spektrum bylo z počátku záhadou. Později se zjistilo, že spektrální čáry mají extrémní červený posuv způsobený expanzí vesmíru. Dnes jsou známé i radiově tiché kvazary.

**Blazary (OVV, BL Lac).** Blazary jsou kvazary, na které se díváme ve směru výtrysku. Název dostaly podle objektu BL Lac ze souhvězdí Ještěrky. V roce 1974 se ukázalo, že BL Lac není hvězda, ale vzdálená galaxie s extrémním a proměnným výkonem. Blazary dělíme do dvou skupin. První jsou vysoce proměnné kvazary OVV (Optically Violent Variable Quasars), druhou skupinu tvoří nepravidelně proměnné galaxie typu BL Lac.

**Kosmologický posuv** – posuv spektrálních čar k červenému konci spektra díky rozpinání vesmíru. Při rozpinání dochází nejen ke vzájemnému vzdalování galaxií, ale i k prodloužení vlnových délek záření. Spektrum vzdálených objektů ve vesmíru se tak jeví posunutě směrem k červené až infračervené oblasti. Kosmologický červený posuv je definován předpisem  $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ , kde  $\lambda_0$  je vlnová délka spektrální čáry v okamžiku vyslání paprsku,  $\Delta\lambda$  je změna vlnové délky téže spektrální čáry v okamžiku zachycení paprsku. Malé kosmologické červené posuvy lze interpretovat pomocí Dopplerova jevu.

■ Petr Kulhánek, 16. 5. 2008, AB 21/2008

## Majú čierne diery hornú hranicu svojej hmotnosti?

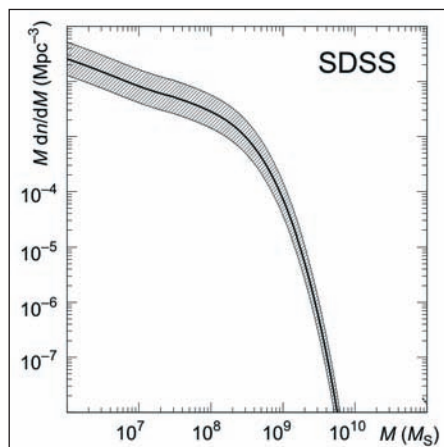
Prvý náznak niečoho podobného čiernej diere sa datuje do roku 1783, keď Angličan John Michell na základe Newtonovej teórie gravitácie určil podmienku pre teleso, z povrchu ktorého by bola úniková rýchlosť rovná rýchlosti svetla a bolo by preto neviditeľné. Prelom nastal až v roku 1916, keď Karl Schwarzschild, na základe Einsteinovej všeobecnej teórie relativity, teoreticky odvodil viac menej súčasnú podobu čiernej diery. V 20. rokoch potom Subrahmanyan Chandrasekhar vypracoval scenár vzniku čiernej diery zrútením sa hmotnej hviezdy, čím sa rozpútali roky búrlivých diskusií o možnosti či nemožnosti ich existencie. Tie vzhľadom k svojej záhadnosti a nedostupnosti často fascinovali verejnosť a boli podnetom pre rôzne nevedecké diskusie a špekulácie. Kvalitatívne nové ponímanie čiernych dier zaviedol v roku 1971 britský fyzik Stephen Hawking, keď pre čierne diery zaviedol termodynamický pojem entropie a následne v roku 1975 odvodil aplikáciou kvantovej teórie poľa nutnosť žiarenia čiernych dier. Dnes sú už čierne diery, kedysi tak vzácne a exotické objekty, považované za bežnú súčasť vesmíru, kde „požierajú“ všetku okolitú hmotu a žiarenie, ktoré má tú smolu a dostane sa k čiernej diere príliš blízko, pod tzv. Schwarzschildovu medzu. Ultra masívne čierne diery sa nachádzajú v centrách obrích eliptických galaxií v galaktických kopách a sú najväčšie vo vesmíre, ich hmotnosť dosahuje až 1 miliardu hmotností Slnka. Dokonca aj veľká čierna diera v strede našej Mliečnej dráhy je tisíc krát menšia než tieto obrovské monštrá.

Ako horúca novinka bola v auguste tohto roku publikovaná práca autorov Priyamvada Natarajan z Yalskej univerzity a Ezequiel Treister z Európskeho južného observatória v Chile správa o hornom limite pre hmotnosť supermasívnych čiernych dier. Tieto stále sa zväčšujúce gravitačné monštrá nemôžu rásť donekonečna. Ich rast sa zastaví, keď dosiahnu hmotnosť asi 10 miliárd hmotností Slnka. Ich štúdia ukazuje, že existuje limit pre ich hornú hranicu hmotnosti. Natarajan použitím dát z optických a rentgenových ďalekohľadov programu SDSS ukázala, že tieto čierne diery museli v nejakom bode svojej evolúcie svoj rast zastaviť. Pokiaľ predpokladáme, že v prípade masívnych čiernych dier v centrách obrích galaxií je formovanie hviezd a napájanie čiernych

**SDSS** – Sloan Digital Sky Survey, ambiciózní projekt prehličky oblohy podporovaný nadáciou Alfreda Pritcharda Sloana, ktorá bola založená v roku 1934. Alfred P. Sloan (1875-1976) bol americký obchodník a výkonný riaditeľ spoločnosti General Motors po viac než dvacet let. Sloanova nadácia podporuje také vedy a školstvo. Projekt katalogizuje všetky galaxie s medzi jasnosťou do 23. magnitudy na čtvrtině severní oblohy. Přehlička zahrnuje asi 500 miliónů galaxií a ještě více hvězd. U každé galaxie je určena pozice, jasnost a barva. Pro asi milión galaxií a 100 000 kvazarů budou pořizena spektra. Stanice SDSS je postavena v Novém Mexiku v Sacramento Mountains na observatoři Apache Point. Hlavním přístrojem projektu SDSS je ďalekohled o průměru primárního zrcadla 2,5 m.

Obrázok obrej galaxie NGC 1132, v jej strede sa môže nachádzať ultramasívna čierna diera. NASA/ESA/HST.





Graf ukazuje závislosť priestorovej hustoty výskytu čiernych dier na jednotku hmotnosti ako funkciu ich hmotnosti získanú z výsledkov programu SDSS. Pre hmotnosť čiernych dier  $10^9$  až  $10^{10}$  hmotnosti Slnka ( $M_{\odot}$ ) je vidieť prudký pokles ich počtu. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2008.

dier hmotou vo vzájomnom vzťahu, je pravdepodobné, že existuje samolimitujúci rastový cyklus čiernych dier, z ktorého musí vyplývať aj horná hranice pre ich hmotnosť.

Možné vysvetlenia, ktoré Natarajan vo svojej práci ponúka, sa zkladajú na obmedzení prílivu hmoty do čiernej diery spôsobené silou hybnosti vetra, jeho radiačným tlakom alebo hybnosťou energetického vetra čiernej diery. Predpokladáme, že čierne diery dospeli do štádia, keď vyžarujú toľko energie koľko skonzumuje ich okolie, čím sa preruší dodávanie plynnej zložky, ktorá ich vyživuje. Následkom toho môže byť aj ukončenie tvorby hviezd v ich okolí.

Tieto zistenia majú dopad na budúce výskumy vzniku a formovania galaxií a to od doby, keď mnoho najväčších galaxií vo vesmíre začalo spoločné putovanie s čiernou dierou vo svojom strede. A na záver slová Natarajan: „Zatiaľ sme zhromažďovali dôkazy o kľúčovej úlohe čiernych dier v procese formovania galaxií, ale teraz sa ukazuje, že v tejto kozmickej opere hrajú úlohu prvej dámy.“

■ Vladimír Scholtz, 19. 9. 2008, AB 39/2008

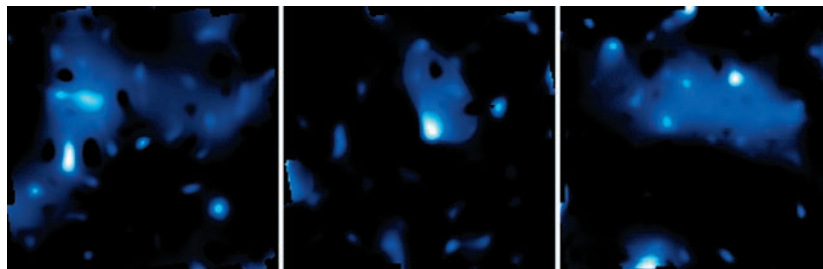


## Temná hmota a projekt COSMOS

Do počátku třicátých let minulého století bylo složení vesmíru velmi jednoduché: plyn, prach, sem tam nějaká hvězda, a když jich bylo trochu víc, tak z toho vznikaly galaxie. Pak ale přišel Fritz Zwicky s objevem, že v kupách galaxií musí být hmoty mnohem více, aby se udržely pohromadě. Jednotlivé galaxie se v nich pohybovaly mnohem rychleji, než by měly, kdyby zde byla jen hmota, kterou můžeme vidět. Skoro třicet let ho nikdo nebral moc vážně, zejména také díky nedostačným pozorovacím metodám, ale od šedesátých let, kdy bylo totéž zjištěno v naší Galaxii, se kousky mozaiky začaly skládat k sobě. Dnes víme, že vesmír, ve kterém žijeme, tvoří z velké většiny látka, kterou se zatím daří pozorovat jen nepřímo, díky vlivům na viditelnou svítící složku tvořenou zejména hvězdnými soustavami. Atomární látka tvoří jen 4 % gravitačního působení vesmíru a z toho jen asi čtvrtina přímo svítí. Další 23 % tvoří již zmíněná „temná hmota“. A nakonec téměř celé tři čtvrtiny veškerého gravitačního vlivu, který je odpovědný za rozpínání vesmíru, je vlastností vesmíru jako celku a je označováno jako „temná energie“.

### Projekt COSMOS

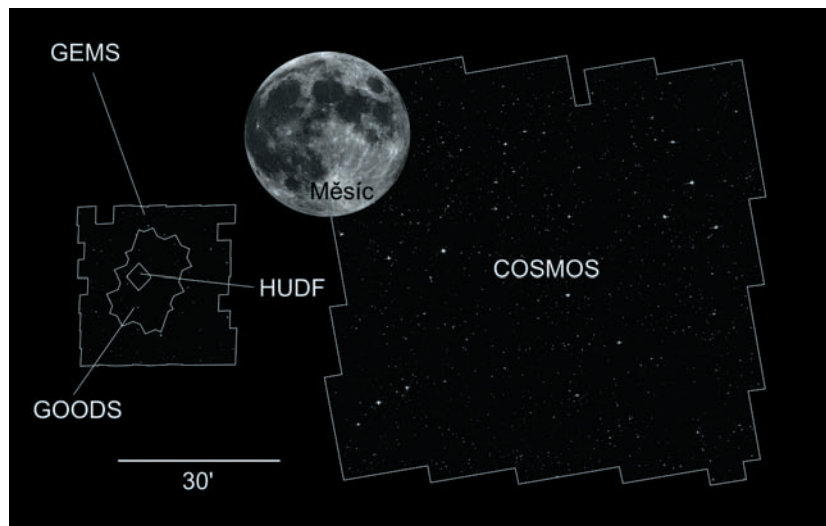
Všechny předchozí studie zabývající se temnou hmotou byly založeny na výpočtových simulacích vycházejících zejména z gravitačních účinků na atomární látku. Od roku 2002 probíhá časoprostorová prohlídka ve vybrané oblasti oblohy pod názvem COSMOS (the Cosmic Evolution Survey). Prohlídka oblohy na časoprostorové škále miliard světelných roků by se mohla stát základem pro poznání vývoje obřích soustav, jakými galaxie a galaktické kupy jsou. Jde o první pokus zmapovat vývoj vesmíru v tak obrovském měřítku. Projekt COSMOS je výjimečný zejména tím, že pomocí rozložení hmoty, která je klíčová pro strukturu vesmíru, mapuje utváření prostorových charakteristik, které mohou být podstatné



Rozložení temné hmoty ve vzdálenosti  $3,5 \times 10^9$  (nalevo),  $5 \times 10^9$  (uprostřed) a  $6,5 \times 10^9$  (napravo) miliard světelných roků. HST, 2007.

**Temná hmota** – hmota ve vesmíru nebaryonové povahy, není složena z kvarků. Temná hmota udržuje pohromadě svítící objekty velkých rozměrů, které díky ní v periferních oblastech obíhají rychleji, než odpovídá známým gravitačním zákonům a množství pozorované hmoty. Tvoří několiknásobek hmotnosti atomární látky galaxií a 23 % hmoty vesmíru. Prozatím je mnoho možností, co všechno by mohlo být temnou hmotou. Dosud ji však neumíme přímo detekovat. Termín zavedl v roce 1933 Fritz Zwicky na základě pozorování pohybu galaxií v kupě galaxií ve Vlasech Bereniky.

**Temná energie** – entita zodpovědná za zrychlenou expanzi vesmíru. Tvoří 73 % hmoty a energie ve vesmíru. Hustota temné energie je velmi málo proměnná v čase i v prostoru, pokud vůbec. Nejnadhřejším kandidátem na temnou energii je energie vakua.



Srovnání velikosti Měsíce s plochou projektů COSMOS, GEMS, GOODS a HUDF. GEMS (*Galaxy Evolution from Morphology and Spectral Energy Distributions*) zahrnuje plochu 900 čtverečních minut pomocí kamery ACS na HST. GEMS zahrnuje 10 000 galaxií do 24 magnitudy. GOODS (*Great Observatories Origins Deep Survey*) spojuje extrémně hluboké prohlídky kosmických observatoří HST, SST, Chandra, XMM Newton. GOODS pokrývá 320 úhlových čtverečních minut. HUDF (*Hubble Ultra Deep Field*) je prozatím nejdále do vesmíru provedená prohlídka ve viditelném oboru zahrnující několik tisíc galaxií až do 31 magnitudy. Prohlídka byla provedena kamerou ACS na HST.

**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 Mapušštině Slunce, Měsíc, Jižní Kříž a Venuši. Sběrná plocha každého z velkých přístrojů je 53 metrů čtverečních. Dalekohledy jsou vybaveny systémem adaptivní aktivní optiky. Další menší pomocné dalekohledy tvoří s hlavní čtveřicí výkonný interferometr o základně 200 m. Dokončení celé stavby se předpokládá v roce 2005.

pro vývoj vesmírných objektů a jejich uskupení. První výsledky byly publikovány v lednu 2007.

### Princip mapování

Rozložení temné hmoty se počítá ze zkreslení obrazů vzdálených objektů. Světlo přicházející z extrémních vzdáleností je ovlivňováno na své dráze od zdroje k pozorovateli prostředím, kterým prošlo. Z míry tohoto ovlivnění, pokud máme k dispozici extrémně velké soubory světelných zdrojů, lze určit vlastnosti vesmírného prostředí. Pokud předpokládáme, že vesmírné prostředí je nejvíce strukturová-

no právě temnou hmotou, pak mapa „ovlivňování světla“ je hledanou mapou prostorového rozložení temné hmoty.

Výsledkem výpočtů je třídímní „mapa“ rozložení temné hmoty v oblasti, která má dva rozměry kolmé na zorný paprsek stanovený úhlovou mírou a třetí rozměr, rovnoběžný ke směru pozorování, je měřen vzdáleností od pozorovatele – ve světelných rocích nebo v čase (což je zde totéž). Mapa je tedy časoprostorovým rozložením pozorovaných deformací světla vzdálených svítících objektů.

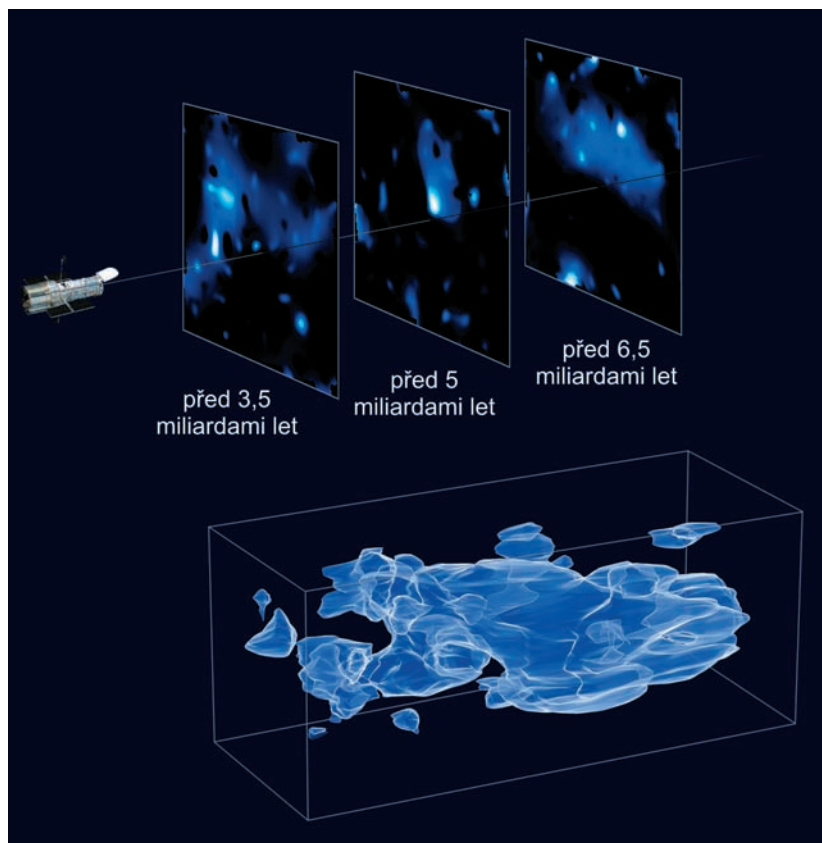
### Výsledky

Na vlastním pozorování se podílely nejlepší týmy a astronomické přístroje dnešní doby: Hubbleův vesmírný dalekohled, největší japonský dalekohled SUBARU, Evropská jižní observatoř VLT (Velmi velký dalekohled) a rentgenová observatoř XMM Newton. Výsledkem je prostorová mapa „temné hmoty“ ve vazbě na hmotu svítící, která zabírá na obloze výřez zhruba  $3 \times 3$  průměry Měsíce, a táhne se do hloubky 6,5 miliardy světelných roků. Prostorová mapa vznikla sloučením 575 obrazových polí pořízených HST pomocí širokouhlých kamer ACS a WFPC. Data byla získána během 1 000 hodin pozorovacího času. K vytvoření mapy byly použity zkreslené obrazy 500 000 vzdálených galaxií. Vzdálenosti galaxií byly určeny spektroskopicky pomocí tele-

skopů SUBARU na Hawai a VLT v Chile. K prostorovému rozložení mezigalaktického plynu posloužila pozorování rentgenového dalekohledu XMM Newton. Projekt COSMOS poskytl dosud nejpodrobnější údaje o rozložení temné hmoty ve vesmíru.

COSMOS si ale neklade za cíl jen mapovat temnou hmotu. V historii snímkování pomocí HST jde o nejrozsáhlejší spojitou oblast, která byla kdy tímto dalekohledem zobrazena. V kontextu nastupující éry observatoří nové generace, jako např. Herschel, JWST, ALMA atd. jde o grandiózní pilotní projekt. Budoucí přehlídkové kosmologické projekty, které se budou zabývat strukturou látky v dalekém prostoru v měřítkách  $z > 0,5 \div 6,0$ , tak již dnes získávají zřetelnější obrysy.

■ Ivan Havlíček, 1. 3. 2007,  
AB 10/2007



*Princip skenování a výsledná časoprostorová mapa rozložení temné hmoty získaná projektem COSMOS.*

## Hubbleův vesmírný dalekohled

**HST (Hubble Space Telescope)** – Hubbleův vesmírný dalekohled. Největší dalekohled na oběžné dráze kolem Země, kde byl umístěn ve výšce 600 km v roce 1990. 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 Hubbleovy konstanty. V lednu 2004 NASA zrušila servisní mise k tomuto unikátnímu přístroji, nicméně v roce 2006 bylo rozhodnuto o jejich obnovení, s nejbližší opravou dalekohledu se počítalo v roce 2008, mise však byla kvůli závadě na dalekohledu odložena na rok 2009, kdy úspěšně proběhla.

Hubbleův vesmírný dalekohled – přístroj, o kterém slyšel snad každý. Dalekohled na oběžné dráze, jehož snímky obletěly svět a staly se ozdobou astronomických publikací. Dalekohled, kterému nevádí atmosférické turbulence, déšť vítr, bouře ani sněh. Na oběžné dráze je již 19 let – od roku 1990. Pojmenován byl po Edwinu Hubbleovi, který si jako první uvědomil, že mlhavé obláčky na obloze jsou další galaxie – cizí světy podobné naší Mléčné dráze. Při pozorování těchto galaxií zjistil, že vesmír expanduje a stal se tak otcem současné kosmologie. Dalekohled nesoucí jeho jméno mu rozhodně nedělá ostudu a má na svém kontě řadu významných objevů. Život dalekohledu je ale bytostně závislý na servisních misích. Kosmonauti přivážejí nové přístroje, opravují poruchy, vyměňují gyroskopy nutné k navádění dalekohledu, atd. Zkrátka údržba, bez níž by se dalekohled stal hromadou starého železa. Čtvrtá servisní mise byla několikrát odložena a aktuální plán počítal s počátkem října 2008. I tak již bylo spíše po dvanácté než za pět minut dvanáct. Poslední zářijový víkend se na Hubbleu objevila porucha a přestal předávat data pozemskému středisku. Servisní mise byla okamžitě zrušena. Letět nepřipraveni k nefungujícímu stroji nedávalo žádný smysl. Komunikaci se podařilo obnovit 25. října, nicméně servisní mise se uskutečnila až v květnu 2009.

Hubbleův vesmírný dalekohled. NASA/ESA.



### Počáteční problémy

Hubbleův dalekohled od počátku provázely problémy. Hned při prvních testech se objevil zvláštní jev. V pravidelných intervalech se těleso celé observatoře rozkmitalo. Po týdně zjistili odborníci z NASA příčinu jevu. Zdrojem kmitání byly panely slunečních baterií. Rozkmitání nastávalo vždy při přechodu ze světla do stínu. Závada byla alespoň částečně odstraněna v dubnu 1991 programovým řešením.

Dalším problémem bylo generování hvězdného pole v blízkosti požadovaného objektu. Příčinou byla chyba znaménkové konvence v jednom z použitých vzorců pro výpočet. Chyba byla celkem snadno odstraněna.

Největší šok přišel 20. května 1990 v průběhu technologických zkoušek a prvního snímkování oblohy. Citlivost byla na předpokládané úrovni, ale obraz byl rozostřen. Zaostřit se nedařilo posunem ani náklonem sekundárního zrcadla. Po další zkoušce bylo konstatová-

no, že optická část dalekohledu má sférickou aberaci. Důvodem bylo podleštění o 3  $\mu\text{m}$ . Díky tomu vznikl rozdíl ohniskových vzdáleností okrajového a středového paprsku 38 mm. Závadu nebylo možno jednoduše opravit (např. počítačovým zpracováním obrazu). Při první servisní misi v roce 1993 musela být nainstalována korekční technika COSTAR upravující chod paprsků. Teprve poté se stal dalekohled dokonalým strojem, jak ho známe dnes.

HUBBLEŮV VESMÍRNÝ DALEKOHLED	
start	24. dubna 1990
nosná raketa	raketoplán Discovery
oběžná dráha	600 km
průměr primárního zrcadla	2,4 m
průměr sekundárního zrcadla	30 cm
hmotnost	11 600 kg
nominální výkon	2 400 W

### Jak Hubble funguje?

Navigační systém dalekohledu má tři základní části: setrvačníky RSU, reakční kola RWA a optické senzory polohy FGS. Srdcem jsou tři dvojice setrvačnicků uložené ve třech jednotkách RSU. Pomocí setrvačnicků lze zjistit jakoukoli změnu polohy, protože rotační osy setrvačnicků jsou stále vzhledem ke hvězdám. Počítač může poté vydat pokyn ke změně směru. Fyzicky dalekohledem otáčí reakční rotující kola RWA. Princip je jednoduchý. Jde o stejnosměrný elektrický motor. Při zvýšení otáček se tělo dalekohledu, které je pevně spojeno se statorem motoru, začne otáčet na druhou stranu než rotor. Poslední částí navigačního systému jsou tři jemné optické senzory FGS, které kontrolují polohu dalekohledu vzhledem k vybraným hvězdám. Tyto senzory využívají ke své práci hlavní zrcadlo dalekohledu.

**COSTAR** – *Corrective Optical Space Telescope Axial Replacement*, speciální optika pro korekci nesprávného chodu paprsků, který způsobilo chybné vyleštění primárního zrcadla Hubbleova dalekohledu. Jednotka COSTAR byla namontována při první servisní misi v roce 1993.

**NICMOS** – *Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer*, infračervená kamera na HST pro blízké IR chlazená na 77 K pomocí Dewarovy nádoby se 114 kg kapalného dusíku. Instalována byla v roce 1997 při druhé servisní misi, při třetí misi byl znovu vychlazen chladicí systém kamery. Při čtvrté servisní misi byl v roce 2009 tento přístroj nahrazen desetkrát citlivějším spektrografem COS.

**COS** – *Cosmic Origin Spectrograph*, citlivý spektrograf pro ultrafialový obor, který byl umístěn na HST při čtvrté servisní misi v roce 2009. COS pracuje pro vlnové délky 115–320 nm a je desetkrát citlivější než minulý spektrograf NICMOS.

**STIS** – *Space Telescope Imaging Spectrograph*, výkonný mnohaúčelový spektrograf na HST, pracuje od UV po IR obor. byl nainstalován při druhé servisní misi v roce 1997. V roce 2004 došlo k poruše přístroje. Opraven byl při čtvrté servisní misi v květnu 2009

**FOC** – *Faint Object Camera*, CCD kamera fungující na HST do roku 2002. Byla navržena pro práci od blízkého UR až po blízké UV pásmo (115–6500 nm).

Zrcadlo dalekohledu. Pracovníci v tuto chvíli ještě netuší, že je chybně vyleštěno. NASA/ESA.



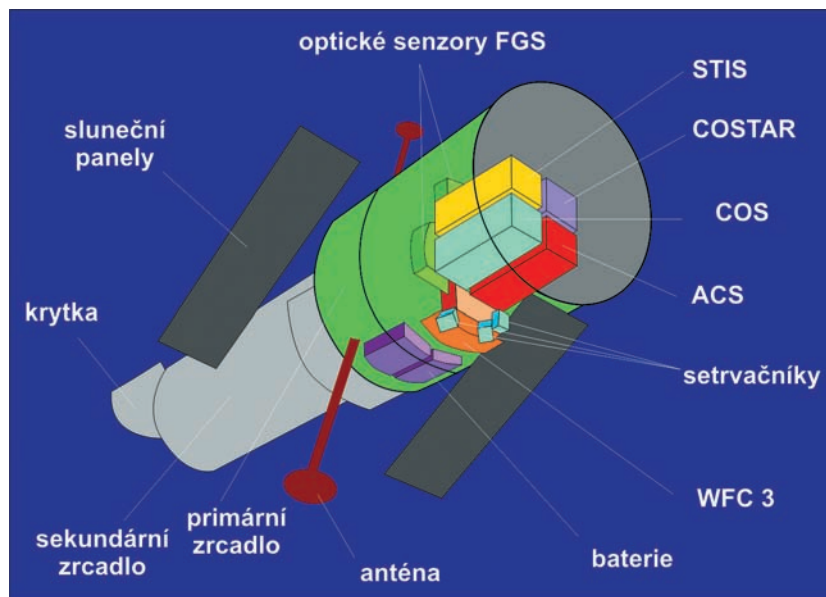


Schéma dalekohledu a uložení jednotlivých přístrojů.

**ACS** – Advanced Camera for Surveys, přístroj umístěný na HST při třetí servisní misi v roce 2002 namísto kamery FOC. ACS má zorné pole 202"×202" a vlnový rozsah pro blízké IR, viditelné a celé UV spektrum. Přístroj je složen z širokoúhlé kamery, kamery s vysokým rozlišením a z kamery pro pozorování Slunce.

**WFPC 2** – širokoúhlá planetární kamera, na HST byla instalována v roce 1993 při první servisní misi, kdy nahradila starší širokoúhlou kameru. Rozlišení je 0,05", kamera obsahuje 4 CCD matice po 640 000 pixlech. Ze spektra (blízké IR, V, blízké UV) mohl být vybrán úzký obor pomocí padesáti filtrů.

**WFC 3** – nejnovější CCD kamera instalovaná při čtvrté servisní misi (2009) na HST namísto WFPC2. Obsahuje CCD matici 1024×1024 pro infračervený obor (vlnové délky 800±1700 nm) a další dvě CCD matice 2048×4096 pro vizuální a ultrafialový obor (200±1000 nm). Jde o nejdokonalější přístroj instalovaný na HST.

Optický systém dalekohledu je uzavíratelný krytkou, lze ji využít například v situaci, kdy Země prolétá meteorickým rojem. Je-li krytka otevřena, paprsky procházejí nejprve na primární zrcadlo (2,4 metru), od něho se odraží na sekundární zrcadlo (30 cm) a poté procházejí otvorem v primárním zrcadle do přístrojové sekce. Základem jsou čtyři pozice, z nichž jedna je trvale obsazena korekční optikou COSTAR, v druhé je UV spektroskop STIS pro UV až IR obor a v poslední špičková širokoúhlá kamera ACS. Mimo tyto čtyři základní pozice je upevněna širokoúhlá kamera WFC 3. Dalekohled je

schopen pozorovat od blízkého IR po UV obor v rozsahu vlnových délek od 115 nm až do 1 000 nm. Pořízená data jsou nahrávána na pevné médium umístěné v dalekohledu. Není bez zajímavosti, že v počátku existence dalekohledu se data nahrávala ještě na magnetofonový pásek. Poté jsou pomocí antény předána družici TDRS (Tracking and Data Relay Satellite), ze které teprve putují do pozemské stanice ve White Sands a odsud jsou poslány k finálnímu zpracování do Goddarda kosmického letového střediska.

## Úspěchy HST

Dalekohled HST posunul astronomické znalosti v mnoha směrech a výčet jeho úspěchů by byl velmi dlouhý. Proto se omezíme jen na některé, jakousi první desítku, která je ale dána osobním výběrem autora.

- Změření Hubbleovy konstanty. Na základě měření červeného posuvu galaxií v Kupě galaxií v Panně byla určena Hubbleova konstanta s přesností 10 %, a to  $72 \pm 8$  km/s/Mpc. Předchozí odhady byly spíše řádové. Vzdálenosti byly určovány na základě vyhledávání cefeid. (2001)
- Vyfotografování povrchu hvězdy. S pomocí HST se podařilo vyfo-

toografovati povrch hvězdy Betelgeuse ze souhvězdí Orionu. Bylo to poprvé, kdy hvězda nebyla na fotografii jako bodový zdroj. (1995)

- Sledování rodičích se hvězd. HST nalezl řadu globulí a čerstvě narozených hvězd ve Velké mlhovině v Orionu. Obdobné objekty nalezl také v Orli mlhovině, jejíž fotografie prosluly jako tzv. sloupy stvoření.
- Sledování rodičích se planet. HST nalezl u některých mladých hvězd v Mlhovině v Orionu plynoprachové disky, ze kterých se rodí planetární soustavy.
- Pozorování mnoha černých děr. HST provádí systematický výzkum černých děr, proslul objevem teoreticky vypočtených turbulencí v akrečním disku obří černé díry v jádře galaxie NGC 4261. (1995)
- Studium aktivních jader galaxií. HST systematicky zkoumá výtrysky z černých děr v jádrech aktivních galaxií.
- Snímek HDF (Hubble Deep Field). Snímek malé, pečlivě vybrané oblasti vesmíru složené z mnoha fotografií, na kterých jsou tisíce galaxií v různých vývojových stádiích. Později byl udělán ještě podrobnější snímek HUDF. (2005)
- Pozorování srážky dvou galaxií. Hubble pořídil snímky srážejících se galaxií NGC 4038 a NGC 4039, kterým říkáme Tykadla. Dnes víme, že srážky galaxií jsou ve vesmíru běžné. (1997)
- Pozorování srážky komety Shoemaker Levy 9 s Jupiterem. Hubble pozoroval v „přímém přenosu“ rozpad komety a dopad jejích příbližně dvaceti úlomků na planetu Jupiter. (1994)
- Pořízení dosud nejpodrobnější časoprostorové mapy rozložení temné hmoty v rámci projektu COSMOS. (2008)
- Objev organických molekul na planetách. HST jako první detekoval organické molekuly na extrasolární planetě HD 189733b. (2007)

### Čtvrtá servisní mise

Po havárii raketoplánu Columbia v roce 2003 se vedení NASA v roce 2004 rozhodlo s definitivní platností mise k Hubbleu ukončit a jeho životnost neprodlužovat. Podle tehdejších optimistických odhadů by setrvačnický a baterie mohly vydržet do roku 2008. Vědecký svět byl zděšen a tak pod silným tlakem protestů NASA v roce 2006 rozhodla

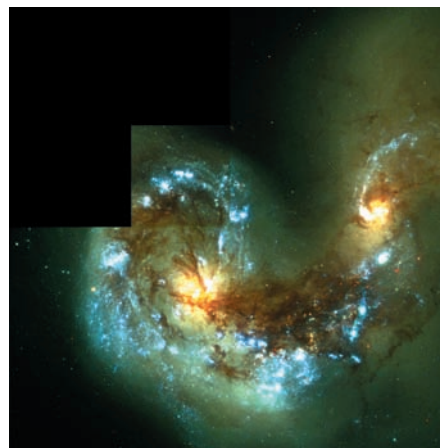
**RSU** – Rate Sensing Unit, setrvačnicková jednotka na Hubbleově vesmírném dalekohledu. Jde o základní součást navigačního systému. HST obsahuje 3 jednotky RSU obsazené po dvou setrvačnicích.

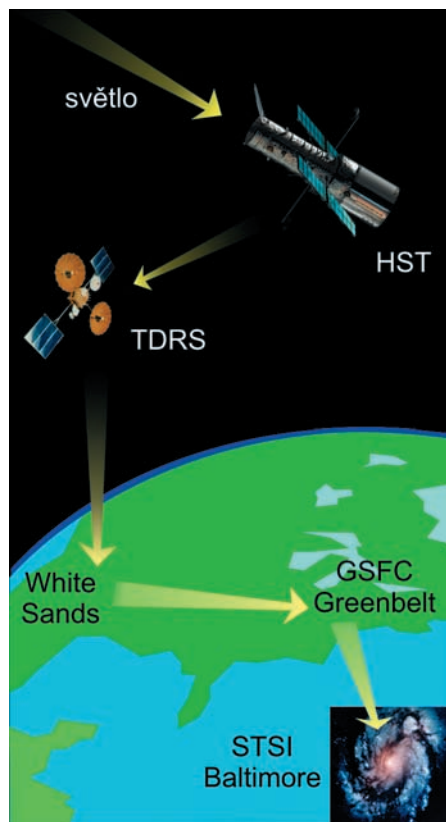
**RWA** – Reaction Wheel Assembly, reakční kola umožňující pohyb dalekohledu HST.

**FGS** – Fine Guidance Sensors, optické senzory zjišťující polohu Hubbleova dalekohledu.

**TDRS** – Tracking and Data Relay Satellites, americká soustava devíti geostacionárních družic určená pro telekomunikační účely. Slouží ke spojení s nízkoletícími družicemi, americkými raketoplány a Hubbleovým vesmírným dalekohledem. První družice byla vypuštěna v roce 1983, poslední v roce 2002. Předpokládána aktivní životnost družice je 10 až 11 roků. Data jsou z konkrétního přístroje předána na jednu z družic TDRS a z ní putují do pozemní stanice ve White Sands

Tykadla – srážející se galaxie. HST 1997.





Cesta signálu z Hubbleova dalekohledu na Zemi.

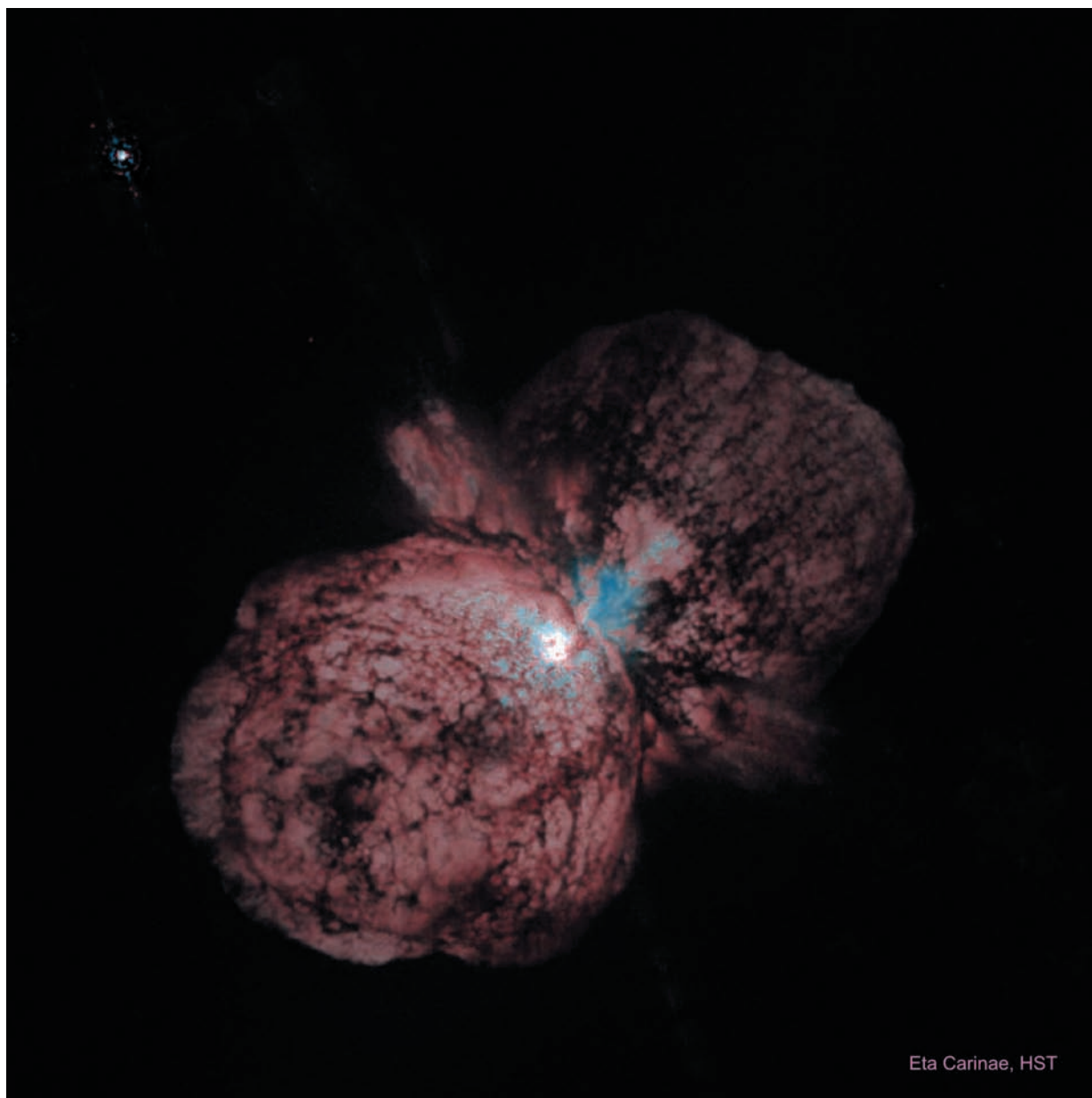
o poslední čtvrté servisní misi k HST v roce 2008, která by jeho životnost prodloužila snad až do roku 2014, čímž by se překlenulo období do vypuštění Hubbleových nástupců (infráčervený Herschel a dalekohled JWST).

Na konci září 2008 došlo k závažné poruše přenosu dat z HST na Zemi. Komunikaci se podařilo zprovoznit za pomoci záložních zařízení až o měsíc později. Mezitím byla ovšem čtvrtá servisní mise odsunuta na počátek roku 2009. Nakonec se čtvrtá servisní mise konala až v květnu 2009 a unikátní vědecký přístroj byl zachráněn pro několik následujících let.

Čtvrtá servisní mise měla především za úkol vyměnit nefunkční setrvačníky. Bez nich je Hubble neovladatelný. Ke správné funkci jsou potřeba tři, v nouzovém režimu postačí dva. Dalšími úkoly byla výměna baterií, výměna optických senzorů FGS, oprava porouchaného spektrografu STIS, oprava porouchané kamery ACS, výměna kamery WFPC 2 za WFC 3, výměna spektroskopu NICMOS za desetkrát citlivější COS a výměna poškozené vnější odrazivé vrstvy (tepelné izolace). Hubble byl při poslední misi také připraven na svůj zánik. Byl na něho připevněn úchyt, pomocí kterého bude po ukončení aktivní činnosti řízeně svržen do atmosféry tak, aby dopadl do Tichého oceánu. Pokud by se z jakýchkoli důvodů nepodařilo HST zajistit důstojný odchod a padl neřízeně na Zemi, je jen velmi malá pravděpodobnost (1:700), že by neshořelé části dopadly do obydleného území. V každém případě doufejme, že devatenáctiletý dalekohled – důchodce, který se stal ikonou současné astronomie, bude sloužit ještě mnoho roků.

■ Petr Kulhánek, 7. 11. 2008, AB 46/2008

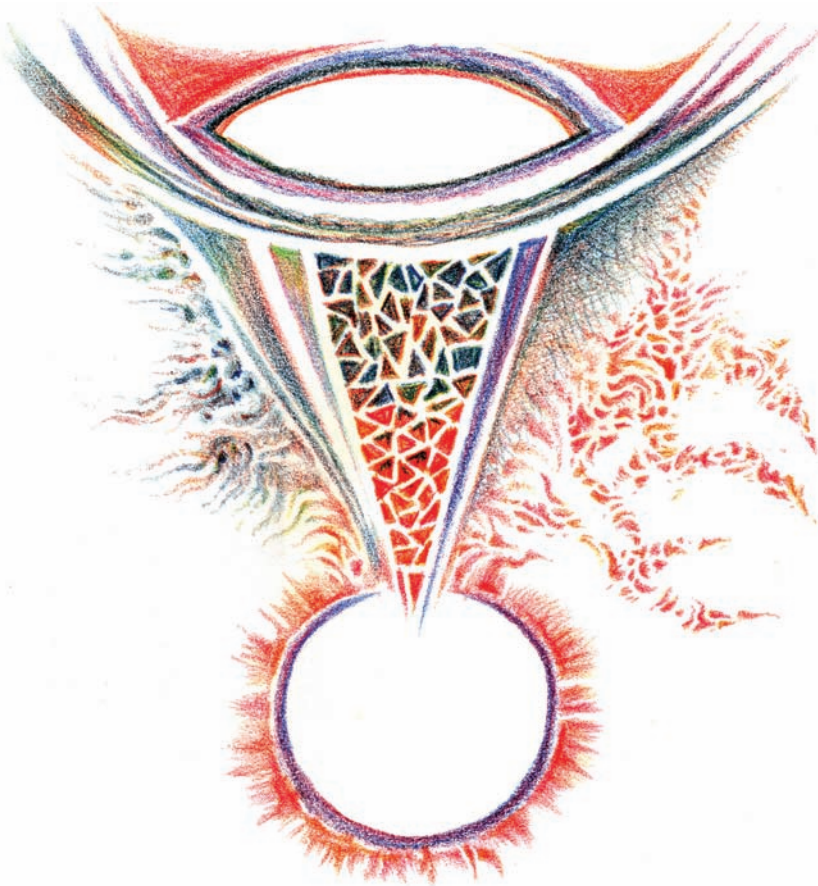


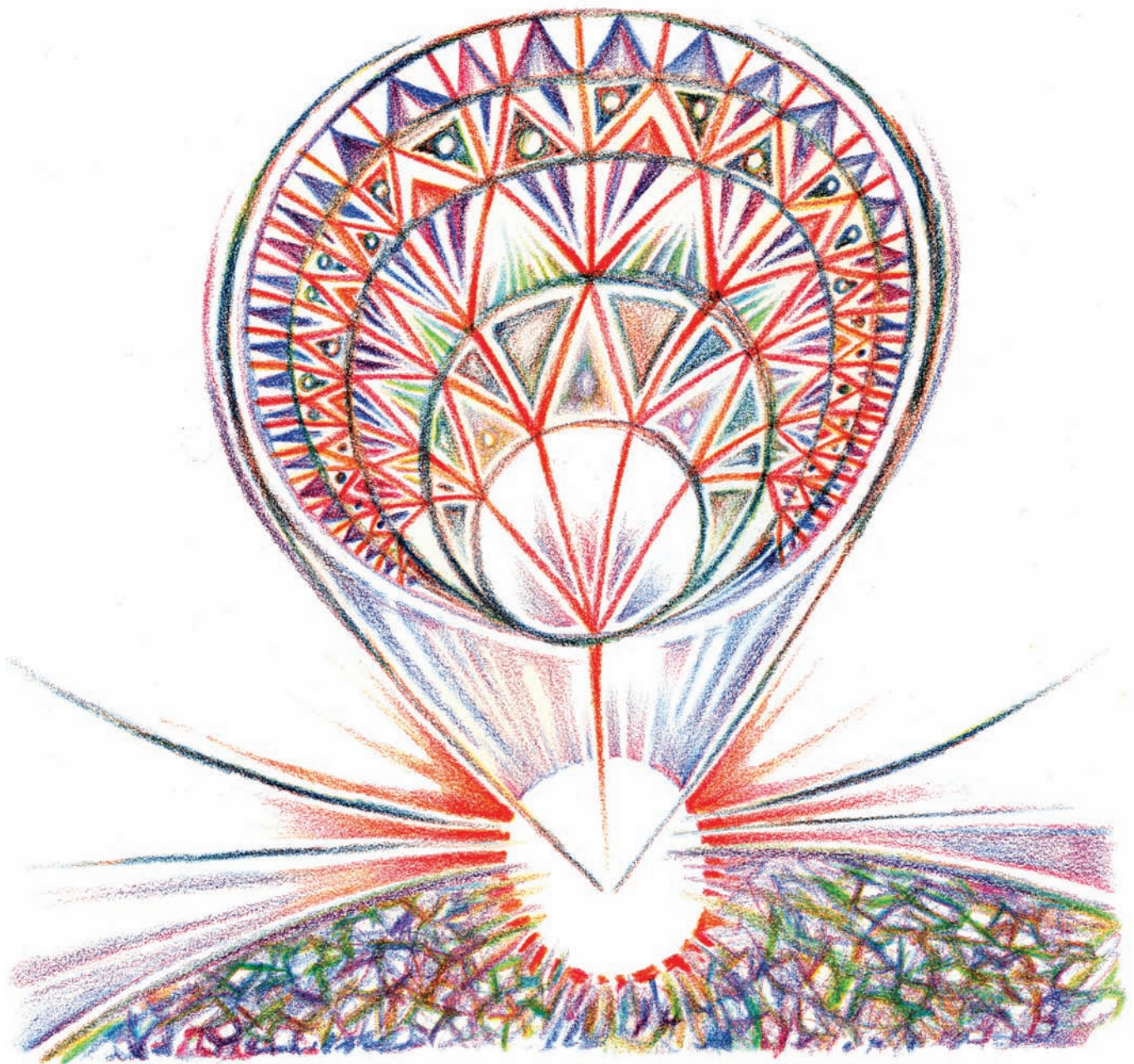


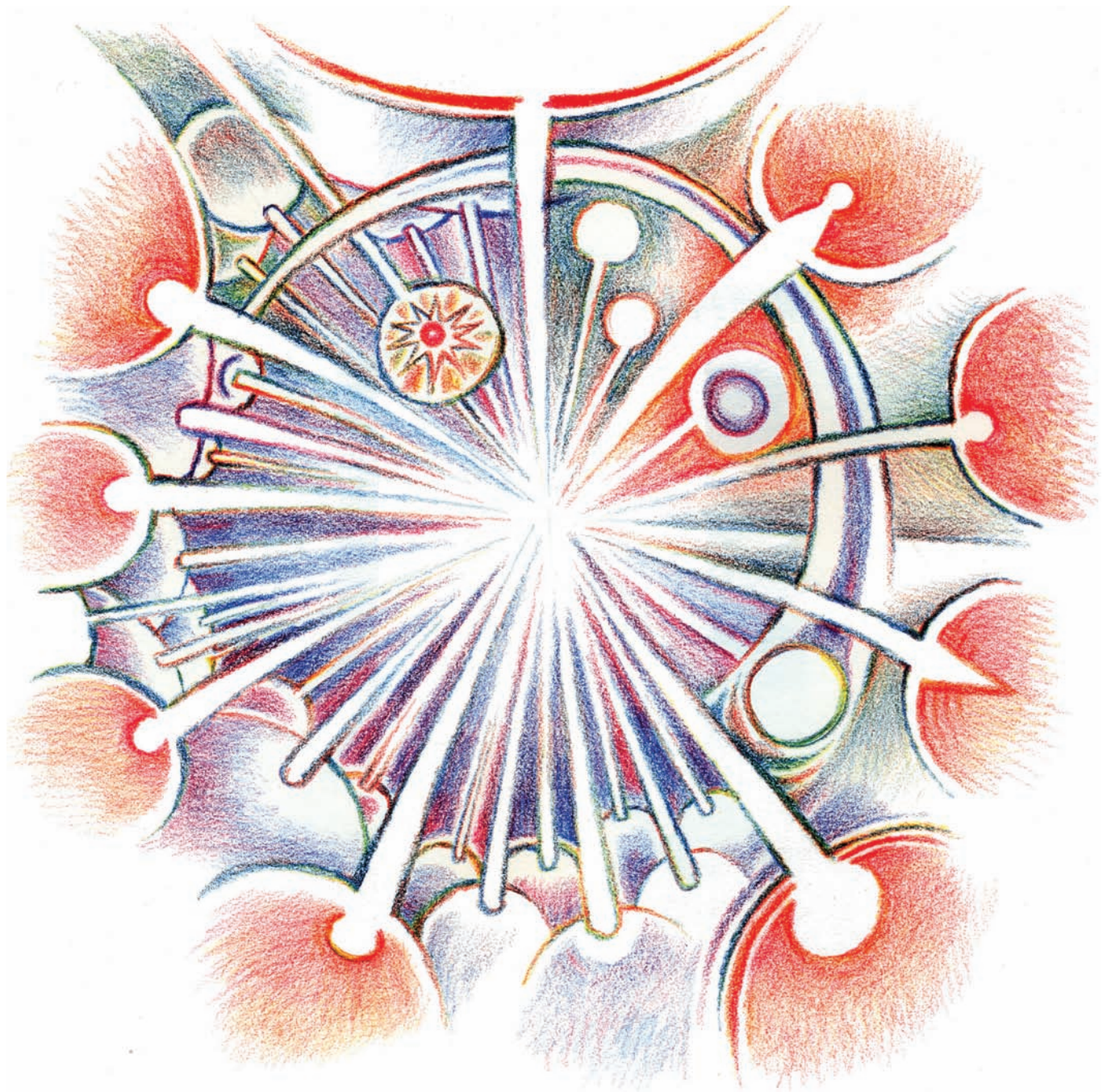
Eta Carinae, HST



### III. PŘÍSTROJE A SONDY







## Mise STEREO – prostorové sledování kosmického počasí

**SOHO** – *Solar and Heliospheric Observatory*, sonda vypuštěná NASA v roce 1995 se zaměřením na pozorování a výzkum slunečního povrchu, atmosféry, korony a slunečního větru. Dodnes je plně funkční a poskytuje cenná data.

**TRACE** – *Transition Region and Coronal Explorer*, sonda NASA vypuštěná v roce 1998 a navazující na práci družice SOHO. Poskytuje vynikající snímky plazmatu rozprostřeného podél silokřivek magnetického pole v UV oboru.

**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.

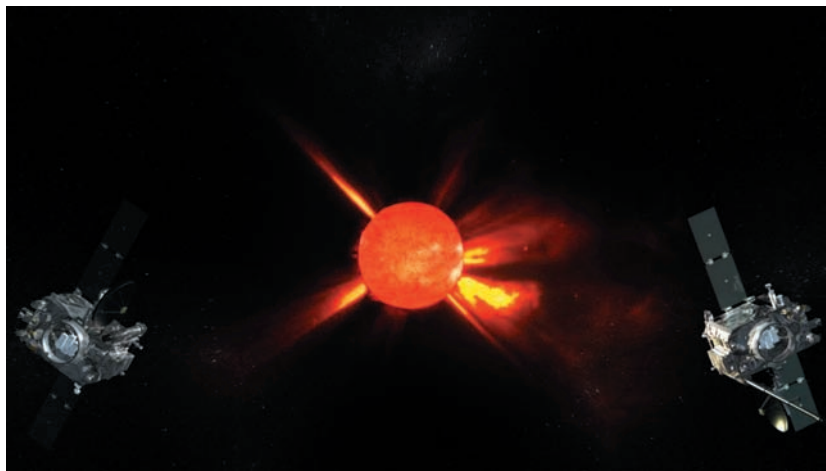
Dvojice observatoří STEREO (Solar TERrestrial Relations Observatory) americké NASA byla vypuštěna z Mysu Canaveral na Floridě 25. října 2006 pomocí rakety Delta II. Hmotnost každé ze sond byla 620 kg včetně paliva. Mise STEREO je prvním projektem využívajícím třírozměrné zobrazení Slunce, slunečního větru a kosmického počasí. Cílem projektu je, díky znalosti prostorového rozložení pozorovaných dějů, lépe poznat vliv sluneční činnosti na děje probíhající na Zemi. Mise byla naplánována na dva roky a stále probíhá. Observatoře letí na dráze velmi podobné dráze Země okolo Slunce a ve stejném směru. STEREO A je umístěna na nižší a rychlejší dráze před Zemí a STEREO B je oproti ní v téměř stejné vzdálenosti na vyšší a tedy pomalejší dráze za Zemí. Vzdálenost od Země a také mezi oběma observatořemi se proto neustále zvětšuje.

Dvojice observatoří STEREO sleduje Slunce z různých stran v téměř čase identickými přístroji. Takto lze získat stereoskopický obraz a z něj následně odvodit prostorové rozložení látky a záření přicházejících ze Slunce, popřípadě z mezihvězdného prostoru.

### Vybavení sond

Observatoře STEREO byly sestavovány v Laboratoři aplikované fyziky na americké univerzitě Johna Hopkinse. Základní přístrojové vybavení SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation) sestává ze dvou koronografů, zobrazovací jednotky pro extrémní ultrafialový obor EUVI a heliosférické zobrazovací jednotky HI. Koronografy COR1 a COR2 pracují ve viditelném oboru spektra a oproti přístroji LASCO/C3 na legendární sluneční observatoři SOHO mají

Dvojice stejných sond STEREO sleduje Slunce ze dvou různých poloh. NASA.



rozlišení v obraze pětinašobně vyšší. V určení teploty je rozlišení trojnásobně přesnější. Koronograf COR1 sleduje vnitřní ( $1,4\div 4 R_{\odot}$ ) koronu a koronograf COR2 vnější ( $2\div 15 R_{\odot}$ ) koronu. Oba koronografy ji snímají s vyšší frekvencí a přesnějším měřením roviny polarizace než přístroje na ostatních sondách. COR1 je prvním přístrojem určeným pro kosmický prostor, který zobrazuje vnitřní koronu v bílém světle až do vzdálenosti  $1,4 R_{\odot}$ .

Dalším přístrojem na palubě je zobrazovací jednotka EUVI (Extreme Ultraviolet Imager), která pracuje v UV oblasti spektra a je určena ke sledování fotosférických magnetických polí, pozorování chromosféry a vnitřní korony. Celou sestavu završuje heliosférická zobrazovací jednotka HI (Heliospheric Imager), která pracuje v širokém prostorovém úhlu  $12\div 318 R_{\odot}$  a která je primárně určena ke sledování koronálních výronů hmoty (CME) na cestě mezi Sluncem a Zemí.

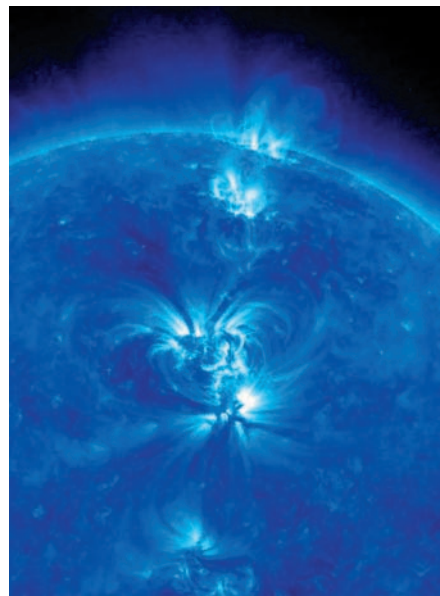
Kromě komplexu SECCHI (koronografy a zobrazovací jednotky EUVI a HI) jsou na palubě i další přístroje, například malý navigační dalekohled, S/WAVES (STEREO/WAVES) pro vyhledávání radiových poruch a vzplanutí, IMPACT (In-situ Measurements of Particles and CME Transients) pro sledování energetických částic slunečního větru a přístroj PLASTIC (PLAsma and SupraThermal Ion Composition) schopný měřit hmotnosti a náboje těžkých iontů a parametry plazmatu v koronálních výronech.

## Pozorování slunečních projevů

Dvouleté sledování Slunce, blízké heliosféry a ostatních objektů sluneční soustavy samozřejmě nelze vměstnat do několika málo řádek textu. Následující výčet bude tedy jen upozorněním na některé zajímavosti, které se podařilo díky observatořím STEREO zaznamenat a vidět.

Podrobné sledování slunečního povrchu a změn ve sluneční chromosféře zobrazilo s velkým rozlišením vznik erupčních smyček a jejich odezvu ve fotosféře, nicméně přesný mechanismus těchto dějů slunečním teoretikům stále uniká. Sondy pořídily podrobné třírozměrné obrazy sluneční korony včetně plazmových vláken, které patří spolu se snímky ze sond SOHO a TRACE k tomu nejlepšímu, co mají sluneční fyzikové k dispozici.

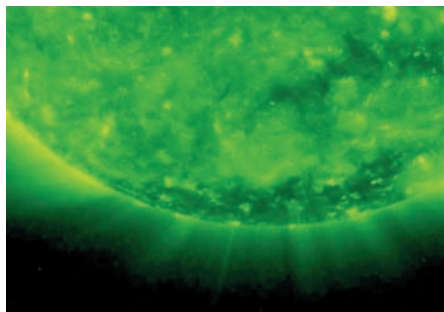
Obě sondy také pozorovaly interakci koronálních výronů hmoty prolétávajících meziplanetárním prostorem s magnetosférami planet



*Snímek povrchu Slunce v blízkosti rovníku z 9. června 2007 v extrémním UV oboru na vlnové délce 17,1 nm. Patrné jsou aktivní oblasti se smyčkami. Zorné pole bylo snímkováno každé 2,5 minuty po dobu 36 hodin. Jde o unikátní záběry vlivu magnetického pole na chování slunečního plazmatu.*

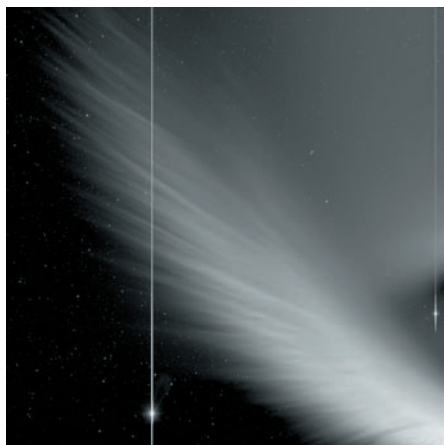
**Koronograf** – původně přístroj k pozorování korony Slunce, ve kterém je vlastní povrch Slunce zakryt, aby nerušil pozorování. Koronograf se používá i k pozorování okolí hvězd. Samotná hvězda je zakryta a koronograf zobrazuje její okolí, například protoplanetární disky nebo planety.

**Plazmoid** – kompaktní plazmový útvar, někdy nazývaný plazmový oblak, hustek, shluk, cluster. Plazmoid s sebou může unášet tzv. vmrznuté magnetické pole.



Blízký pohled na jižní pól Slunce. Rozsáhlé tmavé oblasti jsou tzv. koronální díry. Oblast byla fotografována mezi 23. a 25. červnem 2008. Patrné jsou také jemné výtrysky kopírující magnetické slikařivky vycházející z polární oblasti.

Kompozice složená ze série snímků ohonu komety McNaught z období 11. až 18. ledna 2007. Snímek je centrován 17° od slunečního středu a hrana zobrazené oblasti je široká 20°. Snímek je pořízen aparaturou HI, kometa byla v té době ve vzdálenosti 0,17 AU od Slunce a délka viditelného kometárního chvostu se pohybovala kolem 7°.



(těch, které mají magnetosféru) nebo jejich kolizi s kometami. Na konci dubna 2007 pořídila observatoř STEREO zajímavý záznam kolize komety ENCKE s výronem koronální hmoty. Sluneční látka výrazně ovlivnila plazmový chvost komety. Části kometárního chvostu byly plazmoidem vyvrženým ze Slunce odneseny do meziplanetárního prostoru.

## Heliosféra

Obě observatoře STEREO zachytily, oproti dějům odehrávajícím se ve vnitřní heliosféře, překvapivě také události až na samé její hranici – ve styku s mezihvězdným galaktickým prostředím. V době od června do října 2007 detekoval přístroj IMPACT (In-situ Measurements of Particles and CME Transients) určený k detekci vysokoenergetických elektronů, neutrální atomy pocházející z téhož místa oblohy. Atomy přiletaly ze směru, kterým se pohybuje celá sluneční soustava galaktickým prostředím. Zde při styku slunečního větru a mezihvězdného prostředí vzniká dvojice rázových vln pojmenovaných podle dějů, jimiž je prostředí vymezeno.

První z vnitřní strany od Slunce je terminační vlna – jiným názvem rázová vlna slunečního větru. Je to oblast, ve které rychlost slunečního větru klesá na podzvukovou rychlost. Tato oblast má přibližně tvar povrchu koule a je vzdálena 90±95 AU od Slunce. Následuje heliopauza – hranice heliosféry. Jde o oblast, ve které končí vliv našeho Slunce. Za heliopauzou se nachází mezihvězdné prostředí.

Poslední předpokládanou hranicí je rázová vlna heliosféry – rázová vlna vznikající ve směru pohybu Slunce mezihvězdným prostředím. Stýká se zde magnetické pole Slunce s magnetickým polem galaktickým. Přístroj IMPACT je navržen pro detekci nabitých částic, jejichž výskyt se ale mění v závislosti na magnetickém poli. Zachycené částice však na změnách magnetického pole nezávisely. Mělo by tedy jít o neutrální atomy. Výměna náboje mezi horkými ionty a neutrálními atomy může generovat vysokoenergetické atomy. Tyto děje jsou známy z planetárních atmosfér. Dle očekávání by k těmž mohlo docházet také při styku heliosféry s mezihvězdným prostředím.

## Ostatní pozorování

Při vzdalování od Země 12. prosince 2006 prolétávaly obě observatoře Van Allenovými radiačními pásy, které jsou pastí pro nabitě částice

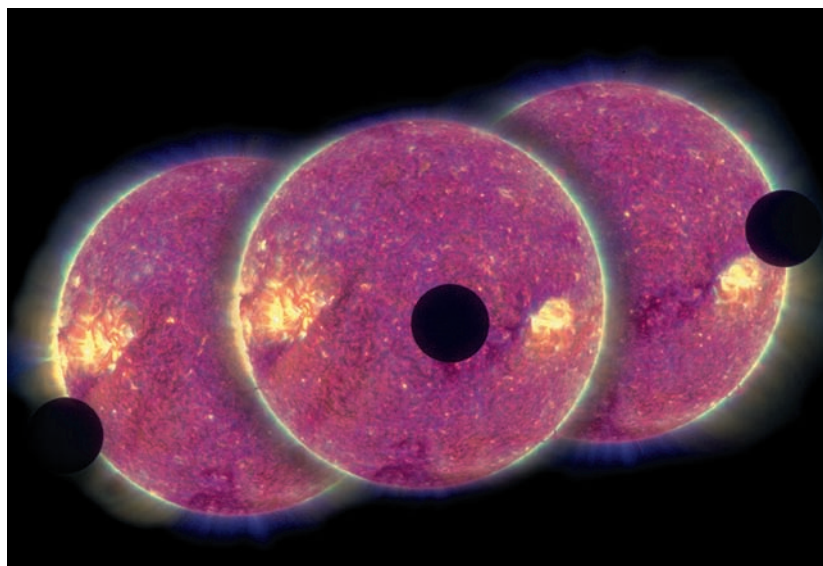


kosmického záření. Pomocí přístroje TDS (Time-Domain Sampler), určeného pro sledování vln ve slunečním větru, byly zaznamenány odezvy magnetické bouře, která v té době probíhala ve vnějším pásu. Obě sondy letěly za sebou po téže dráze v intervalu 84 minut a odezvu bouře, kterou prolétala jedna sonda, zachytila druhá. Rádiové vlny, které byly magnetickou bouří vyvolány, byly desetkrát intenzivnější, než ty, o kterých vědci doposud věděli.

Mimořádně zajímavé bylo také pozorování přechodu Měsíce přes sluneční kotouč pozorované z observatoře STEREO B dne 25. února 2007. Posloužilo k proměření ohniska, stanovení rozptylu světla v přístrojích a k pointaci slunečních koronografů.

V období mezi 11. a 18. lednem 2007 pořídila observatoř STEREO A sérii snímků ohonu komety McNaught. Jde sice jen o vedlejší produkt činnosti sond, nicméně je zřejmé, že sondy mají mnohem širší pole působnosti, než bylo zamýšleno.

■ Ivan Havlíček, Filip Příbyl, 29. 8. 2008, AB 18/2006, 36/2008



*Přechod Měsíce přes sluneční kotouč. Úkaz trval 12 hodin, a jelikož observatoř byla od Měsíce 4,4 krát dále než Země, jeví se Měsíc v téměř poměru menší. Při pozorování tohoto úkazu ze Země by byla obě tělesa stejně veliká a viděli bychom zatmění Slunce Měsícem. Snímky jsou pořízeny v UV oblasti a převedeny do nepravých barev. NASA/Jay Friedlander.*

## LABOCA otevírá nové okno do vesmíru

**ESO** – European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, zkráceně European Southern Observatory, Evropská jižní observatoř. Organizace založená v roce 1962, která postavila řadu dalekohledů v Chile. Jde o lokality na La Silla (2 400 m), dalekohled VLT (Very Large Telescope, Velmi velký dalekohled) na Cerro Paranal (2 635 m) a v tuto chvíli se staví radioteleskopická síť ALMA na Llano de Chajnantor (5 100 m).

**ALMA** – Atacama Large Millimeter Array. Síť 64 radioteleskopů, která se buduje v Chilských Andách ve výšce 5 100 m nad mořem. Jde o projekt ESO, smlouva o stavbě byla podepsána v roce 2002, se stavbou se započalo na podzim 2003 a zcela dokončena by měla být v roce 2012. V únoru 2010 jsou v provozu první tři radioteleskopy.

**APEX** – Atacama Pathfinder EXperiment, dvanařtmetrový radioteleskop ESO umístěný v Chile v Atacamské poušti ve výšce 5 100 metrů nad mořem. Do provozu byl uveden v roce 2007, stal se prvním radioteleskopem ze zamýšlené sítě 64 teleskopů ALMA. Apex je také bod na obloze, k němuž směřuje Slunce vzhledem k okolním hvězdám a nachází se v souhvězdí Herkula. Název experimentu byl tedy vybrán s přísně vědeckým entuziasmem.

**LABOCA** – Large APEX BOlometer CAmera, maticový detektor elektromagnetického záření v submilimetrové oblasti na pomezí radiových vln a infračerveného světla, s excelentní citlivostí. Bolometrické čidlo má 295 pixelů. Umístěn je na radioteleskopu APEX v Atacamské poušti v Chile v nadmořské výšce 5 100 m.

**Bolometr** – neselektivní detektor tepelného (infračerveného) záření pracující na principu měření změny elektrického odporu v závislosti na změně teploty čidla bolometru v důsledku absorpce optického záření čidlem bolometru. Závislost lze vyjádřit přibližným vztahem  $\Delta R/R = \alpha \Delta T$ , kde  $\alpha$  je teplotní součinitel změny odporu  $R$ , jehož velikost je určena použitým materiálem čidla bolometru a pracovní teplotou ( $\alpha = 0,5 \div 5\,000\text{ K}^{-1}$ ).

Evropská jižní observatoř staví od roku 2005 v nehostinné Atacamské poušti v Chile, v nadmořské výšce 5 100 metrů, největší radioteleskopickou síť světa ALMA. První z 64 zamýšlených radioteleskopů byl uveden do provozu v roce 2007 pod názvem APEX. Jde o dvanáctimetrový radioteleskop s pohyblivou anténou, který vznikl ve spolupráci tří evropských institucí, MPIfR (Max-Planck-Institut für Radioastronomie), ESO (Evropská jižní observatoř) a OSO (Onsalská observatoř).

### LABOCA

Srdcem prvního radioteleskopu sítě ALMA je unikátní kamera LABOCA (Large Apex BOlometer CAmera), která v sobě kombinuje optické prvky spolu s extrémně citlivými čidly pro měření teploty. Nová kamera je unikátním technickým řešením. Spolu s vynikajícím místem pro pozorování lze očekávat nové, dosud nedosažitelné astronomické výsledky. Kamera využívá matici extrémně citlivých bolometrů, čímž se daří pozorovat chladnou mezihvězdnou hmotu prostřednictvím jejího tepelném záření, často dosud jinými metodami nepozorovatelnou. Nové výsledky nám umožní lépe pochopit například procesy při formování chladného mezihvězdného plynu a prachu před vznikem nebo po zániku hvězd, úlohu této látky ve spirálních ramenech galaxií apod.

Konstrukce kamery LABOCA byla vyvinuta vědeckou skupinou pro bolometry pracující v MPIfR a zúročuje mnohaleté zkušenosti při vývoji bolometrů pro astronomická pozorování v submilimetrovém pásmu. Jde zatím o nejkompexnější pozorovací aparaturu vyvinutou touto skupinou. Všimněme si nyní jejího principu a některých nově vyvinutých unikátních technických řešení.

### Nová technika odstranění atmosférického šumu

Největší překážku pro pozorování v milimetrovém a submilimetrovém pásmu je zemská atmosféra, která představuje v tomto pásmu podobnou obtíž, jako kdybychom chtěli provádět astronomická pozorování v optickém oboru za dne, kdy atmosféra září rozptýleným denním světlem. V infračerveném oboru toto způsobuje nejvíce vodní pára obsažená v atmosféře a v menší míře další plyny, jako je například ozón.

Kromě toho je rušivé atmosférické pozadí časově proměnné a tvoří tak jakýsi pozorovací šum, přehlušující záření všech astronomických objektů s výjimkou Slunce, Měsíce, Venuše, Marsu a Jupiteru se Saturnem. Nejrozšířenější metodou, jak detekovat záření s intenzitou pod hladinou šumu je tzv. přepínací technika, realizovaná nejčastěji sekundárním zrcadlem nazývaným woobler (rozmitací zrcadlo), které přepíná obraz pozorované oblasti s obrazem atmosférického pozadí na frekvenci vyšší než je frekvence atmosférického šumu.

Tato metoda je použitelná s jistým omezením i pro matici detektorů, nejlépe však pracuje ve spojení s jednopixelovými detektory. Pro detektor LABOCA byla pro eliminaci šumového pozadí použita odlišná technika, vyvinutá speciálně pro maticové detektory. V této technice nazvané Fast Scanning (rychlé snímání) se využívá skutečnosti, že v poli snímačů jsou vždy snímány pro každý jednotlivý bolometr také okolní části oblohy sousedními bolometry. Rozmítání signálu se tedy nahrazuje pohybem celé aparatury po pozorované oblasti oblohy a obraz se zkonstruuje až ve fázi počítačového vyhodnocení pozorovaných dat. Šumový příspěvek atmosféry a podobně i přístrojový šum, u nichž obou se předpokládá, že v sousedních snímačích jsou v čase do jisté míry korelovány, lze tak částečně odečíst.

Tato technika byla poprvé testována v roce 2000 na matici o 37 bolometrech umístěných na 30metrovém radioteleskopu IRAM (Instituto de Radioastronomía Milimétrica) v Pico Veleta ve Španělsku a od té doby na některých dalších radioteleskopech. Získané zkušenosti posloužily při vývoji bolometrického snímače LABOCA, ve kterém byla použita zcela nově vyvinutá metoda „rychlého snímání“ za použití nových algoritmů pro zpracování dat.

### Dosud největší matice bolometrů

V čem nový detektor naprosto zřejmě vyniká v porovnání se staršími detektory, je použitý počet 295 pixelů v poli snímačů. Detektory vytvořené z 0,4  $\mu\text{m}$  silné vrstvičky nitridu křemíku jsou pokryté titanovým filmem sloužícím jako absorbér detekovaného záření. K němu jsou připájeny germaniové termistory, které detekují nepatrné změny teploty snímače v důsledku pohlceného záření. Celé pole je umístěno v kryostatu využívajícího k předchlazení kapalný dusík a helium. Konečného zchlazení na teplotu 0,285 K je dosaženo dvoustupňovým sorpčním chladičem. Sada studených filtrů, oddělujících dusíkovou

**RCW** – katalog H II oblastí z roku 1960, který obsahuje 182 objektů. Jeho tvůrci jsou Alex Rodgers, Colin Campbell a John Whiteoak (RCW jsou počáteční písmena autorů) z australské observatoře na Mt. Stromlo. V katalogu je mnoho tzv. „hvězd v bublině“. Jde o rozpínající se obálku plynu a prachu, jejíž rozpínání přičítáme tlaku hvězdného větru žhavých hvězd uvnitř bubliny. Vnitřní stěny bubliny, tvořené prachem, se zahřívají světlem hvězdy a následně vydávají takto získanou energii v infračervené oblasti. Na snímcích v IR tyto oblasti vypadají jako duté jeskyně nasvícené zevnitř.

Radioteleskop APEX je prvním dalekohledem z rozsáhlé sítě 64 radioteleskopů ALMA. V plném počtu by antény měly pracovat v roce 2012. APEX je postaven na planině Chajnantor v chilské poušti Atacama. Parabola antény má průměr 12 m a teleskop pracuje v intervalu vlnových délek od 0,2 do 1,4 mm. ESO/MPI/IR/OSO.





Detekční část zařízení LABOCA v Cassegrainově ohnisku radioteleskopu. Stříbřité talíře ve spodní části snímku jsou odrazná zrcadla směřující optický svazek přicházející z primární antény do detektoru. Detektor sestávající z 295 bolometrů je ukryt ve stříbřitém válci (kryostatu), který je umístěn uprostřed.

**OSO** – Onsala Space Observatory, švédská národní radioastronomická observatoř umístěná 45 kilometrů jižně od Gothenburgu v Onsale. Vlastní dva radioteleskopy pracující na milimetrových a centimetrových vlnách. Observatoř byla založena v roce 1949.

**MPIfR** – Max Planck Institute for Radioastronomy. Součást největšího německého komplexu 80 vědeckých ústavů MPI. Ústav pro radioastronomii byl založen v roce 1966 společností Maxe Plancka. Sídlo ústavu je v Bonnu. Ústav se zabývá radioastronomií a astronomií v infračerveném oboru.

a heliovou část kryostatu od okolí, je navržena na propustné pásmo se středem  $870 \mu\text{m}$  (345 GHz) a  $150 \mu\text{m}$  (2 000 GHz).

Zařízení je po vstupu do kamery soustředěno k jednotlivým bolometrům – monolitickým polem trychtýřovitých antén. Úhlová šířka oblastí odpovídající jednomu pixelu odpovídá 18,6 úhlovým vteřinám a celé matici odpovídá oblast oblohy o velikosti 11,4 úhlových minut.

Mechanismus „rychlého snímání“ může probíhat ve více režimech. V prvním režimu snímání oblohy probíhá po spirále s konstantní úhlovou rychlostí vztaženou ke středu spirály, takže úhlová rychlost po obloze (vztažená ke středu teleskopu) roste s poloměrem spirály. Další je kombinace spirálového pohybu s pohybem rastrovým. Třetí režim se nazývá One–The–Fly (OTF) mapování, při kterém se snímá obloha při pohybu dalekohledu po obloze jedním směrem. Volba režimu se řídí podle velikosti snímané oblohy a podle typu pozorovaného objektu. Pro malé kompaktní objekty se hodí spirálový režim, pro větší části oblohy se používají další dva z uvedených režimů. Typická úhlová rychlost snímání oblohy je kolem  $30''/\text{s}$  a závisí mimo jiné také na momentálních vlastnostech oblohy, přičemž maximální úhlová rychlost je omezena maximální možnou rychlostí zpracování dat, která činí přibližně  $4''/\text{s}$ .

## Výzkumný program

Výše popsaná experimentální aparatura se hodí na širokou škálu pozorování nejrůznějších, hlavně chladných objektů. Hlavní náplní programu kamery je

- výzkum formování planetárních disků,
- výzkum chladné hmoty v naší Galaxii,
- výzkum chladné hmoty ve spirálních ramenech sousedních galaxií,
- pozorování kosmologických objektů s extrémním červeným posuvem.

Ač by bylo lépe provádět pozorování v infračerveném oboru dalekohledem umístěným ve vesmíru a vyhnout se tak rušivému vlivu atmosféry, mají pozemní dalekohledy i přes obtížnější pozorovací podmínky některé jiné výhody, které mohou v konečné bilanci převážet. Je to zejména nesrovnatelně nižší cena a také možnost použít dalekohledy s většími průměry paraboly a bezproblémová oprava poruch přímo na místě. Přístroje umístěné ve vesmíru jsou buď závislé na servisních misích, a nebo mají velmi omezenou životnost.

## První výsledky – hvězdná líheň a hvězdy v bublinách

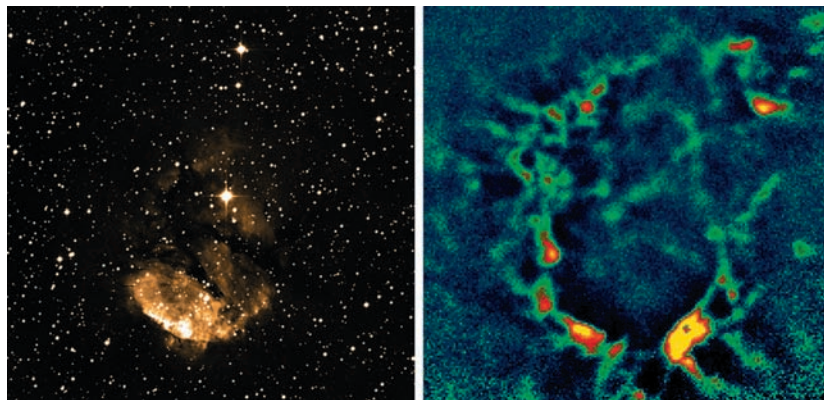
V listopadu 2008 byl oznámen objev hvězdné líhně, oblasti RCW 120, vzdálené od Země 4 200 světelných roků ve směru souhvězdí Štíra. V jádru oblasti se nachází velmi horká (35 000 K) a velmi hmotná hvězda spektrální třídy O8V, jejíž maximální zářivý výkon je v UV oblasti spektra. Svým ultrafialovým světlem ionizuje okolní plyn, vytrhává elektrony z vodíkových atomů a je tak příčinou charakteristického červeného záření známého jako  $H_\alpha$  emise. Na submilimetrových vlnových délkách pozorovaných špičkovou aparaturou LABOCA můžeme rozeznat, jak v okolí hvězdy vzniká dutina, na jejíž periferii materiál zřetelně kolabuje do zhustků, v nichž se následně rozžínají nové hvězdy. Zdá se, že může jít o předhvězdnou fázi hvězdného vývoje, tzn. období, kdy hvězdy ještě nezačaly svítit.

Díky pozorování v rozdílných spektrálních pásmech můžeme spatřit různé druhy mezihvězdného prostředí. V nejbližším okolí hvězdy je plyn ionizován a svítí ve viditelném světle. Centrální hvězda intenzivně září v ultrafialovém oboru a tlak tohoto záření vytlačuje okolní plyn do prostoru. Rázová vlna ionizovaného plynu před sebou tlačí materiál, který není ionizovaný v takové míře jako centrální oblast. Tento neutrální materiál tvoří přechod do mezihvězdného prostředí (prozatím není rozpínající se bublinou ovlivněno) a září v infračerveném oboru. Neutrální materiál se ale rozpíná spolu s bublinou a tvoří vlastně její obálku. Třetím prostředím je pak okolní galaktická látka, uvnitř které se celé představení odehrává. Vnitřní hrana neionizovaného materiálu se pohybuje na čele rázové vlny rozpínající se bubliny a jeho vnější hrana je brzděna stykem s okolním galaktickým prostředím. A tato mezivrstva je právě klíčová při očekávané tvorbě nových hvězd. Může se stát gravitačně nestabilní a rozrhat se do fragmentů, které se následně začnou smršťovat. Pozorované fragmenty oblasti RCW 120, do nichž se mezivrstva rozpadá, mají hmotnost více než  $500 M_\odot$ . Koncentrace rozpadající se mezivrstvy se, podle měření na vlnové délce 1,2 mm, odhaduje na 1 500



Pole 295 bolometrických snímačů použité v kameře LABOCA. Průměr křemikové destičky je 102 mm. MPIfR.

Snímky galaktické H II oblasti RCW 120. Levý obrázek je pořízen ve viditelném světle (R-band; ESO Schmidt Telescope), pravý pomocí aparatury LABOCA v submilimetrovém pásmu. K pořízení pravého snímku bylo zapotřebí tři hodin expozičního času. Zdroj zobrazovaného světla má teplotu 23 K. ESO.





Kompozitní snímek oblasti RCW 120. Submilimetrová emise je zde zobrazena jako modře svítící oblaka obklopující červenavě zářící ionizovaný plyn. *SuperCosmos Halfa Survey, SGDSS.*

atomů na  $\text{cm}^3$ . V prachové části obálky byly podle emise na  $8 \mu\text{m}$  rozpoznány polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). Vlivem ionizovaného plynu se tyto molekuly na vnitřní straně obálky rozpadají.

Velmi hmotné hvězdy, jakou je hvězda v centru oblasti RCW 120 (alespoň  $10 M_{\odot}$ ), jsou rozhodující pro celý galaktický vývoj. Svým extrémním zářivým výkonem ovlivňují pohyb a koncentraci mezihvězdné látky ve svém bezprostředním okolí až do vzdálenosti několika desítek světelných roků a zároveň jsou schopny měnit její chemické složení. V závěrečných fázích svého hvězdného života, který u tak hmotných hvězd trvá jen několik desítek miliónů let, většinu své hmoty rozmetají do okolního prostoru a obohatí tak galaktické prostředí o prvky, které vytvořily ve svém nitru. Astronomové proto věnují velkou pozornost právě galaktickým H II oblastem, jako je RCW 120, za jejichž svit jsou často obří hvězdy odpovědné.

■ **Martin Žáček, Ivan Havlíček, 5. 12. 2008, AB 48/2008, 50/2008**

## Detektory temné hmoty

Věda minulého století nám ukázala svět ve zcela jiném světle, než jsme byli zvyklí. Mezi jedno z nejfantastičtějších poznání patří fakt, že ve vesmíru vůbec není dominantní hmota v takové formě, jakou známe ze zkušenosti, ale temná hmota. Otázka o existenci temné hmoty není nová. První vědecky doložené úvahy o existenci temné hmoty podal švýcarsko-americký astrofyzik Fritz Zwicky již v roce 1933. Patrně nejpřesvědčivější důkazy o její existenci podává studium pohybu hvězd a galaxií. Složení temné hmoty však neznáme. Máme ale řadu teorií, které je možné experimentem podpořit nebo vyloučit. Zaměříme se nyní na ty teorie, které je možné experimentálně testovat.

### Slabě interagující částice

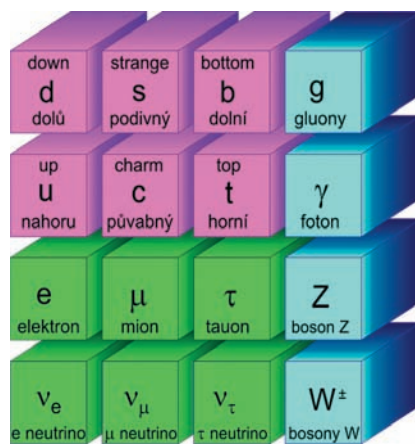
Na světě existuje velké množství komplikovaných detektorů částic (hlavně na urychlovačích), které jsou schopny měřit vlastnosti většiny známých částic v širokém spektru energií. Pro kalibrační účely těchto detektorů se běžně používá kosmického záření. Žádný z detektorů však nenašel něco, co by bylo možné označit jako částice temné hmoty, přestože patrně tyto částice skrz detektory procházejí. Proč tomu tak je? Důvody mohou být hned dva. Prvním z nich může být fakt, že částice temné hmoty interagují buď jen gravitační a slabou interakcí, nebo jen gravitační interakcí. Dalším důvodem může být chybná představa o povaze temné hmoty. Jedním ze slibných kandidátů na částice temné hmoty jsou velmi hmotné slabě interagující částice wimp (zkratka z anglického Weakly Interacting Massive Particles, slabě interagující hmotná částice). Přímá detekce částic temné hmoty je založena na tom, že částice slabě zainteraguje v detektoru. Ale co je wimp? Nepatří do „zvěřince částic“ standardního modelu, na kterém je vybudována současná částicová fyzika.

Odpověď je možná v teorii supersymetrie (SUSY), která by měla vyřešit i některé problémy standardního modelu. Ze supersymetrických partnerů se nabízí nejlehčí SUSY částice – neutralino – směsice supersymetrických partnerů Z bosonu (zina), Higgsova bosonu (higg-sina) a fotonu (fotina). Wimp by měla být stabilní částice o hmotnosti 10 GeV až 10 TeV, která neinteraguje elektromagneticky ani silně. Tyto požadavky neutralino splňuje. Neutralino by mělo s hmotou interagovat pružným rozptylem na atomových jádrech, který je způsoben sla-

**Standardní model** – jedná se o standardní model elementárních částic (leptonů a kvarků), které interagují prostřednictvím elektromagnetické, slabé a silné interakce. Interakčními částicemi jsou fotony, intermediální bosony  $Z^0$ ,  $W^+$  a  $W^-$  a gluony. Součástí teorie jsou dosud neobjevené Higgsovy bosony způsobující narušení symetrie v teorii.

**SUSY** – SuperSYmmetry, symetrie mezi fermiony a bosony, která by se měla podle standardního modelu projevovat při energiích částic nad  $10^{19}$  GeV. Ke každému fermionu by měl existovat superpartner, který je bosonem, a naopak ke každému bosonu by měl existovat superpartner, který je fermionem. Názvy superpartnerů tvoříme příponou „ino“ pro bosony a předponou „s“ pro fermiony. Tedy například foton – fotino, elektron – selektron.

Elementární částice, ze kterých je podle standardního modelu vytvořena hmota ve vesmíru. CERN.

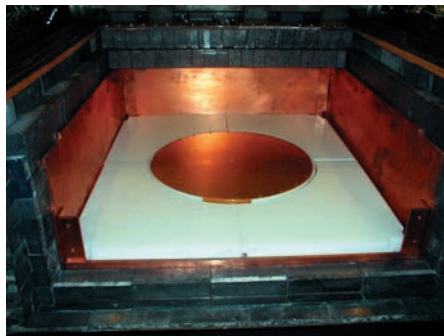


**WIMP** – *Weakly Interacting Massive Particle*, vážný kandidát na částice temné hmoty. Mělo by jít o reliktní superpartnery z období po Velkém třesku, kterým fyzikální zákony zabránily v následném rozpadu. Wimpy jsou usilovně hledány v několika desítkách experimentů.

**Účinný průřez** – vhodný způsob vyjádření pravděpodobnosti, že ostřelující částice bude jistým způsobem interagovat s částicí terče. V podstatě jím zobrazujeme každou částici terče jako určitou malou plochu nastavenou dopadajícím částicím. Všechny částice, které směřují na tuto plochu, interagují. Pravděpodobnost interakce tedy roste s velikostí účinného průřezu.

**LHC** – *Large Hadron Collider*. Urychlovač protonů na energii 14 TeV. Buduje se v komplexu urychlovačů CERN v tunelu po urychlovači LEP II, který má obvod 27 km. Do zkušebního provozu byl uveden v září 2008, první experimenty by měly být prováděny v roce 2009.

Olovené cihličky slouží jako stínění detektoru před vsudypřítomnou radiací přirozeného pozadí. CDMS.



bou interakcí. Nevíme, jestli teorie supersymetrie je správná – dosud žádná supersymetrická částice nebyla pozorovaná. Tuto otázku možná zanedlouho zodpoví urychlovač LHC, kde by při vysokoenergetických srážkách mělo docházet k produkci supersymetrických částic. Pokud však supersymetrické částice existují a tvoří chybějící hmotu, pak nám to zodpoví mnohé otázky z částicové fyziky a kosmologie. Například jak moc byla narušena symetrie mezi SUSY částicemi a SUSY antičásticemi v raných stádiích vesmíru. Částice temné hmoty také nemusejí vůbec interagovat slabou interakcí, ale pouze gravitační interakcí. Zde je prostor pro experimentování. Wimp také není jediným kandidátem na temnou hmotu.

## Experiment CDMS

CDMS II (Cryogenic Dark Matter Search – Hledání temné hmoty detektory s nízkou teplotou) je experimentem pro hledání částic temné hmoty. Na výzkumu se podílejí organizace CALTECH, Fermilab, MIT a dále několik amerických univerzit. CDMS II je nástupcem předchozího projektu CDMS I. Experiment je umístěn asi 700 m pod zemí v Soudanské podzemní laboratoři v Minnesotě. Umístění detektoru bylo zvoleno kvůli eliminaci vlivu kosmického záření. Stínění přirozeného pozadí tvoří dvojice polyetylenových vrstev (45 cm a 10 cm) mezi kterými je 9 cm běžného olova a 4,5 cm radioaktivně čistého olova. Polyetylén slouží jako neutronový moderátor. Toto stínění však není stoprocentní.

Předpokládaný účinný průřez reakce wimpů s detektorem je však velmi malý (asi  $10^{-43}$  cm<sup>2</sup>). Hustota temné hmoty v našem okolí je přibližně 0,3 GeV/cm<sup>3</sup>, čemuž by měl odpovídat i počet zaznamenaných událostí v experimentech – jedna zaznamenaná událost za den na kilogram hmoty detektoru. Deponovaná energie jedné částice by se měla pohybovat v řádu jednotek keV, což způsobí velmi slabý signál v detektoru. Pro měření takto nízkých energií je nutno výrazně zredukovat tepelný šum detektoru, a v maximální míře odstínit kosmické záření a záření radioaktivního pozadí. Vlastní detektory tvoří třicet křemíkových a germaniových válců o průměru 7,5 cm a tloušťce 1 cm. Pracovní teplota je 50 mK. Princip detekce wimpů je velmi sofistikovaný. WIMP, který zainteraguje v detektoru, způsobí vznik mnoha fononů. Na povrchu detektoru jsou umístěny hliníkové elektrody a na nich velmi tenké wolframové elektrody. Hliník je při pracovní teplotě v supra-

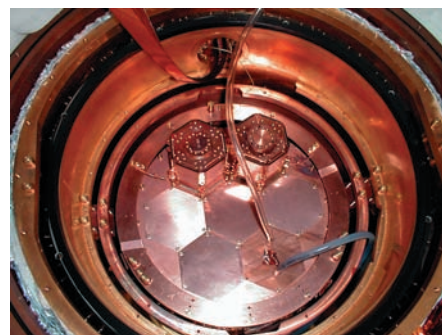


vodivém stavu. Interakcí fononu s Cooperovým párem v hliníku způsobí rozpad Cooperova páru. Vazebná energie Cooperova páru je asi  $10^{-4}$  eV – určuje přirozenou citlivost detektoru (současná elektronika ji však nedokáže plně využít). Pro křemíkové a plynové detektory jsou to jednotky resp. desítky eV. Volné elektrony difundují z hliníku do wolframu, který je ve stavu těsně pod kritickou teplotou supravodivosti. Elektrony, které přejdou z hliníku, způsobí „ohřátí“ wolframových elektrod a tím jejich výraznou změnu ve vodivosti.

Tyto detektory se nazývají TES (Transition Edge Sensors). Změny vodivosti však nejsou natolik velké, aby je bylo možno zesílit a vyhodnotit standardní elektronikou, proto zde bylo použito zařízení SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). SQUID měří magnetické účinky proudu, který prochází wolframovými elektrodami. SQUID ke své funkci využívá Josephsonova jevu, citlivost se pohybuje okolo  $10^{-15}$  tesla. Pro srovnání indukce magnetického pole Země je v řádu  $10^{-5}$  tesla. SQUID se mimo jiné používá ke zkoumání elektromagnetické aktivity živých organismů. CDMS II zaznamenává mnoho falešných událostí způsobených hlavně přirozenou radiací, avšak pomocí sofistikovaných metod (analýza signálu z protějších stran detektoru, data ze simulací...) lze většinu těchto událostí vyloučit. Podle posledních zpráv CDMS II nedetekoval ani jednu částici, která by mohla být kandidátem na temnou hmotu.

## Jiné experimenty

Zajímavé výsledky poskytl experiment DAMA (DARk MATter) umístěný v podzemní laboratoři v Gran Sasso, 1 400 metrů pod povrchem Země. Jeden z detektorů projektu DAMA tvoří přibližně 100 kg scintilačních NaI krystalů. Vzhledem k nízké předpokládané rychlosti částic temné hmoty (stovky km/s) by měly být snadno měřitelné denní a roční variace počtu detekovaných částic. Scintilační NaI detektor tyto variace skutečně zaznamenal jako události, kde deponovaná energie byla nižší než 6 keV. Vzhledem k umístění detektoru je tato skutečnost těžko vysvětlitelná pomocí „standardních“ částic kosmického záření (proton, sekundární miony...). Tyto události mohly být způsobeny částicemi temné hmoty. Zatím však chybí potvrzení jiným experimentem. Jiným kandidátem na temnou hmotu jsou axiony – částice souvisící s narušením CP symetrie. Na jejich objevení je rovněž zaměřena řada experimentů, mezi něž patří například experiment ADMX (Axion Dark

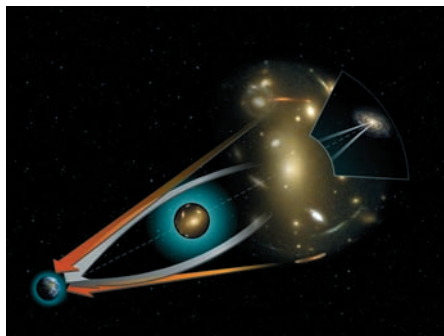


Vnitřek kryostatu, kde budou umístěny křemíkové a germaniové detektory při teplotě 50 mK. CDMS.

**CAST** – Cern Axion Solar Telescope, dalekohled určený pro pozorování axionů vznikajících v nitru Slunce. Silný magnet o indukci 9 T a délce 10 m by měl některé sluneční axiony konvertovat zpět na RTG fotony, které je možné zachytit detektory. Dalekohled funguje od roku 2003.

Členové sdružení Aldebaran před experimentem CAST. Jeho hlavní část tvoří supravodivý magnet z urychlovače LHC, v jehož 8 T magnetickém poli by se měly axiony ze Slunce přeměnit na rentgenové fotony. AGA.





Světlo vzdálených galaxií je deformováno gravitačním působením hmoty. Martin Kommissar & Lars Lindberg Christensen, ST-ECF.

Matter eXperiment) v LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) nebo CAST v evropském komplexu urychlovačů CERN.

Samostatnou skupinu tvoří experimenty, které zkoumají pohyby galaxií. Na základě těchto měření je možné určit rozložení temné hmoty v okolí těchto objektů. Dalším možným způsobem zkoumání temné hmoty je analýza pozorovaného tvaru vzdálených galaxií, který je deformován gravitačním působením mezilehlé temné hmoty. Projektů pro výzkum temné hmoty je mnoho (desítky) a další stále přibývají. V těchto experimentech však i neúspěch znamená informaci, která vede k omezení některých vlastností temné hmoty. Zdá se, že v nejbližší době temná hmota ztratí některé ze svých mnoha tajemství.

■ Miroslav Havránek, 18. 4. 2008, AB 17/2008

**CERN** – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Evropské centrum jaderného výzkumu. Komplex urychlovačů a laboratoří na pomezí Švýcarska a Francie založený v roce 1954. V současné době je zde vybudován největší urychlovač světa – Large Hadron Collider, který má být v plném provozu v roce 2009. K největším objevům patří objev částic slabé interakce, příprava antivodíku a objev kvark-gluonového plazmatu. V CERNu byl také vynalezen a poprvé použit Web.

**CALTECH** – California Institute of Technology, prestižní americká univerzita, která vznikla v roce 1921. Založil ji chemik Arthur A. Noyes spolu s významným fyzikem Robertem A. Millikanem. Předchůdcem byla Throopova univerzita z roku 1891.

**Fermilab** – komplex urychlovačů v USA, založený v roce 1967. V současné době je zde urychlovač Tevatron. K nejvýznamnějším objevům patří objev charmonia, kvarku  $b$  (1977), kvarku  $t$  (1995) a tau neutrina (2000). V současnosti se Fermilab zabývá výzkumem  $t$  kvarku, výrobou a výzkumem antivodíku, zkoumáním platnosti CPT invariance a výzkumem řady dalších vlastností hmoty a antihmoty.

**MIT** – Massachusetts Institute of Technology, prestižní americká univerzita v americkém Cambridge, skládající se z pěti škol a jedné koleje. Založena byla v roce 1861.

## ANTARES – největší podmořský detektor neutrin

Dvacet pět kilometrů jižně od francouzských břehů byla v roce 2008 dokončena stavba obřího podmořského detektoru neutrin s vysokou energií. Detektor se rozprostírá na ploše 0,1 km<sup>2</sup> v hloubce 2,5 km pod mořskou hladinou. Přibližně tisícovka fotonásobičů čeká na posly ze vzdáleného vesmíru. Na stavbě se podílelo 150 odborníků z Francie, Itálie, Španělska, Holandska, Německa, Rumunska a Ruska. Detektor se stane rájem nejenom pro astronomy, ale i pro částicové fyziky a pro vědce zabývající se světem hluboko pod mořskou hladinou. Nové okno do vesmíru bylo otevřeno. Můžeme se těšit na sledování vzniku neutronových hvězd a černých děr, na pozorování jevů v aktivních jádrech galaxií a výzkum samotných neutrin – částic dodnes opředěných mnoha tajemstvími.

### Neutrinová astronomie

Většina astronomických pozorování využívá elektromagnetické spektrum. Fotony ale interagují s látkou v nitru hvězd nebo jsou absorbovány mezihvězdným prachem. Fotony s vysokou energií interagují i s reliktním zářením a infračerveným zářením pozadí. Informace o některých jevech (například o dějích v termojaderném kotli uvnitř hvězd) jsou tak v elektromagnetickém záření buď zcela nedostupné nebo velmi zkrácené.

Neutrino interagují s látkou velmi slabě, procházejí k nám i z nejvzdálenějších zákoutí vesmíru a přinášejí cenné informace o zajímavých procesech, při kterých vznikají. Typickým příkladem mohou být závěrečné fáze života hvězd. Hmotné hvězdy na konci života často explodují jako supernovy a v jejich nitru vznikne neutronová hvězda nebo černá díra. Oba procesy jsou doprovázeny vznikem neutrin. Umírající hvězda vyše neutrinový záblesk v okamžiku, kdy se v jejím nitru za obrovského tlaku hojně přeměňují jádra železa na neutrony. Poprvé byl tento typ neutrin pozorován při explozi supernovy SN 1987A. Méně energetická neutrino vznikají i po celou aktivní dobu života hvězd – v jejich nitrech při termojaderné fúzi. Pro nás je nejbližším takovým zdrojem nitro Slunce. Neutriny jsou doprovázeny i některé gama záblesky. Další neutrino vznikají přímo v horních vrstvách atmo-



Detail optického modulu.

**Neutrino** – leptony, které nemají elektrický náboj. Neinteragují ani silně ani elektromagneticky, proto látkou většinou procházejí.

**Neutrino elektronové** – 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 objevil 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.

**Neutrino taunové** – doprovází taun (supertěžký elektron) při slabých procesech. Bylo objeveno v laboratoři Fermilab v roce 1999 v experimentu DONUT (Do Nu Tau). Z objevitelského týmu jmenujme P. Yagera a V. Paoloneho.


**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.

**Mion** – těžký elektron, hmotnost má  $207 m_e$ . Střední doba života je přibližně  $2 \times 10^{-6}$  s. Těžký elektron se rozpadá na stabilní elektron, elektronové antineutrino a mionové neutrino. Mion se vyskytuje v sekundárních sprškách z kosmického záření. Mion byl objeven C. Andersonem v kosmickém záření za pomoci mlžné komory v roce 1936.

**Tauon** – supertěžký elektron, hmotnost má  $3\,484 m_e$ . Jde o nestabilní částici se střední dobou života  $3 \times 10^{-13}$  s. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrína. Byl objeven v roce 1977 Martinem Perlem

**Čerenkovovo záření** – kužel elektromagnetického záření v podobě rázové vlny, který vzniká za nabitou částicí pohybující se nadsvětelnou rychlostí v daném prostředí.

**Fotonásobič** – často označováno 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.

sféry při interakci částic kosmického záření s vysokou energií s jádry atomů atmosféry. Pozorování těchto neutrin přináší cenné informace o kosmickém záření. Neutrino doprovází procesy v aktivních jádrech galaxií. Celý vesmír je ponořen do moře reliktních neutrin, která se oddělila od látky přibližně jednu sekundu po vzniku vesmíru. Neutrino tvoří horkou část temné hmoty. Mohou se ale objevovat i jako důsledek projevů chladné temné hmoty. Částice chladné temné hmoty (například wimpy) jsou gravitačně stahovány do středů planet, hvězd i galaxií, kde vytvářejí velmi husté oblasti, které mohou opět produkovat neutrino. Zdá se, že všude kolem nás je dosud neobjevený svět neutrinové astronomie, jehož okno se nám právě otevírá.

## Detektor ANTARES

Název detektoru připomíná známou hvězdu Antares ze souhvězdí Štíra, je však zkratkou z anglického „Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch“. Detektor byl postaven na dně Středozemního moře, v hloubce 2,5 km, kde je většina ostatních částic odstíněna mohutným sloupcem vody. Detektor je zejména citlivý na mionová neutrino s vysokou energií, při jejichž slabé interakci s látkou vznikají miony s rychlostí převyšující rychlost šíření světla ve vodě. Za těchto podmínek se za nabitými miony táhne kužel Čerenkovova záření, které může být detekováno fotonásobiči umístěnými na svislých strunách pod mořskou hladinou.

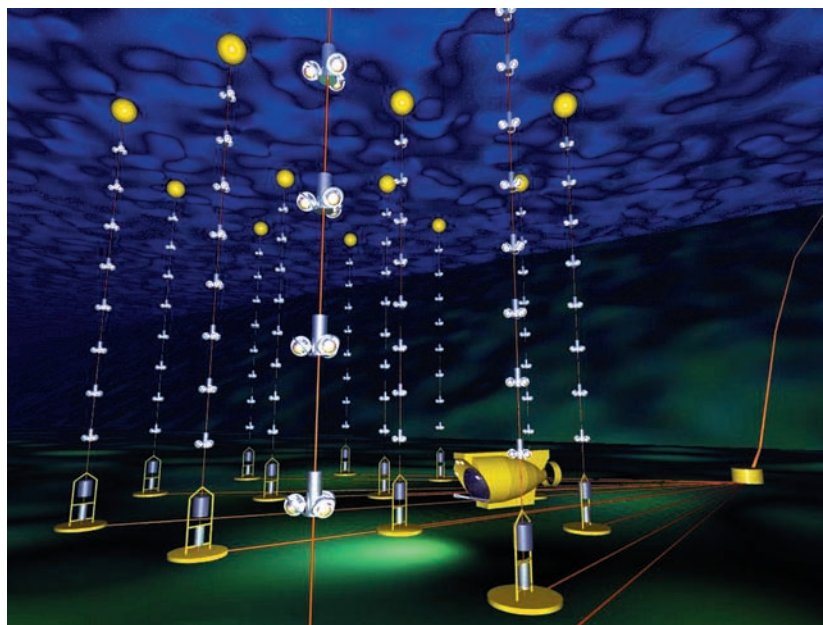
Detektor je umístěn přibližně 25 kilometrů od francouzského pobřeží, v blízkosti města Touloun (souřadnice jsou  $42^{\circ}50'$  s. š.,  $6^{\circ}10'$  v. d.). Struny nesoucí fotonásobiče jsou zakotvené na mořském dně a vznášejí se do výše 400 metrů nade dnem, kde jsou ukončeny bójkou. Celkově je jich 12 na ploše  $0,1 \text{ km}^2$ . Každá struna je rozdělena na 25 úseků, neboli podlaží, vzdálených 14,5 metru. Na každém podlaží se nachází řídicí modul a optický modul složený ze tří skleněných koulí. Koule jsou schopné odolat tlaku až 600 barů, tj. v principu by mohly být ponořeny až do hloubky 6 kilometrů. V kouli je především fotonásobič, ale také další senzory, pomocná elektronika vyhodnocující tvar zachyceného signálu a vysokonapěťový zdroj pro fotonásobič. Datové a napájecí kabely ze všech podlaží struny jsou svedeny do řídicího modulu, který je umístěn na mořském dně u zakotvení struny. Odsud jsou kabely vedeny do spojovacího modulu, ze kterého vede 40 kilometrů dlouhý elektrooptický kabel do pobřežní stanice. Na mořském dně jsou

také kontejnery s bateriemi. Neutrinové detektory mají oproti jiným astronomickým technikám jednu velikou výhodu: mohou pozorovat vesmír nepřetržitě, ve dne i v noci, nezávisle na počasí nebo fázi Měsíce. Detektor ANTARES je schopen sledovat prostorový úhel  $3,5\pi$  steradiánů, tj. většinu oblohy (plný úhel je  $4\pi$  sr). Celkový počet fotonásobičů detektoru je téměř 1 000.

### Stavba detektoru

Stavba detektoru fakticky započala ponořením první pokusné struny o délce „jen“ 250 metrů již v roce 1996. Po řadě experimentů byla 17. března 2005 ponořena testovací struna v místě stavby budoucího detektoru ANTARES. První kompletní struna detektoru byla ponořena 14. února 2006 a první data poskytla 2. března 2006. Poté již stavba pokračovala relativně rychle. Druhá struna byla ponořena 21. září 2006. V průběhu roku 2007 byly ponořovány další a další struny. Nošení strun probíhalo z paluby lodi, na dně moře byl umístěn robot, který strunu ukotvil a připojil její kabely k spojovacímu modulu. Stavba celého detektoru byla dokončena dne 30. května 2008. Detektor má celkem 13 strun, z toho 12 měřicích a jednu pomocnou. První signál byl zaznamenán několik hodin po připojení posledních dvou strun.

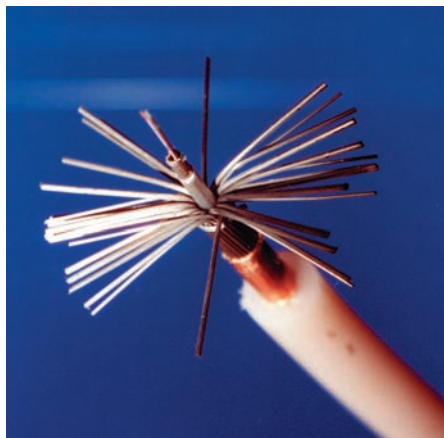
Po třech týdnech provozu se ale detektor 24. června 2008 odmlčel. Posádka lodi ohlásila celkové selhání dodávky energie. Analýza kabelové sítě ukázala poškození podmořského kabelu spojujícího detektor s pobřežím ve vzdálenosti 25 kilometrů od pobřeží. Dne 30. srpna započaly opravné práce z lodi Raymond Croze. Defekt byl nalezen ve vzdálenosti 23 kilometrů od pobřeží a vadná část kabelu vyměněna. Po nucené odstavce tak byl dne 6. září 2008 definitivně obnoven provoz detektoru ANTARES, který se stal největším podmořským detektorem neutrin na světě.



Struny s moduly umístěné pod mořskou hladinou. Data jsou vedena kabely k pobřeží.

Pokládání struny se třemi optickými moduly z lodi.





*Struktura podmořského kabelu. Tyto kabely spojují podmořský detektor s pozemským střediskem.*

### **Budoucnost – KM3NeT**

Detektor nedávno uvedený do provozu není zdaleka posledním slovem astronomů, částicových fyziků a oceánologů. V dubnu 2008 byly zveřejněny plány dlouho připravované stavby obřího podmořského detektoru KM3NeT s objemem  $1 \text{ km}^3$ . Měl by být opět umístěn ve Středozemním moři. Projekt je v tuto chvíli v přípravné fázi, jejímž cílem je nalézt politickou, vědeckou a finanční podporu projektu v jednotlivých zemích. Projektu se účastní 41 institucí z Francie, Holandska, Irska, Itálie, Kypru, Německa, Řecka, Španělska a Velké Británie; v budoucnu se nepochybně připojí i další země. Přípravná studie stála 20 milionů Euro. Autoři projektu tvrdí, že po zkušenostech s detektorem ANTARES proběhne stavba velmi rychle. Můžeme se tak jen těšit na další úspěchy neutrinové astronomie.

■ Petr Kulhánek, 23. 1. 2009, AB 4/2009

# Lasery na báze voľných elektrónov

Klasický laser sa skladá z aktívneho média, v ktorom ide vybudíť inverznú populáciu, zdroja energie, ktorý vybudí médium a optického rezonátora. U laserov založených na voľných elektrónoch sú zdrojom energie a zároveň aktívnym médiom urýchlené elektróny. Také lasery označujeme skratkou FEL (Free Electron Laser).

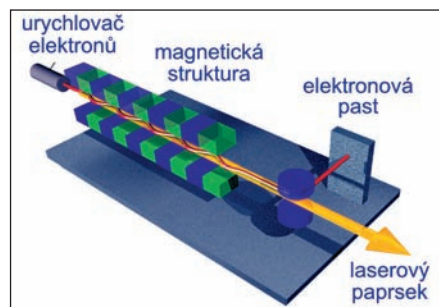
## Základná charakteristika

Lasery FEL sú na rozdiel od väčšiny iných druhov laserov ľahko preladiteľné v širokom rozsahu, to je dôsledok faktu že elektróny v laseru FEL nie sú viazané na atómy. Vlnová dĺžka výstupného žiarenia sa dá nastaviť buď zmenou energie elektrónov alebo zmenou intenzity magnetického poľa. Pretože médium nemôže byť poškodené optickými poľami, je možné dosiahnuť vysokej intenzity žiarenia. Ďalšou výhodou je existencia iba jedného transverzálneho módu (lineárna polarizácia) a vysoká časová a priestorová koherencia.

FEL zariadenia sa dajú rozlíšiť na krátkovlnné a dlhovlnné. Dlhovlnné pokrývajú oblasti od hlbokého infračerveného žiarenia až po ultrafialové žiarenie vrátane viditeľného spektra.

## Princíp laseru FEL

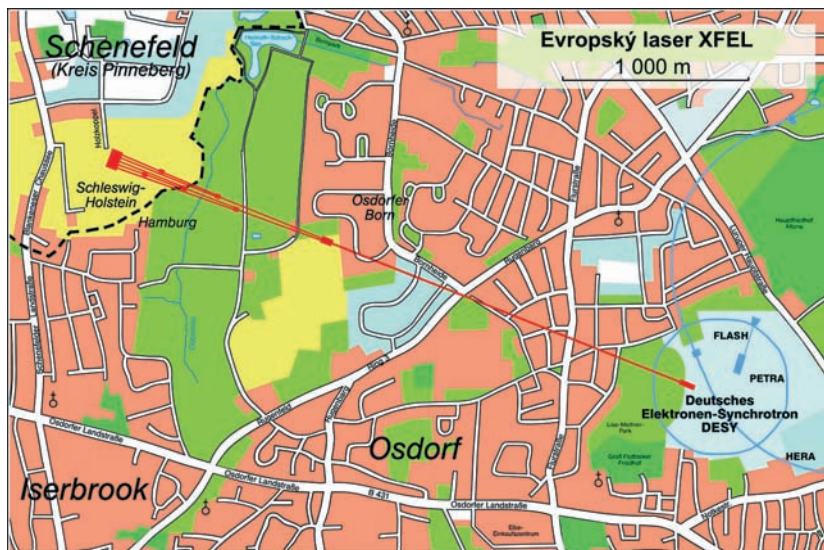
Elektróny prechádzajú cez tzv. undulátor, ktorý sinusoidálne zakriví ich trajektóriu. Ako sú urýchľované zo strany na stranu, spontánne vyžarujú v doprednom smere a žiarenie je zachytené v rezonátore medzi zrkadlami. Ako však narastá jeho intenzita v rezonátore, proces emisie sa začne líšiť od klasických zdrojov synchrotrónnej rádiácie. Vstupujúce elektróny kmitajú medzi magnetmi a vyžarujú v prítomnosti intenzívneho elektromagnetického vlnenia. Ako pole fotónov prechádza cez pomalšie, vlnivo sa pohybujúce elektróny, jeho elektrická zložka pôsobí na zhluky elektrónov a vzniká klasický efekt nie nepodobný kvantovému efektu stimulovanej emisie. Elektróny sa urýchľujú alebo spomaľujú vzhľadom na relatívnu fázu elektrónov voči elektromagnetickému vlneniu. Výrazná výmena energie nastane keď sa sily undulátoru a žiarenia pôsobiace na elektróny dostanú do rezonancie.



Princíp laserovania v undulátore.

**MASER** – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Zařízení, které zesiluje elektromagnetické záření pomocí stimulované emise v mikrovlnném oboru. Stejně funguje v optickém oboru LASER. První MASER byl zkonstruován na Kolumbijské univerzitě v roce 1953.

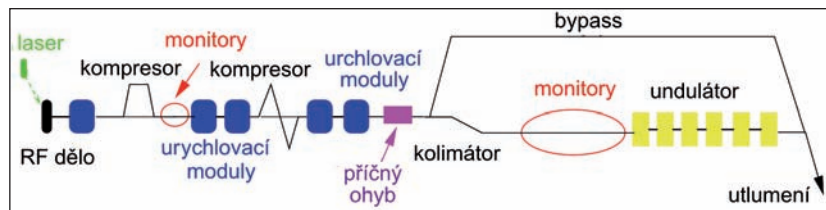
**LASER** – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Roku 1958 ukázal C. Townes spolu s A. L. Schawlowem, že je možné zkonstruovat podobné zařízení jako již existující MASER (pracuje v mikrovlnné oblasti) také pro světlo. První laser zkonstruoval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



Plánované umístění lasera XFEL v DESY.

**Undulátor** – struktura periodicky se střídajících magnetů, která se využívá k vybuzení synchrotronního záření prolétávajícího svazku nabitých částic. Trajektorie částic se vlivem střídajícího se pole zvlní a nabitě částice proto vyzařují. Pro velkou amplitudu oscilací částic se zařízení nazývá wiggler. Původně se undulátorem nazýval zapisovací přístroj pro podmořskou telegrafii sestrojený Lauritzenem. Elektrický proud procházející vinutými magnety vybudil pole, které otáčelo pohyblivými magnety a jejich pohyb byl přenášen na zapisovací zařízení.

Laser FLASH v Hamburgu.



Výsledkem je kolektivní nestabilita a exponenciální nárůst v energii uchované v elektromagnetickém poli.

Elektróny, které původně boli viac menej náhodne rozptýlené v zhluku, sa začnú organizovať do tzv. mikrozhlukov s dĺžkovými rozmermi asi o veľkosti vlnovej dĺžky prítomného elektromagnetického žiarenia. Kvôli sfázovaniu elektrónov je vyžarované žiarenie skoro monochromatické a koherentné. Také žiarenie nie je možné pripraviť iným spôsobom.

Pri vlnových dĺžkach menších ako 100 nm je problém vytvoriť zrkadlá, ktoré by šli použiť na vytvo-

renie rezonátoru. V takýchto prípadoch sa využíva iba jeden prechod elektrónov dlhým undulátorom. Na vygenerovanie počiatočného poľa žiarenia, ktoré sa priechodom zosilní, môžeme použiť externý klasický laser, alebo sa spoľahnúť na interný generátor poľa, teda spontánne žiarenie undulátoru. V prípade využitia spontánneho žiarenia sa princíp nazýva SASE (Self-Amplified Stimulated Emission, samostatne zosilnená stimulovaná emisia). Laser FEL s technológiou SASE operuje v režime s vysokým ziskom a keďže nepotrebuje zrkadlá, tak vlnové dĺžky, ktoré je možno dosiahnuť, sa pohybujú až v oblasti rentgenového žiarenia. Pozdĺžna koherencia však trochu trpí fluktuáciami kvôli faktu, že náhodný proces, akým je spontánne žiarenie undulátoru, spúšťa laserovanie.

Lasery FEL so spektrom v okolí viditeľného svetla je možné postaviť na synchrotronových akumuláčnych prstencoch, pretože potrebujú relatívne nízku energiu elektrónov. Rentgenové lasery FEL vyžadujú lineárny urýchľovač.



## VUV-FEL DESY

Mimo iných miest vo svete, kde sú postavené elektrónové lasery, sa najbližší nachádza u našich západných susedov, kde v súčasnosti funguje experiment VUV-FEL (Vacuum UltraViolet FEL – Vákuový ultrafialový FEL), neskôr premenovaný na FLASH (Free-electron LASer in Hamburg – laser na voľných elektrónoch v Hamburgu). Pôvodné urýchľovacie dutiny pochádzajú z testovacích zariadení pre projekt TESLA (Tera-eV Energy Superconducting Linear Accelerator – Supravodivý lineárny urýchľovač pre teraelektronvoltové energie), z ktorého sa vyvinul urýchľovač ILC. Najmenšia vlnová dĺžka, ktorú je schopný vygenerovať, sa pohybuje okolo 6 nm. Je to pilotný projekt pre pripravovaný laser XFEL.

Elektrónové zhluky vznikajú fotoelektrickým javom v laserovom fotoinjektore, skadiaľ prejdú 8 dutinami a urýchlia sa na energiu 127 MeV. Zhluky častíc sa stlačia v pozdĺžnom smere v kompresore zhlukov. Lúč prechádza diagnostickými systémami a ďalšími urýchľovacími dutinami, až naberie finálnu energiu 1 GeV a je vpustený do undulátora, kde prebieha laserovanie.

XFEL (X-ray FEL) je v súčasnosti pripravovaný medzinárodný projekt urýchľovača, z ktorého budú elektróny využité vo viacerých laseroch SASE. Má byť umiestnený v DESY u Hamburgu. Bude využívať elektróny s energiou 10÷20 GeV, ktoré budú urýchľované v dutinách, ktorých využitie je plánované aj v urýchľovači ILC. Celková dĺžka zariadenia bude okolo 3,4 km.

Dĺžka pulzov by mala byť menšia ako je 100 fs, čo umožní skúmať veľmi krátko alebo veľmi rýchlo prebiehajúce procesy a vlnová dĺžka sa dá preladovať v rozmedzí 0,085 až 6 nm. Plánované aplikácie sú, vďaka extrémne krátkemu záblesku, v chémii a biochémií, vo fyzike materiálov, fyzike plazmy a nanotechnológiách. Začiatok stavby sa predpokladá v lete 2008 a spustenie v roku 2013.

■ Michal Marčišovský, 25. 4. 2008, AB 18/2008



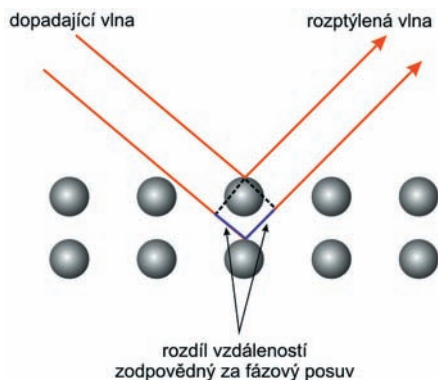
Undulátor lasera FEL.

**Synchrotronní záření** – záření generované zpravidla elektrony rotujícími kolem magnetických silokřivek. Jde o relativistické záření s výraznou polarizací, ze které je možné určit směr magnetického pole. Záření je polarizováno v rovině oběžné dráhy, soustředěno do úzkého kužele, vyzářováno v původním směru pohybující se částice a má spojité spektrum.

**DESY** – Deutsches Elektronen SYNchrotron, německé výzkumné centrum částicové fyziky s laboratorii v Hamburgu a Zeuthenu, které bylo založeno v roce 1959. K nejvýznamnějším zařízením patří urychlovač PETRA a laser na volných elektronech FLASH.

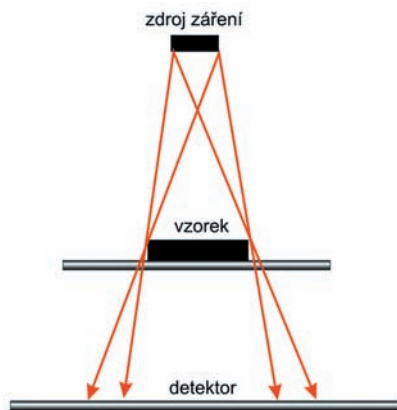
**Koherence** – situace, při které je fázový rozdíl interferujících vln z daného zdroje či objektu v určitém bodě prostoru konstantní a nebo se pomalu mění v čase. Opakem koherence jsou nepravidelné a dostatečně rychlé změny fázového rozdílu interferujících vln. Ideální koherence nelze nikdy dosáhnout.

## Zobrazování malých objektů rentgenovým laserem



Ohyb (difrakce) rentgenového záření na krystalické mřížce.

Klasické projekční metody. Pokud je zdroj záření dostatečně malý a detektor dostatečně vzdálen od vzorku, získáme zvětšený obraz. V opačném případě se projeví rozmazání hran a snížení rozlišení.



Objev rentgenového záření patří bezesporu mezi nejužitečnější objevy v historii. Prvním člověkem, který systematicky prováděl experimenty s tehdy ještě neznámými paprsky X byl Wilhelm Conrad Röntgen. Jeho primitivní zdroj záření byl založen na vakuové trubici připojené na vysoké napětí. Brzděním elektricky nabitých částic vznikalo krátkovlnné elektromagnetické záření. V jistých obměnách se tento princip používá u běžných rentgenů dodnes. Röntgenova odvaha při experimentech byla obdivuhodná. Neváhal ozařovat sebe i svou manželku. Při jednom z jeho pokusů dokonce přiblížil hlavu k vakuové trubici pod napětím a pozoroval záření, které vznikalo jako následek excitace a ionizace atomů v kapalině uvnitř jeho oka. Objev rentgenového záření přinesl okamžitě řadu aplikací v lékařství, biologii, materiálovém inženýrství, ale třeba i v paleontologii. V dnešním bulletinu se zaměříme na zobrazování malých objektů pomocí rentgenových laserů.

### Zobrazování malých objektů

Při zobrazování malých objektů dochází k celé řadě problémů, které určují hranice dané metody. V extrémně tenkých objektech řádu mikrometrů zaujímá jen velmi malý počet z celkového množství prolétávajících fotonů. Výsledným efektem je nízký kontrast obrazu. Dalším omezujícím faktorem je konečná velikost zdroje záření, což způsobí rozmazání ostrých hran objektů. Pomocí klasických projekčních metod se lze dostat s rozlišením na škálu jednotek mikrometrů.

Pokud má vzorek periodickou strukturu, jako například krystalická mřížka, lze využít pro zesílení záření v určitém směru difrakci. Pro snazší pochopení zvolme vlnový popis záření. Jediná elektromagnetická vlna interaguje s několika sousedními atomy v krystalické mřížce. Každý atom se tak chová jako elementární zdroj záření. Vzdálenost mezi atomy zavádí konstantní fázový posuv mezi vlnami vyzařovanými atomy. V určitých směrech lze pozorovat interferenční maxima a minima. Podmínka pro vznik interferenčního maxima je dána Braggovou rovnicí. Analýzou difrakčního obrazce lze získat informace o struktuře krystalové mřížky. Vzdálenost sousedních atomů v mřížce se pohybuje v řádu 0,1 nm.

Problém nastane, pokud bychom chtěli zkoumat strukturu malých objektů, které nemají periodickou strukturu. Vzorky na rozměrové škále desítek nanometrů není již prakticky možné zobrazit pomocí klasických rentgenů. Řešení nabízejí rentgenové lasery. Zde je možné využít podobné metody jako při zobrazování krystalických mřížek. V předchozích případech jsme měli zdroj nekoherentního záření s náhodným rozdělením fází. Konstantní fázový posuv byl zaveden až vlivem periodické krystalické mřížky, zatímco koherentní záření rentgenového laseru dopadající na vzorek má přesně definované fázové poměry. Průchodem záření skrze vzorek se díky neperiodické struktuře atomů tyto fázové poměry změní. V jistých směrech se záření zesílí (zeslabí) vlivem konstruktivní (destruktivní) interference. Za vzorkem lze zachytit difrakční obrazec, ze kterého je možno zpětně určit strukturu vzorku.

### Zobrazování viru rentgenovým laserem

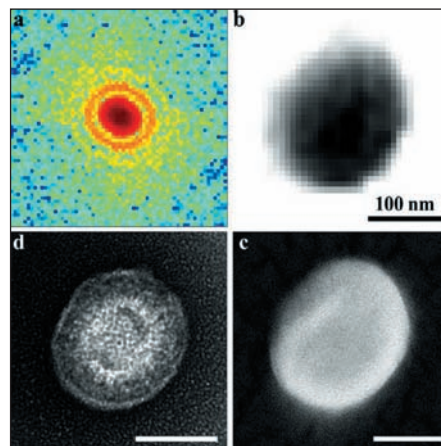
Jianwei Miao se svými kolegy z amerických a japonských univerzit provedli experiment, při kterém se pokusili zobrazit myší herpesvirus – 68. Tento virus má rozměr přibližně 200 nm. Vědci využili laseru na bázi volných elektronů na synchrotronu SPring-8 v Japonsku. Energie dopadajících fotonů byla 5 keV (vlnová délka 0,25 nm). Částice viru byly nejprve umrtveny methanolem a poté umístěny na 30 nm tenkou membránu z nitridu křemíku. Jako senzor posloužila dusíkem chlazená CCD kamera. Snímky byly zpracovány pomocí algoritmu GHIO (Guided Hybrid Input Output). Jedná se o iterační metodu. Difrakční obrazec lze interpretovat jako Fourierův obraz skutečného snímku původního vzorku. Pro získání skutečného obrazu již stačí jen provést inverzní Fourierovu transformaci. Není to ale tak jednoduché. CCD kamera nám poskytne totiž pouze informace o amplitudě (tj. počtu zaznamenaných fotonů v jednom pixelu), nikoliv o fázi, která je nezbytná pro získání správného výsledku pomocí inverzní Fourierovy transformace. Prvním krokem GHIO algoritmu je náhodné vygenerování fází. Dalším krokem je mnohonásobné provedení dopředné a zpětné Fourierovy transformace, v jejímž průběhu se postupně snižuje k nule záporná reálná nebo imaginární část signálu. Tímto způsobem lze odstranit signál způsobený vlivem podpůrné membrány (jedná se vlastně o odečtení pozadí).

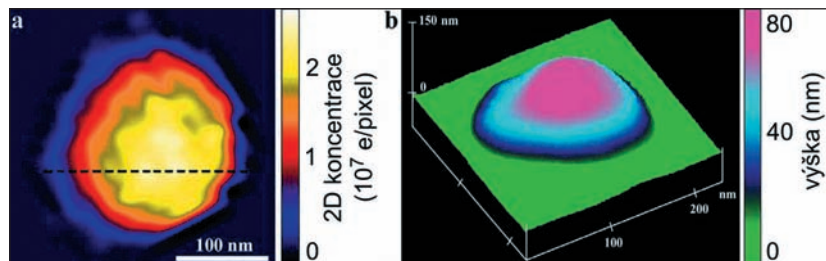
Pro získání kvalitnějších snímků je třeba velmi krátkého a intenzivního pulzu vysoce koherentního rentgenového záření, které zatím



Uspořádání experimentu. Svazek koherentního rentgenového záření dopadá na vzorek, jehož difrakční obrazec detekuje CCD kamera. ArXiv 0806.2875.

Na obrázku a) je difrakční obrazec, který zachytil CCD senzor. Obrázek b) ukazuje výsledný snímek po zpracování obrázku a) pomocí GHIO algoritmu. Zbývající obrázky ukazují srovnání se snímkem pořízenými pomocí skenovacího elektronového mikroskopu. (Obr. c) a transmisivního elektronového mikroskopu (Obr. d). ArXiv 0806.2875.





Zrekonstruovaný snímek znázorňující elektronovou hustotu viru (Obr. a). Snímek pořízený mikroskopem atomárních sil (Obr. b) ArXiv 0806.2875.

neumíme vyrobit. Nyní je však již ve vývoji nový rentgenový laser XFEL, kde by mělo být dosaženo požadované kvality záření. Zde však nastává problém s radičním poškozením vzorku. Detektor bude muset stihnout zaznamenat data dříve, než se vzorek vypaří. Částečným řešením může být podchlazení vzorku. V každém případě by záření z XFEL mělo být dostatečně kvalitní pro získání obrázků na úrovni rozměru makromolekul, buněčných struktur nebo proteinů.

■ Miroslav Havránek, 1. 8. 2008, AB 32/2008

**Difrakce** – ohyb světelných vln při průchodu malým otvorem, na okraji překážky nebo při interakci s periodickou strukturou (průchod či odraz), například krystalovou mřížkou.

**Synchrotron** – cyklický urychlovač nabitých částic s vhodně proměnným magnetickým polem. Je dalším vývojovým stupněm cyklotronu, který pracuje jen s konstantním polem.

**TEM** – Transmisní Elektronová Mikroskopie, vytváření obrazu tenkého předmětu průchodem energetických elektronů. Obraz tvořený prošlými elektrony je následně zvětšen a zaostřen elektronovou optikou, poté je na stínítku převeden na viditelné záření, které je detekováno CCD kamerou.

**AFM** – Atomic Force Microscope, mikroskop atomárních sil. Zařízení skenuje povrch materiálu pomocí hrotu zavěšeného na pružném výkyvném raménku. Hrot je přitahován elektrostatickými a van der Waalsovými silami. Výkyvy raménka nad povrchem jsou sledovány laserem. Mikroskop je tak citlivý, že může sledovat elektronové orbitály molekul materiálu. AFM mikroskop byl vynalezen v roce 1986 G. Binnigem, C. Quatem a C. Gerberem.

**Fourierova transformace** – rozložení neperiodického signálu do sínů a kosínů, v případě časoprostoru do rovinných vln. Původní signál (vzor) je integrálem všech parciálních signálů (obrazu).

## FAIR – urychlovač pro výzkum atomových jader

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) je mezinárodní urychlovačový projekt pro výzkum atomových jader a antiprotonů. Projekt se rozběhl v roce 2003, kdy německá vláda odsouhlasila jeho financování ze 75 %. Zbývajících 25 % financuje 14 dalších zemí (Čína, Francie, Rusko, Velká Británie, atd.). FAIR se stane součástí urychlovačové laboratoře GSI nedaleko německého Darmstadtu. Dokončení projektu se předpokládá v roce 2015. Urychlovačový komplex FAIR naváže na jaderný výzkum laboratoře GSI. Projekt FAIR svými výsledky přispěje hned do několika oborů fyziky, jako je jaderná fyzika, fyzika plazmatu a astrofyzika. Hlavním cílem experimentů je studium formování atomových jader a hlubší porozumění silné interakci.

### Atomové jádro

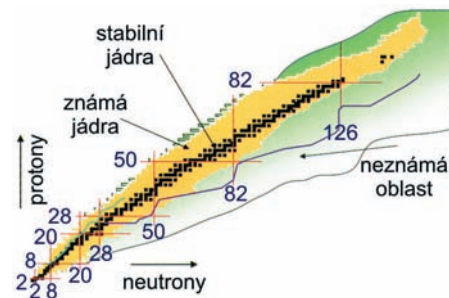
Atomové jádro je vázaný stav nukleonů (protonů a neutronů). Nukleony nejsou elementární částice, skládají se z kvarků. Kvarky však tvoří jen zlomek hmotnosti nukleonu, většina hmotnosti je uložena ve formě gluonů – zprostředkujících částic silné interakce. Například u protonu připadá 11 MeV na hmotu kvarků a 927 MeV na hmotu gluonů. Atomové jádro drží pohromadě díky zbytkové silné interakci (sama silná interakce váže kvarky uvnitř nukleonu). Výsledkem je, že atomová jádra nemohou mít libovolnou velikost – počet nukleonů. Pokud má jádro příliš velký počet protonů, nedokáže již silná interakce přemoci elektrické odpuzování a jádro se rozpadne. Celkem je známo přes 2 500 izotopů, avšak jen méně než 300 je stabilních. Stále však existuje více než 3 500 neobjevených izotopů.

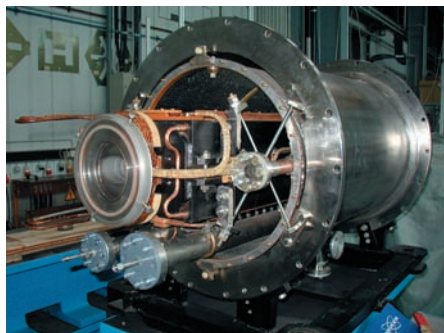
První lehká jádra vznikala v průběhu primordiální nukleosyntézy již několik minut po Velkém třesku. Jelikož vesmír rychle chladl, vznikla pouze jádra lehkých prvků jako je vodík, helium a malé množství lithia a beryllia. Těžší prvky vznikaly mnohem později v jádrech hvězd, kde hmota opět získala dostatečnou teplotu pro tzv. hvězdnou nukleosyntézu. Zde však nastal další limit. energii pomocí jaderné syntézy lze získávat pouze slučováním lehkých jader. Limitní prvek je železo, které má nejstabilnější jádro a jeho další jaderné slučování je již energeticky ztrátové. Prvky těžší než železo tedy vznikají při proce-

**Silná interakce** – interakce krátkého dosahu, přibližně  $10^{-15}$  m. Silná interakce je výběrová, působí jen na částice s barevným nábojem, tj. kvarky. Polními částicemi silné interakce jsou gluony (z anglického „glue“ = lepit, lepidlo). Gluony spojují kvarky do větších celků, tzv. hadronů. Nejznámější jsou proton a neutron složené ze tří kvarků. Silná interakce je odpovědná za soudržnost atomárního jádra. Polní částice mají barevný náboj a proto mohou působit samy na sebe.

**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 neceločíselné (třetinové a dvou-třetinové) elektrické náboje. Jsou také nositeli barevného náboje silné interakce.

Přehled atomových jader. Na obrázku je vidět, že nuklidy a stabilní izotopy zaujímají jen malou část z celkové počtu jader. Argonne National Laboratory.



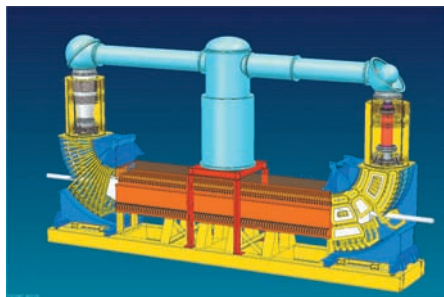


Dipólový supravodivý magnet urychlovače SIS300 s indukcí 2 T a nárůstem pole 4T/s. GSI.

**Gluony** – intermediální (polní, výměnné) částice silné interakce, která působí na hadrony a je krátkého dosahu. Tato interakce spojuje kvarky v mezony a baryony, udržuje pohromadě neutrony a protony v atomovém jádře a způsobuje některé rychlé rozpady elementárních částic. Celkem známe 8 gluonů.

**Nukleon** – společný název pro částice jádra (protony a neutrony). Jde o baryony složené z kvarků „u“ a „d“.

Prototyp kvadrupólového magnetu vyrobený v ruském urychlovačovém komplexu Dubna pro urychlovač SIS 100 GSI.



sech mnohem bouřlivějších, než existují v nitru hvězd. Tvoří se v důsledku explozivní nukleosyntézy, která probíhá při explozích supernov – závěrečných stádiích některých hvězd. Při těchto procesech vzniká celá řada těžších jader, třebaže i velmi krátce žijících, o kterých máme velmi omezené informace. Z produktů rozpadu těchto jader vznikly stabilní prvky, které běžně pozorujeme v přírodě, jako například olovo, zlato, uran, atd. Právě tyto vysokoenergetické procesy bude zkoumat experimentální zařízení FAIR v Německu.

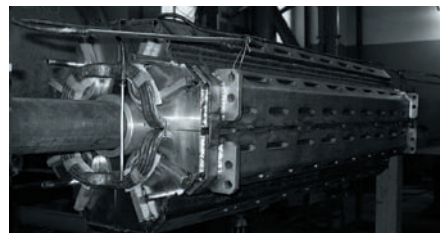
## FAIR

Nově budovaný urychlovačový komplex poskytne stokrát až tisíckrát vyšší intenzitu částic v primárních iontových svazcích a až desítkrát vyšší intenzitu v sekundárních svazcích než stávající zařízení v GSI. Rovněž vzroste také energie částic na zhruba třicetnásobek oproti stávajícímu zařízení. Srdcem experimentální laboratoře je dvojitý synchrotron SIS100/300, na kterém mohou probíhat až čtyři nezávislé experimenty současně. Injektorem pro SIS100/300 je urychlovač SIS18 ze stávající laboratoře GSI.

Supravodivé magnety a rezonanční urychlovací dutiny s nastavitelnou frekvencí umožňují ohromnou variabilitu částicového svazku. Jelikož urychlovanými částicemi jsou ionty, maximální dosažitelná energie na jedno jádro závisí na protonovém a nukleonovém čísle prvku. Pro ilustraci: SIS100 dokáže připravit svazek jader U 238 o energii 1 GeV/nukleon a luminozitě  $10^{12}$ . Naproti tomu SIS300 může urychlit stejná jádra na energii 34 GeV/nukleon, avšak při nižší luminozitě svazku  $2 \times 10^9$ . Urychlovač je schopen urychlovat jádra od vodíku až po uran a také produkovat vzácná nestabilní jádra v sekundárních svazcích. Sekundární svazky se „vyrábějí“ pomocí interakce urychlených iontů s pevným terčíkem. Svazek částic může být buď téměř spojitý, nebo složený z velmi krátkých pulzů, tzv. bunchů [:bančů:] neboli shluků, což je výhodné zejména pro studium velmi žhavé hmoty v plazmatickém stavu. Pulzní výkon získaný interakcí jednoho krátkého pulzu iontů může dosáhnout až několika terawattů.

Součástí laboratoře FAIR bude komplex čtyř akumulčních prstenců (CR, RESR, NESR, HESR). Prstenec CR slouží ke stochastickému ochlazování svazku antiprotonů a izotopů ze sekundárních svazků. V prstenci CR je možné měnit strukturu shluků urychlovaných částic – tzv. rebunching. Dalším z akumulčních prstenců je RESR, jehož

hlavním úkolem je akumulace až  $10^{11}$  antiprotonů a jejich případné přeměrování do urychlovače SIS100, kde se mohou dále urychlit, nebo do prstence NESR pro experiment s nízkoenergetickými antiprotony FLAIR. Prstenec RESR také umožňuje zpomalování izotopů. Poslední ze čtveřice podružných prstenců je HESR. Jeho úkolem je opět akumulace a ochlazování antiprotonového svazku, který je injektován z prstence RESR nebo vysokoenergetického antiprotonového svazku z urychlovače SIS100.



Chladič elektronů pro experimenty navržený BINP v Novosibirsku. GSI.

URYCHLOVAČ	OBVOD [m]
SIS100	1083
SIS300	1083
CR	206
RESR	246
NESR	222
HESR	520

Projekt FAIR není vázaný pouze na základní výzkum. Získané poznatky naleznou uplatnění zcela jistě v medicíně při léčbě nejrůznějších nádorových onemocnění. Další možnou aplikací je studium radiační odolnosti materiálů (včetně elektronických součástek). Těžší jádra způsobují daleko větší radiační poškození než například elektrony nebo samotné protony. Výzkum radiační odolnosti materiálů je velmi aktuální zejména v aplikacích určených pro kosmický výzkum nebo pro budoucí fúzní reaktory.

■ Miroslav Havránek, 6. 2. 2009, AB 6/2009

**Izotopy** – jádra se stejným počtem protonů, ale různým počtem neutronů. Všechny izotopy prvku mají stejné chemické vlastnosti, liší se však od sebe svými fyzikálními vlastnostmi, například poločasem rozpadu, hmotností, atd.

**Protonové číslo Z** – udává počet protonů v atomovém jádře prvku.

**Nukleonové číslo A** – udává počet nukleonů (neutronů a protonů) v atomovém jádře prvku.

**Luminozita** – integrální tok částic průřezem urychlovače.

**Akumulační prstenec** – cyklický částicový urychlovač, přesněji synchrotron, který dokáže uchovat urychlené částice s konstantní energií po dobu i několika hodin. Současné synchrotrony mohou pracovat jak v urychlovacím režimu, tak v režimu akumulačních prstenců.

**Proton** – částice složená ze tří kvarků (duu) 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.

**GSI** – Gesellschaft für Schwerionenforschung (Sdružení pro výzkum iontů). Německá laboratoř v blízkosti Darmstadtu, která byla založena v roce 1969. Laboratoř má 1050 zaměstnanců. Ve vybavení je lineární urychlovač UNILAC, iontový synchrotron SIS, experimentální prstenec ESR. V současnosti se buduje výkonný laser PHELIX a budovaný urychlovač FAIR.

## Miniaturní černé díry na urychlovači LHC

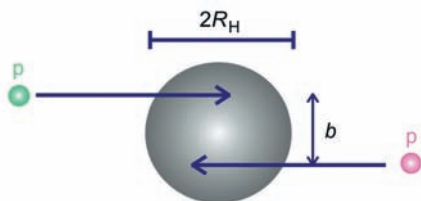
**ATLAS** – A Toroidal LHC Apparatus, detektor pro urychlovač LHC s hmotností 7 000 tun umístěný 100 metrů pod zemí. Jde o multifunkční detektor, který by měl být schopen detekovat mimo jiné Higgsovy bosony. Délka zařízení je 44 metrů. Elektricky nabitě částice vychylují dva magnetické systémy o indukci 2 T a 4 T.

**SPS** – Super Proton Synchrotron, dosažitelná energie 450 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 kvark-gluonové plazma.

**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 zhruba 1 kHz.

**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.

Srážka dvou protonů s vysokou energií může způsobit vznik černé díry. Jednou z klíčových podmínek pro tento proces je nízká hodnota tzv. impaktního parametru (na obrázku je označen  $b$ ). Poloměr černé díry (tzv. Schwarzschildův poloměr) je na obrázku označen  $R_H$ . S. Hossenfelder, Goethe Universität.



Dne 10. 9. 2008 došlo poblíž Ženevy k jedné z nejvýznamnějších vědeckých událostí tohoto roku. Na urychlovači LHC v částicové laboratoři CERN se uskutečnil první oběh protonů okolo celého prstence v obou směrech. Protony byly injektovány z urychlovače SPS, který tvoří předchozí urychlovací stupeň. LHC by měl urychlit protony na energii 14 TeV v těžišťové soustavě. Krátce po spuštění musel být urychlovač odstaven kvůli závadě na supravodivém magnetu. Urychlovač byl opětovně spuštěn v listopadu 2009. Nový urychlovač by měl otevřít cestu k nové fyzice a prověřit současný standardní model v částicové fyzice. Mezi jedno z nejdiskutovanějších témat patří produkce černých děr při vysokoenergetických srážkách protonů.

### Mikroskopické černé díry

Již několik desetiletí máme celkem dobrou představu o tom, jak vznikají hvězdné černé díry ve vesmíru. Může za to gravitační kolaps hvězdy, která již vyčerpala své zásoby paliva a zhroutí se sama do sebe pod vlivem vlastní gravitace. Při tomto procesu dojde ke stlačení velkého množství hmoty do malého objemu. Většina informací o mateřské hvězdě se ocitne zcela mimo dosah pozorovatelů, kteří se nacházejí vně tzv. horizontu událostí. Černá díra poskytne pozorovateli pouze informaci o své hmotnosti, momentu hybnosti a elektrickém náboji. Myšlenky vedoucí k možnosti vzniku mikroskopických černých děr na urychlovači LHC jsou následující: vysokoenergetické částice, jejichž rozměr je zkrácen ve směru pohybu gama faktorem (pro protony na LHC je  $\gamma = 7\,460$ ), se v okamžiku těsně před srážkou dostanou tak blízko sebe, že jejich hmota, ale hlavně kinetická energie je dostatečná pro jejich uvěznění pod horizontem událostí. Taková černá díra bude unikátní z několika důvodů. Již z podstaty jejího vytvoření bude mít velký elektrický náboj vzhledem ke své hmotnosti, což dává možnost vzniku „nahé singularity“. Dále budeme moci přímo pozorovat její vyřazování a závěr života. Ne všechna dostupná energie se využije na tvorbu černé díry. V průběhu jejího vzniku dochází k silnému vyřazování gravitačních vln, které dosud nebyly přímo pozorovány. Tímto procesem může černá díra ztratit až 15 % energie. Měřením „chybějí-



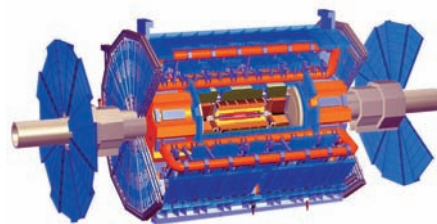
cí“ energie se dozvíme více o gravitačním vyzařování v průběhu tvorby černé díry.

Tento model vzniku černé díry má ale hned několik problémů. Prvním z nich jsou Heisenbergovy relace neurčitosti. Jinými slovy hybnost částic musí být natolik vysoká, aby částice mohly být lokalizovány uvnitř oblasti o rozměru Schwarzschildova poloměru. Ten vychází pro protony o energii 14 TeV asi  $10^{-50}$  m za předpokladu že černá díra je nerotující, bez náboje, a že gravitace působí stejně i na malých škálách. Odpovídající hybnost pak vychází zcela mimo naše možnosti. Nutno podotknout, že zde se již nemůžeme spolehnout na zákony dosud známé kvantové teorie a už vůbec ne na zákony obecné teorie relativity, která dobře popisuje svět, avšak na opačném konci rozměrové škály. Zde se uplatní zákony kvantové teorie gravitace, které nyní stále nemáme k dispozici. Dalším problémem je skutečnost, že energie (hmotnost) černé díry by měla být vždy vyšší, než Planckova energie (hmotnost), která má hodnotu  $10^{19}$  GeV – tedy opět mimo rozsah energií dosažitelných na urychlovači LHC. Tato mezní hodnota má spojitost s vypařováním černých děr. Podle teorie Stephena Hawkinga emitují černé díry částice o energii nepřímo úměrné rozměru horizontu událostí. Pokud by byl rozměr horizontu příliš malý (tedy hmotnost černé díry příliš malá) jediná emitovaná částice by tak měla vyšší energii, než bylo nutné k vytvoření černé díry.

Přesto však existují modely, které připouštějí vznik černých děr i na energetických škálách, které poskytne urychlovač LHC. Výše uvedené problémy přestanou existovat, pokud bude mít Planckova energie (analogicky i ostatní Planckovy škály) mnohem nižší hodnotu. Fyzikové si našli cestu jak toho dosáhnout – zavedením dalších dimenzí prostoru, které existují pouze na mikroskopické úrovni. Ve vícerozměrném prostoru má gravitační konstanta i Planckova energie vyšší hodnotu, než ve trojrozměrném prostoru. Kromě počtu dimenzí má vliv na velikost těchto fundamentálních konstant také topologie přidavných dimenzí. Pro desetidimenzionální časoprostor se hodnota Planckovy energie pohybuje okolo 1 TeV. Za těchto podmínek by při protonových srážkách na LHC vznikala každou sekundu přibližně jedna černá díra.

## Hledání černých děr

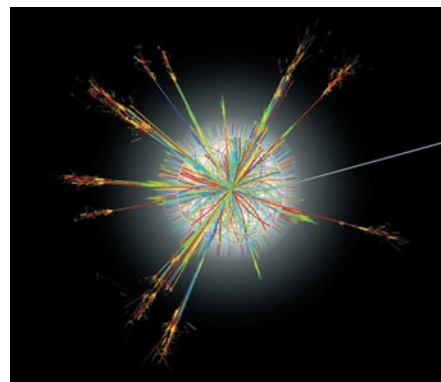
Černá díra bude snadno detekovatelným objektem pro detektory na LHC díky jejímu intenzivnímu vypařování. Očekává se, že podíl

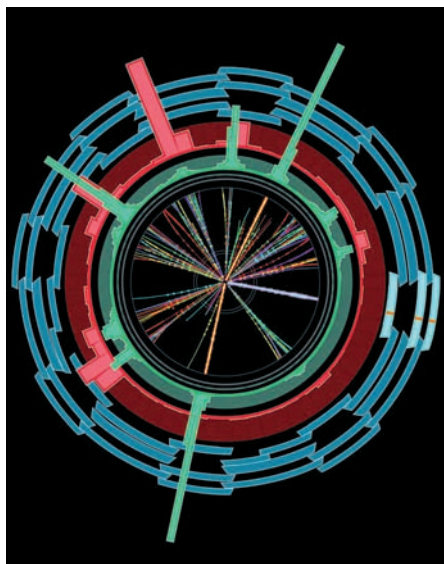


Detektor ATLAS na urychlovači LHC. CERN.

**Hadrony** – částice složené z kvarků. Dělíme je na mezony složené z kvarku a antikvarku a baryony složené ze tří kvarků různých barev. Název je odvozeninou z řeckého hadros (silný, těžký). K nejznámějším mezonům patří piony, k nejznámějším baryonům neutron a proton.

Obrázek z počítačové simulace. Černá díra v závěru svého života emituje částice s vysokou energií. Kvarková složka způsobuje produkci charakteristických hadronových výtrysků. CERN/ATLAS.





Obrázek z počítačové simulace vypaření černé díry na detektoru ATLAS. CERN/ATLAS.

hadronové složky k leptonové bude 5:1 a hadronové složky k fotonové 100:1. Vysokoenergetické částice, které černá díra emituje v konečné fázi svého života mají přibližně rovnoměrné rozdělení směru hybnosti – tedy pokud černá díra příliš nerotuje. To znamená že částice jsou emitovány do každého směru se stejnou pravděpodobností. Pokud však při protonových srážkách na LHC nedojde ke vzniku černé díry, následně vzniklé částice budou mít zřídka kdy vysokou hodnotu transversální hybnosti (tedy hybnosti kolmé k hybnosti primárních protonů). Předpokládá se, že počet částic s velkou transversální hybností by měl velmi strmě narůstat od určitého energetického prahu srážených protonů. Toto by byl nezaměnitelný důkaz o existenci mikroskopické černé díry.

### Konec částicové fyziky?

Produkce černých děr při vysokoenergetických srážkách nám může paradoxně navždy uzavřít dveře ke zkoumání mikrosvěta. Čím menší rozměrové škály chceme zkoumat, tím energetičtější částice musíme srážet. Pokud by však došlo k produkci černých děr již na škále několika TeV, nemá velký smysl v budoucnu stavět větší urychlovače, neboť větší energie částice znamená větší černou díru, kde informace o tom, co se děje při srážce jsou navždy skryty pod horizontem událostí.

■ Miroslav Havránek, 10. 10. 2008, AB 42/2008

## Mezinárodní lineární kolider

Pod zkratkou ILC (International Linear Collider, Mezinárodní lineární kolider) se ukrývá mimořádně zajímavý projekt, i když teprve ve fázi plánování a vývoje. Jeho úkolem bude obsáhnout i ty oblasti subjaderného výzkumu, kde jsou možnosti kruhových urychlovačů omezeny.

### Proč lineární urychlovač?

Částice urychlované po zakřivené trajektorii na rychlosti blízké rychlosti světla emitují synchrotronní záření. Energie tohoto záření je přímo úměrná čtvrté mocnině jejich rychlosti, nepřímo úměrná čtvrté mocnině jejich hmotnosti a kvadrátu poloměru dráhy. Od určité rychlosti je tedy veškerá další dodaná energie vyzářena a nepřispívá k dalšímu urychlování částice. Synchrotronní záření se tak u kruhových urychlovačů stalo limitujícím faktorem urychlování lehkých nabitých částic, jakými jsou elektrony či pozitrony. Konkrétním příkladem je urychlovač LEP (Large Electron-Positron collider, Velký elektron-pozitronový kolider), který v letech 1989–2000 pracoval ve středisku CERN a v jehož tunelech se nyní nachází urychlovač LHC (Large Hadron Collider).

Lineární urychlovače jako ILC nejsou z principu tímto faktorem ovlivňovány. Další výhodou ILC jsou samy částice (elektrony a pozitrony), které budou s jeho pomocí urychlovány a následně sráženy. Patří totiž do rodiny leptonů, které jsou bez vnitřní struktury. Tento fakt činí následnou analýzu dat mnohem snazší, rychlejší a čistší, neboť v porovnání s výstupy hadronových urychlovačů nebudou obsahovat takové množství šumu a pozadí.

### Koncept ILC

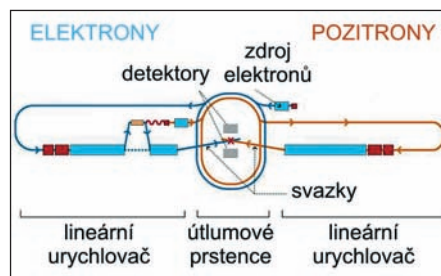
Celý koncept ILC je v podstatě velmi jednoduchý. Jedná se o dva protilehlé lineární urychlovače s detektorem situovaným v místě srážky. Předpokládá se, že částice budou při srážce dosahovat energií od 250 GeV do 500 GeV. Výsledná energie srážky se tedy bude pohybovat mezi 500 GeV až 1 TeV. Přesná délka urychlovače závisí na klidové hmotnosti Higgsova bosonu, která bude teprve určena na LHC. V aktuálním návrhu se počítá s délkou kolem třiceti kilometrů, což odpovídá horní hranici pro energii srážky. Elektrony uvolněné pomocí laserového paprsku z galium-arsenidového terčiku budou předurých-

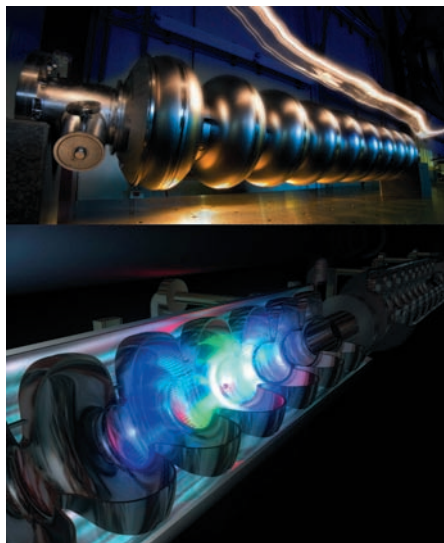
**Kolider** – urychlovač, ve kterém jsou dva urychlené svazky částic nasměrovány proti sobě. Jiným užívaným systémem je namíření svazku na nepohyblivý terč.

**Klystron** – zařízení využívané jako zesilovač mikrovlnných a radiových frekvencí. Energii získávají vlny ze svazku elektronů emitovaných z tepelné katody. Přístroj vynalezli bratři Russell a Sigurd Varian v roce 1937.

**Higgsovy částice** – částice, které se objevují ve sjednocené teorii elektromagnetické a slabé interakce (tzv. elektroslabé interakce) standardního modelu. Částice zde zajišťují nenulovou hmotnost intermedialních částic interakce a způsobují narušení symetrie elektroslabé interakce při energiích nižších než 100 GeV. Částice jsou pojmenovány podle skotského fyzika Petera Higgse. Tento mechanismus nazýváme Higgsov mechanismus a je aplikovatelný i na jiné částice.

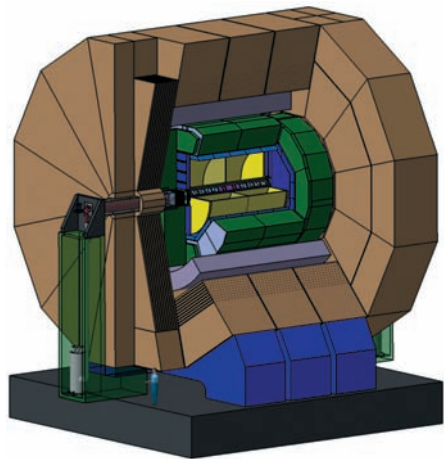
Základní schéma ILC.





Urychlovací devítikomorová dutina vyvíjená v DESY. Celková délka dutiny je přibližně 1 metr, urychlovací pole má hodnotu 35 MV/m. DESY.

Detektor ILD pro projektovaný urychlovač ILC.



leny v pomocném lineárním urychlovači na energii přibližně 5 GeV. Poté poputují do skladovacího prstence. Díky ztrátě energie přeměnou v synchrotronní záření dojde ke zmenšení objemu shluku částic a zvýšení hustoty jeho náboje. Po další kompresi a urychlení na 15 GeV shluk poputuje do hlavního urychlovače, kde získá konečnou energii a nakonec se srazí s protiletícím shlukem pozitronů.

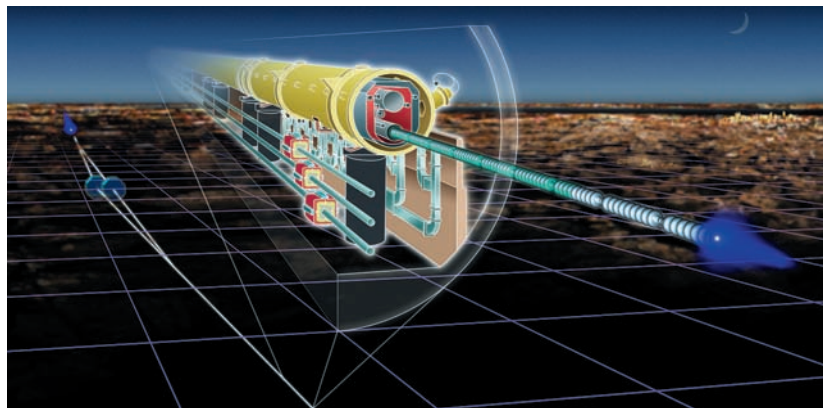
Pozitrony budou získávány srážkami fotonů vyzářených elektrony s energií 150 GeV, odkloněnými ze své dráhy (viz synchrotronní záření), s rotujícím terčíkem ze slitiny titanu. Ze vzniklých elektron-pozitronových párů budou pozitrony odděleny magnetickým polem a urychleny.

Urychlovač ILC bude schopen pracovat také jako tzv. fotonový kolider. Na shluk částic nacházejících se těsně před interakčním místem bude zacílen intenzivní laserový paprsek. Elektrony předají téměř všechnu svou energii rozptýleným fotonům a ty se budou pohybovat směrem k místu interakce.

Samotné urychlování částic se bude realizovat pomocí technologie SCRF (Super Conducting Radio Frequency). Základními stavebními jednotkami SCRF jsou supravodivé dutiny vyrobené z niobu, který se při ochlazení pod teplotu 9,2 K stává supravodičem. Elektromagnetické pole, které má dosáhnout intenzity elektrické složky až 35 MV/m, bude generováno v klystronech a dutiny umožní jeho dlouhodobé, téměř bezztrátové udržení. Ke stavbě urychlovače bude takových dutin potřeba 16 000 a na jejich výrobu se spotřebuje 500 tun niobu. Každá, přibližně metr dlouhá dutina bude složena z devíti komor. Momentálně se vybírá nejvhodnější design dutin a probíhá jejich testování. Stejnou technologii supravodivých rezonančních dutin k urychlení elektronů bude využívat rentgenový laser na volných elektronech XFEL (X-Ray Free-Electron Laser), jehož stavba započne v roce 2009 v německém centru DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron). Délka urychlovací části laseru XFEL je 3,4 km. Samotný provoz by měl být zahájen v roce 2013.

Kvůli vyloučení vad a porovnávání výsledků budou na ILC hned dvě detekční zařízení. Existují celkem čtyři návrhy detektorů s vysokými rozlišovacími schopnostmi: SiD (Silicon Detektor), LDC (Large Detector Concept), GLD (Global Large Detector) a tzv. Čtvrtý koncept. SiD je kompletně založen na polovodičových detektorech, které budou sloužit např. k určení trajektorií částic či kalorimetrii. V poslední době

spolupráce GLD a LDC vyústila v návrh ILD (International Large Detektor) sestávajícího z křemíkového pixelového detektoru a velkého plynového dráhového detektoru. Plynový detektor je založen na ionizaci molekul plynu prolétávajícími částicemi. Uvolněné elektrony pak vlivem elektromagnetického pole putují k vodičům drátové komory, kde produkují signál v podobě elektrického proudu. Čtvrtý detektor se od předchozích liší v implementaci tzv. kompenzační kalorimetrie, která slouží k vyvážení odezvy kalorimetru na různé částice.



*Umělecká vize urychlovače ILC.*

## ILC a fyzika

V možnostech LHC je určit hmotnost Higgsova bosonu a způsob, jakým interaguje s ostatními částicemi.

Protony užívané na LHC jsou však částice s vnitřní strukturou. Ve výstupních datech experimentu bude díky tomu obsaženo množství informací týkajících se nezajímavých fyzikálních procesů. ILC se tak jeví jako vhodnější kandidát k hlubšímu prozkoumání objevů LHC. Dovolí vědcům opět prověřit standardní model elementárních částic nebo proměřit další důležité vlastnosti Higgsova bosonu. Urychlovač ILC může být použit i ke zkoumání supersymetrických částic, pokud bude jejich existence na LHC prokázána. Supersymetrické částice mohou být jedním z klíčů k objasnění původu temné hmoty.

O konečném umístění urychlovače zatím nebylo definitivně rozhodnuto. Uvažuje se o středisku CERN u Ženevy; Fermilabu v Illinois (momentálně preferovaný kandidát) a Japonsku.

- Zuzana Vidláková, 4. 4. 2008, AB 15/2008

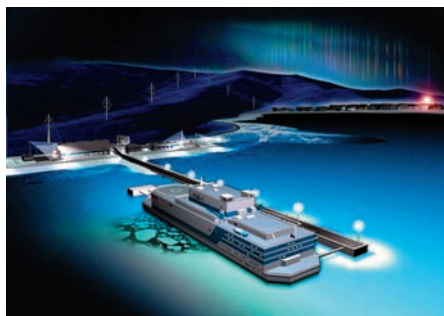
## První plovoucí jaderná elektrárna je na cestě



Průřez elektrárnou. 1. Obytná zóna, 2. Operační místnost, 3. Reaktory, 4. Parní turbíny, 5. Zóna vytváření energie, 6. Zóna pro uskladnění jaderného odpadu.

**Rosatom** – ruská agentura pro jadernou energii, hlavní regulační instituce ruské jaderné energetiky. Dohlíží na Atomenergoprom, který sdružuje 31 společností výrobců jaderných zbraní, výzkumných institucí a agentur pro jadernou bezpečnost. Ředitelství je v Moskvě. Původně šlo o Ministerstvo pro atomovou energii Ruské federace (Minatom) založené v roce 1992. V roce 2004 bylo reorganizováno na Federální agenturu pro atomovou energii. V roce 2007 byl Minatom transformován na státní akciovou společnost Rosatom.

Návrh plovoucí jaderné elektrárny. Rosatom.



Vytvořením první plovoucí jaderné elektrárny se udělá první krok ve vývoji malých jaderných zdrojů energie, schopných poskytovat trvalý přísun energie za specifických podmínek. Elektrárny by se měly stát nenahraditelné v oblastech, kde není možné použít jiný zdroj energie.

### PARAMETRY ELEKTRÁRNY

délka	144 m
šířka	30 m
výtlač	21 500 t
posádka	69 osob
reaktor	KLT 40S
výkon reaktorů (2 reaktory KLT-40S)	70 MW elektrické energie*
	300 MW tepla*
	240 000 m <sup>3</sup> pitné vody denně*
životnost plavidla	38 let
životnost reaktorů	12 let
výdrž paliva	3 roky

\*) dostačuje pro město s 200 tisíci obyvateli.

### O projektu

Konstrukce první takové plovoucí jaderné elektrárny (FNPP) nazvané Akademik Lomonosov byla odstartována 17. května 2009 v Petrohradě. Elektrárna představuje 144 metrů dlouhé plavidlo bez vlastního

pohonu. Měla by dodávat elektřinu a teplo ve slabě rozvinutých a nepřístupných oblastech ležících v blízkosti moře, kde není jiná možnost zásobování energií. Měla by také sloužit k přeměně mořské vody na pitnou. Její provoz by měl ročně ušetřit až 200 tisíc tun uhlí a 100 tisíc tun ropy, což je vzhledem k stále rostoucím cenám a stále snižujícím se zásobám fosilních paliv veliký přínos.

Ambiciózní projekt Rosatomu byl v Rusku představen v roce 2007 v továrně SevMaš v přístavu Archangelsk. Práce byly brzy pozastaveny díky obrovským nákladům. Dne 17. května projekt znovu spustil Baltijskij zavod, OAO v Petrohradě a jeho dokončení je plánováno na rok 2012. Plavidlo ponese dva jaderné reaktory KLT-40S vyvinuté z reaktorů v jaderných ponorkách a ledoborcích, každý o výkonu 35 megawatt. Výměna palivových článků bude probíhat každé 3 roky. Životnost elektrárny je odhadována až na 38 let, přičemž každých 12 let bude čekat její reaktory generální oprava.

Jednou z největších výhod FNPP je skutečnost, že elektrárna může být dopravena na místo, kde je po elektrické energii velká poptávka, a zlepšit tak energetickou situaci místního obyvatelstva. Plavidla na podobné technologii jsou v Rusku používána již od devadesátých let například na jaderných ponorkách a ledoborcích pronikajících do částí země daleko na východě zanechaných bez elektřiny. Ruská vláda chce plovoucí jadernou elektrárnu využívat ve východní oblasti, první bude postavena u města Viljučinsk na Kamčatce, ale v budoucnosti plánuje zásobovat elektřinou i další odlehlé oblasti (Jakutsko a poloostrovy Čukotku, Kolu, Jamal a Tajmýr). Do roku 2015 (střízlivější odhady mluví o roku 2020) mají Rusové v úmyslu postavit sedm takových elektráren, z nichž každá bude stát kolem 10 miliard rublů (něco přes 6 miliard korun). Chtěli by také tato plavidla vyvážet. Zájem již má více než 20 zemí, mezi nimi Indie, Čína, Indonésie a africké nebo latinskoamerické státy.



Plán rozmístění elektráren. První dvě by měly být u měst Viljučinsk (Kamčatka) a Pevek (Čukotka), další potom na poloostrovech Kola, Jamal, Tajmýr a v Jakutsku.

**FNPP** – Floating Nuclear Power Plant, ruský projekt plovoucích jaderných elektráren, které budou zásobovat elektrickou energií, pitnou vodou a teplem nepřístupné přímořské oblasti v Rusku. Projekt byl odstartován v roce 2007 a první taková elektrárna by měla být v provozu kolem roku 2012.

**MH-1A** – tlakový jaderný reaktor vytvořený v šedesátých letech v USA pro potřeby armády. Zkratka MH pochází z anglického „mobile, high power“. Šlo o tlakový jaderný reaktor o výkonu 10 MW, který byl v roce 1961 namontován na americkou válečnou loď Sturgis.



*MH-1A Sturgis, první plovoucí jaderná elektrárna amerického námořnictva.*

### **A co bezpečnost?**

Podle Rosatomu jsou plovoucí jaderné elektrárny z ekologického hlediska bezpečné a leží v nich budoucnost průmyslu elektrické energie. Problémů a otazníků kolem bezpečnosti provozu je však celá řada. Diskutabilní je ochrana plavidla proti teroristickým útokům. Projekt počítá s využitím mořské vody k chlazení, s čímž souvisí kontaminace oceánu. Bezpečnost provozu a ruská historie skrývání jakýchkoliv nehod na jaderných ponorkách či elektrárnách dělá vrásky na čele bezpečnostních expertů. Je známo, že minimálně dvakrát hrozila na ruských jaderných ledoborcích havárie poté, co selhal právě chladicí systém. Případná havárie by měla rozsáhlé důsledky na světové oceány.

### **Závěr**

První plovoucí elektrárnou na světě byl tlakový jaderný reaktor s názvem MH-1A vytvořený v 60. letech v USA pro potřeby americké armády. Rusové chtějí nyní své elektrárny vyrábět ve větším počtu pro komerční účely. Přejme jim úspěch a doufejme, že plovoucí elektrárny budou bezpečné.

■ Jiřina Scholtzová, 28. 6. 2009, AB 25/2009



## Laser HiPER – další šance, jak získat fúzní energii

HiPER (High Power laser Energy Research) je navrhovaný evropský výzkum využití velmi výkonného laseru, zejména v oblasti laserem udržované fúze jako budoucího zdroje energie. HiPER je navržený k tomu, aby rozšířil pole vědy dalšími mnoha směry včetně studií extrémních materiálů, astrofyziky v laboratoři, miniaturizace urychlovačů částic a širokého okruhu základního výzkumu fyziky.

Fúzní energie je velice atraktivní, čistý zdroj energie používající jako zdroj paliva pouze vodík. Při tomto procesu se nevytváří žádné skleníkové plyny ani radioaktivní odpad s dlouhou dobou života. První výsledky experimentů na nyní stavěném superlaseru NIF (Nation Ignition Facility) v Kalifornii jsou očekávány mezi lety 2010 a 2012. V té samé době by se mělo začít stavět zařízení HiPER. Primární laserové svazky budou generovány komerčními pevnolátkovými lasery s účinností v desítkách procent. V porovnání s NIFem by tak mělo dosáhnout mnohem vyšší opakovací frekvence a celkové efektivity. V současnosti je nejdůležitější posunout se od vědeckých experimentů k výrobě komerčního reaktoru. HiPER snad poskytne důležitý krok na této cestě.

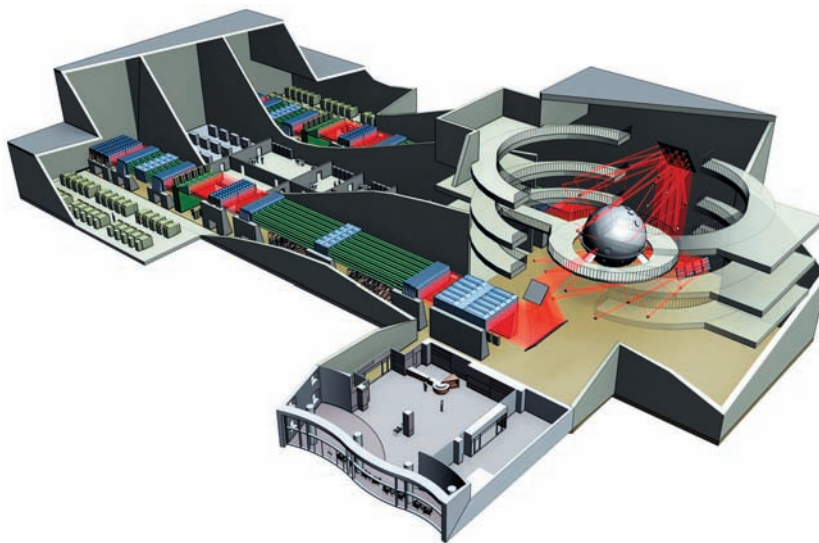
HiPER je čerstvě zahájený evropský projekt. Měl by pomoci k výrobě čisté energie za použití ohromných laserů velikosti fotbalového stadionu. Laserové zařízení by mělo získávat energii tím, že silně zkoncentruje atomy vodíku. Je to proces velmi podobný tomu, který probíhá ve Slunci. V Evropě již probíhá jiný fúzní experiment, ITER, který se ke stejnému cíli snaží dostat cestou magnetické komprese izotopů vodíku.

Výzva k realizaci řízené fúzní energie je značná a řešení uniká vědcům a technikům již přes

**Fúze** – způsob získávání energie slučováním lehkých atomárních jader. Tento proces probíhá přirozenou cestou ve hvězdách. V pozemských podmínkách je základním problémem udržení plazmatu na potřebnou dobu. Může jít o tzv. inerciální fúzi (například iniciovanou laserem), kdy terčík na krátkou dobu drží pohromadě setrvačností nebo o fúzi udržovanou v magnetickém poli (tokamak, stelarátor, pinč).

**ITER** – International Thermonuclear Experimental Reactor, Mezinárodní termojaderný pokusný reaktor. Předpokládaný výkon reaktoru je 500 MW, stavba započne v blízkosti francouzského Cadarache v roce 2009, dokončena by měla být v roce 2016.

Experimentální zařízení HiPER by mělo být dostavěno ke konci příštího desetiletí.



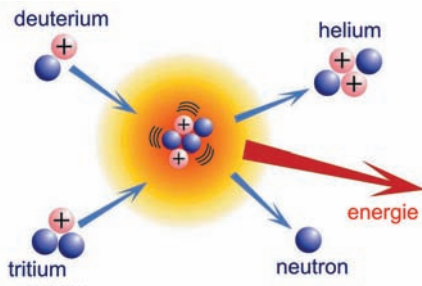


Princip laserem řízené fúze.

**Štěpení** – způsob získávání energie štěpením těžkých atomárních jader. Je základem současných atomových elektráren, ve kterých jsou jádra štěpena nalétávajícími neutrony. Produktem rozpadu jsou další neutrony, které štěpí další jádra (dojde k tzv. řetězové reakci). První štěpný reaktor postavil Enrico Fermi v roce 1946 v Chicagu.

**Deuterium** – těžký vodík, v jádře má jeden proton a jeden neutron. V průměru na Zemi připadá na 7 000 atomů normálního vodíku jeden atom deuteria. Jde o stabilní izotop vodíku.

Základní princip termojaderné fúze



50 let. Klíčovými hráči v projektu jsou Velká Británie, Česká republika a Francie. Princip experimentu HiPER spočívá v tom, že vysoce výkonný laserový puls nejprve stlačí malé množství těžkého vodíku, tzv. „pelety“ na hustotu až třicetkrát vyšší, než je hustota olova, a dalším pulsem laseru zvýší teplotu stlačené pelety až na 100 milionů stupňů Celsia. Za těchto podmínek by již měla probíhat fúze vodíku na helium a podle teorie by mělo být možné již z tohoto malého množství látky získat ohromné množství energie. Jeden z vedoucích pracovníků projektu, prof. Dunne, připodobňuje tento princip ke spalovacímu motoru, kde je nejprve před expanzí vstříkované palivo stlačeno válci, podobně jako zde bude palivo, tj. těžký vodík, stlačeno velmi výkonným laserem. Jako „svíčka“ k zapálení směsi zde bude sloužit další výkonný laserový puls. Po využití vzniklé energie se celý proces zopakuje znovu a znovu, stejně jako v motoru auta.

Přímým předchůdcem HiPERu je laser PETAL (PETawatt Aquitaine Laser) postavený v jihozápadním francouzském regionu Akvitánii. Slovo petal znamená v angličtině okvětní lístek. První důkazy, že je tato cesta využitelná, se očekávají již během nejbližších několika let na dvou ohromných laserových zařízeních, které jsou nyní téměř před dokončením. Superlaser NIF (Nation Ignition Facility) se staví v Kalifornii a bude dokončen v roce 2009. Dalším zařízením je obří Laser Megajoule ve francouzském Bordeaux. Řada zúčastněných vědců doufá, že již na těchto laserových zařízeních by mohly být realizovány dílčí experimenty jako články řetězce, na jehož konci bude reakce, z níž bude značný zisk čisté fúzní energie. Úloha HiPERu bude v samotné technické realizaci pospojování těchto jednotlivých dílčích poznatků do očekávaného nepřetržitého cyklu, který povede ke komerčnímu využití fúzní energie.

Na začátku října roku 2008 byly podepsány oficiální dokumenty umožňující financování a tedy faktický start prvních přípravných fází projektu HiPER. Pokud vše půjde dobře, bude vzápětí následovat další fáze, která povede k sestavení samotného prototypu. Časování není nepodobné s plány tokamaku ITER v Cadarache ve Francii. Všichni zúčastnění, očekávají alespoň od jednoho z těchto zařízení konkrétnější odpovědi na otázky týkající se komerčního využití fúzní energie, tohoto Svatého grálu energetických zdrojů.

■ David Břeň, 14. 11. 2008, AB 47/2008

## ISS – Mezinárodní vesmírná stanice

Mezinárodní vesmírná stanice je obrovským mezinárodním technickým a politickým úspěchem. Vzniká za spolupráce pěti vesmírných agentur – NASA, Roskosmos, ESA, JAXA a CSA – a při účasti patnácti států z celého světa.

### Historie

Mezinárodní vesmírná stanice hraje důležitou roli ve výzkumu podmínek pro život člověka ve vesmíru. Poznatky přinesené výzkumem provedeným na ISS (International Space Station, Mezinárodní kosmická stanice) jsou a budou využívány jak v mnoha různých vědních odvětvích, tak k získání poznatků o vlivu dlouhodobějšího mimozemského pobytu na lidský organizmus. Tyto vědomosti by měly zlepšit život na naší planetě a možná pomoci pootevřít dveře k cestám člověka na planety jiné.

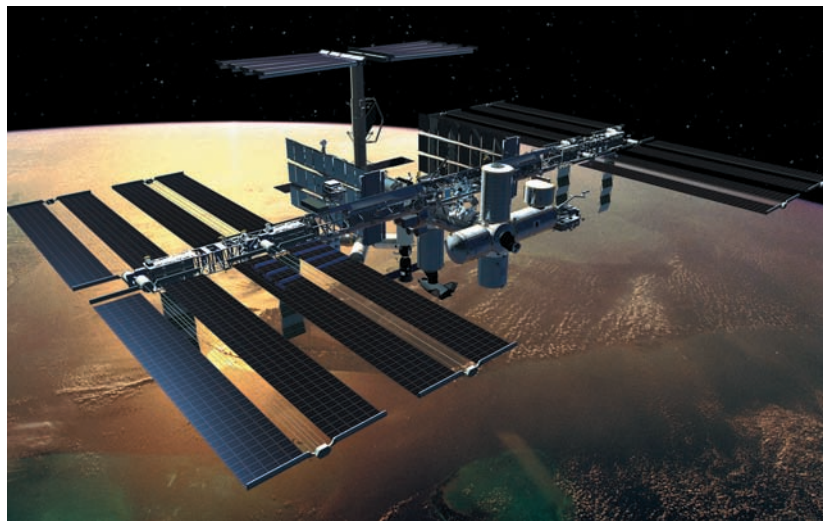
Spojené státy plánovaly stavbu vesmírné stanice jako odpověď na sovětský Saljut a sovětsko-ruský Mir již od roku 1980. Pád Sovětského svazu v roce 1991 způsobil, že Freedom, jak se měla stanice nazývat, nikdy neopustila kreslicí stůl návrhářů NASA. Jedinou orbitální stanicí USA tak zůstal Skylab provozovaný v letech 1973 až 1979. Rozpad Sovětského svazu uvolnil napjatou atmosféru a otevřel cestu k navazování a zlepšování diplomatických vztahů. Jedním z gest se staly i společné plány světových velmocí na vybudování již mezinárodní, vesmírné stanice.

### Současnost

Z Mezinárodní vesmírné stanice se stává ojedinělý komplex laboratoří a výzkumných stanovišť s více než čtyřikrát větším prostorem a šede-

**NASA** – *National Aeronautics and Space Administration, americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, založen byl 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.*

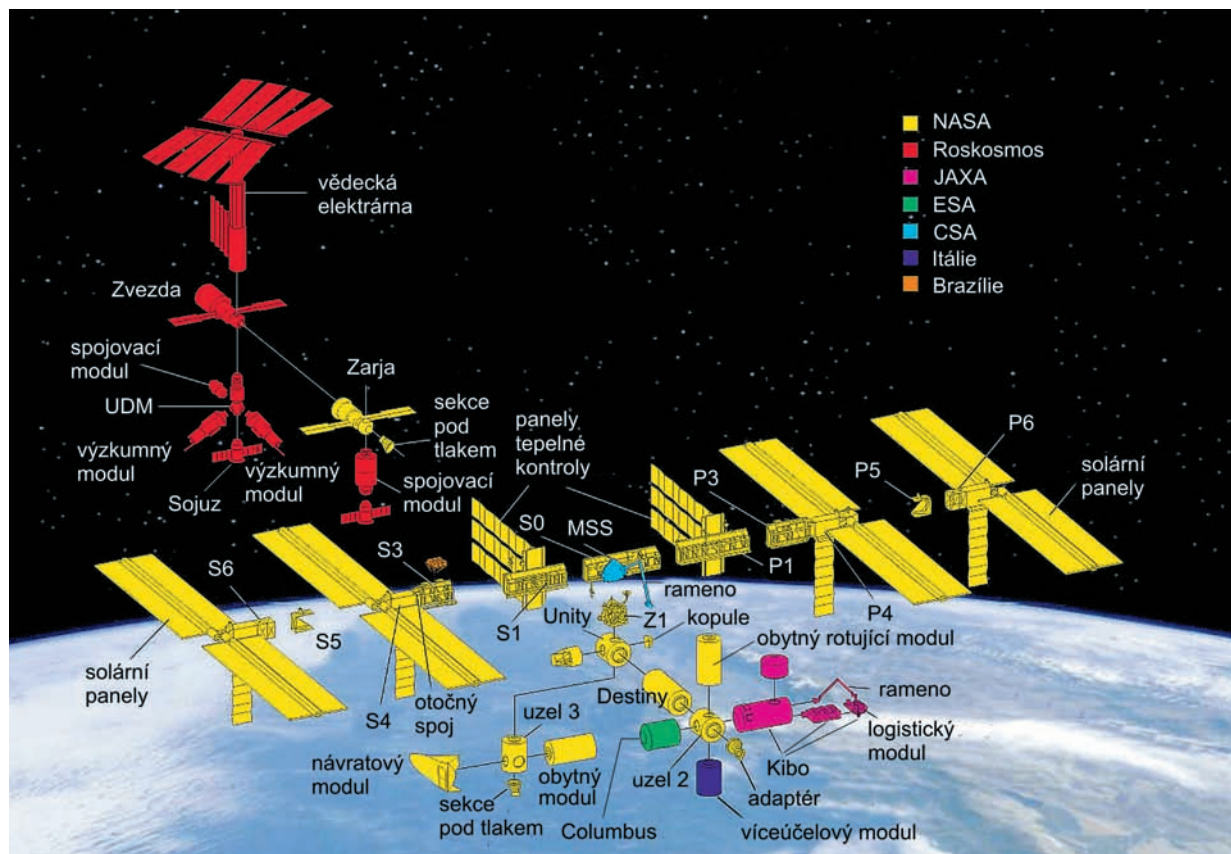
**Roskosmos** – *ruská kosmická agentura, dříve Ruská letecká a vesmírná agentura je vládní agentura zodpovědná za ruský vesmírný program a letecký výzkum. Ruská kosmická agentura byla založena v Sovětském svazu v druhé polovině padesátých let. Vyvinula první balistickou raketu, umělou družici Země, vyslala prvního kosmonauta na oběžnou dráhu, provedla první průzkum Měsíce, Venuše a Marsu.*



**ESA** – European Space Agency, Evropská kosmická agentura. ESA spojuje úsilí 18 evropských zemí na poli kosmického výzkumu. Centrální sídlo je v Paříži, pobočky 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.

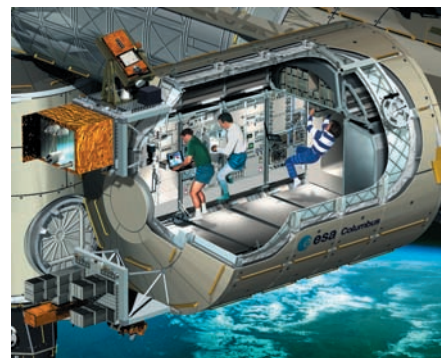
sákrát vyšším zdrojem elektrické energie pro experimenty, než měla vesmírná stanice Mir. Výzkumné procesy by měly probíhat uvnitř i vně pěti modulů (Destiny, Columbus, Kibo, ELC a MLM) a měly by se převážně orientovat na biologii, fyziku, astronomii a meteorologii. ISS je zásobována energií z fotovoltaických panelů a zajišťuje veškeré podmínky pro dlouhodobý pobyt člověka ve vesmíru.

V roce 2008 vynesl na Mezinárodní kosmickou stanici raketoplán Atlantis evropský modul Columbus. Je výsledkem desetileté práce špičkových odborníků, jeho vývoj stál mnoho milionů euro. Uvnitř je pět skříňových pozic pro experimenty. Každá pozice má velikost telefonní budky a skýtá místo pro jeden laboratorní experiment. Hotová



PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍ MODULŮ ISS		
Agentura	Modul	Funkce
CSA	MSS	Mobilní servisní systém, jehož nejvýznamnější částí je Canadarm – klíčový prvek pro rozvoj a výstavbu stanice. Jedná se o manipulační rameno s nosností 119 tun.
ESA	Columbus	Laboratoř specializovaná na biologický výzkum.
Itálie	MLPM	Víceúčelové transportní přetlakové moduly (Leonardo, Raffaello a Donatello), s obytným prostorem a skříněmi většinou používanými pro umístění vědeckých zařízení.
JAXA	Kibo	Japonský laboratorní komplex sestávající se z několika částí, mezi kterými je plošina pro umístění experimentů do volného prostoru, robotická ramena a samozřejmě i obyvatelnou část pro řízení a kontrolu experimentů.
Roskosmos	Zvezda	Servisní modul, který byl základním kamenem pro přítomnost lidské posádky.
	DCM	Dokovací modul
	MLM	Víceúčelový laboratorní modul.
NASA	Destiny	Laboratorní komplex.
	ITS	Nosné příhradové konstrukce, nesoucí různá zařízení jako solární panely, či termoregulační radiatory.
	Unity	Propojovací uzly sloužící k připojení dalších částí stanice
	Harmony	Propojovací uzly sloužící k připojení dalších částí stanice

laboratoř Columbus byla testována v Německu. Slouží především jako laboratoř pro výzkum vlivu prostředí s nízkou gravitací na kapaliny (sedimentace, difúze, tvorba krystalů) a lidskou fyziologii (procesy stárnutí, ochabování svalů, výzkum osteoporózy, atd.). Laboratoř také obsahuje v jedné skříněové pozici experiment Biolab, což je zařízení pro výzkum mikroorganismů, buněk, tkání, kultur virů, malých rostlin a bezobratlých živočichů.

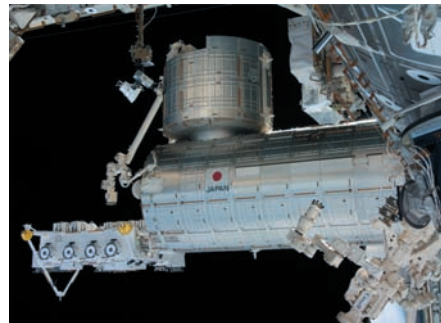


Evropský modul Columbus.

**JAXA** – Japan Aerospace eXploration Agency, japonská kosmická agentura, která vznikla v roce 2003 sloučením tří institucí: ISAS (Institute of Space and Astronautical Science), NAL (the 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.

**CSA** – Canadian Space Agency, kosmická agentura existující od roku 1989. Agentura provozuje několik družic pro pozorování Země (RADARSAT, SCISAT), komunikační družice (MSAT, ANIKA) a vědecké družice (například CASSOPE a MOST).

Japonský modul Kibo.





Vykládání amerického modulu *Destiny* z raketoplánu.

Start raketoplánu *Endeavour* s modulem *Kibo*.



Na vnějším obalu jsou, mimo jiné, umístěny hodiny ACES (Atomic Clock Ensemble in Space), nová generace chlazených atomových hodin v prostředí mikrogravitace a detektor SOLAR, který provádí spektrální analýzu slunečního záření (od 17 nm do 100  $\mu\text{m}$ ). Se sběrem dat se počítá po dobu dvou let. Na povrchu *Columbu* je také umístěn detektor ASIM (Atmosphere Space Interaction Monitor), který zkoumá tvorbu blesků v horní atmosféře a ionosféře a van Allenovy radiační pásy. Detektor ASIM také sleduje srážky částic v mezoféře a termosféře. *Columbus* bude prvním ryze evropským příspěvkem do soustavy modulů a první dlouhodobější evropskou vesmírnou laboratoří vůbec. Životnost evropského modulu je plánovaná na deset let.

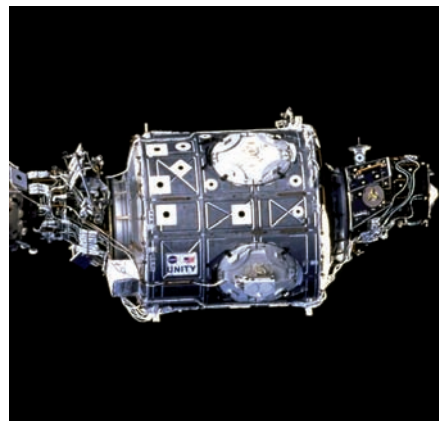
V letech 2008 a 2009 byl při třech misích postupně dopraven na ISS zatím poslední modul *Kibo*. Jde o japonský několikadílný modul, který obsahuje laboratoř, zásobovací jednotku, robotické multifunkční rameno a venkovní plošinu, na které budou probíhat experimenty.

V roce 2010 by měla být ISS, jestliže vše proběhne podle plánu, dokončena. Stanice by měla mít rozpětí 108 metrů při délce 74 metrů. Celkový prostor stanice, který bude pod tlakem, přesahuje 1 000 metrů krychlových. Odhadovaná hmotnost stanice je více než 400 tun a příkon z fotovoltaických panelů dosahuje až 110 kW.

## Laboratoře na ISS

- *Destiny* je první laboratorní modul, který byl umístěn na ISS již roku 2001. Jde o americký modul válcového tvaru s délkou 8,5 metru a průměrem 4,3 metru. V modulu je 23 skříňových pozic pro experimenty. Skříně pro experimenty byly, vzhledem k velké hmotnosti (540 kg jedna), dopravovány do modulu postupně při několika misích. Zajímavostí modulu je mraznička na vzorky, uvnitř které je teplota  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Celková hmotnost modulu je 14 500 kg.
- *Columbus* je evropský laboratorní modul, který byl připojen v únoru 2008 při misi raketoplánu *Atlantis*. Má tvar válce s délkou 7 metrů a průměrem 4,5 metru. Celková hmotnost modulu i s experimenty je 19 800 kg. V modulu je pět velkých skříňových pozic pro experimenty, několik menších a samozřejmě je možné umístit experimenty vně modulu. Na obrázku na straně 138 vidíte řez modulem, na kterém jsou skříňové pozice s experimenty dobře patrné.

- *Kibo* je japonský laboratorní modul, který byl dopraven k Mezinárodní vesmírné stanici ve třech částech – v průběhu letů raketoplánů Endeavour (březen 2008), Discovery (květen 2008) a Endeavour (červenec 2009). Modul je poměrně rozsáhlý, délku má 11,2 metru, průměr základního válce 4,4 metru. Kolmo na základní válec laboratoře je menší válec s náhradními díly a experimenty. Oba válce jsou naplněny vzduchem. Na externí plošinu budou experimenty umístěny pomocí manipulačního ramene.
- *ELC* (Express Logistic Carrier) je brazilsko-americký modul, který bude připojen k Mezinárodní kosmické stanici v roce 2010. Jde o soubor podpůrných prvků pro experimenty a jejich energetické zdroje v otevřeném prostoru.
- *MLM* (Multipurpose Laboratory Module) je ruský víceúčelový laboratorní modul, který by měl být připojen k Mezinárodní kosmické stanici koncem roku 2011. Vynesou ho ruská nosná raketa Proton. V modulu nebude udržována atmosféra. Podpůrná konstrukce pro modul byla nainstalována již v roce 2007.



Uzel Unity.

**Mikrogravitace** – prostředí s velmi nízkou gravitací na oběžné dráze.

**Holografie** – forma záznamu obrazu, která umožňuje zachytit jeho trojrozměrnou strukturu na dvourozměrný obrazový nosič neboli hologram (fotografická deska, binární záznam) a opětovnou rekonstrukci. Na hologram se zaznamenává jak intenzita, tak fáze světla. Teoreticky holografii objevil Dennis Gabor v roce 1948, realizována byla až po objevu laseru.

## Výzkum na ISS

Výzkum na Mezinárodní kosmické stanici lze přibližně rozdělit do těchto kategorií:

- Vliv pobytu na člověka a jeho příprava pro vesmírný průzkum.
- Fyzikální a biologický výzkum v podmínkách mikrogravitace
- Vývoj nových technologií.
- Pozorování Země a výukové aktivity.

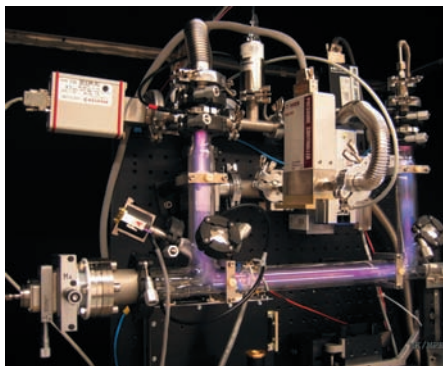
Na ISS probíhají stovky různých projektů zkoumajících výše uvedené oblasti, a proto vybereme jen některé zajímavé případy:

*Pěstování rostlin v kosmu (EPO-Kit C).* Výukový experiment studentů K-12 (označení pro studenty základních a středních škol užívané jak v USA, tak v Austrálii) je zaměřen na pěstování rostlin ze semen bazalky na oběžné dráze. Růstové komory připravili studenti na Zemi. Celé vegetační období rostlin bude neustále monitorováno a výsledný záznam se porovná s růstem rostlin na Zemi. Získané nahrávky se budou používat jako výukový materiál.

*Studie proteinových krystalů.* Roztok proteinů je umístěn do soustavy kapilár, kde difunduje podél kapilár a dochází k rychlé krystalizaci.

Pěstování rostlin v kosmu





Studium krystalů plazmatu.

**Skylab** – první americká vesmírná stanice. Byla provozována v letech 1973 až 1979 a navštívily ji jen tři posádky. Nejdelší pobyt trval tři měsíce. Celková hmotnost byla 75 tun.

**Saljut** – sovětský program orbitálních stanic, který se uskutečnil v letech 1971 až 1991. Celkem bylo vypuštěno 7 těchto orbitálních stanic. Zásobování prováděly lodi Progress nebo Sojuz.

**Mir** – první sovětsko-ruská, trvale obydlená, orbitální stanice. Skládala se z modulů Mir, Kvant (2), Kristal, Spekt, Priroda a DM. Stanice pracovala v letech 1986 až 2001, kdy byla řízeně navedena do atmosféry a zbytky dopadly do Tichého oceánu.

Ukázka interiéru mezinárodní kosmické stanice.



Vzniklé krystaly se zobrazují digitálně pomocí holografické metody. Ta umožňuje automatické snímání i automatické počítačové doostrování. V kosmu mohou proteinové krystaly „vyrůst“ více než na zemi. Analýza těchto krystalů napomáhá vědcům lépe pochopit podstatu proteinů, enzymů a virů. Podobné experimenty se prováděly i v raketoplánech, avšak byly limitovány krátkou dobou letu. Výzkumy tohoto druhu pomáhají nacházet léčebné postupy pro rakovinu, cukrovku, rozednu plic nebo poruchy imunitního systému.

*Studium krystalů plazmatu (PK-3 Plus).* Plazmové krystaly jsou novým druhem látky objeveným v roce 1994. Formují se za striktně stanovených podmínek v prachovém plazmatu, zpravidla v přítomnosti vysokofrekvenčního elektrického pole. Zde se elektricky nabitě prachové částice uspořádávají do makroskopické krystalické mřížky. Tato struktura umožňuje zkoumat vlastnosti kondenzovaných forem hmoty na kinetické úrovni – při základních procesech, jako je například tavení, mohou být sledovány pohyby jednotlivých částic. Na zemi je možné vytvořit jen dvojrozměrné krystaly. V prostředí mikrogravitace lze připravit i velké třírozměrné krystaly a zkoumat vlastnosti těchto výjimečných forem plazmatu, které mohly hrát důležitou roli při samotném vzniku sluneční soustavy. Experiment je již druhou generací pokusů. Jeho předchůdcem byl experiment PKE-Nefedov. V Max Planck Institutu již připravují další experiment PK-4, který bude umístěn na Mezinárodní vesmírné stanici v roce 2010.

*Částicový detektor AMS-02.* Na jednom rameni ISS bude umístěn částicový detektor AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer), je následovníkem staršího detektoru AMS-01 z roku 1998. Jedná se o elektromagnetický kalorimetr (detekuje fotony a elektrony na stejném principu jako detektory na velkých urychlovačích). Čerenkovův detektor a supravodivý magnet. Hmotnost celého zařízení je 6 700 kg. Primárním úkolem přístroje je hledat lehká jádra antihmoty v kosmickém záření a částice temné hmoty. Start raketoplánu s detektorem byl mnohokrát oddálen, přestože jeho vývoj, na němž se podílelo 16 zemí světa a stál více než miliarda dolarů. Většinu prostředků uhradilo Ministerstvo energetiky Spojených států. Po mnoha průtazích přislíbila NASA dopravení detektoru na ISS při úplně posledním letu raketoplánu v červenci 2010.



Datum	Let	Přínos
21. 11. 1998	1A/R	Ruskou nosnou raketou Proton byl vynesena z Bajkonurského kosmodromu první modul ZARJA.
4. 12. 1998	2A	Americký raketoplán Endeavour vynesl modul UNITY sloužící jako propojovací uzel.
27. 5. 1999	2A.1	Raketoplán Discovery dopravil na palubu ISS kolem 1 000 kg zásob a vybavení, čímž připravil zázemí pro první posádku. Během letu byly nainstalovány základní části nákladních jeřábů.
12. 7. 2000	1R	Byl připojen první rýze ruský modul ZVEZDA, který umožňuje ubytování, obsahuje komunikační centrum a provádí korekce kurzu.
2. 11. 2000	2R	První dlouhodobější posádka na palubě ISS.
10. 2. 2001	5A	Byla připojena primární laboratoř DESTINY zajišťující i kontrolu prostředí a ubytoven.
14. 7. 2001	7A	Byl připojen modul QUEST, primární vzduchová uzavěra (přechodová komora) umožňující vstup kosmonautů do vesmíru jak v ruských (Orlan), tak amerických (EMU) skafandrech.
16. 9. 2001	4R	Byl připojen přídavný dokovací modul PIRS pro ruské raketoplány, se vstupní a výstupní komorou pro „kosmické procházky“.
14. 11. 2007	10A	Připojení 2. uzlu HARMONY pro napájení modulů energií. Připojením Harmony k ISS považuje NASA americké jádro stanice za dokončené.
07.02.2008	1E	Připojení laboratoře Columbus.
11.03.2008	1J/A	Připojení 1. části japonského modulu Kibo a SPDM robotického zakončení Canadarm.
31.05.2008	1J	Připojení 2. části japonského modulu Kibo.
15.07.2009	2J/A	Připojení 3. části japonského modulu Kibo.
29.08.2009	17A	Připojení MPLM Leonardo.



Zakládající modul ISS, Zarya.

**Raketoplán** – Space Shuttle (oficiálně Space Transportation System) je americký pilotovaný kosmický raketoplán provozovaný pro lety do vesmíru vládní organizací NASA. Firma Rockwell International, Space Systems Group, nyní Boeing North American, raketoplán vyprojektovala a postavila pět plně provozuschopných exemplářů. Lety jsou řízeny z řídicího střediska v Johnsonově kosmickém středisku v texaském Houstonu. Raketoplán se ukázal jako nepřilíš spolehlivý dopravní prostředek. Jeho lety budou definitivně ukončeny v červenci 2010.

Zvezda, Zarya, Unity.



**Bajkonur** – ruský kosmodrom, ze kterého se v roce 1957 vznesla první umělá družice Země – Sputnik 1 a v roce 1961 startoval první kosmonaut Jurij Alexejevič Gagarin. Po rozpadu Sovětského svazu leží Bajkonur na území nezávislého Kazachstánu, ale Rusko má s tamější vládou dohodu o pronájmu a využívání kosmodromu. Souřadnice kosmodromu: 63°25' v.d., 47°22' s.š.

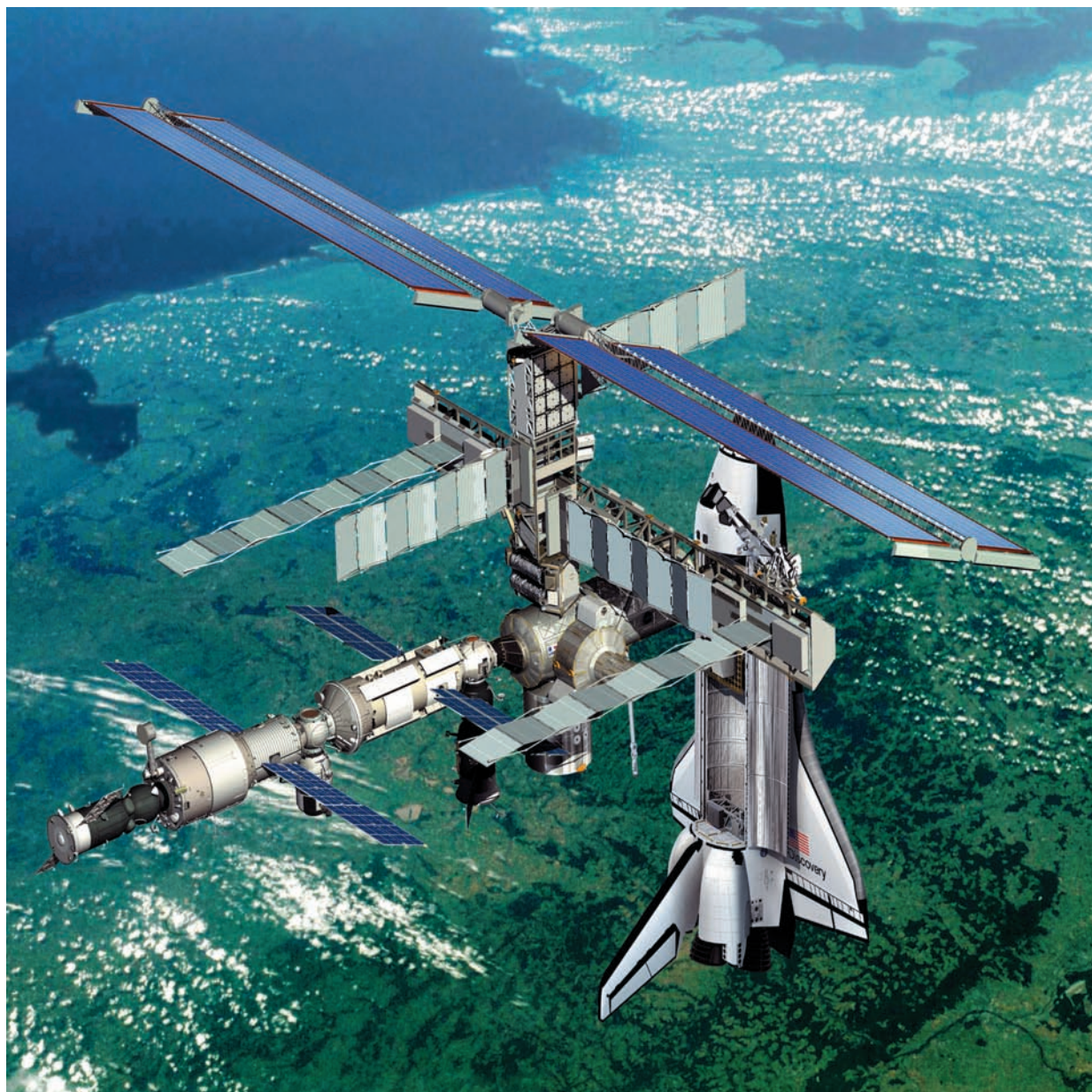
**Fotovoltaický panel** – panel slunečních baterií využívající jevu, při kterém na rozhraní dvou materiálů, na něž dopadá světlo, vzniká elektrické napětí. Jev objevil v roce 1839 Antoine-César Becquerel (1788-1878).

## Závěr

Mezinárodní kosmická stanice svým rozsahem převyšuje veškeré ostatní projekty lidí ve vesmíru. ISS se má stát dalším krokem v hledání způsobu osídlování kosmu a prozkoumávání vzdálenějších destinací. Poznatky o životě ve ztížených podmínkách mimo naši planetu se využívají i ke zlepšení podmínek a rozvoji života na planetě samotné. S výsledky tohoto výzkumu se setkáváme denně, aniž si to uvědomujeme. Jde například o technologie čištění vody, recyklace, ale patří sem i sportovní vybavení, konstrukční materiály, robotika lékařství a mnoho dalších oblastí, ve kterých se využívají výsledky vesmírného výzkumu.

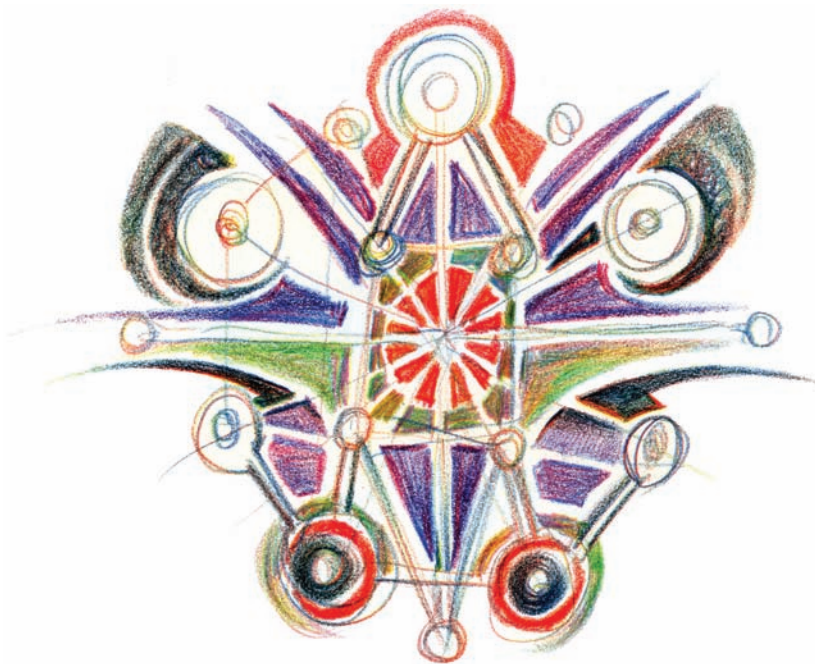
■ Martin Batelka, 1. 2. 2008, AB 5/2008

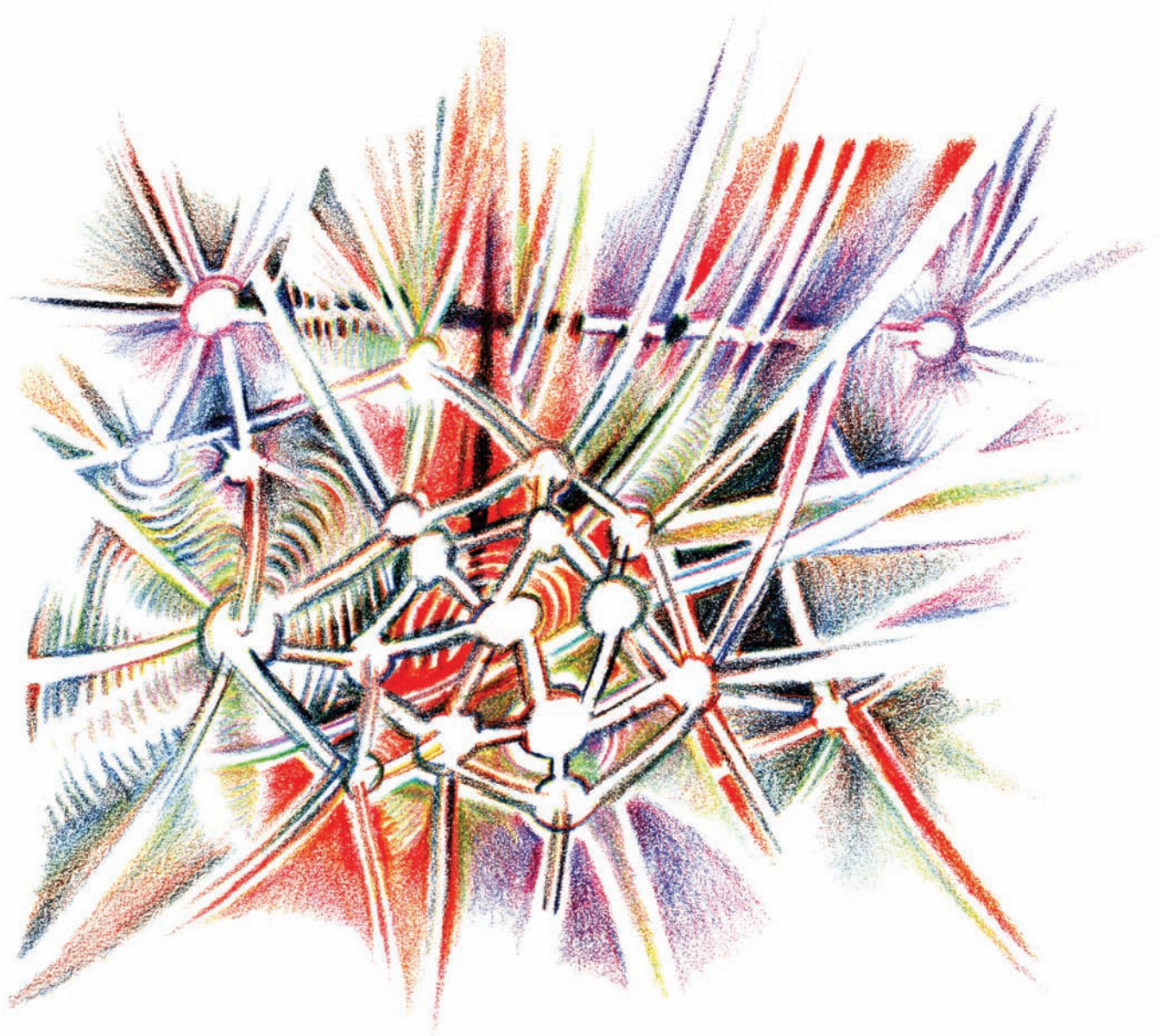


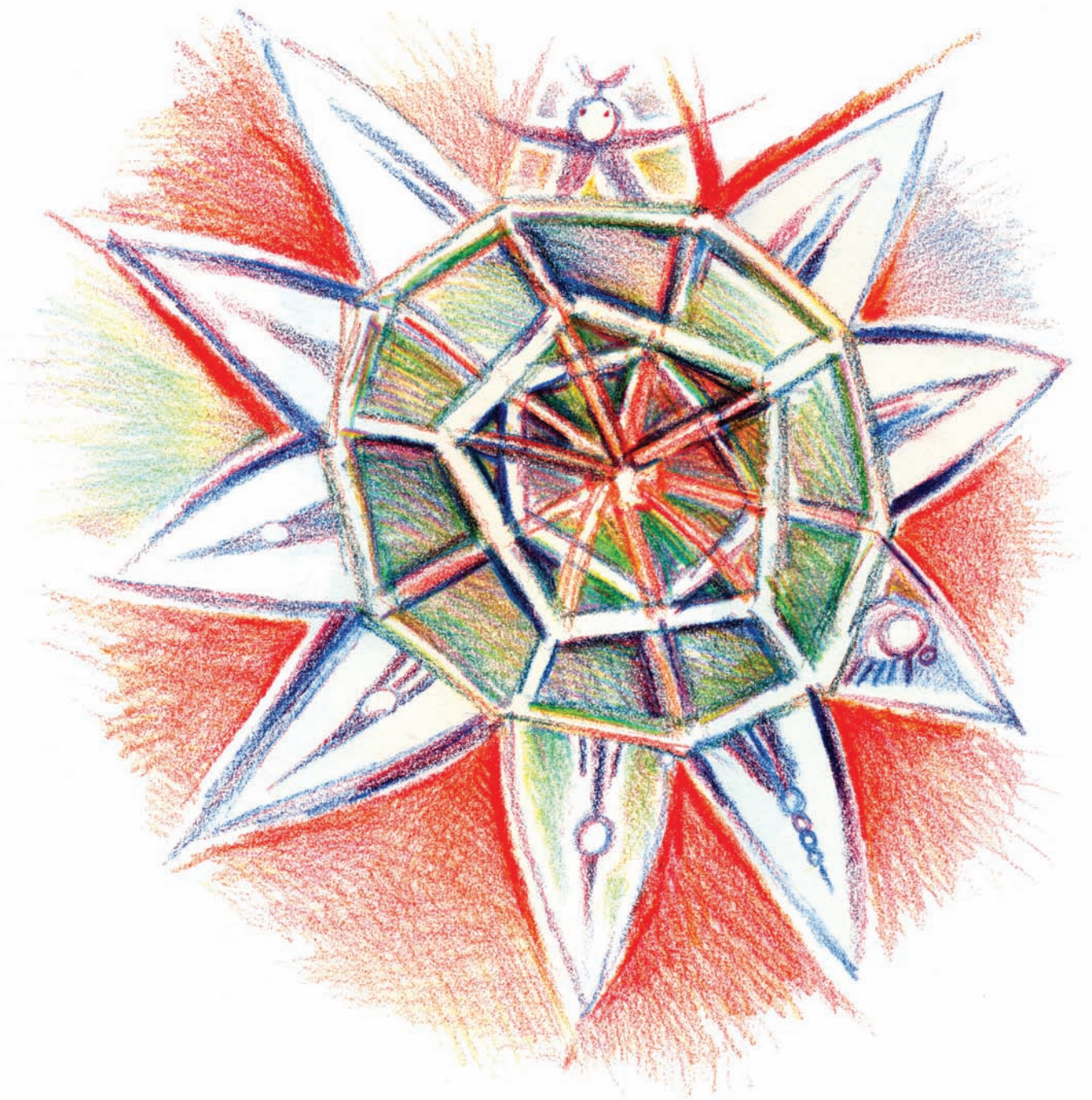




# IV. NOVÉ TECHNOLOGIE







## Zlaté nanohvězdičky

Ve světě nanonástrojů vyšla nová hvězda, a to doslova: zlaté nanohvězdičky představují zatím poslední pokrok při zesilování molekulárních „otisků prstů“, Ramanových spekter. Otevírají se tak možnosti detekce extrémně nízkých koncentrací sloučenin, což pochopitelně upoutává pozornost nejen analytických chemiků, ale i biologů, lékařů a farmakologů díky možnosti aplikovat nanohvězdičky do biologického materiálu in vitro i in vivo. své uplatnění si tyto nové mimořádně citlivé detekční nástroje jistě najdou i v jiných vědních oborech, například při studiu životního prostředí či kriminalistice.

### Ramanův rozptyl

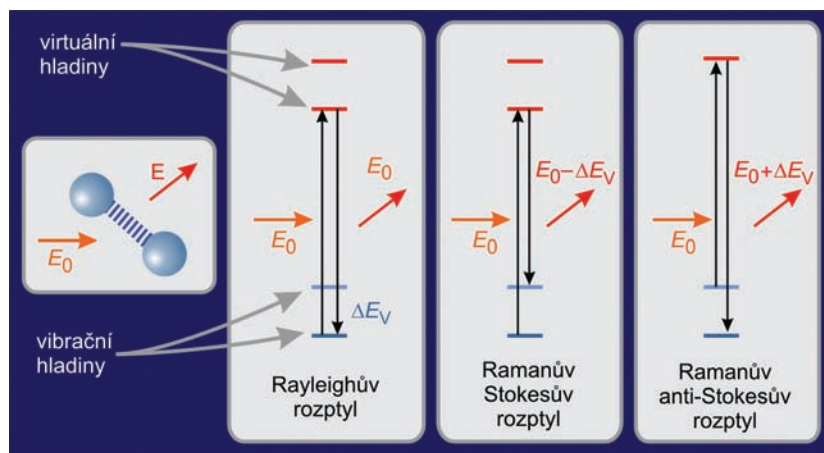
Skutečnost, že ve spektru rozptýleného světla s čárovým spektrem je možné nalézt dodatečné čáry, které odpovídají součtům či rozdílům frekvence spektrální čáry dopadajícího světla a frekvencí odpovídajících rozdílům energií rotačních a vibračních stavů rozptylových center, pozorovali v roce 1928 indičtí vědci Sir Chandrasekhara Venkata Raman (který za tento objev dostal roku 1930 Nobelovu cenu a jehož jméno je nejčastěji s tímto kombinačním rozptylem světla spojováno) a Kariamanikkam Srinivasa Krishnan na kapalinách. Nezávisle na nich (a o několik měsíců dříve) tento jev pozorovali ruští fyzici Grigorij Landsberg a Leonid Mandelstam. Samotný jev nepružného rozptylu světla byl teoreticky předpovězen již v roce 1923 rakouským fyzikem Adolfem Smekalem. Systematický popis kombinačního rozptylu provedl v letech 1930-34 československý fyzik Georg Placzek.

Z kvantově mechanického pohledu si lze rozptyl světla představit jako přechod elektronu po dopadu primárního fotonu ze základní hladiny na virtuální hladinu a následné vyzáření sekundárního fotonu při přechodu elektronu zpět na základní hladinu. Při pružném rozptylu se frekvence rozptýle-

**Ramanův rozptyl** – také kombinační rozptyl, Mandelstamův rozptyl, Smekalův-Ramanův rozptyl. Jde o změnu směru i velikosti vlnového vektoru a polarizace fotonů při průchodu prostředím v důsledku interakce s vibračními a rotačními stavy molekul či krystalové mřížky. Rozptýlené fotony nesou informace o energetickém spektru rozptylového centra i prostorové orientaci konkrétní chemické vazby, tedy jakési molekulární „vizitky“. Bez speciálních opatření je však tímto způsobem rozptylován pouze jediný foton ze stovek miliónů až stovek miliard dopadajících fotonů. Účinný průřez Ramanova rozptylu je zhruba  $10^{-30}$  cm<sup>2</sup>.

**SERS** – povrchem zesílený Ramanův rozptyl (Surface Enhanced Raman Scattering). Při Ramanově rozptylu na molekulách navázaných na povrch drahého kovu (zlata, stříbra) může dojít k zesílení jak rozptýleného tak dopadajícího záření díky rezonanční interakci fotonů s kvanty kmitů elektronového plynu v poli iontů krystalové mřížky vázaných na povrch.

Schéma Rayleighova rozptylu a Ramanova rozptylu se Stokesovými a anti-Stokesovými fotony.





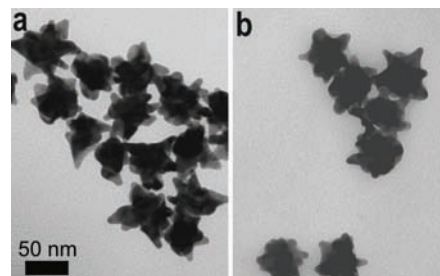
ného fotonu (a následně velikost vlnového vektoru) nemění – hovoříme o Rayleighově rozptylu. K této události dochází u dopadajících fotonů s pravděpodobností  $1:10^4$ . Při nepružném, Ramanově, rozptylu dochází ke změně energie rozptylovaných fotonů s pravděpodobností  $1:10^8-10^{11}$ . Energie se může u rozptylovaného fotonu snížit, pokud se elektron po přechodu na virtuální hladinu vrátí zpět na vyšší hladinu, než je základní. Těmto rozptýleným fotonům říkáme Stokesovy. Rozdíl energií dopadajícího a rozptýleného fotonu pak přesně odpovídá rozdílu mezi základní a vyšší hladinou. Při vyšších teplotách je možná i opačná situace: Elektron přejde po dopadu primárního fotonu z vyšší (než základní) hladiny na virtuální hladinu a sekundární foton je vyzařen po přechodu elektronu do základního stavu. Rozptýlený foton pak má energii navýšenou o rozdíl mezi výchozí hladinou a základním stavem; hovoříme o anti-Stokesově fotonu.

Spektrum Stokesových a anti-Stokesových fotonů vytváří Ramanovo spektrum vyšetřovaného vzorku. Obvykle se vyjadřuje v podobě závislosti intenzity na posunu vlnového čísla. Z tohoto posunu lze zrekonstruovat vibrační hladiny rozptylových center. Vzhledem k tomu, že zdrojem dopadajících fotonů bývá laser, je u dopadajících fotonů definována polarizace a směr vlnového vektoru. Z těchto charakteristik u rozptýleného záření lze dovozovat orientaci chemických vazeb v prostoru.

## Povrchem zesílený Ramanův rozptyl, SERS

Ačkoli je Ramanův rozptyl teoreticky schopen identifikovat pomocí analýzy spektra i jednotlivou chemickou vazbu, velice nízká incidence rozptylu značně omezovala využití tohoto jevu jako senzoru sloučenin. Dalším významným mezníkem k využití kombinačního rozptylu byl objev povrchově zesíleného Ramanova rozptylu uskutečněný roku 1977 dvěma skupinami vědců nezávisle na sobě. Historicky první rozptyl SERS pyridinu adsorbovaného na povrch elektrochemicky zdrsňelého stříbra byl naměřen již v roce 1974, ale nebyl správně interpretován. Obě skupiny zároveň navrhly dvě primární teorie SERS, uznávané dodnes: elektromagnetickou, založenou na excitaci plazmonů vázaných na povrch, zatímco chemická teorie je založena na tvorbě komplexů s přenosem náboje.

Nejčastěji užívanými materiály pro SERS jsou zlato a stříbro s povrchem s nerovnostmi alespoň o řád menšími než je vlnová délka do-



Agregáty nanohvězdiček synergicky posilují efekt SERS. Duke University.

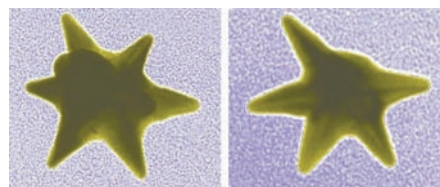
**In vitro** – ve zkumavce.

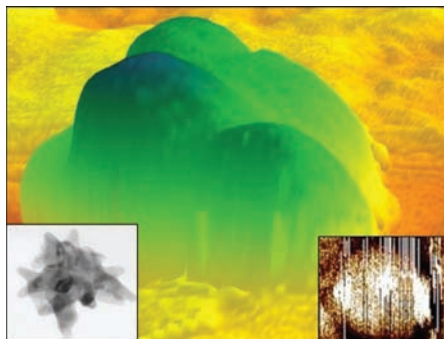
**In vivo** – na živém organismu.

**Povrchové plazmony** – plazmony vyskytující se na rozhraní vakua či materiálu s kladnou relativní permitivitou a prostředí se zápornou relativní permitivitou (obvykle kovy či dotované polovodiče). Silně interagují s fotony a vytvářejí tak další kvazičástici – polariton.

**Polarizace světla** – jde o vlastnost, pomocí níž popisujeme určitou chaotičnost světla. Elektromagnetické záření je příčným vlněním, které lze popsat kmitý vektorů  $E$  a  $B$  kolmých 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 směru elektrického vektoru. Při kruhové polarizaci opisuje konec elektrického vektoru v prostoru kružnici.

Izolované nanohvězdičky. NIST.





Obrázek nanohvězdičky v transmisním rastrovém elektronovém mikroskopu (TEM) je doplněn vlevo dole snímkem jediné zlaté nanohvězdy pomocí mikroskopie na atomových silách (AFM) a fázovým portrétem nanohvězdičky pomocí mikroskopie na elektrostatických silách (vpravo dole, bílá místa ukazují oblasti s kumulací náboje na ostrých vrcholech hvězdičky. Nanotechweb.

padajícího světla. Rezonanční frekvence plazmonů těchto materiálů spadají do oblasti viditelného světla a blízkého infračerveného záření. Zesílení kombinačního rozptylu při plošném substrátu se pohybuje v rozsahu  $10^3$ – $10^6$ .

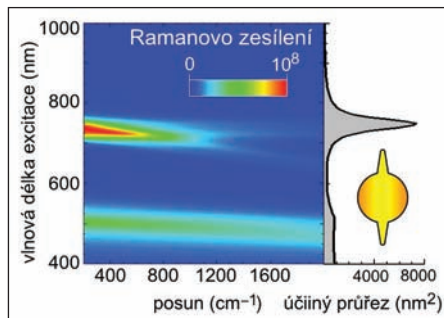
### Rozptyl SERS na nanohvězdičkách

Vzhledem ke skutečnosti, že charakteristické rozměry nerovností povrchu, při kterých bylo dosaženo maximálního zesílení kombinačního rozptylu, byly v řádu nanometrů a desítek nanometrů, bylo jen otázkou technologických možností, kdy se od nanostruktur rozložených na ploše přejde k nanočásticím rozloženým v prostoru. Používané materiály jsou stejné jako v případě SERS, tedy především zlato a stříbro, případně měď a platina. Od původních tvarů (kuličky, zlaté kuličky se stříbrným pláštěm, tyčinky, kužely, krychličky) se v posledních letech přešlo k dosavadnímu vítěznému tvaru – zlatým nanohvězdičkám. Zesílení kombinačního rozptylu u těchto částic bylo  $10^4$  až  $100\,000\times$  vyšší oproti nanočásticím, které jim předcházely. Navíc v roztoku projevují synergický efekt – při vzájemné blízkosti více nanohvězdiček dochází ke značnému zvýšení zesílení oproti jediné nanohvězdičce. Zesílení je již dostatečné na sledování jednotlivých molekul.

Díky svým malým rozměrům mohou nanohvězdičky proniknout i do nitra živé buňky bez jejího poškození, navázat na sebe testovanou látku a sledovat děje uvnitř buňky na molekulární úrovni. Možnost stanovení i stopových množství otevírá zcela nové možnosti. Diabetiky, kteří jsou dosud nuceni kvůli měření hladiny krevního cukru bolestivě bodnout do prstu jistě potěší perspektiva nekrvavého stanovování glykémie. Časná diagnostika nádorových onemocnění dostává do ruky mocný nástroj. Molekulární biologie může bezprostředně pozorovat procesy v buňkách. Farmakologie může sledovat přímo interakci léčiva s cílovým místem, analytické chemii se dostává nový rozměr. Rovněž boj proti zločinu dostává ve zlatých nanohvězdičkách neoceňitelného pomocníka.

■ Vítězslav Kříha, 24. 4. 2009, AB 17/2009

Vypočtené hodnoty zesílení a účinného průřezu pro hypotetickou nanohvězdičku se dvěma hroty. Poloměr hrotu je 1,5 nm, velikost hvězdičky 17 nm. P. S. Kumar a kol.; Nanotechnology 19 (2008).



## Nanovodiče

Technologie výroby nanovodičů je dnes velmi dobře zvládnuta. Změňování osově symetrických vodivých elementů do rozměrů řádově desítek nanometrů umožňuje vytváření různých komplexních struktur:

- vodivá a polovodivá nanovlákná,
- axiální nanovodičové struktury,
- radiální nanovodičové struktury,
- větvené 2D a 3D nanovodičové struktury.

Využití nanovodičů zahrnuje mnoho oborů lidské činnosti. Pojďme se seznámit alespoň s některými z nich.

### Zdroje energie na bázi koaxiálních p-i-n nanostruktur

Vývoj solárních článků je motivován jednak snahou o širší využití těchto obnovitelných zdrojů energie, jednak při současné miniaturizaci představují zajímavou možnost integrovaných zdrojů napájení mikroelektronických a nanoelektronických zařízení. Přechod do submikronových rozměrů jednotlivých článků je cílen jak na snížení pořizovacích nákladů i rozměrů výsledných zdrojů energie, tak i na zvýšení účinnosti fotovoltaické konverze.

Výzkumná skupina profesora Charlese Liebera z Harvardské univerzity vyvinula solární p-i-n článek s koaxiálním uspořádáním nanostruktur s účinností energetické přeměny 3,5 % a výstupním výkonem 200 pW na článek. Proudová hustota při zapojení nakrátko dosahovala až 2,4 mA/cm<sup>2</sup>. Při zvýšení osvětlení na trojnásobek solární konstanty (1,4 kW/m<sup>2</sup>, množství sluneční energie dopadající kolmo na 1 m<sup>2</sup> povrchu za sekundu mimo atmosféru Země) se účinnost v průměru zvýšila na 4,1 % a při pětinasobku až na 4,5 %.

Průměr článku byl zhruba 300 nm, osový vodič byl tvořen p-polovodičem, sestávajícím z křemíkového monokrystalu dopovaného borem vypěstovaného tzv. metodou VLS (Vapor-Liquid-Solid). Na substrátu monokrystalického křemíku se roztaví například zlatý terčik, který vytvoří taveninu směsi zlata s křemíkem v rozměrech požadovaného vlákna. Další nárůst vlákna probíhá v atmosféře ochranného plynu, nejčastěji vodíku spolu s pa-

**Nanofyzika** – obor fyziky, zabývající se vlastnostmi látky v nanometrových měřítkách. Spadá do fyziky pevných látek. O možnosti manipulovat s jednotlivými atomy v nanometrových měřítkách poprvé uvažoval Richard Feynman v roce 1959.

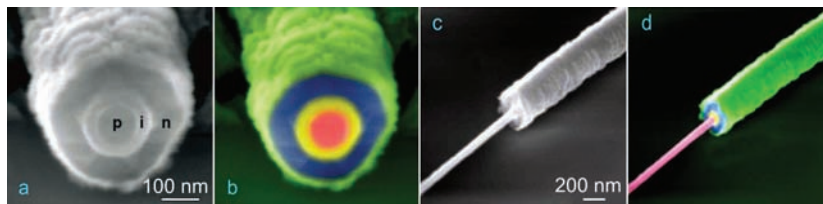
**Nanotechnologie** – obor zabývající se aplikováním výsledků nanofyziky. Zkoumá možnosti, jak vytvářet zařízení molekulových rozměrů a jak manipulovat s jednotlivými atomy tak, aby se dosáhlo žádaných vlastností. Protože u zařízení vyrobených pomocí nanotechnologie můžeme jejich činnost předurčit polohou a druhem jednotlivých atomů, můžeme dosáhnout maximální účinnosti, efektivity a výkonnosti, za dodržení malých rozměrů.

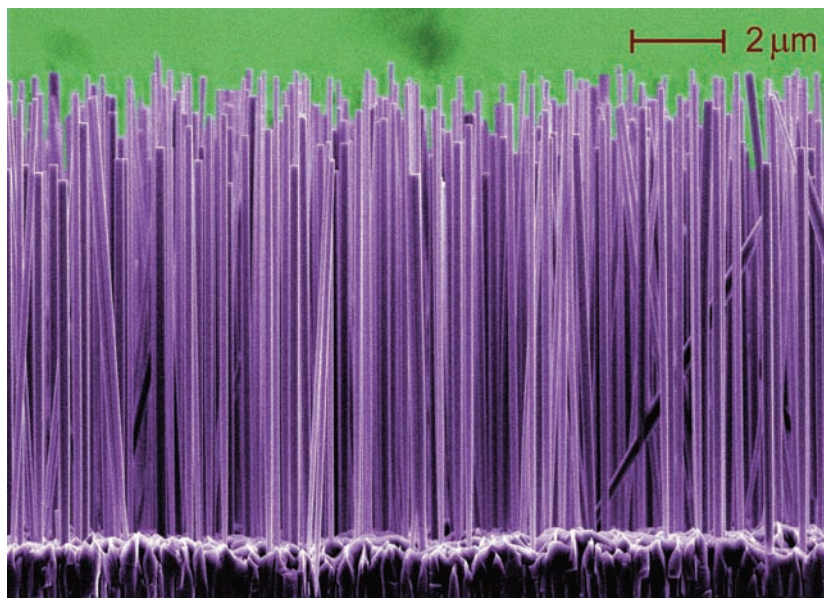
**Nanovodiče** – válcové vodivé elementy submikronových průměrů, tj. v desítkách či stovkách nanometrů.

**Nanometr** – tisícina mikrometru, jednotka používaná zejména ve fyzice pevných látek. Je to jednotka srovnatelná s meziatomovou vzdáleností v krystalické mřížce.

**p-i-n** – z anglické zkratky positive-intrinsic-negative. Polovodičová struktura tvořená p typem polovodiče, vlastním polovodičem a n typem polovodiče.

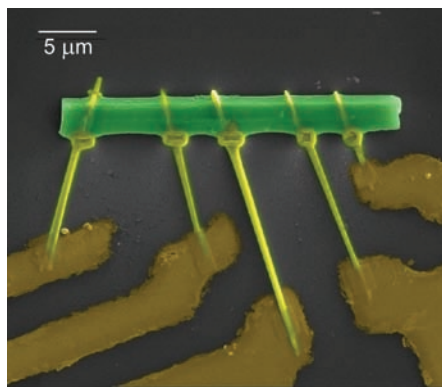
Snímky z elektronového mikroskopu TEM. Na obrázcích b) a d) jsou nepravými barvami vyznačeny jednotlivé struktury: červeně osový p-polovodič, žlutě vrstva vlastního polovodiče, modře plášť z n-polovodiče a zeleně krycí vrstvička oxidu křemičitého. Na snímcích c) a d) jsou odleptány vrstvy polykrystalického křemíku, osový p-vodivý kanál je obnažen. Lieber Research Group, Harvard University.





Polovodičová nanovláčna pro nanolasery připravená v NIST

Snímek z mikroskopu TEM, na kterém je patrná realizace kontaktů nanovodičů. Pět platinových nanovodičů (žlutě) je připojeno ke dvěma zlatým mikroelektrodám (zlatě) je organickému supravodiči (TMTSF)<sub>2</sub>ClO<sub>4</sub> (zeleně). M. J. Naughton a kol., Boston College.



rami sloučeniny křemíku (hydridu či chloridu křemičitého). Příměsí jiných par v požadované koncentraci (například hydridu boritého či fosforečného) lze pěstovat příměsné polovodiče. Změnou teploty a nebo tlaku lze dosáhnout ukončení růstu monokrystalu, přičemž z plynné fáze se mohou na monokrystalu začít vytvářet koaxiální polykrystalické vrstvy.

Střední vrstva vlastního polovodiče byla tvořena polykrystalickou fází křemíku s nanokrystalickými zrnky v tloušťce 30÷80 nm a vnější plášť n-polovodiče byl opět na bázi nanokrystalického křemíku, avšak dopovaného fosforem. Celý článek byl kryt vrstvou oxidu křemičitého nanoseného pomocí technologie PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). Jde o plazmatické napařování tenkých vrstev z plynné fáze na pevný substrát. V důsledku chemických reakcí v plazmatu elektrického výboje dochází k usazování požadované sloučeniny na substrát. Například pro vytvoření vrstvy oxidu křemičitého hoří výboj ve směsi silanu a kyslíku.

mičitého nanoseného pomocí technologie PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). Jde o plazmatické napařování tenkých vrstev z plynné fáze na pevný substrát. V důsledku chemických reakcí v plazmatu elektrického výboje dochází k usazování požadované sloučeniny na substrát. Například pro vytvoření vrstvy oxidu křemičitého hoří výboj ve směsi silanu a kyslíku.

### Měření pH na bázi koaxiálních p-i-n nanostruktur

Malou modifikací výše uvedeného zařízení lze vyrobit senzor pH. Vnější vrstva oxidu křemičitého je modifikována 3-aminopropyltriethoxysilanem. Při osvětlení odpovídajícímu osminásobku solární konstanty se napětí reverzibilně mění úměrně pH roztoku.

### Detekce chemických a biologických agens

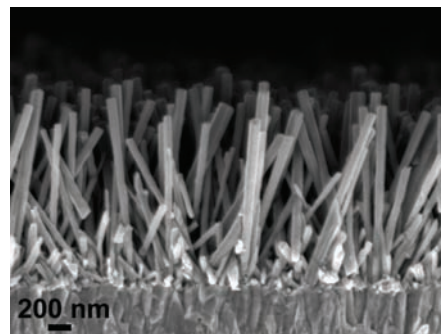
Polem řízené unipolární tranzistory NW-FET (NanoWire Field-Effect Transistor) s elektrochemicky regulovaným hradlem realizovaným pomocí nanovodiče s navázanou protilátkou jsou velice zajímavé z hlediska diagnostiky specifických antigenů i chemických látek a jejich realizace může do budoucna znamenat široké komerční využití nano-

vodičů. Možnosti uplatnění jsou v detekci jediné částice bez potřeby předchozí výroby jejich kopií, mimořádně citlivém stanovení bílkovin spojených se zhoubným bujením, při určování stopových množství chemických a biologických zbraní, rutinních vyšetřovacích metodách v klinickém i soudním lékařství, detekci otrav či zneužívání návykových látek a velkoplošném záchytu rizikových faktorů v preventivním lékařství.

### Další uplatnění (místo závěru)

- Paměti nevyžadující zdroj napájení,
- vysoce výkonné tranzistory a logická zařízení,
- ohebná elektronika,
- nové architektury počítačů a výpočetních systémů,
- lasery s elektrickou injekcí,
- jednofotonové detektory,
- mnohobarevné LED/laserové matice,
- fotonické obvody a procesory,
- 3-D nanoprocessorové systémy.
- hybridní digitálně-biologické procesory,
- spinová a kvantová elektronika,
- bio-nano interface.

■ Vítězslav Kříha, 24. 4. 2009, AB 17/2009



TEM snímek průřezu pole ZNO nanovodičů pro fotovoltaická zařízení. Consolidator Hope Project.

**Protilátka** – bílkovina, zaměřená proti cizorodé látce v organismu. Jejím úkolem je navázat se na specifický antigen a buď usnadnit jeho pohlcení buňkami imunitního systému, nebo svým navázaním přerušit škodlivé působení antigenu, případně spolu s antigenem vytvořit větší nerozpustný celek. Pod vlivem jednoho antigenu se může najednou tvořit více protilátek, neboť se mohou vázat na různá místa antigenu. Vazebná místa antigenu a jemu příslušející protilátky do sebe zapadají jako klíč do zámku, obecně tedy daná protilátka reaguje pouze na zcela určitý antigen.

**Antigen** – organismu cizí látka, kterou je imunitní systém schopen rozpoznat a reagovat na ni specifickou odpovědí.

## Metamateriály v infračervené oblasti

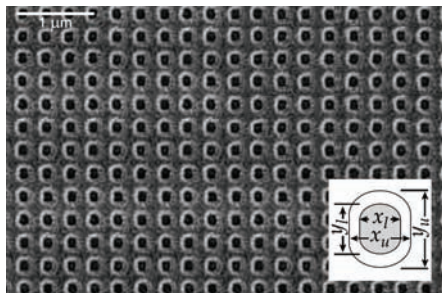
**Metamateriál** – umělá struktura, která vykazuje elektrické a magnetické vlastnosti (permitivitu, permeabilitu) nevyskytující se v přírodě.

**SN-NIM – Single Negative – Negative Index Metamaterial.** Metamateriál, který má buď zápornou permitivitu, nebo permeabilitu (nemá záporné obě veličiny současně).

**DN-NIM – Double Negative – Negative Index Metamaterial.** Metamateriál, který má zápornou permitivitu i permeabilitu. Někdy se označuje jako LH materiál; označení LH (Left Handed) znamená, že vektory  $k$ ,  $E$ ,  $B$  zde tvoří levotočivou ortogonální soustavu (v izotropním prostředí).

**LH materiál** – prostředí, které vykazuje současně zápornou permitivitu a permeabilitu. Označení LH (Left Handed) znamená, že vektory  $k$ ,  $E$ ,  $B$  zde tvoří levotočivou ortogonální soustavu (v izotropním prostředí).

Struktura metamateriálu připraveného v USA, který zasahuje až do infračervené oblasti. Dobře patrné jsou jednotlivé rezonátory.



Metamateriály jsou materiály, které mají velmi zvláštní vlastnosti, zápornou permitivitu, permeabilitu, index lomu. Takovéto exotické vlastnosti vykazují dnes vyráběné metamateriály pouze v určitém rozsahu vlnových délek, jinde se chovají jako běžné prostředí. Snahou vědců je vytvořit strukturu použitelnou v optické oblasti, tzn. pro viditelné vlnové délky elektromagnetického záření a využít jejich jedinečné vlastnosti zejména v optických přístrojích. Vývoj metamateriálů v posledních letech zaznamenal značný pokrok. V roce 2001 byl vyroben metamateriál se záporným indexem lomu pouze pro mikrovlny a o pouhé čtyři roky později, v roce 2005 byla vyrobena struktura vykazující záporný index lomu na vlnové délce 1,5  $\mu\text{m}$ . V obou případech se však jednalo o tzv. SN-NIM, který nemá současně zápornou hodnotu permitivity i permeability. Další průlom nastal v roce 2006, kdy se podařilo vyrobit tzv. DN-NIM (má záporné obě hodnoty), který pracoval v okolí vlnové délky 1,4  $\mu\text{m}$ .

### Záporný index lomu

Elektrické a magnetické vlastnosti materiálů vystihují dvě veličiny – permeabilita a permitivita (indexem nula jsou označeny hodnoty ve vakuu).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad \mu = \mu_0 \mu_r.$$

V reálných (ztrátových) materiálech obvykle definujeme komplexní permitivitu (permeabilitu), kde imaginární části popisují ztráty v prostředí:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad \mu_r = \mu' + i\mu''.$$

Dvojitě čárkované veličiny jsou vždy kladné, jinak by při průchodu elektromagnetické vlny materiálem došlo k jejímu zesílení, což například u laseru možné je, ale laser vyžaduje prostředí, do kterého je dodávána energie zvenčí. Budeme-li zkoumat optické vlastnosti materiálu, vstupuje do hry další veličina – index lomu. Index lomu se obecně vyjadřuje v komplexním tvaru:

$$n = (\varepsilon_r \mu_r)^{1/2} = n' + in'',$$

kde  $n'$  je index lomu, ze kterého můžeme určit například úhel lomu pársku,  $n''$  se nazývá absorpční index a určuje, jak moc se elektromag-

netická vlna tlumí v daném prostředí. Prostředí může mít zápornou reálnou část indexu lomu tehdy, pokud je splněna následující podmínka:

$$\varepsilon''\mu'' + \varepsilon'''\mu''' < 0.$$

Vzhledem k tomu, že obě dvoučárkové veličiny jsou kladné, můžeme splnit tuto podmínku dvěma způsoby a podle toho rozlišujeme dva typy metamateriálů. Splnit podmínku uvedenou výše můžeme tak, že položíme  $\varepsilon' < 0$  a současně  $\mu' < 0$ . Pokud má materiál tyto vlastnosti, pak se jedná o tzv. DN-NIM materiál neboli LH materiál, kde vektory **k**, **E**, **B** tvoří levotočivý systém.

Další možností, jak splnit podmínku pro záporný index lomu je položit jednu z čárkovaných veličin kladnou a druhou zápornou. Hodnoty této veličiny se ovšem musí pohybovat v takových mezích, aby platila výše uvedená podmínka. Takový materiál se nazývá SN-NIM. Další důležitou veličinou prozrazující vlastnosti metamateriálu je činitel jakosti  $Q$

$$Q = -n'/n''.$$

Jde o poměr indexu lomu ku ztrátám v prostředí. Snadno můžeme odvodit, že při stejném indexu lomu mají DN-NIM materiály vyšší  $Q$  než materiály SN-NIM. To znamená, že méně tlumí elektromagnetickou vlnu. Z tohoto důvodu se současný vývoj metamateriálů směřuje k DN-NIM strukturám.

## Metamateriály v IR

V březnu roku 2007 se podařilo americkým vědcům vytvořit DN-NIM pracující v infračervené oblasti, čímž jsme se opět posunuli blíže k viditelným vlnovým délkám. Testovaný materiál vykazoval zápornou permitivitu i permeabilitu v rozmezí vlnových délek 799 až 818 nm. U vyrobeného vzorku byl změřen koeficient propustnosti, absorpce a odrazu. Metamateriál byl ozařován lineárně polarizovaným zářením z wolframové lampy. Vlastnosti vzorku velmi silně závisí na rovině polarizace elektromagnetické vlny.

## Struktura metamateriálu

Předchozí experimenty ukazují, že pro vytvoření prostředí se záporným indexem lomu se osvědčila struktura dvou kovových destiček s otvory, oddělených vhodným dielektrikem. Vzdálenosti mezi otvory musejí být menší, než je vlnová délka elektromagnetického záření. Jako dielektrikum byl použit oxid india a cínu, tloušťky pouhých

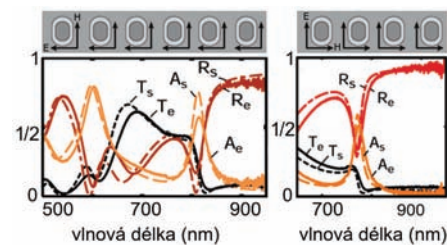
**SRR** – Split Ring Resonator, kruhový štěrbinový rezonátor. Základní součástka metamateriálů se zápornou permeabilitou navržená Johnem Pendrym z Imperial College London v roce 1999.

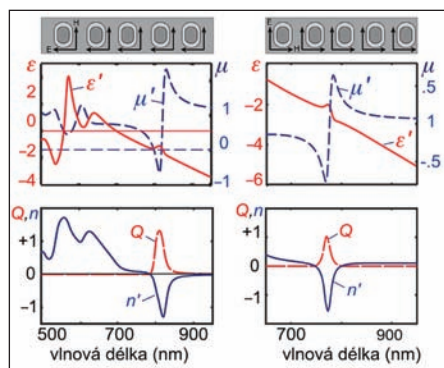
**Permeabilita** – lineární koeficient úměrnosti mezi magnetickou indukcí a intenzitou. V izotropním a homogenním materiálu jde o jediné číslo, v komplikovanějších materiálech o tenzor (matici) koeficientů.

**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.

**Stříbro** – Argentum, ušlechtilý kov bílé barvy, používaný člověkem již od starověku. Vyznačuje se nejlepší elektrickou a tepelnou vodivostí ze všech známých kovů. Slouží jako součást různých slitin pro použití v elektronickém průmyslu, výrobě CD i DVD nosičů a šperkařství, jeho sloučeniny jsou nezbytné pro fotografický průmysl.

Závislost koeficientu odrazu  $R$ , propustnosti  $T$  a absorpce  $A$  na vlnové délce elektromagnetické vlny. Plné křivky odpovídají naměřeným hodnotám ( $e$ ) a přerušované křivky byly získány počítačovou simulací ( $s$ ). Levý obrázek platí pro primární polarizaci a pravý pro opačnou polarizaci.





V horní části je závislost permittivity a permeability na vlnové délce elektromagnetické vlny, pro obě navzájem kolmé polarizace. V dolní části je závislost reálné části indexu lomu a činitele jakosti  $Q = -n''/n'$  na vlnové délce. Je patrné, že  $Q$  vzroste až při výrazném poklesu permeability a reálné části indexu lomu. Pro primární polarizaci dosáhne  $Q$  hodnoty 1,3 pro vlnovou délku 813 nm. Reálná část indexu lomu má hodnotu  $-1$ . Nejnižší hodnotu má reálná část indexu lomu  $-1,3$  a to pro vlnovou délku 820 nm. Pro druhý směr polarizace je průběh napravo.

15 nm (což odpovídá několika desítkám molekulových vrstev). Na dielektrikum byly naneseny dvě vrstvy stříbra (33 nm), oddělené vrstvou hliníku (38 nm). Povrch stříbra dále chrání 10 nm vrstva hliníku. Otvory v kovových vrstvách jsou rozmístěny tak, aby vrchní a spodní destička stříbra způsobila rezonanční pík permeability. Struktura metamateriálu je patrná na obrázku.

Otvory ve stříbrných destičkách byly vytvořeny elektronovou litografií. Tato metoda umožňuje zaostřit elektronový svazek na mnohem menší plochu, než laserový svazek z důvodu jeho nízké difrakce. Výpočet rozměrů vhodné geometrické struktury prostředí a jeho vlastností pro různé vlnové délky a polarizace elektromagnetické vlny by byl ještě před čtvrt stoletím velmi obtížný úkol. S výpočetním výkonem dnešních počítačů se tyto úkoly stávají mnohem snazšími. Porovnání výsledků počítačové simulace s naměřenými výsledky na obrázcích výše ukazuje relativně dobrou shodu, ačkoli měření na vlnových délkách větších než 900 nm bylo již velmi ovlivněno šumem.

■ Miroslav Havránek, 30. 3. 2007, AB 13/2007



## Hyperčočky

V posledních letech naše technologie umožňují vyrábět velké množství různých metamateriálů – umělých látek s exotickými vlastnostmi při šíření elektromagnetických signálů. Většinou se jedná o různé periodické struktury (složené z paralelně uspořádaných drátků nebo šterbinových rezonátorů), pomocí kterých se docílí záporné permitivity, permeability, při kladném či záporném indexu lomu prostředí. Zpravidla jsou vlastnosti metamateriálu silně frekvenčně závislé a „výhodné“ chování má metamateriál jen v úzkém pásmu frekvencí. V roce 2001 byl vyroben první metamateriál se záporným indexem lomu pro mikrovlny a v roce 2005 pro infračervenou oblast. Samozřejmě, že největším cílem je využití metamateriálů v optické (vizuální) oblasti elektromagnetického spektra. Tomu dosud bránila především velikost periodicky se opakujících prvků, která musí být maximálně srovnatelná s vlnovou délkou, tedy v případě světla nesmí rozměry prvků převýšit stovky nanometrů. Druhou důležitou skutečností je to, že struktura pro využití v optických přístrojích musí být třírozměrná, což většina dosavadních metamateriálů nespĺňovala. Na přelomu let 2008 a 2009 se ale pravděpodobně prolomila i tato bariéra.

### Úspěšné tažení metamateriálů

Metamateriály mohou sloužit především jako přesně definované pásmové propusti a filtry, kterými prochází jen signál určitých frekvencí a ostatní frekvence jsou silně absorbovány. K tomu se využívá výrazné frekvenční závislosti chování metamateriálu. Obdobně jako plazma, má i metamateriál mezní frekvenci propustnosti, pro niž se v přeneseném slova smyslu používá opět název plazmová frekvence. Jiným využitím metamateriálů je tzv. Veselagova čočka – planoparalelní vrstva metamateriálu, která fokusuje bodový zdroj na jedné straně vrstvy do bodu na druhé straně vrstvy (u konvenčního materiálu by muselo jít o spojnou čočku s zakřiveným povrchem). Další zajímavou aplikací jsou speciální povrchy těles vytvořené z metamateriálu, které způsobují neviditelnost předmětu v určitém pásmu frekvencí (jde o jakýsi pohádkový kabát, pod nímž je předmět neviditelný). První neviditelný „oblek“ byl připraven v roce 2006 v mikrovlonné oblasti a v roce 2008 v optické oblasti. Tyto „oblečky“ mají sice zatím rozměry jen několika mikrometrů, ale spolehlivě odkloní elektromagnetické paprsky z okolí

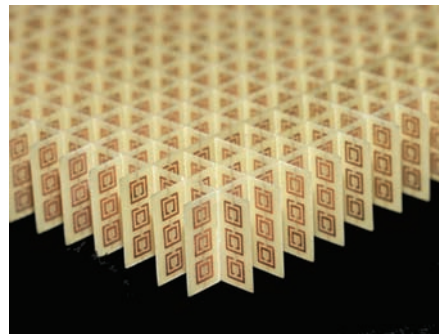
**Evanescentní vlna** – elektromagnetická vlna na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi. Šíří se podél rozhraní a kolmo na rozhraní ubývá exponenciálně. Z hlediska řešení vlnových rovnic jde o pole krátkého dosahu, které zajišťuje spojitost normálových složek polí. Vzniká při průchodu světla rozhraním, nejnámější je situace při úplném odrazu. Obdobná vlna vzniká i při šíření zvuku.

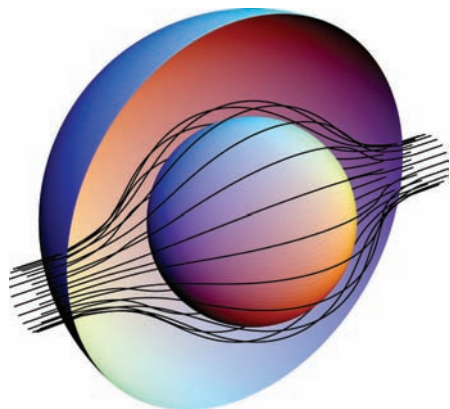
**Index lomu** – podíl rychlosti šíření světla ve vakuu a v daném prostředí. Na rozhraní dvou prostředí je index lomu roven podílu sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu (tzv. Snellův zákon).

**Kruhový šterbinový rezonátor** – (SRR, Split Ring Resonator). Základní součástka metamateriálů se zápornou permeabilitou navržená Johnem Pendrym z Imperial College London v roce 1999.

**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.

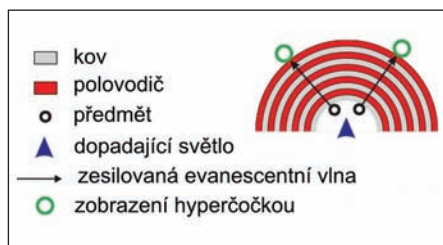
Typický metamateriál vyrobený z opakujících se šterbinových rezonátorů (zajistí zápornou permeabilitu a jsou na snímku dobře patrné) a vsvisle orientovaných drátků procházejících středy rezonátorů (zajistí zápornou permitivitu a nejsou příliš viditelné). Periodicita této umělé struktury je 5 mm a vlastnosti LH materiálu má v oblasti frekvencí 10÷11 GHz. NASA.





Princip neviditelného pláště. Oranžová sféra je skrytá ve vrstvě metamateriálu, který odklání paprsky tak, aby z místa bodového zdroje pokračovaly jakoby po přímkách. Pozorovateli se bude objekt zdát dokonale průhledný. Science.

Základní princip hyperčočky ve tvaru „rolády“. Dva předměty jsou v malé vzdálenosti od sebe v dutině hyperčočky umístěny tak, aby byly co nejbliže vnitřního povrchu hyperčočky. Základní osvětlení předmětů (například laserem) vybudí evanescentní vlnu, která je zesílena v periodické struktuře metamateriálu. Obrazy obou předmětů se nachází na vnějším povrchu v mnohem větší vzdálenosti než předměty. Hamburská univerzita.



objektu tak, že není viditelný. K důležitým aplikacím metamateriálů patří také nové typy detektorů v terahertzové oblasti využitelné při letištních kontrolách nebo příprava zcela nových typů magneticky aktivních materiálů, jejichž uplatnění lze v tuto chvíli jen odhadovat.

### Superčočky aneb zobrazovací techniky s metamateriály

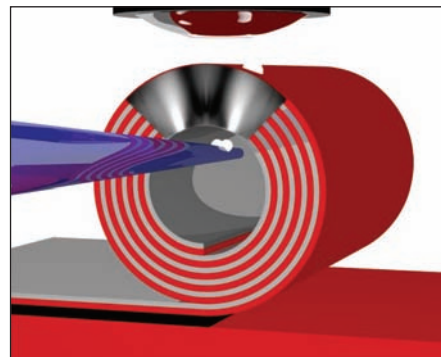
Optická část spektra leží v oblasti 400–700 nm. Klasickým mikroskopem nemůžeme pozorovat podrobnosti menší, než je přibližně polovina vlnové délky, tj. cca 200 nm. Jemnější detaily jsou překryty ohybovými a interferenčními jevy. Klasickému optickému mikroskopu tak navždy zůstávají skryty podrobnosti uvnitř bakterií a buněk, o virech ani nemluvě. Nejlepším řešením je elektronový mikroskop nebo mikroskop atomárních sil, ve kterém je ovšem třeba objekt destruovat, usmrtit, zamrazit nebo pokovit, aby měl vhodné vlastnosti pro zobrazení. Nyní se zdá, že nedestruktivní optická mikroskopie může být provozována i za hranicemi klasické optické limity. Využit by se měly tzv. evanescentní vlny, které vznikají na různých rozhraních biologického objektu a mají jen krátký dosah (do několika nanometrů od objektu). Pro klasickou mikroskopii jsou jakékoli vlny krátkého dosahu nevyužitelné.

V roce 2005 zkonstruoval na Kalifornské univerzitě v USA Xi-ang Zhang první superčočku z tenké stříbrné vrstvy, která zobrazila vlny z dvojice nanovláken vzdálených 70 nm, které pak mohly být od sebe rozlišeny standardní optickou technologií (běžným mikroskopem). Hranice optické mikroskopie tak byla posunuta na třetinu klasické limity. Šlo o první prototyp, který sloužil jen k ověření správnosti této cesty a navíc byla použita jen rovinná struktura, stejně tak jako v dalších experimentech. V roce 2007 zkonstruoval další rovinnou superčočku Igor Smolyaninov z Marylandské univerzity. Podstatou této superčočky byla rovinná periodická struktura soustředných plastických prstýnků (vzdálených od sebe 500 nm) na zlatém podkladu. Uprostřed struktury bylo nanoseno několik plastických teček, jejichž rozměry a vzdálenosti nebyly rozlišitelné klasickou optickou mikroskopii. V experimentu byly tečky ozářeny laserem a rozptýlená vlna byla po průchodu metamateriálem pozorována za vnějším prstencem klasickým mikroskopem, ve kterém bylo možné rozlišit jednotlivé mikrotečky. Při šíření vlny sehrály podstatnou úlohu i plazmony vznikající v zlatém substrátu.

## Hyperčočka

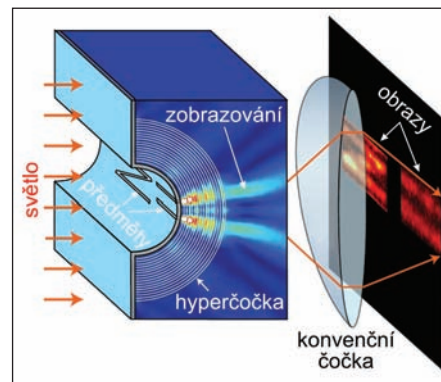
Nevýhodou všech dosavadních experimentů byly příliš velké rozměry struktur a jejich plošné uspořádání. Pro skutečnou mikroskopii nanoobjektů bylo nutné vytvořit třírozměrnou periodickou strukturu s periodicitou v jednotkách či desítkách nanometrů. To se poprvé podařilo v roce 2009 týmu vedeném Stefanem Mendachem z Hamburské univerzity v Německu. Vědci připravili metamateriál z několika se střídajících vrstev polovodiče a kovu. Jako podklad posloužila vrstva arzenidu galitého (GaAs) pokrytá arzenidem hlinitým (AlAs). Na tomto substrátu se poté pravidelně střídaly tři vrstvy (každá měla tloušťku 20 nm): arzenid inditogalický (InGaAs), arzenid galický (GaAs) a hliník. Po nanesení vrstev byla chemicky odstraněna podkladová vrstvička arzenidu hliníku a celý metamateriál se během třiceti sekund svinul do tvaru duté rolády o vnějším poloměru 2 000 nm (2 mikrometry). K tomu přispěla různá periodicitu mříže obou polovodičů (GaAs, InGaAs). Uvnitř zůstala dutina určená pro umístění pozorovaného objektu. Periodická struktura by v těsné blízkosti osvětleného objektu měla reagovat na evanescentní vlny krátkého dosahu a transformovat je při radiálním průchodu strukturou na normální vlny pozorovatelné běžnou optickou soustavou. Při demonstraci bylo dosaženo jen malého zvětšení, ale správnost principu byla ověřována i počítačovými simulacemi. Čočku schopnou transformovat evanescentní vlny na pozorovatelné světelné vlny dalekého dosahu nazýváme hyperčočkou. Nejbližším úkolem je připravit hyperčočky s větším poměrem vnějšího a vnitřního poloměru, které budou vykazovat větší zvětšení a do nitra hyperčočkové „rolády“ umístit kapičku kapaliny se živými buňkami. Pokud se to podaří, půjde o výrazný průlom optické mikroskopie.

■ Petr Kulhánek, 15. 5. 2009, AB 20/2009

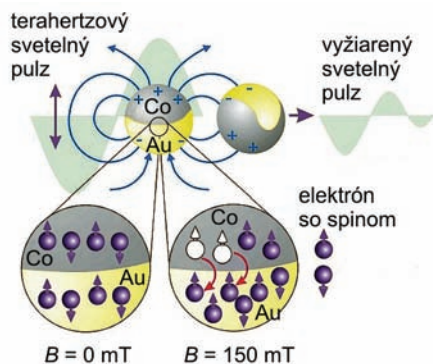


*Třírozměrná realizace hyperčočky. Předměty jsou opět umístěny v blízkosti vnitřního povrchu hyperčočky (důvodem je krátký dosah evanescentní vlny). Obraz vznikne na vnějším povrchu hyperčočky a je možné ho prohlédnout konvenčním mikroskopem. Hamburská univerzita.*

*Další schéma hyperčočky včetně následného zobrazení běžnou čočkou. UCB.*



## Spinom spínané svetlo



Svetelné žiarenie sa šíri vo forme plazmónov po povrchu kobaltu, ktorý je čiastočne obalený zlatom. Bez prítomnosti magnetického poľa ( $B = 0$  mT) sú elektróny a ich spiny rozložené rovnomerne. V prítomnosti magnetického poľa ( $B = 150$  mT) a svetelného žiarenia dochádza k spinovej polarizácii elektrónov a ich čiastočnému prechodu z povrchu kobaltu do zlata, čo zabraňuje šíreniu sa plazmónov po povrchu materiálu. H. Jonston/Physics.

**Spintronika** – spinová elektronika neboli magnetoelektronika. Jde o technológiu využívajúcu kvantové vlastnosti spinu elektrónu. Zatímco v klasické elektronike je nositeľom informácie elektrický prúd, resp. tok elektrónov, ve spintronike sa kromé náboje elektrónu uvažuje i orientácie jeho spinu.

**AMR** – Anizotropní magnetorezistencia. Je to jev, při kterém dochází ke zvýšení rezistence (odporu) materiálu vlivem vnějšího magnetického pole. Tento jev poprvé pozoroval W. Thomson v roce 1856.

**Plazmon** – kvazičástice (kvantum) podélných oscilací elektronového plynu v pevných látkách (v krystalové mříži kovů, v nekovech, v plastech). Například v kovech je možné vybudit oscilace plazmatu jako kolektivní excitace plynu vodivostních elektronů na pozadí kationtů krystalové mříže. Odražené či prošlé elektrony nebo fotony interagující s plazmony vykazují ztráty energie rovné celistvým násobkům energie plazmonu.

Mnoho výskumníkov sa snaží vyvinúť spintronické zariadenia a teda využitím spinu elektrónu a jeho náboja spracovávať informácie. Iní sa zase zameriavajú na interakciu medzi svetlom a povrchom materiálu, kde vznikajú kolektívne oscilácie elektrónov, zvané plazmóny, aby mohli vytvoriť plazmonické zariadenia pre spracovanie a prenos dát. Výskumníkom z Naval Research Laboratory vo Washintone, DC sa podarilo vytvoriť materiál kombinujúci spintronické a plazmatronické vlastnosti a s jeho pomocou spínať terahertzový svetelný lúč.

Materiál je zhotovený z malých častíčkách magnetického kobaltu s veľkosťou asi 10  $\mu\text{m}$ , ktoré sú čiastočne obalené nemagnetickým zlatom. Ak tento materiál vystavíme externému magnetickému poľu, začnú sa elektróny v kobaltových zrnách spinovo polarizovať. Pokiaľ na tento materiál dopadne svetlo s frekvenciou rádo vo THz, elektromagnetické pole svetelného lúča spôsobí, že na hranici zlata a kobaltu sa spinovo polarizované elektróny premiestnia z kobaltu do zlata (pozrite obrázok). Vďaka tomu vzrastie elektrický odpor hranice medzi zlatom a kobaltom. Tento efekt sa nazýva anizotropná magnetorezistencia (AMR). Zvýšenie elektrického odporu zabraňuje šíreniu plazmónov a teda šíreniu vlnenia. Priepustnosť svetla je tým značne obmedzená a v prípade niektorých vzoriek dochádza k pohlteniu až 70 % svetla. Pri vypnutí magnetického poľa sa elektróny vrátia na pôvodné miesto, nedochádza k efektu AMR a väčšina svetla prechádza materiálom vo forme plazmónov.

Abdul Elezzabi z výskumného kolektívu tvrdí, že podobný efekt pozorovali aj v iných magnetických materiáloch a v súčasnosti sa snažia nájsť materiál, u ktorého by bol tento efekt ešte významnejší. Tvrdí, že nie je principiálny problém pozorovať tento efekt aj pri iných frekvenciách ako terahertzových. Pri vyššej frekvencii elektromagnetického žiarenia však nie sú elektróny schopné udržať sa v zlatom povlaku a nedochádza k nárastu rezistivity. V súčasnosti sa však tento kolektív snaží registrovať patent na viacero zariadení pracujúcich na tomto princípe.

■ Vladimír Scholtz, 15. 6. 2007, AB 23/2007

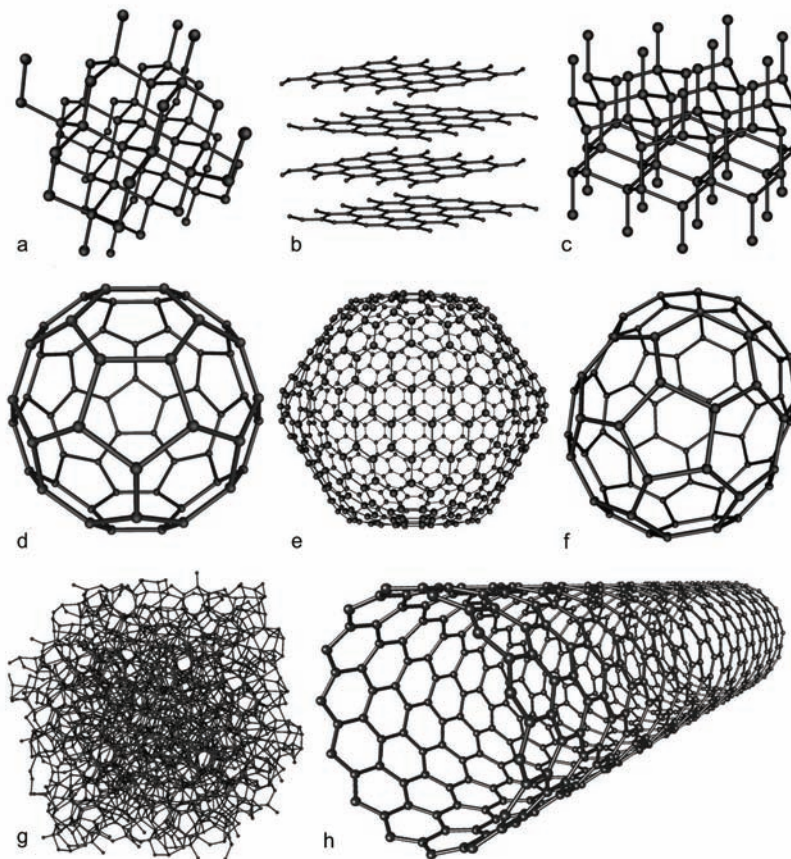
## Zajímavé vlastnosti uhlíku

Žijeme v době, kdy se mnoho poznatků z kvantové teorie, které kdysi existovaly jen v poznámkách teoretických fyziků, dostává také do oblasti experimentální. Mnoho věcí, se kterými denně pracujeme, by bez znalosti kvantové teorie neexistovalo. Stačí se jen rozhlédnout kolem sebe. Patrně nejvíce tato teorie zasáhla oblast elektroniky, zejména polovodičů. Valná většina dnešních elektronických součástek je vytvářena fotolitografickou cestou na křemíkových deskách. Tato technologie byla díky hromadné výrobě dotažena téměř k dokonalosti. Velikosti současných tranzistorů se měří v desítkách nanometrů a jejich pracovní frekvence v řádu gigahertzů.

### Nejen křemík

Avšak ne všechny součástky je možné vyrobit na křemíku. Příkladem mohou být svítivé diody (LED), nebo tranzistory ve vysokofrekvenčních obvodech mobilních telefonů. Pro optoelektronické součástky křemík příliš nevyhovuje kvůli šířce a tvaru zakázaného pásu. Tato veličina je jedna z nejdůležitějších pro polovodiče, mimo jiné úzce souvisí s interakcí elektromagnetického záření s polovodičem. V poslední době vědci intenzivně vyvíjejí materiálové struktury, které mají v jistém směru mnohem výhodnější vlastnosti, než má křemík. Značný rozvoj zaznamenává vývoj organických polovodičů, jejichž základním stavebním prvkem je uhlík. Pojdme se tedy blíže podívat na jeho fascinující vlastnosti.

*Základní formy (alotropy) uhlíku: a) diamant, b) grafit, c) lonsdaleit, d) C60 fullerén, e) C540 fullerén, f) C70 fullerén, g) amorfní uhlík, h) jednovrstvá nanotrubička.*  
Michael Ströck.



**Hallův jev** – uplatňuje se ve vodiči (polovodiči), kterým protéká proud za přítomnosti magnetického pole. Pokud má magnetické pole kolmo složku na rychlost nosičů náboje, působí na náboje Lorentzova síla a na bočních stěnách vodiče se objeví tzv. Hallovo napětí.

**Kvantový Hallův jev** – pozorujeme ve dvou-dimenzionálních strukturách, kdy za nízkých teplot a silných magnetických polí elektrická vodivost materiálu nabývá celočíselných násobků  $e^2/h$  s velmi vysokou přesností. V tomto stavu vodivost nezávisí na jiných vlastnostech materiálu.

Dvě nejznámější formy uhlíku: grafit (nahore) a syntetický diamant (dole). Dennis Tasa/St. Petersburg.



## Uhlík a jeho vlastnosti

Tento prvek je základem pro organické sloučeniny, ze kterých je složeno vše živé na Zemi. V přírodě se uhlík vyskytuje v několika formách. Nejběžnější z nich je grafit. Atomy uhlíku vytvářejí hexagonální krystalickou strukturu. Jinou formou je diamant. Již od pohledu se velmi liší od grafitu, přestože se jedná pouze o jiné uspořádání atomů uhlíku. Diamant, na rozdíl od grafitu, neobsahuje volné elektrony, proto je elektricky nevodivý a průhledný.

Další formy uhlíku jsou dílem člověka. Zaváděním poruch do krystalové mřížky uhlíku lze vytvářet zajímavé molekuly. Uvažujme rovinu složenou z pravidelných šestiúhelníků. Zaměníme-li několik šestiúhelníků za pětiúhelníky, rovina se různě zprohýbá tak, aby atomy zaujímaly stav s nejnižší energií. Pokud správně rozmístíme tyto pětiúhelníky, může se část roviny uzavřít sama do sebe a vznikne tak molekula zvaná fullerén. Poměr šestiúhelníků a pětiúhelníků ve fullerenu nemůže být nahodilý. Pro topologii molekuly je určující počet sousedních atomů, se kterými se daný atom může vázat. Za jistých okolností může dojít k tomu, že se vrstva uhlíkových atomů svine do trubcovitého tvaru, vznikne útvar zvaný nanotrubička. Nanotrubičky jsou nyní objektem značného zájmu mnoha vědců. Posledním „hitem“ jsou atomární monovrstvy a dvojevrstvy známé pod názvem grafen. Už po tomto krátkém úvodu je vidět, jak rozsáhlé možnosti nám nabízí tento úžasný prvek a to jsme ještě nezačali hovořit o vazbách s jinými prvky!

## Uhlíkové atomární vrstvy

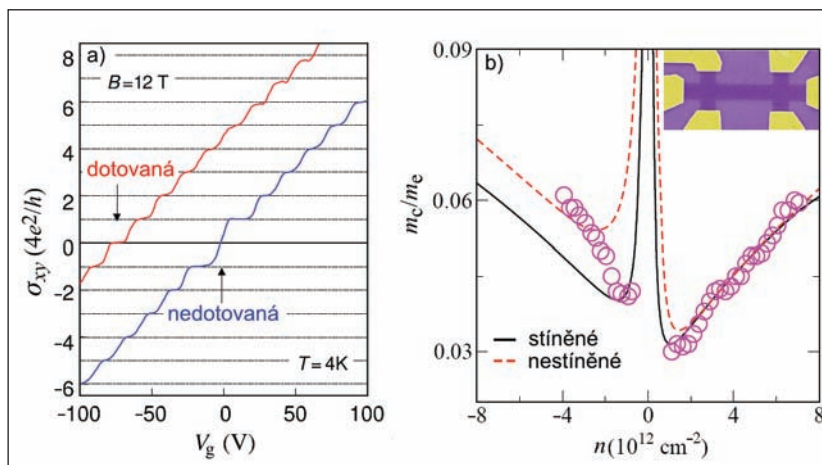
Uhlíkové monovrstvy (vrstvy o tloušťce jeden atom) jsou zajímavé především svými elektrickými, ale i mechanickými vlastnostmi. Monovrstva je velmi dobře elektricky vodivá, avšak elektrony se zde chovají poněkud jinak, než jsme zvyklí u vodičů. Elektrony jsou uvězněny v rovině (2D prostoru), mají vysokou pohyblivost, nejvyšší naměřená hodnota byla okolo  $200\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , pro srovnání pohyblivost elektronů v křemíku je  $1\,450\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Vyšší hodnoty pohyblivosti elektronů dosud nebyly u žádného jiného materiálu pozorovány. Rychlost elektronů dosahuje  $10^6\text{ m/s}$ .

Pro popis stavu elektronů v běžných materiálech (křemík, germanium, galium-arsenid) se používá Schrödingerova rovnice. V uhlíkové monovrstvě však tato rovnice selhává. Příčinou je vysoká rychlost elektronů, uplatňují se relativistické efekty. Správný popis poskytují

Diracova rovnice. Kromě vysoké rychlosti mají elektrony ještě další exotickou vlastnost, chovají se jako nehmotné částice někdy nazývané Diracovy nehmotné fermiony. Energie elektronu roste lineárně s hybností, což je typické pro částice s nulovou klidovou hmotností. Takové chování mají i elektrony ve vakuu, pokud je jejich kinetická energie mnohem vyšší než klidová energie a rychlost velmi blízká rychlosti světla. V monovrstvě se však relativistické elektrony nepohybují rychlostí velmi blízkou rychlosti světla (ve vakuu), proto je třeba v Diracově rovnici použít skutečnou rychlost pohybu elektronů.

Nyní však již probíhají experimenty s uhlíkovými dvojvrstvami. Mezinárodnímu týmu fyziků se nedávno podařilo vytvořit dvojvrstvu uhlíkových atomů se zcela zásadní vlastností. Působením vnějšího elektrického pole je možné nastavit šířku zakázaného pásu materiálu v rozmezí od nuly do více než 200 meV. Šířka zakázaného pásu zde souvisí s koncentrací elektronů v materiálu, která je přímo úměrná intenzitě elektrického pole. Stejný efekt byl však pozorován v souvislosti se zvyšováním dotace příměsí, které zvyšují koncentraci volných elektronů. Koncentrace příměsí má tedy ekvivalentní vliv na šířku zakázaného pásu jako elektrické pole. Nenulová šířka zakázaného pásu (asi do 3 eV) znamená polovodivé vlastnosti. V tomto režimu se volné elektrony a díry již nechovají jako částice s efektivně nulovou klidovou hmotností. Podle vědce Antonia Castra Neta z Bostonské univerzity právě efektivní hmotnost nosičů náboje je úměrná šířce zakázaného pásu. Tato závislost byla měřena pomocí cyklotronní rezonance. Měření periody rotačního pohybu elektronů v magnetickém poli v dvojvrstvě byla vypočítána jejich efektivní hmotnost a následně šířka zakázaného pásu.

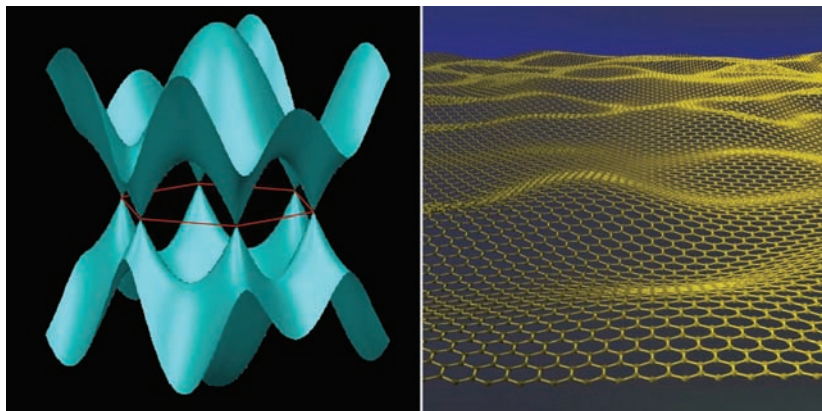
Z naměřených výsledků se ukázalo, že při určité hodnotě napětí zakázaný pás zanikne a materiál se chová jako vodič. Další důkaz o změně šířky zakázaného pásu poskytla analýza kvantového Hallova



a) naměřená závislost vodivosti na přiloženém napětí u kvantového Hallova jevu. Červená křivka platí pro dotovanou dvojvrstvu a modrá pro nedotovanou dvojvrstvu. b) Cyklotronní hmotnost v závislosti na koncentraci. Experimentální data jsou znázorněna kroužky. Vložený obrázek je elektronová mikrofografie zařízení pro měření Hallova jevu. Šíře grafenového pásku je 1  $\mu\text{m}$ . E. V. Castro1 a kol., ArXiv:cond-mat/0611342v2, 2007.

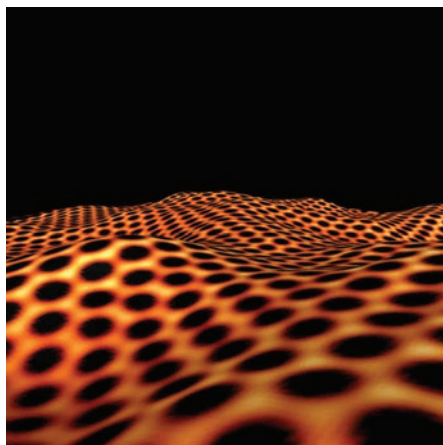
**Křemík** – polokovový prvek, hojně se vyskytující v zemské kůře. Slouží jako základní materiál pro výrobu polovodičových součástek, ale i jako základní surovina pro výrobu skla a významná součást keramických a stavebních materiálů. Objev křemíku je připisován švédskému chemikovi J. Jacobu Berzeliovi (1824).

**Uhlík** – Carboneum, chemický prvek, tvořící základní stavební kámen všech organismů. Sloučeniny uhlíku jsou jedním ze základů světové energetiky, kde především fosilní paliva jako zemní plyn a uhlí slouží jako energetický zdroj pro výrobu elektřiny a vytápění, produkty zpracování ropy jsou nezbytné pro pohon spalovacích motorů a silniční dopravu. Výrobky chemického průmyslu na bázi uhlíku jsou součástí našeho každodenního života ať jde o plastické hmoty, umělá vlákna, náterové hmoty, léčiva a mnoho dalších.



*Tvar valenčního a vodivostního pásu jedné hexagonální buňky uhlíkové monovrstvy (vlevo), uspořádání atomů v monovrstvě (vpravo). Raghunath Murali.*

*Třírozměrný TEM snímek zvlněné vrstvy grafenu na podkladu SiO<sub>2</sub>. RWTH Aachen University.*



jevu. Jde o kvantování elektrické vodivosti materiálu vystaveného silnému magnetickému poli za nízké teploty. Za kvantování vodivosti je zodpovědné kvantování fundamentálnější veličiny, rotační energie elektronu. Elektronů mohou obsazovat pouze diskrétní orbity, které se nazývají Landauovy hladiny. Vhodnou kombinací velikosti magnetického pole a koncentrace elektronů lze dosáhnout toho, že vodivost materiálu závisí pouze na základních konstantách přírody.

Tento jev nastává jen v dvojrozměrných strukturách. Na obrázku v levo je srovnání průběhu Hallovy vodivosti dotované a nedotované dvojvrstvy v závislosti na napětí. Elementární kvantum vodivosti u dvojvrstvy musí být vynásobeno čtyřmi z důvodu čtyřnásobné degenerace stavů elektronů. U nedotované dvojvrstvy chybí plató v okolí nulové Hallovy vodivosti, což je typické pro vodiče (nulová šířka zakázaného pásu).

Polovodiče s nastavitelnou šířkou zakázaného pásu jistě najdou okamžité uplatnění v oblasti laserů s proměnnou vlnovou délkou a fotodetektorů. Další možné uplatnění existuje v oblasti vysoce účinných solárních článků, které by bylo možné přímo optimalizovat pro spektrum slunečního záření. V lednu 2008 byl publikován článek o nejčernějším materiálu na světě s odrazivostí pouhých 0,045 %. Není to náhoda, že byl vyroben z uhlíkových nanotrubic. Nyní již na univerzitě v Princetonu probíhají pokusy o vývoj FET tranzistorů (polem řízené tranzistory) vyrobených na uhlíkových atomárních vrstvách. Je vidět, že vývoj uhlíkových nanostruktur jde velmi rychle dopředu, avšak ke komerčnímu použití mají tyto technologie stále ještě daleko.

■ Miroslav Havránek, 22. 2. 2008, AB 8/2008



# Grafen – materiál, kde elektrony ztrácejí hmotnost

Grafen je materiál složený pouze z jedné nebo dvou vrstev atomů uhlíku, uspořádaných do pravidelné hexagonální struktury. Zatímco jednoatomární vrstva grafenu bez příměsí vykazuje vysokou elektrickou vodivost a efektivní hmotnost elektronů klesá k nule, dvouatomární vrstva se chová podobně jako polovodič s malou šířkou zakázaného pásu, která však může být ovládána externím elektrickým polem. Ke grafenu se váže hned několik prvenství. Elektrony v tomto materiálu dosahují nejvyšší pohyblivosti ze všech známých materiálů. Grafen je nejtenčí a současně nejpevnější materiál na světě. Pevnost grafenu si můžeme představit na příkladu, kdy máme 100  $\mu\text{m}$  tlustou membránu – tedy jen o málo tlustší než lidský vlas. Pokud by atomy této vrstvy byly vázány stejně pevně jako atomy grafenu, pak bychom potřebovali sílu asi 20 kN k jejímu proříznutí. Grafen je nyní jedním z nejintenzivněji zkoumaných materiálů na světě.

## Stručná historie grafenu

Grafen se poprvé podařilo vyrobit v roce 2004 vědcům z Univerzity v Manchesteru (Velká Británie) a Ústavu pro mikroelektronické technologie v Černogolovce (Rusko). Teoreticky však byly tyto dvojrozměrné struktury studovány o mnoho desítek roků dříve, ale fyzikové se tehdy domnívali, že jednoatomární vrstvy by byly velmi nestabilní. Důvodem byly tepelné kmity krystalové mřížky, které měly být natolik silné, že by docházelo k přemísťování atomů a přeměně částí jednoatomárních vrstev do nanotubic a fullerénových struktur. Tento názor byl vyvrácen až v roce 2004. Nyní probíhají experimenty s grafenovými tranzistory a s ovlivňováním vlastností grafenu za pomoci vhodných dopantů.

Přestože první grafenový tranzistor byl vyroben již ve stejném roce, kdy byl poprvé vyroben grafen, tak jeden z prvních tranzistorů schopných pracovat na frekvenci v řádu GHz se podařilo vyvinout vědcům v laboratoři IBM teprve nedávno (2008). Jedná se o polem řízený tranzistor (podobně jako křemíkový MOSFET). Jako základní materiál slouží křemíková destička s tenkou povrchovou vrstvou oxidu křemičitého.

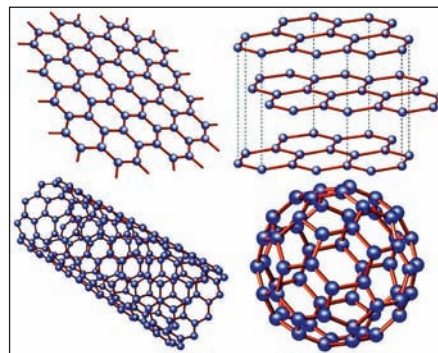
**Zakázaný pás** – interval energie, ve kterém se nemůže nacházet žádný ze stavů elektronů v krystalové mříži. Podle šířky zakázaného pásu rozdělujeme látky na vodiče (mají nulovou šířku zakázaného pásu), polovodiče (zakázaný pás nulový avšak menší než 3 eV) a izolanty (zakázaný pás je větší než 3 eV).

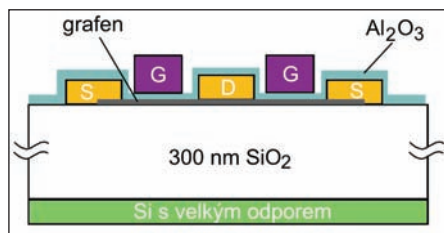
**Vodivostní pás** – interval energii, při kterých nejsou elektrony vázány ke konkrétním jádrům a mohou se pohybovat v látce volně.

**Valenční pás** – poslední (nejvyšší) pás, ve kterém se vyskytují nějaké elektrony v základním stavu.

**Pásově spektrum** – energetické spektrum, které vznikne, pokud má potenciální energie mnoho maxim a minim, například pro elektrony v krystalické mříži složené z mnoha iontů. Energetické hladiny elektronů se rozmazávají (na základě relací neurčitosti) a vznikají tzv. energetické pásy dovolených a zakázaných energií.

Porovnání jednotlivých fází uhlíku. Grafen (vlevo nahoře) tvoří šestiúhelníková mříž uhlíkových atomů. Grafit (vpravo nahoře) můžeme chápat jako mnoho grafenových vrstev na sobě. Uhlíková nanovlákná (vlevo dole) jsou stočené grafenové vrstvy. Fullerény (vpravo dole) jsou tvořeny sbaleným grafenem s vnořenými pětiúhelníky do šestiúhelníkové mříže. ArXiv 0709.1163, 2008.



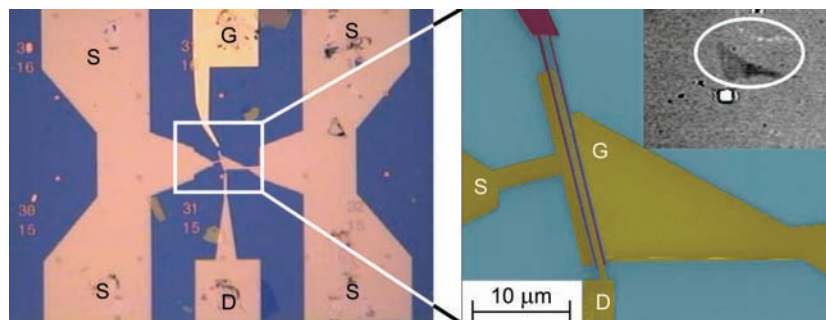


Schematické znázornění průřezu grafenového tranzistoru. Elektrody jsou označeny S (Source), D (Drain) a G (Gate). ArXiv 0812.1586, 2008.

**Hmotnost efektivní elektronu** – zdánlivá hmotnost elektronu v krystalové mříž. Pokud se elektron pohybuje krystalovou mříží určitého materiálu, působí na něj elektrické síly atomu, poblíž kterého se elektron zrovna vyskytuje. Elektron pak reaguje na vnější elektrická a magnetická pole tak, jako by měl hmotnost lišící se od jeho klidové hmotnosti. Taková hmotnost se nazývá efektivní hmotnost; může být různá v různých směrech, obecně se jedná o tenzorovou veličinu.

**Pohyblivost** – mobilita, koeficient úměrnosti mezi průměrnou rychlostí nabitých částic a elektrickým polem.

Grafenový tranzistor. Foto, ArXiv 0812.1586, 2008.



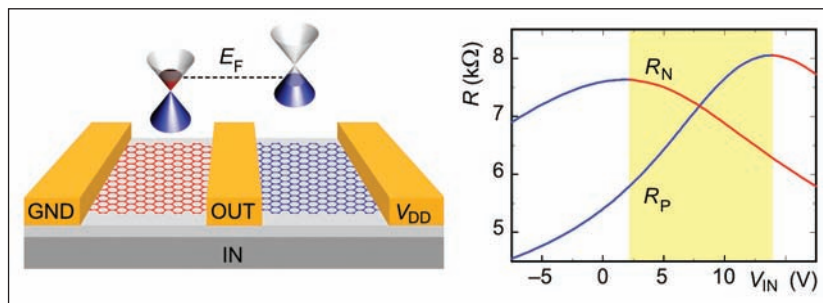
Rok	Popis	Instituce
2004	Grafen byl poprvé vyroben a jeho vlastnosti tak mohly být zkoumány experimentálně. Ve stejném roce byl demonstrován princip polem řízeného tranzistoru vyrobeného z grafenu.	University of Manchester, Institute for Microelectronics Technology (Černogolovka, Rusko)
2007	Prokázána nastavitelná šířka zakázaného pásu dvojvrstvé grafenové struktury.	Universidade do Porto, University of Manchester a další
2008	Vyrobena polem řízený tranzistor pracující na frekvenci 26 GHz.	Laboratoře IBM
2008	Grafen lze změnit z velmi dobrého vodiče v izolant pomocí dopování vodíkem.	University of Manchester
2009	První logický obvod – invertor pracující na frekvenci 10 kHz.	L-NESS (Miláno, Itálie)

Grafen je vytvořen technologií postupného mechanického „odlupování“ atomárních vrstev uhlíku až do fáze, kdy na povrchu vrstvičky oxidu křemičitého zůstane pouze jediná atomární vrstva. Tato technologie je však vhodná pouze pro laboratorní účely a neumožňuje vytvářet velkoplošný grafen. Vodivé elektrody byly vytvořeny z paladia pomocí elektronové litografie. Délka vodivého kanálu v grafenu je 150 nm. Mezní frekvence, při které tranzistor přestává zesilovat, závisí nepřímo úměrně na délce vodivého kanálu. V případě tohoto tranzistoru dosahuje mezní frekvence hodnoty 26 GHz. Než ale bude možné z podobných tranzistorů realizovat například mikroprocesor v počítači, bude třeba překonat mnohé technologické bariéry. Jednou z nich je malý poměr proudů tranzistoru v sepnutém a v rozepnutém stavu.

### První integrovaný obvod

První funkční grafenový integrovaný obvod se podařilo vyro-

bit vědcům v laboratoři L-NESS v Milánu. Je jím invertor složený ze dvou tranzistorů. Invertor byl vyroben na grafenové jednovrstvě. Běžně známý invertor vyrobený CMOS procesem obsahuje dvojici křemíkových MOSFET tranzistorů s N a P kanálem. Rozdílný typ vodivosti jejich kanálů je dosažen rozdílným typem dotace křemíku.



Tranzistory vyrobené z grafenu s rozdílnou odezvou na hradlové napětí byly realizovány pomocí selektivního elektrického ochlazování. Jeden z tranzistorů, který slouží jako tranzistor s P kanálem, zůstal nezměněný a N tranzistor byl elektricky ochlazován. Při tomto procesu se na tranzistor připojí elektrické napětí. Tranzistorem protéká proud, čímž dojde k jeho ohřátí a zvýšení difúze P dopantů. Postupným snižováním napětí se materiál ochlazuje až na pracovní teplotu a proces difúze se zastaví.

Tímto způsobem došlo ke snížení koncentrace dotací, k posuvu Fermiho hladiny tranzistoru a ten se již dále choval jako tranzistor s N kanálem. Invertor byl úspěšně testován při frekvenci vstupního signálu 10 kHz. Napájecí napětí a vstupní úrovně invertoru byly 3,3 V, tedy kompatibilní se současnými CMOS obvody. Na výstupu však bylo dosaženo rozdílu logických úrovní pouze 0,15 V. Frekvenční limit 10 kHz je způsoben vysokou vstupní kapacitou zařízení měřícího výstupní napětí invertoru. Pravděpodobně existuje možnost zvýšení frekvence vstupního signálu až na 4,5 GHz v případě zatížení invertoru dalším ekvivalentním hradlem.

## Aplikační potenciál

Současný stupeň miniaturizace a integrace křemíkových součástek v integrovaných obvodech se zdá být blízko hranice, pod kterou tyto obvody již nebudou schopny pracovat. K problémům této technologie patří například příliš velký odpor (malý průřez) signálových cest, velké svodové proudy (zanedbatelné u jedné součástky ale ne u miliardy součástek), odvod tepla a další, které se týkají přímo fyzikálních principů tranzistorů. Grafen se vyznačuje vysokou tepelnou i elektrickou vodivostí. Tyto vlastnosti je možno využít například u signálových cest

Vlevo: schéma invertoru. Vpravo: závislost odporu kanálů tranzistorů na hradlovém napětí. Booleanovská funkce obvodu je zaručena pouze pro vyznačený rozsah vstupních napětí. ArXiv 0904.2745, 2009.

**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 S.

**CMOS** – Complementary Metal Oxid Semiconductor, technologie, která využívá polovodičových součástek řízených elektrickým polem. K provozu stačí jen jedno napájecí napětí a spotřeba těchto elektronických snímačů je velmi malá. Technologie samotná je poměrně laciná a dobře zvládnutá. Touto technologií se vyrábí světlocitlivé prvky digitálních fotoaparátů (alternativa k CCD) a většina počítačových integrovaných obvodů včetně procesorů.

**Invertor** – druh elektrického obvodu, který realizuje funkci logické negace. Pokud je na vstupu obvodu logická jednička, na výstupu dostaneme logickou nulu. Je-li na vstupu logická nula, výstup se nastaví do logické jedničky.

**Dopant** – nečistota přidávaná záměrně v malém množství do krystalické mříže. Jejím účelem je ovlivnit optické a elektrické vlastnosti krystalu.

**Litografie** – metoda tisku na hladké povrchy, 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 implementován 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 zaostřeného elektronového paprsku). Záznam se provádí do fotorezistu, kde vzniká po expozici a chemickém odleptání reliéfní profil.

v obvodech s vysokou integrací. Zvláště zajímavá je modulace šířky zakázaného pásu vnějším elektrickým polem v rozsahu zatím přibližně od 0 do 200 meV.

V takovém polovodiči se ale bude výrazně uplatňovat vlastní vodivost, kdy elektrony z valenčního pásu mohou pod vlivem tepelných excitací přecházet do vodivostního pásu. Tento problém lze potlačit dotací grafenu vhodným prvkem. Nedávné experimenty ukazují, že grafen dotovaný vodíkem se může změnit z velmi dobrého vodiče v izolant. V budoucnu se tedy může stát, že na jeden čip bude možné integrovat digitální obvody s tranzistory, signálové cesty, izolační cesty a optoelektronické součástky vyrobené ze stejného materiálu – z grafenu.

■ Miroslav Havránek, 3. 7. 2009, AB 26/2009

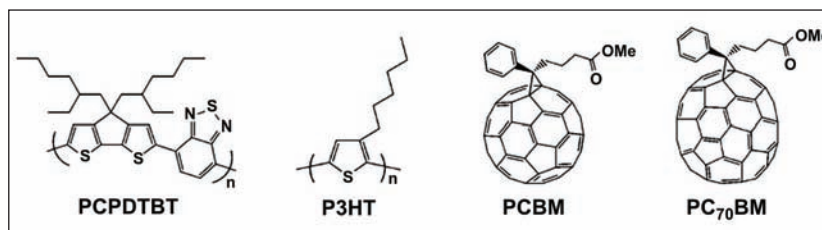
## Organické polymery jako zdroj energie

V současné době, kdy neustále roste poptávka po elektrické energii, je potřeba zabývat se možnostmi jejího získávání. Zajímavým řešením je využití energie pocházející ze Slunce. Naše mateřská hvězda produkuje každou sekundu  $4 \times 10^{26}$  J energie, ze které se k naší

Zemi (mimo atmosféru) dostane přibližně 1 kJ na čtvereční metr. Pro snazší představu tohoto energetického toku uvedme následující příklad. Pro uvaření šálku kávy je třeba přibližně energie 80 kJ. Kdybychom měli k dispozici zařízení, které by veškerou energii slunečního záření dopadající na 1 m<sup>2</sup> dokázalo převést na elektrickou energii, pak bychom pomocí tohoto idealizovaného zařízení uvařili šálek kávy za 80 sekund. V současné době běžně využíváme energii ze Země, ať již k přímému ohřevu, nebo k získávání elektrické energie pro napájení nízkoodběrových elektrických zařízení. energii získanou ze solárních článků využívá mnoho lidí na celém světě, aniž by si to přímo uvědomovali. Příkladem mohou být GPS družice, které takto získávají energii pro svůj provoz. Téměř všechna zařízení v kosmu jsou napájena ze solárních panelů. Mnoho dalších aplikací bychom našli i na Zemi. Pro konverzi slunečního záření na elektrickou energii se používají fotovoltaické články (viz str. 143), většina z nich je v současnosti vyráběna z křemíku. Výroba je však relativně náročná a drahá. Dalším omezením v širším využití všech solárních článků je nízká účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Ke snížení výrobních nákladů by mohla pomoci nová technologie tandemových článků, vyrobených z organických polymerů.

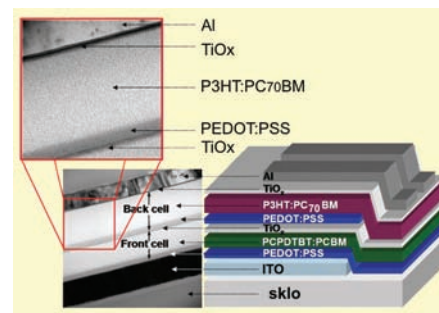
### Křemíkové fotovoltaické články

Křemíkové články využívají ke konverzi světla na elektrickou energii řadu fyzikálních procesů odehrávajících se v okolí PN přechodu fotodiody. Na rozhraní oblastí vodivosti typu P a N difundují jednotliví nositelé náboje (elektrony a díry) na opačnou stranu přechodu a tam



*Schématické znázornění jednotlivých druhů molekul. Na schématech v pravé části obrázku je dobře patrná molekula fullerenu. Kim a kol., Science AAAS, Science Magazine, 2007.*

*Průřez tandemovou strukturou solárního článku z organických polymerů. Kim a kol., Science AAAS, Science Magazine, 2007.*



**Majoritní nositelé náboje** – náboje, které vznikly v polovodiči vytvářením chemických vazeb prvků s různým mocenstvím. V polovodiči typu P jsou to díry (neobsazené místo po elektronu v chemické vazbě) a v polovodiči typu N elektrony (tyto elektrony se nemohou účastnit chemické vazby a jsou k atomům vázány velmi volně). Koncentrace majoritních nositelů náboje je v polovodiči obvykle o několik řádů vyšší, než koncentrace minoritních nositelů náboje.

**Minoritní nositelé náboje** – náboje opačné polarity oproti majoritním nositelům v dané oblasti. Vznik minoritních nositelů v polovodiči je způsoben hlavně tepelným pohybem, dopadem fotonů nebo elektricky nabitých částic.

**PN přechod** – rozhraní v polovodiči, kde dochází ke změně typu majoritních nosičů náboje.

**Heteropřechod** – rozhraní polovodivých materiálů s různými šířkami zakázaného pásu, přičemž je nutné, aby jednotlivé materiály na sebe plynule navazovaly na úrovni krystalové mřížky. Heteropřechody se používají často v optoelektronických součástkách a vysokofrekvenčních tranzistorech.

rekombinují. Na tomto rozhraní se tak vytvoří tenká oblast bez volných nositelů náboje (tzv. depletiční vrstva neboli vyprázdňená oblast). Absorbují-li se v depletiční vrstvě foton, vznikne volný pár elektron – díra. Tomuto jevu se říká vnitřní fotoelektrický jev. Takto vygenerovaný pár elektron-díra přispívá k proudu minoritních nositelů náboje přes PN přechod. Není-li k fotodiode připojen vnější obvod, musí být tento proud kompenzován proudem majoritních nositelů náboje, což se projeví vznikem elektrického napětí na kontaktech diody. Pokud k diodě připojíme rezistor, začne přes něj protékat fotoelektrický proud. Jako základ solárního panelu slouží tedy plošné fotodiody (PN přechody), které jsou technologicky uspořádány tak, aby na depletiční vrstvu mohlo dopadat světlo. Pro výrobu panelů se používá monokrystalický, polykrystalický a amorfni křemík. Typ krystalické struktury má značný vliv na šířku zakázaného pásu, která určuje účinnost článku.

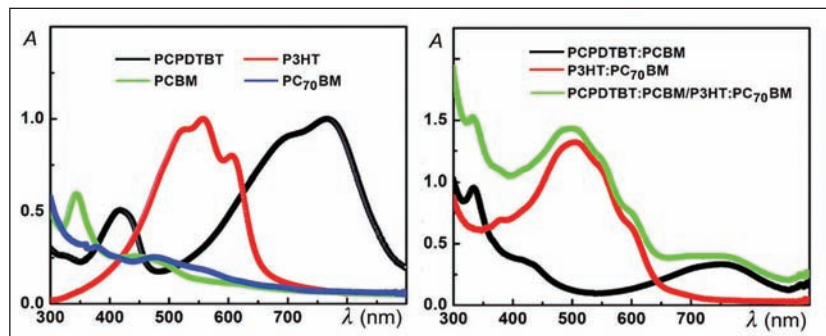
Největší účinnosti (okolo 15 %) dosahují články vyrobené z monokrystalického křemíku. Čtvereční metr takového solárního panelu by za ideálních podmínek (Slunce v zenitu, obloha bez mráčku) dokázal dodat energii na uvaření šálku kávy za necelých 10 minut. Výroba monokrystalických křemíkových článků je však výrobně dražší oproti amorfniému a polykrystalickému křemíku. Další nevýhodou je nízká mechanická odolnost všech křemíkových článků.

## Články z organických polymerů

Částečné odstranění některých problémů křemíkových článků nabídne v budoucnu využití organických polymerů, a to hlavně díky jejich nízké výrobní ceně a vyšší mechanické odolnosti. Důvodem jejich nevyužívání ve velkém je zatím velmi nízká účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii.

Nejvyšší účinnosti organických solárních článků se nedávno podařilo dosáhnout týmu vědců pod vedením profesora Alana Heegera z Kalifornské univerzity v Santa Barbaře, nositele Nobelovy ceny za chemii. Účinnost článků dosahovala 6,5 %. Využijeme-li opět analogii s vařením šálku kávy, vyjde potřebný čas přibližně na

Absorpční koeficienty ( $A$ ) jednotlivých složek polovodiče v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření (první graf) a sloučenin těchto materiálů obsahující heteropřechody (druhý graf). Kim a kol., Science AAAS, Science Magazine, 2007.



20 minut. Nutno podotknout, že v roce 2005 byl rekord v účinnosti organických článků pouhá 3 %. Současný nejučinnější solární článek, vyrobený z polovodivého polymeru a molekul fullerenu, je složen ze dvou subčlánků umístěných nad sebou v takzvaném tandemovém uspořádání.

Oba články jsou odděleny vrstvou oxidu titanu, která plní několik úloh. Slouží jako mezivrstva pro navázání různých druhů materiálů obou článků, které mají odlišné chemické vlastnosti. Dále slouží jako transportní vrstva pro elektrony a brání průchodu děr. Vrstva oxidu titanu je opticky polopropustná, její optické parametry (zejména koeficient odrazu) byly voleny tak, aby se v jednotlivých člancích absorbovalo optimální množství fotonů určité vlnové délky. Každý z dvojice článků je tedy citlivý na jinou část spektra slunečního záření. Klíčové materiálové složky tvoří sloučeniny P3HT a PCPDTBT (jsou to zkratky komplikovaných názvů polymerů). P3HT pokrývá podstatnou část viditelného spektra, zatímco PCPDTBT absorbuje nejvíce v blízké infračervené oblasti, další výrazný pík má tento materiál v blízké ultrafialové oblasti. Tyto materiály samy o sobě nedokáží přeměnit sluneční záření na elektrickou energii. Ke konverzi energie dochází v okolí heteropřechodů vytvořených sloučeninami PCPDTBT:PCBM pro blízkou infračervenou a ultrafialovou oblast vlnových délek. P3HT:PC<sub>70</sub>BM je aktivní ve viditelné oblasti spektra.

Většina současně vyráběných tandemových článků je řešena tak, že horní vrstvu tvoří materiál s větší šířkou zakázaného pásu, oproti té spodní. Tak se v horní vrstvě absorbují fotony kratších vlnových délek a fotony delších vlnových délek projdou materiálem s velkou šířkou zakázaného pásu a absorbují se až ve spodní vrstvě. Tím se dosahuje nejen vyšší účinnosti, ale i podobné voltampérové charakteristiky obou článků v tandemové struktuře. V případě článku vyvinutého na Kalifornské univerzitě bylo nutno použít inverzního uspořádání. To znamená, že článek s větší šířkou zakázaného pásu je umístěn na spodní straně. V opačném případě by vzhledem k velké tloušťce horní vrstvy došlo ke značnému útlumu záření a celý článek by tak měl nižší účinnost než v opačném uspořádání.

## Epilog

S postupným zdražováním energií a vývojem stále levnějších solárních panelů, se energie ze Slunce stane velmi perspektivním řešením



Články z organických polymerů mají úžasné mechanické vlastnosti, které je předurčují k použití v mobilních zařízeních. Kim a kol., Science AAAS, Science Magazine, 2007.

**Depleční vrstva** – oblast v okolí PN přechodu, ve které majoritní nositelé náboje difundují na druhou stranu PN přechodu, kde jsou minoritními nositeli náboje a rekombinují. Tímto procesem se v okolí přechodu vytvoří oblast, kde se nevyskytují volní nositelé náboje.

**Rekombinace v polovodiči** – proces, při kterém elektron z vodivostního pásu obsadí volnou energetickou hladinu ve valenčním pásu. Rekombinace může být buď zářivá (doprovázena emisí fotonu), nebo nezářivá (přebytečná energie se využije na kmity atomů v krystalové mřížce).

**Fotovoltaický jev** – objeven v roce 1839 Antoine-César Becquerelem (1788-1878). Na rozhraní dvou materiálů, na něž dopadá světlo, vzniká elektrické napětí. Jevu lze využít ke konstrukci fotovoltaického článku.

**Sluneční záření** – elektromagnetické záření širokého spektra, od dlouhovlnného rádiového záření až po rentgenové, které vyzařuje Slunce. U Země tok energie slunečního záření činí přibližně  $1,4 \text{ kWm}^{-2}$ .

**Amorfni látka** – látka, u které chybí pravidelné uspořádání atomů, rentgenovou difrakcí u této látky získáme pouze difúzní obrazec, svědčící o nahodilém uspořádání bez pravidelné struktury.

**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.

**Zenit (nadhlavník)** – bod svíse nad námi.

zejména v oblastech s minimální oblačností. Pokud se vědcům povede ještě jednou zdvojnásobit účinnost, pak se organické polovodiče stanou výhodnějším materiálem pro stavbu solárních panelů než křemík. Zkuste si představit solární panely nejrůznějších tvarů, které je možné složit do kompaktních rozměrů. Takovéto mobilní řešení by našlo okamžitě své využití všude tam, kde není k dispozici elektřina ze sítě. Ve vzdálenější budoucnosti by se mohly organické polymery stát součástí našeho oblečení, které by poskytovalo energii například pro mobilní telefon a mnoho jiných zařízení.

■ Miroslav Havránek, 3. 8. 2007, AB 30/2007

Průhledný gelovitý organický polymer, jehož polymerace trvala 15 minut při teplotě 4 °C. Kostka o velikosti 1 cm<sup>3</sup>.  
R. A. Lerner, The Skaggs Institute for Chemical Biology.





## Ferokapalinová zrcadla

Nahrazení pevných materiálů tekutinou přináší značné výhody při konstrukci velkého zrcadla. Patří mezi ně nižší pořizovací cena, snadné dosažení velké plochy a absence defektů typických pro zrcadla klasická. Tekutinová zrcadla však nemohou být natáčena – zrcadlo směřuje vždy do zenitu. První generace tekutinových zrcadel stavěných na přelomu 20. a 21. století používala rtuť, jejíž povrch byl do parabolického tvaru formován rotací. Největšího průměru, šesti metrů, dosáhl dalekohled LZT (Large Zenith Telescope) v Kanadě. Nezanedbatelným faktorem omezujícím použitelnost prvních tekutinových zrcadel byla absence adaptivní optiky.

### První deformovatelná rtuťová zrcadla

Za druhou generaci tekutinových zrcadel, která spatřila světlo světa v roce 1994, vděčíme R. Ragazzonimu a E. Marchettimu. Italští vědci nechali procházet elektrický proud tekutou rtuť a její povrch deformovali cívkami generovaným magnetickým polem. Jejich první experimenty spočívaly v deformování zrcadla jako celku. Testovaný princip je však možno použít i pro rychlé lokální deformace povrchu zrcadla, které budou fungovat jako systém aktivní a adaptivní optiky. Pro adaptivní optiku je důležitá schopnost zrcadla rychle kompenzovat turbulence atmosféry, které mění tvar vlnoploch přicházejícího světla. U standardních zrcadel se odpovídajícím způsobem deformuje až sekundární nebo dokonce terciální zrcadlo, u tekutinových je možné deformovat přímo zrcadlo primární.

### Ferokapaliny

V případě rtuťových zrcadel je velkou komplikací pro implementaci adaptivní optiky vysoká hustota tekutiny. K dostatečné deformaci je potřeba velkých proudů. Řešením je v tomto případě nahrazení rtuť ferokapalinou – suspenzí nanočástic. Nanočástice mají průměr obvykle menší než 10 nm, jsou vyrobeny z magnetitu nebo jiného feromagnetika a rozptýleny v nosné kapalině. Feromagnetika obsahují při nízkých teplotách tzv. Weissovy domény, což způsobuje, že nanočástice mají vlastní magnetický moment. Vě výsledku tedy tvoří soustavu miniaturních magnetů, díky čemuž je ferokapalina schopna reagovat na magnetické pole. Mezi feromagnetickými nanočásticemi působí i van



Ferokapalina v magnetickém poli. Sachiko Kodama.

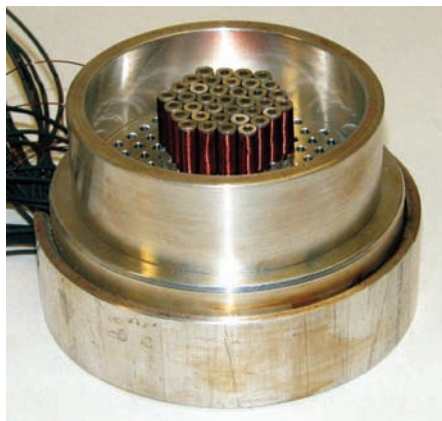
**Feromagnetikum** – materiál, ve kterém je energeticky výhodné, aby sousední magnetické momenty měly shodný směr. Tyto látky, například železo, jsou schopné značné magnetizace ve vnějším magnetickém poli. Po odstranění magnetického pole si ponechávají tzv. permanentní magnetizaci, tj. zůstávají zmagnetizované i bez vnějšího magnetického pole. Typickým příkladem je krystalické železo, kobalt či oxid chromu  $\text{CrO}_2$ .

**Aktivní optika** – způsob korekce nízkofrekvenčních (0,03 Hz a nižších) deformací primárního zrcadla. Poprvé byl systém aktivní optiky vyvinut a použit pro dalekohled NTT (New Technology Telescope) o průměru 3,5 metru, který patří ESO a je umístěn na hoře La Silla. Aktivní optika by měla eliminovat především tyto jevy: stálé výrobní vady, tepelné deformace způsobené teplotním gradientem, kompenzace vlastního průhybu zrcadla způsobeného gravitací, kompenzace nízkofrekvenční složky deformace zrcadla způsobené větrem a změny způsobené přechodem mezi Nasmythovým a Cassegrainovým ohniskem.

**Adaptivní optika** – slouží ke korekci vysokofrekvenčních změn obrazu způsobených zejména turbulencí atmosféry (až 500 korekcí za sekundu). Korekce se provádí počítačem řízenými posuny a deformacemi pomocných zrcátek. K vyhodnocení aktuálního tvaru vlnoplochy slouží referenční hvězda, která se musí nacházet v blízkosti pozorovaného objektu. Asi v 1% případů lze využít přirozenou hvězdu (NGS – Natural Guide Star). Většinou se používá umělá hvězda (LGS – Laser Guide Star), která se vytváří laserovým paprskem fokusovaným do výšky přibližně 90 km, kde zpětným rozptylem vzniká skvrna zářících sodíkových atomů. Druhou možností je využití Rayleighovy difúze ve výškách 10 až 20 km. Umělou hvězdu můžeme vytvořit jakkoli blízko sledovanému objektu, vyvstávají ale problémy spojené s její konečnou výškou a velikostí.

**LZT** – Large Zenith Telescope, šestimetrový rtuťový dalekohled umístěný v Kanadě 30 km od Vancouveru. Dalekohled byl uveden do provozu v roce 2004, na stavbě se podílela Univerzita of British Columbia, Lavalova univerzita a Institut d'Astrophysique de Paris.

Aktivní podložka zrcadla s 37 cívkami, které deformují povrch ferokapaliny. Denis Brousseau, Laval University.



der Waalsový síly, jež způsobují nežádoucí shlukování, které je možné omezit potažením nanočástic vrstvou polymerů. Ferokapaliny však trpí pro astronomy jednou podstatnou vadou, a to nízkou odrazivostí. Řešení spočívá v pokrytí povrchu ferokapaliny jinou koloidní kapalinou s vysokou odrazivostí, tzv. vrstvou MeLLF (Metal Liquid-Like Film). Tyto kapaliny bohužel nejsou slučitelné s většinou komerčně vyráběných ferokapalin.

### První ferokapalinové zrcadlo

Miniaturní prototyp výše popsaného typu zrcadla s adaptivní optikou byl sestaven v Kanadě na půdě Lavalovy univerzity. Výzkumný tým kladl důraz na nízkou cenu experimentu. Aktivní podložka zrcadla v sobě měla 37 hexagonálně rozmístěných magnetických cívek. Každá měděná cívka s 200 závitů obsahovala malé feritové jádro, díky čemuž její spotřeba proudu poklesla na méně než 200 mA. Průměr pokusných cívek byl 5 mm a do budoucna ho bude potřeba snížit na 1 mm. Na podložném zařízení spočívala hliníková nádoba naplněná jeden milimetr silnou vrstvou ferokapaliny. V tomto případě se jednalo o ferokapalinu EFH1 o hustotě 1 210 kg/m<sup>3</sup> a relativní permeabilitě 2,7, jejíž nosnou kapalinou je olej. Zrcadlo nebylo pokryto odrazivou vrstvou MeLLF, neboť její implementace nebyla prioritou experimentu. Ukázalo se, že povrch zrcadla je možné deformovat s frekvencí několika set oprav povrchu plochy za sekundu, což je dostatečné pro systém adaptivní optiky. Vědci doufají, že v příštích letech bude možné korigovat i změny s frekvencí až 500 Hz. Původní představy, že povrch kapaliny může reagovat jen na změny o frekvenci maximálně 20 Hz, se tedy nepotvrdily. Vědecký tým zkoušel reakce systému na vložení skleněných předmětů do dráhy paprsků a úprava povrchu zrcadla byla dostatečně rychlá. Experiment navíc prokázal, že amplituda deformace závisí nelineárně na magnetickém poli a chování magnetického pole neumožňuje použít standardní metody k předpovídání chování povrchu zrcadla. Přes všechny momentální nedostatky se deformovatelná ferokapalinová zrcadla zdají být velkým příslibem budoucí astronomie.

■ Zuzana Vidláková, 26. 9. 2008, AB 40/2008

## Umíme nedestruktivně detekovat jednotlivé fotony?

V poslední době se často objevují zprávy o nedestruktivním kvantovém měření, kdy je detekován kvantový objekt (zpravidla elektron, foton nebo atom) s minimálním narušením jeho stavu. V této stati se budeme zabývat pokusy o nedestruktivní detekci jednotlivých fotonů, o kterou se pokouší Michel Brune se spolupracovníky na francouzské universitě Ecole Normal Supérieure.

### Klasická detekce fotonů

Fotony se nejčastěji registrují klasickou nebo elektronickou cestou. Může jít o fotografickou desku či film, matici detekčních prvků CCD, fotonásobič nebo jiné detekční zařízení. V některých detektorech jsme schopni detekovat i jednotlivé fotony, vždy to ale znamená jejich zánik. Při registraci přístrojem foton zaniká a tak lze proces měření popsat v rámci tzv. Fockových stavů jednoduchým schématem, kdy se při měření mění jednofotonový stav ve vakuový stav:

$$|1\rangle \rightarrow |0\rangle.$$

Klasickými detektory není možné například zjistit vznik fotonu na stěně mikrovlnné dutiny, jeho šíření prostorem a jeho následný zánik. Kvantové skoky elektromagnetického pole v dutině působené kreací a anihilací fotonů na stěnách dutiny jsou pro tato zařízení nedostupná.

### Nedestruktivní detekce

Změřit přesně polohu a hybnost fotonu není možné, brání tomu Heisenbergovy relace neurčitosti. Měření jedné veličiny ovlivní měření veličiny druhé. V principu je ale možné určit alespoň přítomnost fotonu, tj. provést nedestruktivní měření Fockova stavu

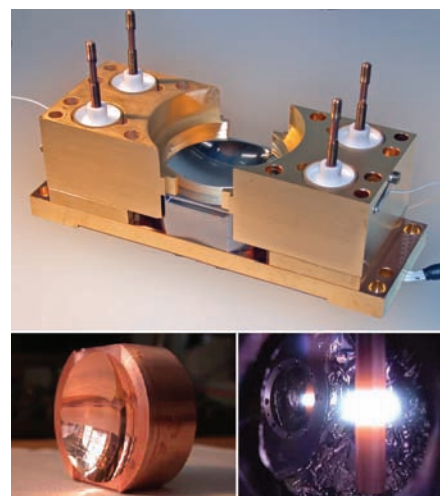
$$|1\rangle \rightarrow |1\rangle.$$

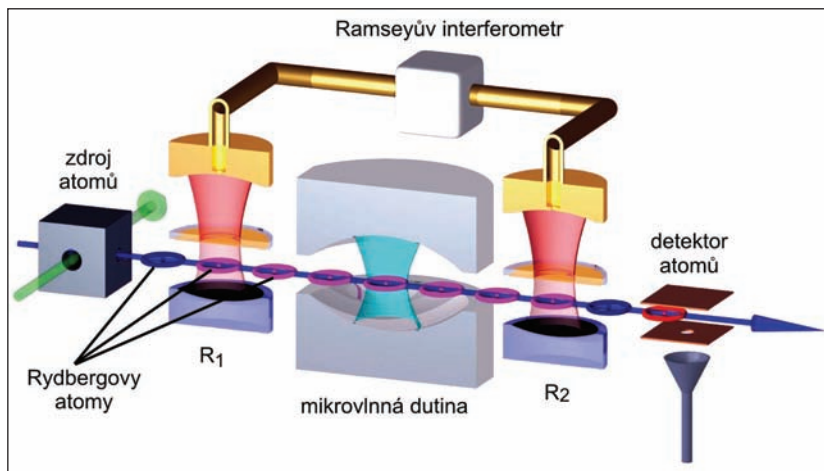
Způsob, jak to udělat, navrhla francouzská skupina vedená Michele Brunem již v roce 1990. K realizaci bylo ale třeba dlouhých sedmnácti let. Srdcem experimentu je mikrovlnná dutina ochlazená na teplotu 0,8 K. Na jejích stěnách se rodí a zanikají fotony. Dutina je opatřena dokonale opracovanými měděnými zrcadly s přesností na 8 nanometrů, které odráží fotony mezi sebou. Zrcadla jsou potažena niobem. Ten je za teploty v dutině supravodivý. Pokud se v dutině objeví foton, od-



Fotonásobič. Na levé straně je fotocitlivá katoda emitující elektrony, jejichž počet roste v jedenáctistupňovém násobiči na pravé straně. National Valve Museum.

Celkový pohled na rezonanční mikrovlnnou dutinu. Patrná je její spodní část, vrchní část není namontována. Vlevo dole je měděné zrcadlo rezonanční dutiny. Vpravo dole je snímek z pokovování zrcadla niobem. Ecole Normal Supérieure.





Základní schéma detekce fotonu v mikrovlnné dutině.  
Ecole Normal Supérieure.

razi se od zrcadel 1,3 miliardkrát, než se rozptýlí. Přesněji, v dutině mezi zrcadly dojde k útlumu faktorem  $1/e$  za 1,3 miliardy odrazů, což znamená, že foton urazil vzdálenost 40 000 km rovnou obvodu Země. Doba života fotonu v dutině je tak 0,13 sekundy.

Jak ale detekovat, zda je právě v dutině foton? Základní princip je na následujícím obrázku. K detekci fotonu se využívají Rydbergovy atomy rubidia Rb 85. Jsou připraveny ve stavech s vysokým hlavním kvantovým číslem  $n$ . Jedná se

o dvoustavový systém se stavy  $|g\rangle$ ,  $|e\rangle$  odpovídajícími čísly  $n = 50$  a  $n = 51$ . Vedlejší kvantové číslo dosahuje své maximální hodnoty  $l = n - 1$ . Frekvence odpovídající přechodu mezi oběma hladinami je 51,099 GHz. U takto vysoké excitace se elektronové orbitály podobají klasickým trajektoriím a proto je možné Rydbergovy atomy považovat za kruhové útvary (tak jsou znázorněny i na obrázku).

## Princip detekce

Rydbergovy kruhové atomy mají velký dipólový moment a proto jsou mimořádně citlivé na přítomnost elektromagnetického pole. Při průchodu ultrachladnou mikrovlnnou dutinou dochází ke změně jejich vlnové funkce podle toho, zda je či není přítomen foton. V přítomnosti fotonu bude většina atomů v dutině ve stavu  $|e\rangle$ , bez přítomnosti fotonu ve stavu  $|g\rangle$ . Stav Rydbergových atomů lze měřit Ramseyovým interferometrem, jehož jedno rameno je před dutinou a druhé za dutinou (na obrázku jsou ramena označena  $R_1$  a  $R_2$ ).

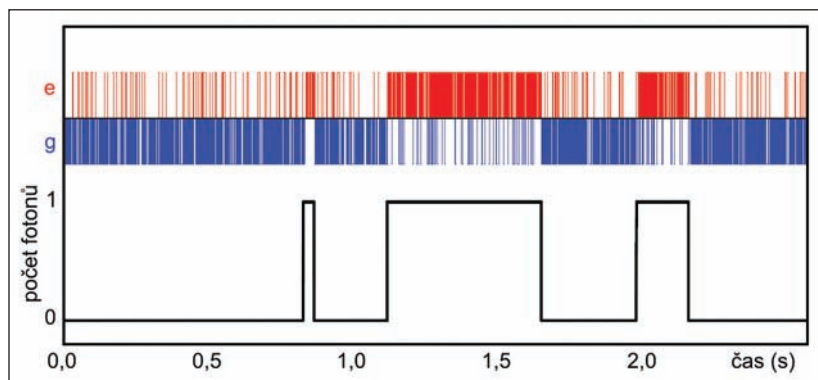
Oba signály se skládají do výsledného interferenčního obrazce, ze kterého je možné určit stav Rydbergových dvouhladinových atomů a tím přítomnost či nepřítomnost fotonu v dutině. Poznamenejme ještě, že míru interakce Rydbergových atomů s elektromagnetickým polem dutiny určuje tzv. Rabiho frekvence. Za teploty 0,8 K je 50 % šance, že v dutině je právě jeden foton a 50 % šance, že zde není foton žádný. Uvedená měření dávají svědectví o vzniku, době života a zániku fo-

**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  $|Ž\rangle$ , 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).

**Fockův stav** – stav v kvantové teorii, ve kterém je znám počet jedinců s danou energií. Někdy hovoříme o tzv. reprezentaci obsazovacích čísel. Tento stav je pojmenován podle sovětského fyzika Vladimira Alexandroviče Foka (1898–1974), v angličtině se jeho příjmení píše Fock.

tonu v dutině. Poprvé v historii je známa existence fotonu v dutině bez jeho likvidace. Velikou výzvou do budoucna je zjištění místa výskytu fotonu v dutině, samozřejmě v rámci možností daných kvantovou teorií. Prakticky půjde o určení tzv. Wignerovy funkce popisující pravděpodobnost výskytu fotonu ve fázovém prostoru.

■ Petr Kulhánek, 16. 3. 2007,  
AB 11/2007



*Detekovaný signál z Ramseyova interferometru. Převažující stav  $|e\rangle$  (červeně) znamená přítomnost fotonu. Převažující stav  $|g\rangle$  (modře) znamená nepřítomnost fotonu. Statistický charakter signálu je zřejmý. Ecole Normal Supérieure.*

## Astronomická observatoř v Ondřejově



1901 – cirkumzenitál a Šafaříkův hledač komet. Na snímku Andreas, František Nušl a Josef Jan Frič. Archiv observatoře.

**Cirkumzenitál** – přístroj na určování zeměpisné polohy z okamžiku, kdy předem zvolená hvězda dosáhne určité výšky nad obzorem. Právě tuto výšku měří cirkumzenitál. První cirkumzenitál zkonstruovali F. Nušl a J. Frič, zdokonalil ho E. Buchar. Zeměpisnou polohu bylo možné určit s přesností až 1,5 metru.

1905 – přikrývání cirkumzenitálu. Na snímku František Nušl, Josef Jan Frič, Vojtěch Pařízek a Bohuslav Mašek se sextantem. Archiv observatoře.



V roce 1750 založil páter Stepling při jezuitské koleji v Klementinu pražskou hvězdárnu, která se na dlouhá léta stala astronomickým centrem naší země. Věž Klementina sice záhy přestala vyhovovat astronomickým pozorováním pro své nevýhodné umístění uprostřed města, avšak všechny snahy o založení nové observatoře ztroskotaly. Hvězdárna ale pracovala nadále a stala se důležitým centrem časové služby, meteorologickou stanicí a první geofyzikální observatoří. Zásluhou profesora Seidlera se česká univerzita postarala o zřízení univerzitní hvězdárny v Praze na Letné, později přemístěné na Smíchov do Švédské ulice.

K velkým obdivovatelům astronomie patřili mezi jinými také bratři Josef a Jan Fričové. Po vysokoškolských studiích se oba nejvíce věnovali astronomii. Nedostupnost drahých přístrojů vyřešili založením vlastní mechanicko-optické dílny. Výrobou přesných astronomických a měřicích přístrojů získávali také potřebné prostředky pro živobytí a realizaci svých plánů. Jan vybudoval v podkroví společné dílny malou hvězdárničku, kde umístil i malý astrograf vlastní výroby. Tímto přístrojem získali řadu úspěšných snímků komet. Později Jan zhotovil plány na větší astrograf s patnácticentimetrovým Petzvalovým objektivem. Ale dříve, než se mohli pustit do práce, Jan vážně onemocněl a po čtyřech dnech umírá.

21. ledna 1898 koupil Josef Frič z ušetřených peněz zalesněný pozemek na vrcholu Manda u městečka Ondřejova, aby tu vybudoval hvězdárnu. Pozemek získal za 900 zlatých, avšak s podmínkou, že bude sloužit pouze vědeckým účelům. Uctil tak památku svého bratra Jana, se kterým si vzali za svůj životní cíl vybudování české observatoře. Hvězdárna vyrůstala jen pozvolna tak, jak to dovolovaly prostředky získané výrobou přístrojů jemné mechaniky. První observatoří byla dřevěná bouda v ohradě na svahu Mandy za zahradou vily Eleonory Ehrenbergrové. Ta byla později odkoupena a využívána jako byt ředitele ústavu. S vlastní výstavbou observatoře bylo započato až roku 1905, podle projektu architekta Fanty.

V roce 1911 byla postavena západní kopule – věnována památce Jana Friče s pamětní deskou „In tristium memoriam“. Zde byl roku

1920 instalován dvojitý Fričův astrograf s průměry objektivů 16/72 cm, 21/95 cm a s hledáčkem 13,5/117 cm, který sloužil plných 43 roků. V roce 1912 byla dokončena stavba centrální kopule s 8" Clarkovým ekvatoreálem (20,8/283 cm), který byl v roce 1961 nahrazen reflektorem o průměru zrcadla 65 cm a výsledným ohniskem 11,4 m. Optika tohoto přístroje pocházela z dílny prof. Gajduška, montáž byla paralaktická od fy Zeiss-Jena.

V roce 1913 byla na observatoři zřízena první rádiová stanice v Čechách pro příjem časových signálů. Po dobu první světové války byly práce na hvězdárně přerušeny. V roce 1928 nabídl Frič observatoř Československému státu pro účely tehdejší Karlovy university, avšak s podmínkou ryze českého samostatného ústavu. Po převzetí do státní správy byla ondřejovská observatoř pojmenována Žalov, hvězdárna bratří Josefa a Jana Friče při Universitě Karlově. Prvním ředitelem se stal profesor František Nušl. Od roku 1929 začíná hvězdárna pracovat celoročně, avšak se skromným personálem a slabým materiálním a finančním zajištěním.

18. listopadu 1942 převzali hvězdárnu hitlerovští okupanti do své správy pro potřeby „německé Karlovy univerzity“. Hvězdárna se tak stala výhodným útočištěm před frontou pro profesora astronomie na německé univerzitě – dr. Schauba. Z okupace vyvázlo zařízení hvězdárny poměrně dobře i přesto, že podle vojenského rozkazu ji v poslední fázi války hrozilo zničení.

Po válce v roce 1945 se hvězdárna opět stává součástí Státní hvězdárny. Po ustavení ČSAV přechází observatoř v roce 1952 pod její řídicí správu. Dále se rozšiřuje. V letech 1952–1955 se realizuje výstavba nové sluneční laboratoře s kopulí Zeiss o průměru 6 metrů. Budují se nové mechanické dílny (1963) a výstavba vrcholí v roce 1967 otevřením dvacetimetrové kopule pro ondřejovský dvoumetr, výrobek firmy Zeiss-Jena, s průměrem hlavního zrcadla 2 metry, s Newtonovým ohniskem 9 metrů. V Cassegrainově soustavě dosahuje ohnisko 29 metrů a v systému Coudé dokonce 64 metrů. Hmotnost celého přístroje činí 80 tun. Dalekohled se využívá pro spektroskopii. Jedná se o dosud největší dalekohled v České republice.

V Astronomickém ústavu AV ČR, v. v. i., dnes pracují čtyři oddělení: stelární, sluneční, oddělení meziplanetární hmoty a oddělení galaxií a planetárních systémů. Na observatoř v Ondřejově je možné se přijet podívat. Historické kopule hvězdárny slouží v současné době jako mu-



1908 – zakládání centrální kopule. Na snímku Josef Jan Frič. Archiv observatoře.

**Astrograf** – dalekohled uzpůsobený k fotografování oblohy. Objektiv astrografu by měl být bez barevné vady. Normální astrograf je přístroj, který zobrazuje 1 obloukovou minutu jako 1 milimetr na fotografické desce umístěné v ohnisku. Pro Keplerův čočkový dalekohled tomu odpovídá ohnisková vzdálenost 344 cm.

**Ekvatoreál** – dalekohled na paralaktické montáži, hlavní osa směřuje ke světovému pólu. K této ose je kolmá osa deklinační. Dalekohled může sledovat pohyb hvězd pohybem v jediné ose.

Dnešní pohled na centrální kopuli Ondřejovské observatoře.





1962 – u meteorického radaru na Ondřejově. Na snímku Anděla Špindlerová, Karel Pacner a Boris Valniček. Archiv observatoře.

zea. Ve verandě muzea V. Šafaříka je umístěn tubus Fričova dalekohledu, jehož optika, více než 150 let stará, slouží dále ve slunečním oddělení k pozorování slunečních skvrn. Jsou zde také vystaveny přístroje vyrobené převážně Josefem Janem Fričem a dobové fotografie ze stavby hvězdárny. Kromě muzea je možné si prohlédnout z návštěvnické galerie největší český dalekohled se zrcadlem o průměru 2 m. Hvězdárna je koncipována jako arboretum se vzácnými keři a dřevinami.

■ Pavel Suchan, 19. 1. 2008, AB 3/2008

**Diazenitál** – přístroj na určování průchodu hvězd výškovou kružnicí (prochází zenitem a nadírem). Využívá pravoúhlý hranol ležící ve svíslé rovině a rtuťový horizont. Přístrojem se pozorují tři obrazy hvězdy, při průchodu hvězdy výškovou kružnicí mají boční obrazy od sebe stejnou úhlovou vzdálenost.

**Paralaktická montáž** – montáž dalekohledu, u které jedna z os míří k světovému pólu a druhá (deklináční) je na ni kolmá. Takový dalekohled je možné navádět za hvězdou pohybem v jediné ose.

**Coudé ohnisko** – paprsky jsou po odrazu na hlavním zrcadle odraženy na vyduťtém sekundárním zrcadle zpět na rovinné terciální zrcátko skloněné pod úhlem  $45^\circ$ , které paprsky odkloní kolmo na osu (do boku) do tzv. Coudé ohniska. Další pomocnou optikou lze docílit, že Coudé ohnisko je pevné v prostoru.

**Newtonovo ohnisko** – paprsky jsou po odrazu od hlavního parabolického zrcadla vedeny na sekundární rovinné zrcátko skloněné pod úhlem  $45^\circ$ , kde se odráží kolmo na osu dalekohledu (do boku) do tzv. Newtonova ohniska.

**Cassegrainovo ohnisko** – paprsky jsou po odrazu na hlavním parabolickém zrcadle odraženy zpět hyperbolickým vyduťtým zrcadlem do otvoru v hlavním zrcadle, do tzv. Cassegrainova ohniska.

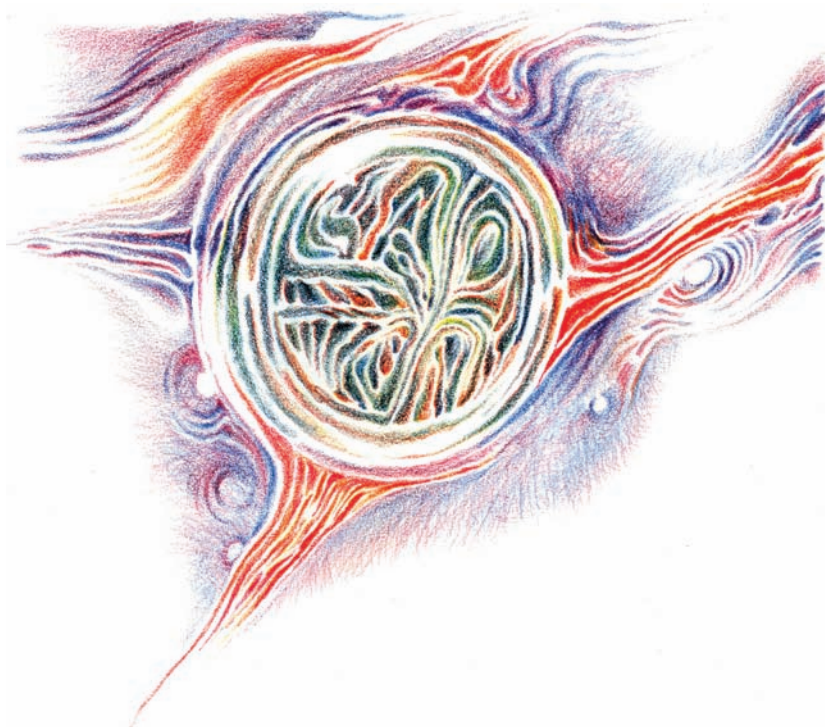


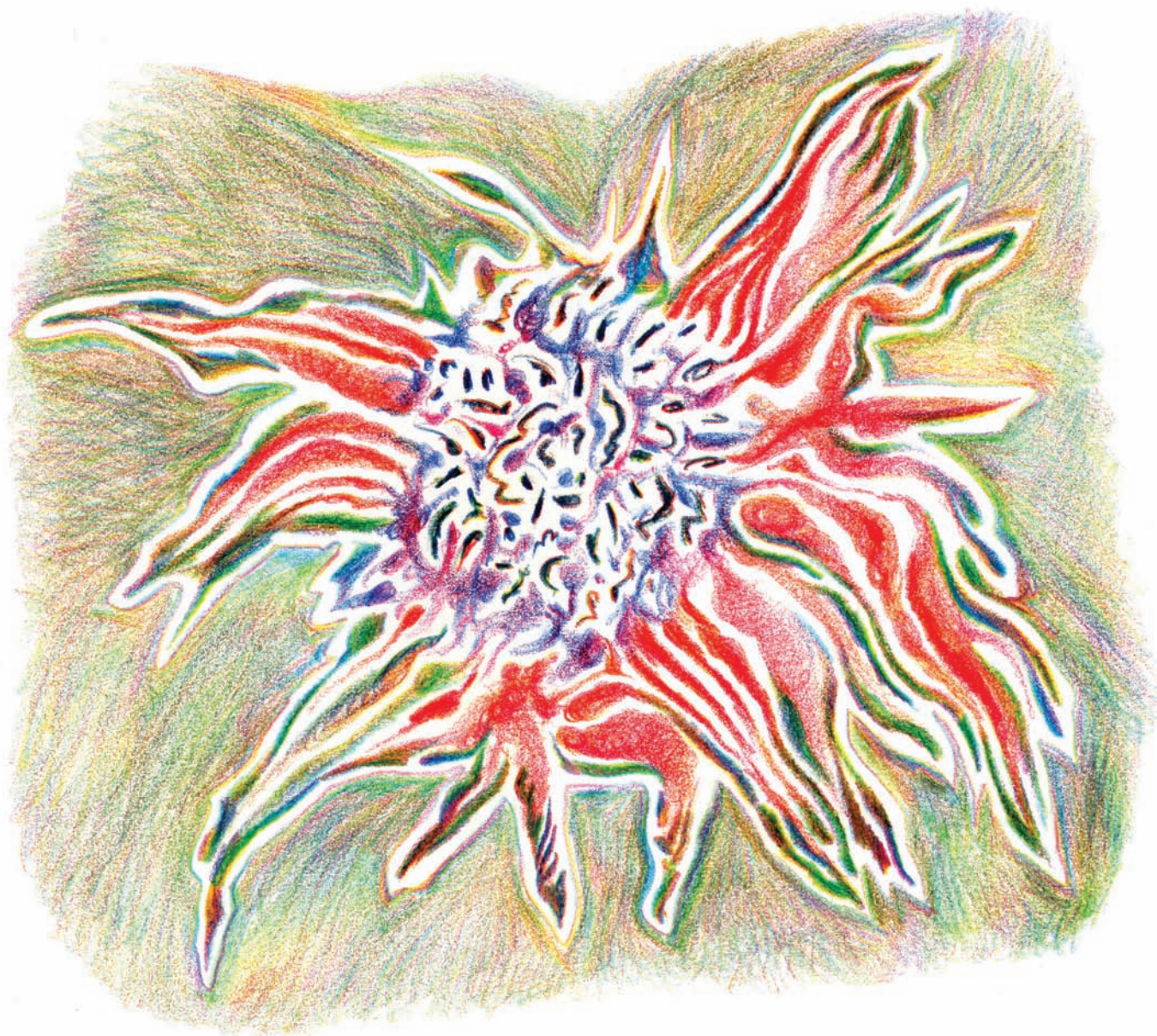


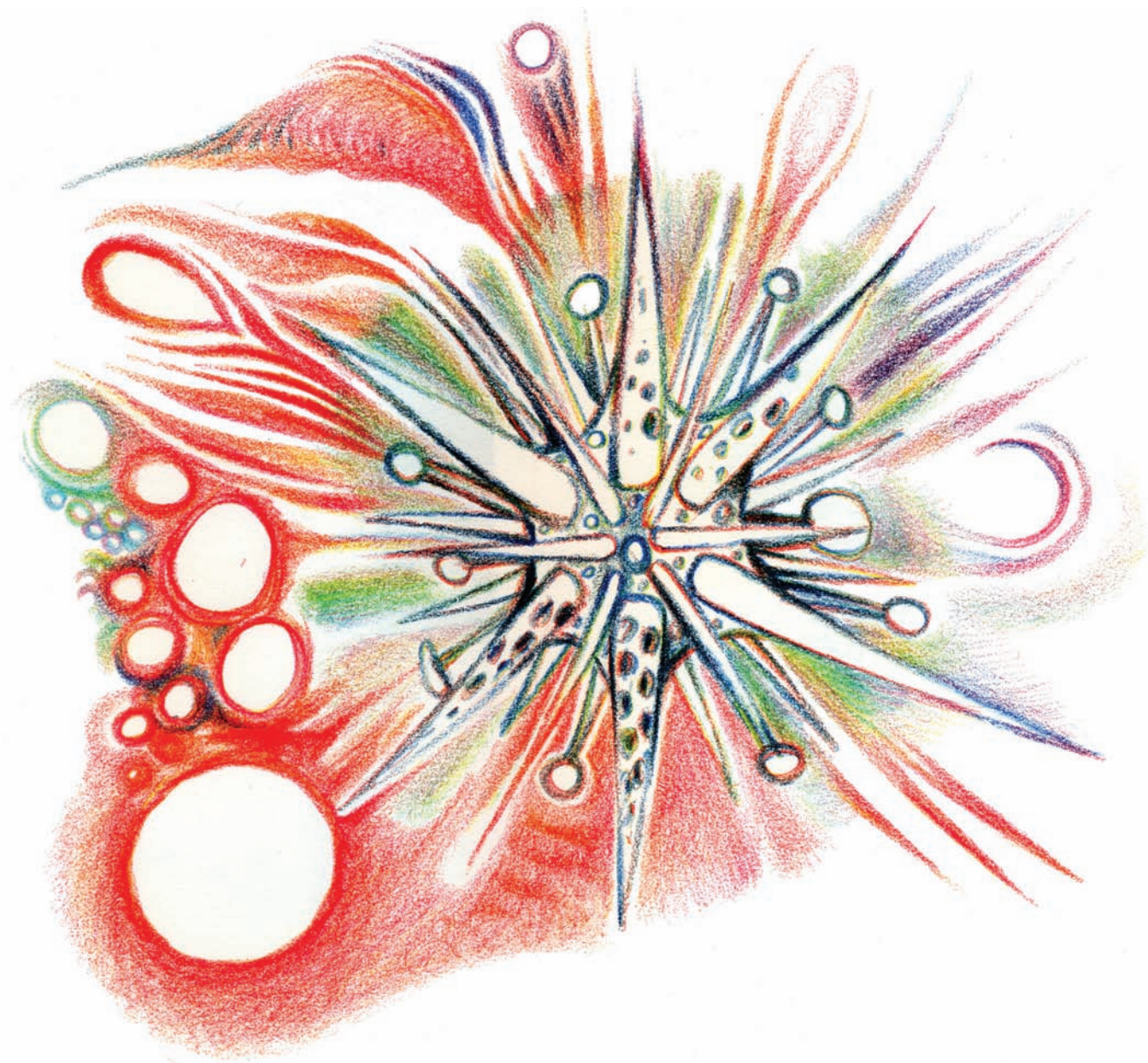
*Busta zakladatele Ondřejovské observatoře J. J. Friče*



# V. BIOFYZIKA



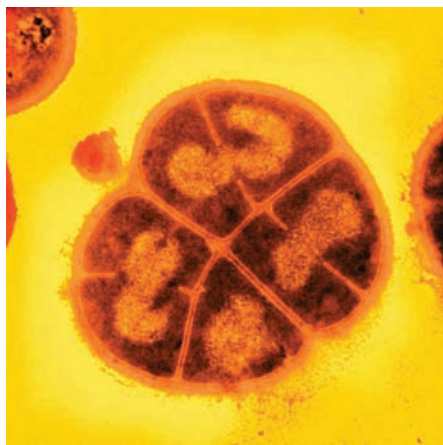




## Baktéria prežívajúca rádioaktívne žiarenie

**Escherichia coli** – gramnegatívni baktérie tyčinkovitého tvaru, bežne osidlujúci tlusté střevo teplokrevných živočíchů, včetně člověka. Je fakultativně anaerobní, což znamená, že v případě potřeby dokáže převést svůj metabolismus přizpůsobený na přítomnost kyslíku na fermentaci za nepřítomnosti kyslíku. Je významná z hygienického hlediska jako jeden z indikátorů fekálního znečištění pitné vody. Její přítomnost ve střevě je pro organismus obvykle prospěšná, může však nést genetickou výbavu, která z ní činí původce závažných střevních onemocnění. Vzhledem ke svým nenáročným růstovým vlastnostem a dobře prozkoumané DNA definovaných kmenů je oblíbeným modelovým organismem či nosičem cizorodých genů.

Fotografia baktérií *Deinococcus radiodurans* z elektrónového mikroskopu, baktéria tvorí tetrakoky, tj. klaster štyroch buniek. Na obrázku práve prebieha delenie. Znázornené rané štádium v pravej bunke až po pokročilé štádium postupne v smere hodinových ručičiek. M. J. Daly's Laboratory, University of the Health Sciences.



Rádioaktívne žiarenie poškodzuje a následne hubí všetky živé organizmy, hlavnou príčinou je narušanie štruktúry DNA, ktorá nesie zakódované predpisy na výrobu všetkých proteínov v živých bunkách. Človek a všetky vyššie formy života sú komplikované mnohobunkové organizmy s vysoko špecializovanými bunkami a na ich usmrtenie stačí dávka rádioaktívneho žiarenia približne 5 Gy, na spoľahlivé usmrtenie kolónie baktérií *Escherichia coli* je potrebná dávka rádovo vyššia, približne 1 000 Gy. Oproti tomu však baktéria *Deinococcus radiodurans* je schopná prežiť dávku rádioaktívneho žiarenia až 15 000 Gy a je schopná aktívne žiť, tj. rásť a množiť sa, pri vystavení permanentnej rádiácii až 60 Gy/h. Bola objavená v roku 1956 A. W. Andersonom a jeho spolupracovníkmi v mäse prasaťa, ktoré bolo sterilizované rádioaktívnym žiarením. Neskôr bola táto baktéria izolovaná na mnohých miestach na Zemi, napr. na severnom póle, alebo v jadrovom reaktore. Pochopiteľne to vyvolalo senzáciu a teórie o jeho mimozemskom pôvode a podobné nezmysly nenechali na seba dlho čakať. Dlhú dobu bolo záhadou, aký mechanizmus chráni túto baktériu pred takou silnou dávkou žiarenia a uspokojujúca odpoveď nie je ešte stále známa.

### Vlastnosti baktérie

Omnoho zaujímavejšou a filozofickejšou otázkou však zostáva ako a hlavne prečo sa táto baktéria vyvinula. Na Zemi sa totiž vyskytujú iba zlomky rádioaktivity v porovnaní s tou, ktorej je táto baktéria schopná odolávať. Vzhľadom k roku objavenia baktérie, 1956, už nie je ani možné zistiť, či sa táto baktéria vyvinula ako mutácia v niektorom jadrovom reaktore, alebo existovala na svete už pred tým a prispôbila sa nejakým iným extrémnym podmienkam. Ako je uvedené vyššie, rádioaktívne žiarenie hubí živé bunky tým spôsobom, že naruša, resp. láme reťazec ich DNA. Tento typ poškodenia je však veľmi podobný poškodzovaniu živej bunky dehydratáciou. Je teda celkom možné, že sa táto baktéria v skutočnosti prispôbila životným podmienkam v extrémne suchých miestach a to, že je vysoko odolná voči rádioaktívnemu žiareniu je len zhoda okolností. Na prežívanie extrémnych podmienok sa u niektorých baktérií vyvinula schopnosť tvoriť tzv. bakteriálne

spóry, čo je veľmi odolná forma baktérií, pri ktorej sa baktéria zbaví väčšiny vody a vytvorí si okolo seba hrubý obal. Takto sporulovaná baktéria má takmer nulový metabolizmus a teda nie je schopná aktívne žiť. K tomu sa musí opäť „prebudit“ a pretvoriť na pôvodnú zraniteľnú baktériu. Naproti tomu si zvolila baktéria *Deinococcus radiodurans* stratégiu aktívneho prežívania v nepriaznivých prostrediach. Pri bližšom skúmaní tejto baktérie sa zistilo, že nemá žiadne zvláštne enzýmy ani iné molekuly v porovnaní s bežnými baktériami, je kompletne známy jej genetický kód, ale ani v tom nie sú žiadne zvláštne znaky, ktoré by mohli túto jej odolnosť vysvetliť. Ale aspoň je možné s istotou tvrdiť, že nejde o žiadnu extraterestriálnu baktériu, teda mimozemšťana.

### Najnovšie výskumy

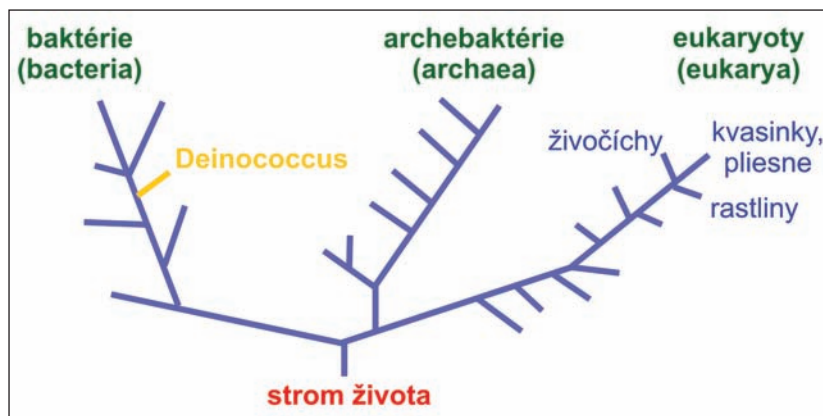
Až najnovšie výskumy z Weizmannovho ústavu v Izraeli dávajú aspoň čiastočnú odpoveď. Pokiaľ dôjde iba k čiastočnému poškodeniu dvojzázvitnice DNA, je možné ju ešte na základe paralelnej postupnosti opraviť. Pri silnejšom poškodení sa však DNA v jednom mieste preruší a opravenie takto „rozsypanej“ DNA je komplikované. Pri radiačnom poškodení je *Deinococcus* schopný prežiť aj pokiaľ sa jeho DNA „rozsype“ na cca 100 častí. *Deinococcus* nemá iba jednu, ale štyri kópie DNA, pričom je vždy aspoň jedna v aktívnom stave, ktorá funguje ako u bežnej baktérie a sú podľa nej tvorené látky potrebné pre fungovanie bunky. Ostatné sú skrútené do prstencovej štruktúry, čo síce znemožní ich aktívne využívanie bunkou, ale dokáže ich ochrániť pred rozpadom. Takto skrútená DNA sa ani pri rozlamaní úplne neznehodnotí, jednotlivé kúsky rozlámanej DNA zostávajú stále pokope a tým pádom je možné ich opätovne pospájať opravnými mechanizmami do pôvodného tvaru. Prípadné ďalšie chyby, ktoré sa nepodarilo týmto spôsobom opraviť, je ešte možné opraviť podľa ostatných troch kópií DNA.

- Vladimír Scholtz, 19. 1. 2007, AB 3/2007

**Deinococcus radiodurans** – nepatogenní striktně aerobní bakterie patří do čeledě Deinococcaceae, vyznačuje se největší známou odolností vůči radioaktivnímu záření, dokáže přežít dávky záření až 10 000 Gy. Poprvé byla popsána kolektivem pod vedením A. W. Andersona z Oregon Agricultural Experimental Station v roce 1956. Na počátku množení vytváří typické dvojice (diplokoky), v pokročilé fázi množení však začíná postupně tvořit čtveřice (tetrady).

**Gy** – gray, jednotka absorbované dávky záření, energie ionizujícího záření absorbovaného v 1 kg látky. 1 Gy = 1 J/kg. Vyjadruje jen energii absorbovaného ionizujícího záření, nikoli jeho účinky na danou látku.

Zaradenie baktérie *Deinococcus radiodurans* do základnej cytologickej klasifikácie. Argonne National Lab.



## Digitálna evolúcia

**Tierra** – počítačový systém pre simuláciu evolúcie digitálnych organizmov. Bol vytvorený Thomasom Rayom, biológom z Delawarskej univerzity začiatkom 90. rokov 20. storočia. V *Tierre* bol prvý krát pozorovaný spontánny vznik parazitických digitálnych organizmov.

**Avida** – počítačový systém pre simuláciu evolúcie digitálnych organizmov. Bol vytvorený v roku 1999 na Michigan State University. Dokázal, okrem iného, možnosť spontánneho vzniku komplexných orgánov, konkrétne vzniku komplexnej operácie porovnania dvoch čísel iba na základe selekčného evolučného tlaku.

Teórie vo fyzike, chémii a iných exaktných vedách sa zakladajú na tvrdeniach, podľa ktorých sú schopné predpovedať chovanie sa systému, ktorý opisujú. To znamená, že teória predpovedá výsledok experimentu a tento experiment teóriu buď potvrdí, alebo vyvráti. Princíp je jednoduchý, ale dá sa aplikovať na teóriu evolúcie? Evolúcia prebieha okolo nás iba jedna, nedá sa s ňou príliš manipulovať a navyše prebieha veľmi pomaly. To znamená, že evolúciu môžeme pozorovať, ale nemôžeme na základe teórie predpovedať výsledok experimentu. Sme síce schopní vyšľachtiť (v obmedzenej miere) organizmy a podľa svojich potrieb potlačiť, resp. posilniť u nich nejakú vlastnosť, avšak v tomto procese iba manipulujeme už existujúce organizmy a vzhľadom k ich zložitosti meníme ich spôsob fungovania iba minimálne.

### Systém Tierra

S myšlienkou vytvorenia vlastnej evolúcie prišiel Thomas Ray, biológ z Delawarskej univerzity. Inšpiroval sa počítačovou hrou „Core War“, kde súťažili malé programy a vyhral ten, ktorý zastavil procesy ostatných súťažiacich programov. Začiatkom 90 rokov vytvoril systém nazvaný Tierra (Zem), čo bol počítačový systém pozostávajúci z niekoľkých krátkych programov, ktoré si navzájom konkurovali, množili sa a pri vytváraní kópií občas došlo k náhodnej mutácii. Nebola to simulácia evolúcie, bola to evolúcia. Jej výhodou bolo, že ju mohol kedykoľvek spustiť, spomaliť, zopakovať, porovnať s inou a vo výsledku pozorovať, ktoré vlastnosti sú univerzálne a ktoré špecifické pre náš svet. A aké boli výsledky? Programy sa podľa očakávania začali vyvíjať, a to postupne ku kratším verziám, tj. optimalizovali sami seba. Program dlhý pôvodne 80 inštrukcií sa skrátil na 79 inštrukcií. Náhle sa však v systéme začali objavovať programy dlhé len 45 inštrukcií. Ostatné inštrukcie si vypožičali z dlhých programov, boli to skutočné parazity. Postupne sa však dlhé programy naučili ako zabrániť krátkym programom parazitovať na ich dlhom kóde. Avšak len dočasne, postupne sa objavili mutácie parazitov, ktoré boli schopné parazitovať aj na takýchto „imúnnych“ programoch, čo zase viedlo k vývoju ďalších mechanizmov na odrazenie parazita atď. Thomas Ray tým potvrdil, že závody v zbrojení medzi hosťiteľmi a parazitmi je jedným zo základných princípov evolúcie.

Thomas Ray, autor systému Tierra.





## Systém Avida

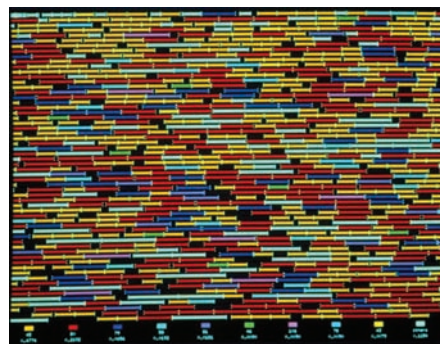
Ďalším systémom digitálnej evolúcie je projekt Avida na Michiganskej štátnej univerzite. Vznikol v roku 1999 a evolúcia tu prebiehala na systéme asi 200 počítačov (v roku 2005). Princíp je podobný ako v systéme Tierra a výsledky jednak potvrdzujú výsledky z Tierra a odpovedajú na ďalšie otázky evolúcie. Jednou z nich je adaptácia a vznik komplexných orgánov. O adaptácii organizmov na Zem sa už vo všeobecnosti nepochybuje, potvrdzujú to rôzne organizmy, čím menšie a čím jednoduchšie, tým viac. Bakteriálne kmene rezistentné na antibiotiká sa objavujú len niekoľko málo rokov od ich objavenia (niekedy aj pred tým, napr. tetracyklín, ale to je iný prípad). Bielym motýľom v znečistených mestách tmavnú krídla, aby lepšie splynuli so špinou, sme schopný vypestovať octomilky žijúce niekoľkokrát dlhšie ako obyčajne a pod. Nikdy sa nám však nepodarilo pozorovať vznik nového druhu organizmu alebo nejakého nového orgánu. Vynára sa teda otázka, či je niečo také vôbec možné a ako by sa dal tento predpoklad potvrdiť.

Komplikovaný organizmus ako človek alebo ktorýkoľvek iný, je výsledkom miliárd rokov evolúcie a prírodného výberu. Je však možné, aby sa takéto komplikované organizmy vyvinuli z prvotného primitívneho praorganizmu? Je možné, aby sa vyvinul tak komplikovaný orgán ako oko, ktorý je zložený z veľkého množstva vzájomne spolupracujúcich štruktúr? Keby ktorákoľvek z jeho častí prestala pracovať, prestalo by pracovať oko ako celok. Je to zároveň jeden z princípov teórie kreacionizmu, ktorá zastáva názor, že komplexná štruktúra nemôže vzniknúť evolúciou a preto bol celý svet stvorený približne v dnešnej podobe a pripúšťa iba adaptáciu na životné prostredie. A práve evolúcia v Avide dokázala potvrdiť možnosť vzniku komplexných štruktúr evolúciou. Digitálne organizmy nemajú orgány ako my, ale majú časti programového kódu, ktorý môže, resp. by mal vykonávať nejakú zmysluplnú funkciu. Avida kolektív pripravil experiment, v ktorom sa snažili prinútiť ich digitálne organizmy, aby si vytvorili operáciu porovnania dvoch čísel. Je to samozrejme jednoduchá operácia ale musí porovnávať zadané čísla po jednotlivých bitoch a v programovacom jazyku Avidy tento program zaberá (minimálne) 19 inštrukcií. Takže šanca, že by vznikla náhodnou mutáciou je menšia ako jedna ku tisíc tisícov tisícov atd. Avida kolektív však vytvoril digitálny svet organizmov bez schopnosti porovnávať čísla a začal ich od-

**Parazit** – organizmus žijúci na úkor hostiteľského organizmu, pričom mu viac alebo menej spôsobuje ujmu. V medicíne sa za parazity považujú všetky parazity s výnimkou baktérií a vírusov, ktoré spadajú do mikrobiológie.

**Michiganská štátna univerzita** – americká univerzita, ktorá bola založená v roce 1855. Stala sa prototypom amerických národných univerzít. Mezi absolventy je šesť nositeľů Pulitzerovy ceny. Původně byla univerzita orientovaná na vývoj obalové techniky, turistiku, telekomunikace a hudbu. Dnes nabízí široké spektrum studií v nejrůznějších oborech.

*Digitálne organizmy v systéme Tierra: hostitelia – dlhé červené organizmy (programy), parazity – krátke žlté organizmy (programy), ďalšie farby – iné mutácie pôvodných programov.*





Obdobný systém AVIDA.

meňovať podľa toho ako dobre zvládli operáciu porovnania. V tomto svete nechali prebehnúť 16 000 generácií organizmov a celý tento experiment zopakovali 50 krát. A výsledok? V 23 z 50 prípadov evolúcia vytvorila organizmy schopné komplexnej operácie porovnania dvoch čísel. Navyše, každý z 23 experimentov vyprodukoval operáciu porovnávania inou cestou a na inom princípe. Tým potvrdili Darwinov predpoklad, že evolúcia je schopná vytvárať „zariadenia“ pre ten istý účel na rôznych princípoch. Oko muchy aj oko chobotnice je schopné vytvárať komplexný obraz okolia a predsa sú dramaticky odlišné od nášho oka, ako aj medzi sebou. Avida software je voľne prístupný na Internete a kreacionisti ho sťahovali a snažili sa nájsť v ňom fatálnu chybu, zatiaľ sa im to nepodarilo. Avida kolektív má aspoň zadarmo tisíce betatesterov, čo viac si môže priať?

Z evolúcie sa však vynára ďalšie množstvo otázok na ktoré v tuto chvíľu neexistuje jednoznačná odpoveď a na ktoré by systémy digitálnej evolúcie mohli dať odpoveď. Napríklad prečo existuje pohlavné rozmnožovanie? Prečo existujú u vyšších organizmov oddelené pohlavia a nie hermafroditi? Prečo existuje také veľké množstvo druhov organizmov? Na niektoré z nich existuje viacero teórií a niektoré už boli čiastočne vyriešené.

■ Vladimír Scholtz, 29. 2. 2008, AB 9/2008

## Dvadsať rokov trvajúca evolúcia

V minulom článku sme hovorili o digitálnej evolúcii. Teraz sa zastavme pri zaujímavom experimente evolúcie biologických mikroorganizmov a pokúsme sa trochu demonštrovať výhody a nevýhody biologickej a digitálnej evolúcie z pohľadu experimentátora, ktorý sa snaží z prírody vydolovať nejaké informácie.

### Lenského experiment

V experimente biológa Richarda Lenského z Michigan State University bola hlavnou hrdinkou baktéria *Escherichia coli*.

Ide o veľmi bežnú a nenáročnú, takmer „univerzálnu“, baktériu, veľmi často používanú v práci mikrobiológov. Myšlienka experimentu bola veľmi jednoduchá. Na začiatku si vzal Lenski jednu baktériu, z ktorej vytvoril množstvo klonov, z týchto klonov vybral 12 vzoriek a každú z nich vložil do samostatnej banky. Každý deň ráno svoje baktérie krmil trochou glukózy, ktorú však do popoludnia strávili a až do ďalšieho rána trpeli hladom. Na druhý deň ráno vybral z každej banky malú vzorku, vložil ju do novej banky, opäť ich nakrmil dávkou glukózy a tento postup opakoval každý deň v priebehu 20 rokov a pokračuje v ňom dodnes.

Vzhľadom k tomu, čo je o evolúcii známe, Lenski predpokladal, že bude v bankách prebiehať súťaž o zdroje, v tomto prípade o glukózu a teda dôjde k prirodzenému výberu. V každej generácii môže dôjsť u každej z baktérií k náhodnej mutácii, tá pre ňu môže byť škodlivá a baktériu zabiť alebo spomaliť jej rast, alebo naopak priaznivá a jej rast urýchliť. Baktérie so zvýhodňujúcou mutáciou by tak mali postupne v populácii dominovať, a to z dôvodu, že sú schopné rýchlejšie narásť a rozmnožiť sa – ostatné baktérie proste prevalujú svojim počtom.

Lenského snahou bolo zistiť, či sa niečo podobné bude diať aj v tomto systéme. Aby bol schopný v budúcnosti podľa potreby sledovať vývoj svojich baktérií, vytváral si niečo ako fosílny záznamy. Každých 500 generácií zamrazil vzorku aktuálnych baktérií tak, aby tieto vzorky mohol kedykoľvek rozmraziť a hybernované baktérie tak znovu oživiť a skúmať ich vlastnosti.

**Baktérie** – jedna ze troch domén (nadříší) organizmů (Archea, Bacteria, Eukaryota), jednobuněčné organismy, které obvykle vytvářejí buněčnou stěnu, až na výjimky nemají obsah buňky rozdělený membránami na oddělené prostory. Typické tvary baktérií jsou kulové a tyčinkovité, mohou mít však i jiné tvary, například spirální. Velikost baktérií se obvykle pohybuje od zlomků mikrometrů po jednotky mikrometrů. Rozmnožují se nepohlavně, jsou však schopny si navzájem vyměňovat části DNA tzv. konjugací.

**Klon** – v biologii původně populace geneticky identických jedinců, později byl tento termín používán i pro jedince uměle vytvořené genetické kopie, v informatice kopie dat či části kódu reprezentující vlastnosti a chování.

Fotografia baktérie *Escherichia coli* z elektrónového mikroskopu. Dennis Kunkel Microscopy, Inc., 2001.



**Citrát** – v úzkém slova smyslu sůl kyseliny citrónové, neboli kyseliny 2-hydroxypropan-1,2,3-trikarboxylové. V biochemii se pojmem citrát myslí též anion kyseliny citrónové, disociované ve vodě. Sama kyselina citrónová je bílá, krystalická látka kyselé chuti, používaná v potravinářství pod označením E330.

**Glukóza** – hroznový cukr, krevní cukr, monosacharid se šesti uhlíky. V čisté formě je to bílá, krystalická látka sladké chuti. V přírodě se vyskytuje jen v optické formě D, pak se nazývá dextróza. Pro červené krvinky a mozek je to jediný zdroj energie.

**Plazmid** – DNA nacházející se mimo bakteriálního chromozomu. Malá kruhová molekula DNA, která kóduje specifické informace. Vyskytuje se u archeí, některých bakterií a vzácně i eukaryot. Plazmidy hrají významnou roli v odolnosti bakterií vůči antibiotikům. Genetická informace uložená na plazmidech může být vyměňována mezi dvěma bakteriemi konjugací, což je obdoba pohlavního rozmnožování.

**Bílkovina** – protein, vysokomolekulární biopolymer aminokyselin s molekulovou hmotností tisíc až milión. Tvoří strukturální i funkční podstatu živé hmoty.

Dvanásť populácií Lenského baktérii, v každej banke je jedna populácia. Brian Baer, Neerja Hajela, 25. 6. 2008.



Základná vec, ktorej sa začali baktérie, pravidelne trápené hladom, prispôbovať, bola rýchlosť prijímania glukózy. Keďže sa nedostatok tohto tovaru pravidelne opakoval, získali výhodu tie baktérie, ktoré si z neho dokázal ukrojiť najväčší podiel. Výsledkom bolo zrýchlené vstrebávanie glukózy z okolia a súčasne baktérie sú schopné prijať z prostredia glukózu za 75 % času ako pôvodný klon. Toto zistenie potvrdzuje schopnosť organizmov prispôbovať sa svojmu okoliu a dalo sa viac menej predpokladať, omnoho zaujímavejšia je však nasledujúca skutočnosť.

### Kŕmenie citranmi

Skúmané baktérie boli kŕmené nielen glukózou, ale čiastočne aj citranmi, čo sú soli kyseliny citrónovej. Citrany však baktérie *E. coli* nie sú schopné stráviť, čo je jeden z ich základných vymedzujúcich znakov. Problém je v tom, že nie sú schopné ho prepraviť cez svoju bunecnú membránu dovnútra bunky. (Z tohto pravidla existujú výnimky, a to klony *E. coli*, ktoré majú túto schopnosť kódovanú v DNA obsiahnutej v plazmidoch, Lenského baktérie však neobsahovali žiadne plazmidy.) Prekvapením bolo, keď po 33 127 generáciách si Lenski a jeho študenti všimli v jednej z kultúr zvláštneho zákalu, ktorý obyčajne znamenal kontamináciu vzorky cudzími baktériami. V tomto prípade kontamináciu vylúčili a ako príčinu určili pôvodné baktérie *E. coli* pochutnávajúce si na citrane. Keď tieto baktérie premiestnili do prostredia obsahujúceho citrany, bunky ich začali využívať ako jediný zdroj uhlíku.

Vzápätí sa začali zaoberať otázkou, kedy sa baktérie naučili tieto citrany spracovávať. Začali postupne rozmrazovať uložené fosílie a zistili, že prvýkrát sa títo konzumenti citranov objavili v 31 500.

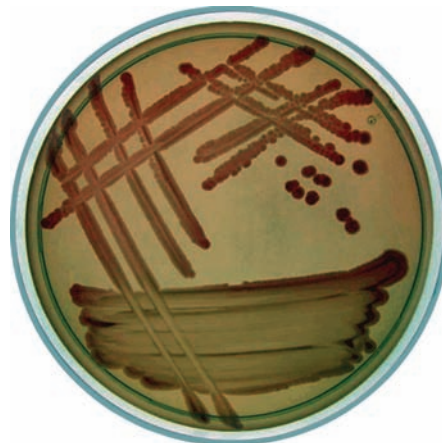
generácii a to v 0,5% koncentrácii. Po nasledujúcich 1 000 generácií ich zastúpenie postupne rástlo až na 19 % až v 33 000. generácii takmer vymizli. Avšak už za ďalších približne 120 generácií začalo zastúpenie v populácii opäť rásť, až sa stali dominantnými a v populácii prevládli. Tento nárast, pokles a opätovný nárast naznačuje, že sa pravdepodobne jednalo o niekoľko

postupných mutácií. Prvá dovolila baktériám tráviť citrát, avšak nebola dostatočne úspešná v konkurencii s pôvodnými konzumentami glukózy, to takmer spôsobilo ich vyhynutie. Až následná ďalšia mutácia naučila baktérie tráviť citrát dostatočne účinne na to, aby boli schopné uspieť v konkurencii ostatných baktérií. Lenski sa so svojimi študentami pokúsil znovu prehrať evolúciu. Zobrali baktérie z vývojovej etapy pred vznikom konzumentov citranov a nechali ich vyvíjať sa v podobných podmienkach a z každého náznaku konzumácie citranov preniesli malú vzorku na Petriho misku obsahujúcu iba citrát. Podľa ich slov otestovali 40 miliónov buniek (to neznamená 40 miliónov testovaných vzoriek, aj malá vzorka obsahuje niekoľko miliónov buniek). Zistili, že z tejto hromady baktérií bola schopná tráviť citrany iba malá časť a že šanca na vznik tejto schopnosti je rádovo jedna ku biliónu.

Ďalšou úlohou teraz je zistiť konkrétne genetické mutácie, ktoré viedli k vývoju týchto klonov. Aby bola *E. coli* schopná živiť sa citranmi, potrebuje špeciálnu bielkovinu vo svojej bunecnej membráne, ktorá je schopná citrany dopraviť dovnútra. Je možné, že už existujúca bielkovina slúžiaca na prenos nejakej inej molekuly zmutovala do podoby, že bola schopná prenášať aj citrany. Ďalšie mutácie túto už zmutovanú bielkovinu ešte viac vylepšili, resp. jej vytvorili taký podporný aparát, aby bola schopná vykonávať tento prenos efektívnejšie a umožniť tak tomuto klonu poraziť (aspoň dočasne) ostatné klony v prirodzenom výbere, v súboji o zdroje a potomstvo.

Lenski pestoval svojich zhruba 30 000 generácií baktérií 20 rokov, neustále bojoval s kontamináciou, baktériám venoval nepretržitú starostlivosť a k vytváraniu „fosílnych“ záznamov používal zložité zmrazovacie techniky. Naproti tomu v digitálnej evolúcii, popísanej v minulom článku, prebehne 30 000 generácii organizmov (aj keď podstatne jednoduchších) za niekoľko minút, „fosília“ sa vyrobí kópiou dát na disk, je možné ich ľahko čítať a vyhľadávať v nich žiadané úseky. Tak ako sa Avida tímu pozorujúcemu digitálnu evolúciu podarilo demonštrovať vznik komplexnej funkcie porovnania dvoch čísiel, podarilo sa Lenskému tímu ukázať, že vznik komplexných funkcií, v tomto prípade trávenie citranov, je možný aj v biológii. Môžeme teda predpokladať, že základné princípy evolúcie a prirodzeného výberu sú v oboch prípadoch zhodné, aj keď dôležité a zaujímavé je samozrejme štúdium oboch druhov evolúcie.

■ Vladimír Scholtz, 8. 5. 2009, AB 19/2009



Baktéria *Escherichia coli* vyrastená na Endovej pôde.  
Foto autor.

Baktéria *Escherichia coli*. Mattosaurus, 2009.

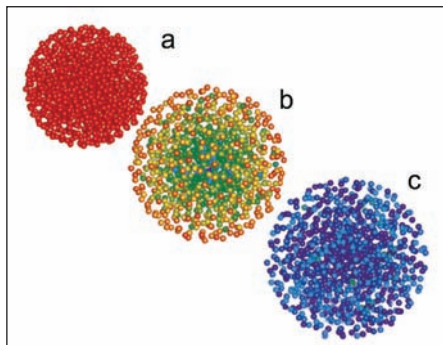


## Živá hmota ve vesmíru?

**Nukleotidy** – fosforylované nukleosidy. Na pátý uhlík sacharidové složky je navázán jeden nebo více zbytků kyseliny fosforečné. Sacharidovou složku tvoří buď ribóza (ribonukleotidy) nebo deoxyribóza (deoxyribonukleotidy). Tvoří monomery nukleových kyselin, dále vstupují (přímo nebo ve formě derivátů) do enzymatických reakcí, přenosu energie a informace. Genetická informace je kódována posloupností nukleotidů.

**Nukleové kyseliny** – lineární orientované polymery tvořené nukleotidy (makromolekuly), které zajišťují v živé buňce ukládání, přenos a zpracování genetické informace. Informační obsah nukleotidů nesou heterocyklické dusíkaté báze odvozené buď od purinu, nebo od pyrimidinu. V ribonukleotidech, vytvářejících ribonukleovou kyselinu (RNA), jsou purinové báze adenin (A) a guanin (G) a pyrimidinové báze cytosin (C) a uracil (U) navázány na ribózu 5-fosfát. V deoxyribonukleotidech, vytvářejících deoxyribonukleovou kyselinu (DNA), je na jednom z uhlíků nahrazena hydroxylová skupina vodíkem. DNA využívá purinové báze A a G, avšak pyrimidinové báze cytosin (C) a thymin (T).

Simulace vývoje sféricky symetrické uzavřené struktury v plazmatu: (a) je počáteční stav systému v čase  $t = 0$ ; stav (b) odpovídá času  $t = 0,3$  s a stav (c) času  $t = 3$  s. Barva částic na obrázku odpovídá jejich rychlostem a roste od modré k červené. V. N. Tsytovich a kol., *New J. Phys.* 2007.



Možná nás samotné někdy udivuje, jak jednoduše odlišujeme živé od neživého. Jsme schopni rezolutně rozhodnout, že např. židle, na které právě sedíme, je neživá. Stejně jednoznačně např. mouchu považujeme za živý organismus. Právě proto snad veškeré pokusy o nalezení té nejuniversálnější definice života selhaly.

V. N. Tsytovich z fyzikálního ústavu Ruské akademie věd v Moskvě a jeho spolupracovníci z Institutu Maxe Plancka a Univerzity v Sydney se nám rozhodli úvahu ještě ztížit. V srpnu 2007 publikovali výsledky numerických simulací chování zrn neorganických materiálů v plazmatu, ve kterém zpozorovali prvky připomínající chování živých organismů. V abstraktu článku uvádějí: „*Vývozujeme, že komplexní autonomní plazmatické struktury vykazují, za podmínek, které jim umožňují přirozený vývoj, všechny vlastnosti nutné k tomu, abychom je klasifikovali jako hmotu živou.*“

### Jak definovat co je živé?

Obecně lze živou hmotu definovat jako autonomní (z řeckého *nomos* – zákon; a *autos* – sám, samostatný) systém s následujícími vlastnostmi (tyto vlastnosti však nepřisuzujeme například virům nebo samotným DNA řetězcům, které považujeme za základní stavební kámen živé hmoty.) Co tedy považujeme za základní vlastnosti života?

1. *Autopoiéze*: Slovo pochází z řeckého *poiein* – tvořit; a *autos* – sám. Jde o schopnost samoorganizace a tvorby systému, jehož funkce a struktura jsou vzájemně propojené a neoddělitelné (komplementární) vlastnosti. Disipativní systémy jsou tradičně utvořeny tak, aby zůstávaly stabilní i pokud jimi neustále prochází hmota a energie. Tradiční organický systém sestává z:

- aparátu pro selektivní přenos energie a hmoty (přenosového kanálu a říditelného filtru),
- oddělovací membrány (prostorové separace),
- paměťových prvků (konstrukční plán, adaptivní řízení).

2. *Homeostáze*: Slovo pochází z řeckého *hómos* – rovnoměrný; a *istémi* – stát. Představuje schopnost organismu uchovat sebe sama, zachovat organizovanost snižováním lokální entropie systému. To zahrnu-

je způsob zpracování energetického příjmu. V případě organismů jde o metabolismus; proces, který přetváří energetický příjem na potřebné biochemické sloučeniny. To vyžaduje:

- přítoky, příjem energie z externích zdrojů (potravy, slunečního záření...),
- ústojný systém (dynamický prostředek samostabilizace),
- odtoky, vylučování.

**3. Reprodukce:** Jde o schopnost systému vytvořit instanci sebe sama. Rozmnožování může probíhat na úrovni prostého kopírování (replikace) či na úrovni asexuální/sexuální reprodukce. Rozmnožování je nutnou podmínkou evoluce v systémech s komplexnější strukturou.

*Další znaky života:* K sekundárním znakům patří například reagování na podněty či přizpůsobivost okolnímu prostředí.

### Uspořádané struktury v plazmatu

Výsledky výzkumu ukazují, že anorganická hmota se ve složitějších plazmatických systémech sama organizuje do stabilních symetrických struktur. Děje se tak díky makroskopickým tokům a vzájemnému stínění částic v plazmatu. Vzniklé útvary jsou pohromadě udržovány elektrostatickými silami, rychlost pohybu částic je tlumena třením.

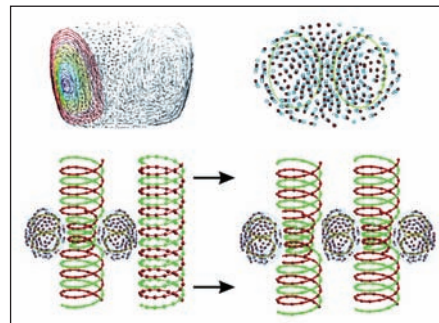
**1. Autopoiéze:** Kromě vnitřní uspořádanosti mají struktury v plazmatu i schopnost reprodukce a takové termodynamické vlastnosti, které doposud byly přisuzovány jen živým organismům. Za přesně daných počátečních podmínek mohou vznikat struktury sférické, v ostatních případech je pravděpodobnější vznik struktur cylindrických či helikálních (ve tvaru šroubovice).

Uspořádané struktury mají pevné hranice a jsou od sebe separovány prázdnými místy. Tento jev byl pozorován jak v laboratořích tak v experimentech s mikrogravitací na Mezinárodní kosmické stanici. Simulace ukazují, že válcové útvary v čase konvergují k helikální struktuře. Lze ukázat, že helikální struktury mají v mnoha situacích minimální energii. Podobně se chovají živé organismy, které jsou schopny udržovat komplexní strukturu jen za určitých podmínek, v opačném případě se rozpadají.

**DNA** – Deoxyribonucleic acid, deoxyribonukleová kyselina. Jde o nukleovou kyselinu, jejíž cukernou složkou je 2-deoxyribóza. Báze jsou tvořeny především čtveřicí adenin, thymin, guanin a cytosin; vzájemně komplementární jsou nukleotidy s adeninem a thyminem, a nukleotidy s cytosinem a guaninem. DNA vytváří dvoušroubovici z navzájem komplementárních opačně orientovaných řetězců, pracovního a paměťového. Její hlavní funkcí je uchovávání genetické informace.

**RNA** – Ribonucleic acid, ribonukleová kyselina. Jde o nukleovou kyselinu, jejíž cukernou složkou je ribóza, nukleotidy jsou obdobné jako v DNA, pouze báze thymin je nahrazena uracilem, který také umožňuje komplementaritu s adeninem. Hlavní funkcí RNA je přenos informace z DNA do dalších struktur. Na rozdíl od DNA dvoušroubovice není typickou strukturou RNA.

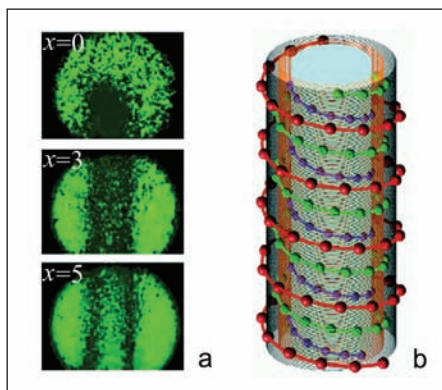
Replikace helikálních struktur. V. N. Tsytovich a kol., *New Journal of Physics*.



**Virus** – struktura nacházející se na hranici mezi živým a neživým. Ty nejpřimitivnější viry obsahují pouze svoji genetickou informaci ve formě DNA nebo RNA, které jsou uloženy v kapsidě a několik málo proteinů tvořících virový obal. Viry nejsou schopny samostatné replikace bez hostitelské buňky. Buňka slouží pouze jen jako biologická továrna a sklad náhradních dílů potřebných pro vznik nových virů.

**Bifurkace** – výběr jedné z více možností. K typické bifurkaci dochází v systému s několika základními stavy. Za nízké teploty dojde ke spontánnímu narušení symetrie a systém si „vybere“ jeden z dostupných základních stavů. Bifurkace je také známá jako větvení řešení soustavy obyčejných diferenciálních rovnic způsobené změnou nějakého vnějšího parametru, například teploty.

Helikální struktury v plazmatu. Souřadnice  $x$  je v milimetrech. V. N. Tsytovich a kol., *New Journal of Physics*. 2007.



2. **Homeostáze:** Dvojitě šroubovitě struktury byly hlavním objektem zájmu vědců právě pro svoji enormní podobnost s DNA řetězcí. Jednou z jejich specifických vlastností je bifurkace, schopnost přecházet mezi několika rovnovážnými stavy, tedy různými geometrickými parametry šroubovice. Helikální struktury mohou uchovávat informaci, jelikož jedna struktura se může nacházet v různých stavech. Tyto stavy jsou stabilní a udržované elektrostatickými silami (ústojný systém) a prouděním částic (přítok/odtok).

3. **Reprodukce:** Proces je naznačen na obrázku na předchozí straně, body (c) a (d). Jakákoliv bifurkace v helikální struktuře vyvolá změnu proudění, která vytvoří pár válcovitých vírů (a), (b) v okolí šroubovice. Rotace horní části víru je po směru hodinových ručiček, je-li helikální struktura nabitá záporně. Rotace dolní části víru je vždy opačná. Představme si jinou šroubovici bez bifurkace, která se dostane do blízkosti vírů. Vystaví se tak změnám proudění částic a změnám elektrického pole, které nakonec vytvoří totožnou bifurkaci v této struktuře. Dochází tak k přenosu informace (v podobě zmíněné bifurkace) a vytvoření identické kopie původní struktury. Jedná se tedy o replikaci.

Jak se ukázalo, přítomnost plazmatických vírů je nutnou podmínkou reprodukce. Evoluce systému se urychluje s přibývajícím počtem vírů a replikovaných struktur. Různé bifurkace mezi sebou bojují o „teritorium“ právě díky svému vlivu na okolní prostředí (to lze interpretovat jako „boj o potravu“). Větší změny v průměru a úhlu natočení šroubovice produkují v okolí silnější víry.

## Experimenty a pozorování

První experimentální pozorování uspořádaných struktur v plazmatu – viz obrázek a) nalevo – bylo provedeno při zkoumání stejnosměrných elektrických výbojů v chlazených plynech. Na obrázku je zřetelně vidět „červ“ dlouhý přes 5 mm (souřadnice  $x$  je v milimetrech).

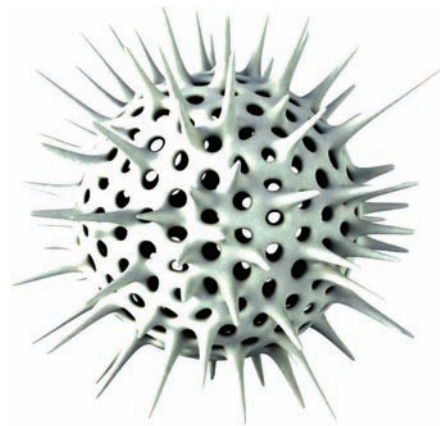
Teorie předpovídá, že obdobné struktury bychom měli být schopni pozorovat ve vesmíru v plazmatu smíchaném s mezihvězdným prachem (v tzv. prachovém plazmatu). Kolektivní oscilace organizovaných struktur ovlivní infračervené spektrum prachového plazmatu.

Snahy o vysvětlení původu života na Zemi naráží na problém, že v použitých modelech je pro spontánní vznik tak složitých struktur, jaké lze pozorovat v naší biosféře, potřeba mnohem více času, než Země



skutečně měla k dispozici (4,5 miliardy let zkrátka nepostačí!). Možná lze vysvětlení hledat právě u anorganických struktur, jaké simuloval tým V. N. Tsytovice. Podobné podmínky na povrchu planety dokážou vytvořit například blesky při bouřkách. Další možností je vznik samoorganizovaných struktur v molekulárních mračnecích, kde hvězdy a planety vznikají, a jejich sekundární zanesení na povrch planet. Ať probíhal vznik života jakoukoliv cestou, simulace a experimenty jevů probíhajících v prachovém plazmatu nám ukazují, že život může mít vedle biopolymerů a počítačových programů ještě další rozměr.

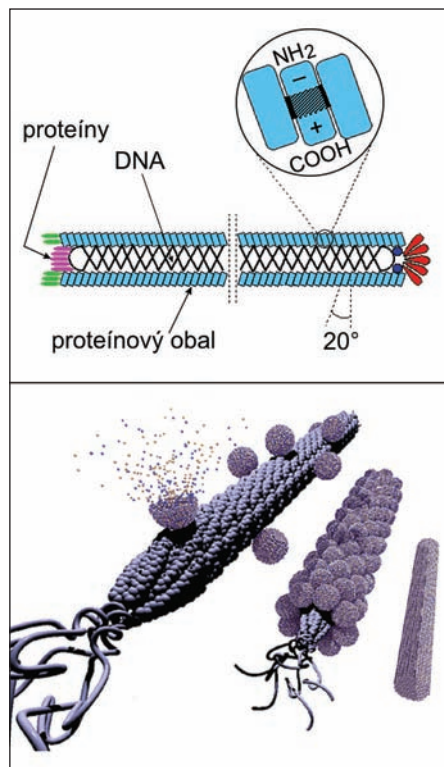
■ **Martin Zeman, 19. 12. 2008, AB 52/2008**



## Bakteriofág M13 v nanotechnológiách

**Bakteriofág** – vírus napadajúci bakterie. Pro buňky s jadrý (eukaryotni), tj. buňky rastlín a živočíchů, je neškodný. DNA, resp. RNA bakteriofágu je obalená v bílkovinném (proteinovém) obalu, na jednom konci přizpůsobeném k přichycení na bakterii. Při napadání bakterie se bakteriofág přichytí na její stěnu a vtlačí do ní svoji kopii DNA, resp. RNA.

Štruktúra bakteriofágu M13. Tulane University Course BS224.



Terajšie mikroelektronické súčiastky sa vyrábajú komplikovaným spôsobom, pri ktorom sa každá jednotlivá komponenta obvodu vytvára samostatne. Nedal by sa vyvinúť proces, ktorý by požadované mikroelektronické štruktúry generoval takpovediac „sám od seba“? Určite sa to dá, napríklad živé organizmy sa pri vývoji vytvárajú a štrukturalizujú sami z jednej bunky.

### Nelineárna dynamika

V prírode sa často stretávame s fascinujúcimi útvarmi, rôzne sfarbenými a maskovanými živočíchmi a rastlinami, a fascinuje nás, ako môžu tieto tvary vznikajú sami od seba. Odpoveď priniesli až posledné desaťročia minulého storočia a tzv. nelineárna dynamika. Tá dokázala pomocou riešení nelineárnych diferenciálnych alebo diferenčných rovníc, pri použití relatívne jednoduchých reakčno-difúzných modelov opísaných analytickými rovnicami pri rôznych vstupných parametroch generovať množstvo druhov, v prírode sa vyskytujúcich, vzorov. Ako príklad je možné uviesť sústavu dvoch diferenciálnych rovníc navrhnutých Meinhardtom a Klingerom, ktorých niektoré riešenia sa nápadne podobajú na vzory reálne existujúcich mušlí. Následne si niektorí ľudia položili logickú otázku, nedali by sa tieto schopnosti živých organizmov využiť priamo na tvorbu pre človeka užitočných štruktúr?

### Bakteriofág M13

Tejto myšlienky sa držala aj Angela M. Belcher z MIT a dosiahla už prvé pozitívne výsledky. Po predchádzajúcich pokusoch s monoklonnými protilátkami, prácu s ktorými však považovala za príliš zložitú, zamerala svoju pozornosť v polovici 90. rokov na bakteriofága M13. Ide o bežný vírus pretiahnutého tvaru napádajúci baktérie a neškodný pre človeka. DNA vírusu je obalená proteínovým povlakom, tvoreným cca 2 700 kópiami jednej molekuly bielkoviny a niekoľkými inými bielkovinami uloženými na koncoch. Vírusy sú schopné rýchlo mutovať a meniť presné zloženie bielkovín tvoriacich ich povrch, čím sa môže meniť ich chemická afinita. Biológovia už dlhú dobu študujú a využívajú tieto vlastnosti napríklad pri určovaní zloženia neznámych

organických vzoriek. Angela Belcher však bola prvá, ktorá ukázala, že bakteriofágy M13 sú schopné manipulovať aj s anorganickými molekulami, napríklad atómami alebo molekulami kovov a polovodičov.

Na získanie klonu bakteriofágu selektívneho na požadovanú molekulu bol použitý štandardný proces evolúcie. Zjednodušene sa dá tento proces opísať nasledovne: Veľké množstvo vírusov M13 sa v skúmavke zmieša so vzorkou, s ktorou má vírus reagovať. Nejaká časť vírusov s touto vzorkou zreaguje, čím sa čiastočne zmení ich povrch. Tieto vírusy sa selektívne oddelia od ostatných (napr. rôznou reakciou s povrchom iného materiálu, zmenou pH apod.) a infikujú sa nimi baktérie, v ktorých sa tento klon vírusov namnoží. Tento proces sa opakuje až pokiaľ nebudú mať klonované vírusy požadované vlastnosti. A. Belcher trval tento proces evolúcie asi tri týždne. Podarilo sa jej získať rôzne klony vírusov vysoko selektívne na ióny zlata alebo galium-arsenidu. Pokiaľ vložíme vírusy selektívne na ióny zlata do roztoku obsahujúceho zlato, vírusy ich z roztoku povytáňujú a vytvoria nanovodiče dlhé rádovo mikrometre. Niektoré klony sú dokonca schopné vytvárať vodiče dlhé až niekoľko centimetrov, ktoré je následne možné zaplietať podobne ako vlákna alebo nite.

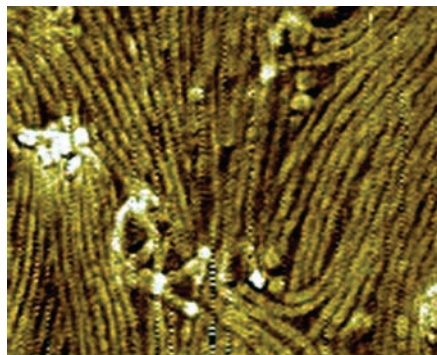
## Vývoj batérie

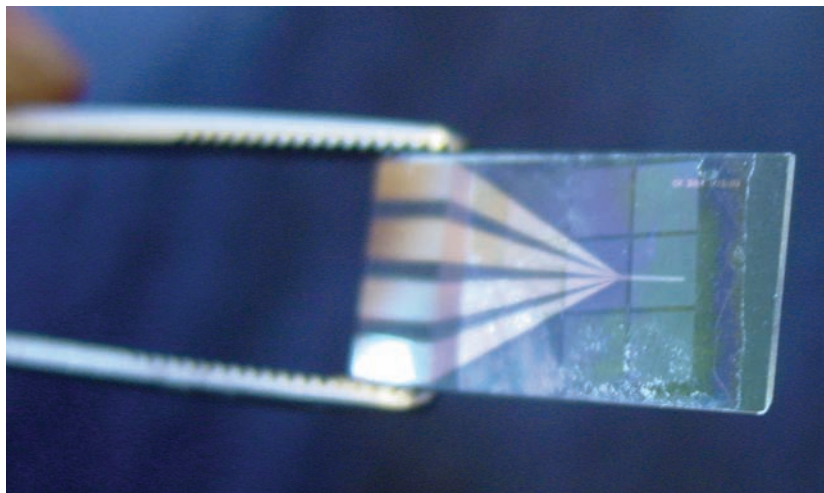
Pokiaľ sa zmieša niekoľko málo vírusov, bude ich organizácia chaotická. V prípade, že ich však bude dostatočné množstvo, budú mať tendenciu sa organizovať. Napríklad sa podarilo vytvoriť vrstvu usporiadaných bakteriofágov M13 hrubú rádovo mikrometer a s plochou až  $10 \text{ cm}^2$ . V tomto čase sa A. Belcher spolu so svojimi spolupracovníkmi z MIT Yet Ming Chiengom, Palou Hammondom a Ki Tae Namom snažia vyvinúť ultratenkú lítium-iónovú batériu. Jej hlavnou prednosťou by mala byť už spomínaná hrúbka a teda minimálna hmotnosť, pri rovnakej kapacite asi 20 krát menšia v porovnaní s terajšími batériami. Záporná elektróda je tvorená bakteriofágmi na ktorých povrchu je naviazané zlato a oxid kobaltu. Zlato zvyšuje vodivosť a oxid kobaltu poskytuje ióny ako nosiče náboja. Táto elektróda je vytvorená priamo na pripravenom polymérnom elektrolyte. Kladná elektróda je v súčasnosti vo vývoji a snažia sa, aby sa formovala priamo na opačnej strane elektrolytu. Tieto vrstvy sa nanášajú niekoľkokrát na seba, čím sa zvyšuje celkové napätie batérie a malá vzdialenosť medzi vrstvami umožní rýchle nabíjanie a vybijanie batérií.

**pH** – záporné vzaté dekadický logaritmus koncentrace hydroxoniových iónů  $\text{H}_3\text{O}^+$ , matematicky definováno  $\text{pH} = -\log[c(\text{H}_3\text{O}^+)]$ . Chemicky čistá voda má  $\text{pH} = 7$ , kyseliny od 0 do 7, zásady od 7 do 14.

**Chemická afinita** – prirodzená schopnosť atomů a molekul slučovat se s jinými látkami. Pojem byl poprvé použit již v roce 1600, v dnešním smyslu v roce 1616. Původ afinity je v kvantových vlastnostech atomárních a molekulárních elektronových obalů.-

Samoorganizovaná štruktúra vírusov M13, ktorá bude tvoriť časť funkčnej batérie. Lindsay Carswell: Virus Battery. Ki Tae Nam, MIT.





Snímok z experimentov pri vývoji batérie. MIT.

### **Budúcnosť**

Do budúcnosti by autori radi využili schopnosti bakteriofágov aj na iné účely. Napríklad by pomocou bakteriofágov bolo možné detegovať defekty v materiáloch, resp. ich opotrebovanie. Taktiež by bolo zaujímavé prinútiť vírusy aby vytvorili PN prechody a sami tvorili tranzistory. Tranzistory by pravdepodobne nemali lepšie vlastnosti, či už elektrické alebo mechanické, ako teraz používané polovodičové súčiastky, boli by však pripravované bez použitia agresívnych chemikálií a taktiež znateľne lacnejšie.

■ Vladimír Scholtz, 11. 5. 2007, AB 19/2007

## Konec druhohorních potvor

Náhlý úhyn dinosaurů a jiných živočichů před 65 miliony lety umožnil nástup savců a pozdější vzestup člověka. Od roku 1980 se spekuluje o tom, že by rychlé vymření několika živočišných druhů mohlo souviset s dopadem menší planety nebo jádra komety na Zemi. V roce 1990 se dokonce našel kráter, který by mohl být dávným svědectvím této události. A v roce 2007 byl na základě numerických simulací označen i pravděpodobný viník – úlomek planety 298 Baptistina.

### 1980 – objev KT rozhraní

Počátek našeho příběhu spadá do roku 1980. Tehdy geofyzik Walter Alvarez (\*1940) spolu se svým otcem Luisem Alvarezem (1911–1988) a dalšími spolupracovníky našli zajímavou sedimentární vrstvu v hloubce odpovídající rozhraní mezi obdobím křída a třetihor.

Dnes tuto tenkou vrstvu označujeme KT rozhraní. Písmeno K v názvu připomíná období křída (anglicky Cretaceous) a písmeno T třetihory (anglicky Tertiary). Na výzkumech se spolu s Walterem a Luisem Alvarezovými podíleli také chemici Frank Asaro a Helen Michel z Lawrenceovy laboratoře v Berkeley. Shrňme mimořádné vlastnosti této vrstvy:

- Vrstva je tlustá pouhý jeden až dva centimetry a nachází se v sedimentech na celém světě. Její vznik tedy souvisí s globálním jevem, který ovlivnil ve velmi krátkém údobí celou Zemi.
- Vrstva obsahuje zvýšené množství iridia. Oproti okolí je jeho koncentrace třiceti až stonásobně vyšší. V zemském plášti je iridium velmi vzácné. Naopak se hojně vyskytuje v materiálu planetek a kometárních jader.
- Izotopové složení chrómu v KT rozhraní neodpovídá izotopovému složení tohoto prvku na Zemi.
- Ve vrstvě se nachází přetavený křemík a malé skleněné kuličky.

Na základě veškerých indicií vyslovil Walter Alvarez velmi odvážnou hypotézu. Země se před 65 miliony lety musela střetnout s tělesem o rozměrech přibližně 10 kilometrů. Při srážce se uvolnila energie sto bilionů tun TNT, což je milionkrát více než při pokusných termojaderných explozích. Dopad byl doprovázen rázovou vlnou ve vzduchu, která měla stejně ničivé účinky jako vlna tsunami vzniklá na vodní hladině. Následná seizmická vlna způsobila silná zemětřesení a zvýše-



*Eroze půdy v blízkosti města Drumheller v Kanadě odkryla KT rozhraní. Pod ní jsou křídové sedimenty, nad ní třetihorní. Foto G. Larson.*

**Křída** – poslední druhohorní období, které započalo před 145 miliony lety a skončilo před 65 miliony lety. Je charakteristické rozsáhlými křídovými pánevemi. Období poprvé definoval belgický geolog Jean Baptiste Julien d'Omalius d'Halloy (1783–1875) v roce 1822.

**Druhoohory** – geologické období, které započalo asi před 251 miliony lety a skončilo před 65 miliony lety. Dělí se na trias, juru a křidu. V druhohorách se prakticky Pangea rozdělil na jednotlivé kontinenty. Typickou faunou druhohor byli velcí plazi.

**Třetihory** – geologické období začínající před 65 miliony lety vyhynutím velkých plazů a končící před 2,6 miliony nástupem první doby ledové. Pro toto období je charakteristický nástup savců. Termin zavedl italský geolog Giovanni Arduino (1714–1795) v roce 1759.

**KT rozhraní** – tenká vrstva sedimentů oddělující období křídý a třetihor, která je bohatá na iridium. Byla objevena Walterem a Luisem Alvarezovými v roce 1980. Předpokládá se, že jde o pozůstatek po dopadu desetikilometrové planetky, která způsobila vyhynutí velkých plazů.

**Baptistina** – planetka s přesným označením 298 Baptistina, která má rozměry 13 až 30 km. Obíhá kolem Slunce po eliptické dráze s periheliem 2 AU a aféliem 2,5 AU. Podle numerických simulací (2007) vznikla Baptistina (spolu s dalšími tělesy na obdobné dráze) přibližně před 160 miliony lety jako největší pozůstatek srážky tělesa o průměru 170 km s menším tělesem.

**TNT** – trinitrotoluen. Jde o běžnou trhavinu, která se využívá jako ekvivalent k vyjádření energie. 1 kg TNT odpovídá energii 4,2 MJ.

nou sopečnou činnost i ve velmi vzdálených oblastech. Po rázové vlně, která rychle oběhla zeměkoulí, následovala pomalejší vlna tepelná, rovněž s velkým dosahem, která globální zkázu dokonala. Předpokládá se, že rozsáhlá území mohly zachvátit požáry a uvolněný oxid uhličitý pravděpodobně způsobil dočasný skleníkový jev. Zemská kůra se při velkých rychlostech dopadu tělesa chová jako tekutina a nezanedbatelné množství horniny bylo vyvrženo do stratosféry. Znečištění atmosféry bylo dáno odpařenou horninou nejen primárně (po dopadu), ale i sekundárně (po návratu vyvržené hmoty) a kouřem z globálních požárů. Do atmosféry se dostaly i vodní páry, a to jak přímo (při dopadu do moře), tak nepřímo (odparem během šíření tepelné vlny). V tomto období byl v atmosféře ve zvýšené míře přítomen aerosol kyseliny sírové a Země byla proto sužována kyselými dešti. Znečištěná atmosféra zabránila po několik let přísunu slunečního svitu. Výsledkem byl rapidní úbytek rostlin a fytoplanktonu, který spolu s nevhodnými životními podmínkami na povrchu planety vedl k vyhynutí organismů závislých primárně či sekundárně na této potravě, především býložravců a predátorů, tedy i velkých a malých plazů. Dle odhadů Alvareze musela taková srážka vytvořit kráter o rozměrech přibližně 250 kilometrů.

## 1990 – objev kráteru

O deset let později, v roce 1990, byly objeveny pozůstatky po kráteru, který odpovídá jak stářím, tak velikostí. Jde o 180 km velký kráter Chicxulub (čti číksulub) na poloostrově Yucatán. Část kráteru se nachází pod mořem v Mexickém zálivu. Na počátku roku 1990 objevil na Haiti Alan Hildebrand z Arizonské univerzity jíl s obsahem iridia, přetaveného křemene a skleněných kuliček. Bylo jasné, že by se v blízkosti (cca do vzdálenosti 1 000 km) měl nacházet velký impaktní kráter. Po zveřejnění objevu na konferenci se ukázalo, že geofyzik Glen Penfield pracující pro mexickou ropnou společnost PEMEX objevil při leteckém průzkumu obloukovité oblasti u poloostrova Yucatán již v roce 1978. Jeden oblouk byl patrný na magnetogramech oblasti a druhý na gravitační mapě. Podrobný průzkum oblouků ukázal, že jde o hledaný kráter. V roce 1996 byly pořízeny i podrobné satelitní snímky oblasti, na kterých byla nalezena řada zatopených kruhových děr podél prstence se středem v centru kráteru. Stáří těchto reliktů včetně nalezených oblouků je 65 milionů roků. Existují i další, podstatně menší krátery z tohoto období. Příkladem může být kráter Boltyš na

Poloha kráteru v Severní Americe. Pearson Prentice Hall, Inc., 2005.

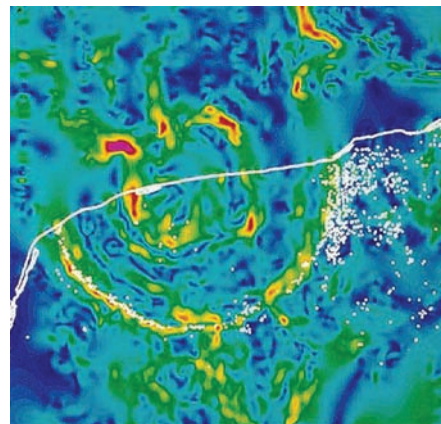


Ukrajíně a pravděpodobně také kráter Silverpit v Severním moři. Podle všeho se tedy zdá, že před 65 miliony lety na Zemi dopadlo jedno větší, přibližně desetikilometrové těleso, a několik menších úlomků. Ze stejného období je i kráter Tycho na Měsíci.

### 2007 – objev viníka, planetka Baptistina

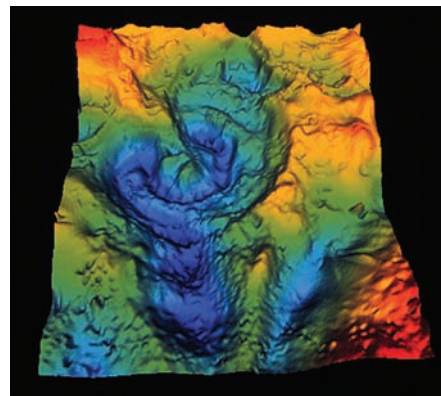
V roce 2007 prováděl William F. Bottke (USA), David Nesvorný (USA) a David Vokrouhlický (ČR) numerické simulace dráhy planetky Baptistina a dalších menších těles s obdobnou dráhou. Zjistili, že všechna tělesa vznikla před 140 až 190 miliony lety srážkou planetky o rozměru 170 km s menším tělesem. Baptistina je největším pozůstatkem s rozměry 13 až 30 km. Při srážce vznikla řada dalších úlomků, které postupně dopadly na Zemi, Měsíc a Venuši. S devadesátiprocentní pravděpodobností zasáhl podle simulací více než desetikilometrový úlomek z této srážky před 65 miliony lety Zemi. Při pádu došlo k fragmentaci úlomku na několik částí. Obdobný jev fragmentace v gravitačním poli byl pozorován i při dopadu komety Shoemaker-Levy 9 na planetu Jupiter v roce 1994. Pravděpodobně je tak konečně vypátrán viník vyhynutí velkých plazů a dalších druhů a následného vzestupu savců na planetě Zemi.

■ Petr Kulhánek, 14. 9. 2007, AB 36/2007



Gravitační mapa oblasti. Alan Hildebrand a kol., 1990.

Počítačová rekonstrukce profilu oblastí na základě měření gravitačního a magnetického pole. V. L. Sharpton, LPI.



## Historie kilogramu – minulost a budoucnost



ΜΕΤΡΩ ΧΡΩ

Původní logo Mezinárodního úřadu pro míry a váhy.

**BIPM** – Bureau International des Poids et Mesures; International Bureau of Weights and Measures; Mezinárodní úřad měr a vah. Úřad má sídlo v Sevres v blízkosti Paříže. Založen byl v roce 1875 a jeho hlavním úkolem je zajistit jednotný celosvětový systém měr a vah. Prováděcí práva má výbor CIPM.

**CGPM** – Conférence Générale des Poids et Mesures; General Conference on Weights and Measures; Všeobecná konference o mírách a váhách. Konference svolávaná za účelem řešení problematiky definice základních jednotek SI.

**CIPM** – Comité International des Poids et Mesures; International Committee for Weights and Measures; Mezinárodní výbor pro míry a váhy.

**NIST** – National Institute for Standards and Technology. Americký Národní úřad pro standardy a technologie. Založen byl v roce 1901. Jeho laboratoře se nacházejí v Boulderu (Colorado) a v Gaithersburgu (Maryland).

Jednotka hmotnosti kilogram má dosud zvláštní a výjimečné postavení mezi základními jednotkami metrické soustavy SI. Není totiž odvozena a určena na základě obecného přírodního děje či mikroskopických vlastností hmoty, ale je stále definována pomocí prototypu, tedy stejným způsobem, jako se to provádělo v počátcích, kdy jednotné měřicí systémy vznikaly. Z nejrůznějších důvodů zůstala jednotka kilogram definována dodnes naprosto stejně, jak byla zavedena v roce 1889 a nezměnil to ani vznik kvantové mechaniky a teorie relativity. Definici kilogramu neotřáslý ani nesmírné pokroky v metodách měření. Zamysleme se nad otázkami, proč tomu tak je, a zda již není na čase tento pozůstatek dávné historie opustit a nahradit novější a dokonalejší definicí, lépe vyhovující současným potřebám.

### Co je prototyp kilogramu?

Prototyp kilogramu, jak je nyní používán, představuje kovový váleček ze slitiny 90 % platiny a 10 % iridia, uchovávaný v trezoru spolu s jeho šesti kopiemi v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy ve Francii, v Sevres u Paříže. O něm dle definice platí, že představuje hmotnost jednoho kilogramu. Je to vlastně jediný objekt na Zemi, o němž víme jeho hmotnost naprosto přesně. Jde ale jen o zdání. Číselně ano, jak plyne z definice, ale hmotnost prototypu má samozřejmě jistou neurčitost, která je dána jednak omezenými možnostmi použitých metod jeho vážení a také se může časem měnit hmotnost samotného prototypu. To způsobuje vnější prostředí, které má vliv na oxidaci povrchu a způsobuje difúzi plynů přímo dovnitř kovu. Před vážením se prototyp předepsaným způsobem čistí, čímž se však všechny systematické chyby eliminovat nemohou.

Ideální by proto bylo uchovávat prototyp ve vakuu bez dotyku podložky, uchycený v nějakém magnetickém závěsu. Takové možnosti však v době přijetí prototypu za standard hmotnosti před více než 100 lety nebyly a také by se musel vyřešit problém, jak takto uchovávaný prototyp vážit. Je jasné, že se zlepšujícími se nároky v oboru metrologie se dříve či později musíme dostat do situace, kdy již definice na základě prototypu nebude vyhovovat.



## Historie kilogramu

1795. Ve Francii byl v rámci reformy po Francouzské revoluci přijat gram jako hmotnost jednoho krychlového centimetru vody za teploty tajícího ledu.

1796. Pro potřeby snazší praktické realizace byl vyroben provizorní kilogram z čisté platiny, jehož tisíckrát větší hmotnost také lépe vyhovovala potřebám průmyslu a obchodu. Na základě přesnějších měření hustoty vody se přijala nová definice hmotnosti založená na hustotě vody v lépe měřitelném bodě blízko 4 °C, kdy má voda největší hustotu. Přesným přeměněním se zjistilo, že 1 dm<sup>3</sup> vody má za této teploty 99,92072 % hmotnosti provizorního platinového kilogramu vyrobeného téhož roku dřívě. Provizorních kilogramů bylo následně vyrobeno několik.

1799. Novou jednotkou byl proto zaveden kilogram, který byl definován jako hmotnost jednoho z provizorních kilogramů, válečku o průměru 39,4 mm a výšce 39,7 mm z čisté platiny. Nazván byl *Kilogramme des Archives*.

1870. Počínaje tímto rokem, iniciovala francouzská vláda prostřednictvím několika vědeckých konferencí snahu vylepšit metrický systém. Jeden ze závěrů učiněných v následujících letech bylo doporučení nahradit dosavadní platinový kilogram kilogramem ze slitiny platiny a iridia.

1875. Byla přijata metrická konvence, také byl zřízen Mezinárodní úřad pro míry a váhy.

1880. V následujících několika letech bylo postupně vyrobeno přibližně 80 platino-iridiových prototypů kilogramu ve společnosti Johnson & Matthey. Slitinu připravil George Matthey.

1889. První CGPM rozhodla o výměně starého prototypu v definici kilogramu za nový, vyrobený ze slitiny platiny a iridia. M. Collot vybral a vyleštil jeden prototyp, který se hmotností nejlépe blížil předchozímu platinovému kilogramu. Tento odlitek byl nazván Mezinárodním prototypem kilogramu. Jeho průměr 39,17 mm byl zvolen tak, aby jeho

**Gravitační konstanta** – fundamentální konstanta charakterizující gravitační interakci. Vystupuje jako koeficient úměrnosti v Newtonově gravitačním zákonu. Podle současných znalostí je  $G = 6,674\ 28(67) \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1}$  s relativní chybou  $10^{-4}$ .

**Avogadrova konstanta** – konstanta udávající počet molekul, popřípadě jiných částic, v látkovém množství jeden mol. Značí se  $N_A$ . Někdy se také nesprávně označuje jako Avogadrovo číslo. Nejpresnější metody jejího měření jsou založeny na rentgenové difrakci aplikované na vzorky monokrystalů křemíku nebo kalcitu. Poslední nejpresněji stanovená hodnota Avogadrovy konstanty je rovna  $N_A = 6,022\ 141\ 79(30) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  s relativní chybou  $5 \times 10^{-8}$ .

**Planckova konstanta** – fundamentální konstanta popisující chování mikrosvěta. Jde o základní konstantu kvantové teorie, která má význam elementárního kvanta projekce momentu hybnosti do libovolné osy. Podle současných znalostí je  $\hbar = (1,054\ 571\ 628(53) \times 10^{-34} \text{ Js})$  s relativní chybou  $5 \times 10^{-8}$ .

Sídlo Mezinárodního úřadu pro míry a váhy v Sèvres u paříže. BIMP.



**Josephsonův jev** – jev, při kterém dva supra-  
vodiče oddělíme tenkou vrstvou izolantu tak, aby  
Cooperovy páry mohly tunelovat skrz izolant. Roz-  
hraním poteče elektrický proud, jehož velikost závi-  
sí na vnějším magnetickém poli a teplotě. Využívá  
jej například senzor magnetického pole SQUID.

**SQUID** – citlivý magnetometr, kterým se měří vel-  
mi slabá magnetická pole za pomoci supravodivé  
smyčky obsahující Josephsonův spoj. Zařízením  
lze změřit i extrémně slabá pole až do  $5 \times 10^{-18}$  T.  
Název zařízení je zkratkou z anglického „Supercon-  
ducting Quantum Interference Device“. Samotné  
slovo „squid“ znamená v češtině kalmár (hlavono-  
žec žijící ve Středozezemním moři).

Prototyp kilogramu, váleček ze slitiny platiny a iridia, ulo-  
žený pod třemi skleněnými zvony v Mezinárodním úřadu  
pro míry a váhy ve Francii, v Sèvres u Paříže. Prototyp  
připravili G. Matthey a M. Collot v roce 1879. BIMP



povrch byl co nejmenší. Kromě Mezinárodního prototypu kilogramu se uchovává pro porovnání jeho 6 sesterských kopií a další kopie tvoří národní standardy. Ty se porovnávají s Mezinárodním prototypem přibližně každých 50 let.

1960. Na 11. CGPM byl přijat mezinárodní systém jednotek známý pod zkratkou SI, do něhož byla jednotka hmotnosti kilogram zahrnuta. Jeho dosavadní definice však zůstává nadále v platnosti beze změny.

1988. Při porovnávacích měřeních v letech 1988–1992 se zjistilo, že Mezinárodní prototyp kilogramu ztratil od posledního měření během padesátiletého období hmotnost přibližně 50  $\mu\text{g}$ . Ztráta hmotnosti zhruba odpovídá hmotnosti otisku prstu.

1999. Dvacátá první konference CGPM se zabývala návrhy na změnu definice kilogramu pomocí koule vyrobené z monokrystalu křemíku a pomocí experimentu Watt Balance. Dosavadní experimentální neurčitost však neumožnila změnu definice. Jako překážkou využití experimentu Watt Balance k definování kilogramu se také zdála přílišná složitost experimentu a zatím malý počet laboratoří, který se tímto experimentem zabýval.

2003. Dvacátá druhá konference CGPM se zabývala mimo jiné otázkou, zda je vhodné využít experiment *Watt Balance*, převádějící poměr Planckovy konstanty a hmotnosti elektronu  $\hbar/m_e$  na frekvenci. Rovněž byla nastolena otázka, zda lze podobně zafixovat Boltzmannovu konstantu  $k_B$ . Poměr  $k_B/\hbar$  lze totiž také převést na měření frekvence a zafixování Boltzmannovy konstanty by vedlo k redefinici teploty, jejíž stupnice je dosud vázána na trojný bod vody.

2007. Dvacátá třetí konference CGPM doporučila změnu definice kilogramu buď na základě zafixování hodnoty Planckovy, nebo Avogadrovy konstanty, podobně se má učinit s definicí teploty a Boltzmannovou konstantou. Formální návrhy obou definic mají být předloženy na dvacáté čtvrté konferenci CGPM v roce 2011.

2009. Právě čtete tuto knížku a definice kilogramu na základě Mezinárodního prototypu je oficiálně platná již neuvěřitelných 120 let. Taková

délka platnosti téže definice nemá u žádné jiné jednotky SI obdoby. Navíc jde o jedinou z jednotek SI definovanou na základě makroskopického, uměle vyrobeného prototypu.

2011. Na dvacáté čtvrté konferenci CGPM se pravděpodobně po 122 letech změní definice kilogramu.

### Nevýhody současné definice kilogramu

V minulosti, kdy nebyly potřeby vědy z hlediska přesnosti jednotek tak vysoké, způsob zavedení jejich definice pomocí jejich prototypů vyhovoval. Hlavní hnací silou vedoucí k jednotnému definování jednotek nebyla totiž snaha dosáhnout vysoké přesnosti pro účely vědy, ale motivace byla původně spíše praktická, sjednotit jednotky měření pro globalizující se obchod, rozvíjející se průmysl a nahradit velké, nepřehledné a nepraktické množství jednotek regionálních menším množstvím jednotek celosvětových, neboť se tak ušetří námaha s jejich vzájemným přepočítáváním. Významná samozřejmě byla také snaha zajistit vhodným prototypem relativní stálost jednotek, vyhovující běžným potřebám. K tomuto účelu nejspíše prototyp kilogramu vyhovuje i dnes a nejinak by tomu bylo i u jiných jednotek. Připomeňme například prototyp metru, kovovou profilovanou tyč se dvěma ryskami na koncích, již byl metr jako jednotka délky svého času určen. Prototyp metru nahradil starší definici, založenou na délce zemského poledníku, což však bylo svým charakterem také možné považovat za prototyp. Šlo totiž stejně, jako u uměle vyrobených prototypů, o vlastnost objektu, který se vyskytuje v jediném provedení. Dalším příkladem je sekundové kyvadlo definující sekundu, jednotku času, přičemž v tomto případě byla vlastně součástí prototypu také celá Země, ovlivňující jeho dobu kyvu gravitačním zrychlením.

Předchozí, svého času rovněž používaná (a vlastně původní), definice sekundy jako část délky dne, definovaná časovým intervalem mezi dvěma průchody hvězdy

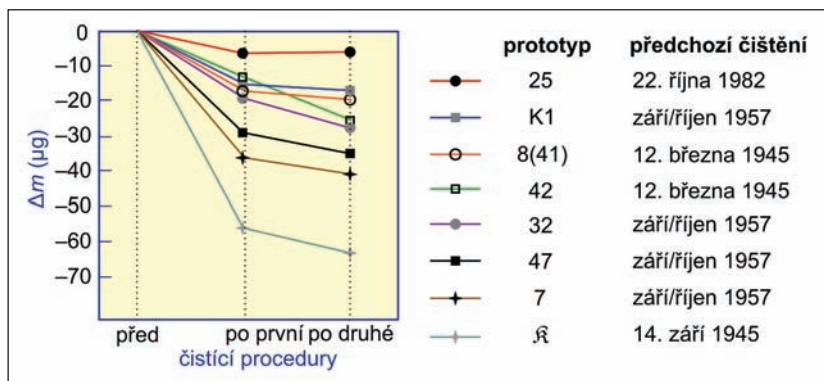


Dvě z šesti oficiálních kopií prototypu kilogramu číslo 43 a 841. BIMP.

**Platina** – velmi těžký a chemicky odolný kujný a tažný kov stříbřitě bílé barvy. Objevena byla pravděpodobně v roce 1735. Je elektricky i tepelně dobře vodivá. Využití má v elektrotechnickém průmyslu a šperkařství.

**Iridium** – drahý kov šedivě bílé barvy. Iridium bylo objeveno roku 1804. Ušlechtilý, poměrně tvrdý, i když křehký kov, elektricky i tepelně středně dobře vodivý. V přírodě se vyskytuje téměř pouze jako ryzí kov, převážně v okolí míst dopadu meteoritů.

Graf ilustrující vliv čistících procedur na změnu hmotnosti Mezinárodního prototypu kilogramu (spodní křivka) a jeho kopií. BIMP.





Čištění prototypu probíhá dnes přesně definovaným postupem.

zemským poledníkem, měla podobné nevýhody, spočívající v proměnnosti jednotky vlivem změn parametrů Země. Pro potřeby občanské by však takto definovaná sekunda jako část dne mohla vyhovovat paradoxně ještě lépe než dnešní definice. Čas odvozený od takovéto sekundy by totiž stále (podle definice) určoval stejnou část dne, bez ohledu na změnu periody otáčení Země. Pro jiné účely by však proměnnost sekundy samozřejmě vadila. Prototypy jednotek tak byly postupně nahrazovány dokonalejšími definicemi, založenými na univerzálních fyzikálních vlastnostech látky či světla. Základní rozdíly obou popsáných způsobů definice vystihuje následující tabulka:

ZÁKLADNÍ ROZDÍLY ZPŮSOBŮ DEFINIC		
CHARAKTERISTIKA	DEFINICE POMOCÍ PROTOTYPU	DEFINICE POMOCÍ VLASTNOSTÍ PŘÍRODY *)
přesnost jednotky	je principiálně omezena konstrukcí prototypu	přesnost můžeme neomezeně zlepšovat s tím, jak se zdokonalují metody měření
časová stálost	časem může narůstat v principu neodstranitelná systematická chyba samotného prototypu	veličina, z níž se odvozuje jednotka, je kdykoliv měřitelná za stejných podmínek
dostupnost	pro porovnání národních etalonů se základním prototypem je nutno je k prototypu převážet	veličina, z níž se odvozuje jednotka, je dostupná a měřitelná kdekoli
vhodnost vzhledem ke zdokonalování metod měření	s rostoucí přesností měření vhodnost prototypu klesá	s narůstající přesností měřících metod se úměrně zlepšuje i přesnost určení jednotky

## ZÁKLADNÍ ROZDÍLY ZPŮSOBŮ DEFINIC

CHARAKTERISTIKA	DEFINICE POMOCÍ PROTOTYPU	DEFINICE POMOCÍ VLASTNOSTÍ PŘÍRODY *)
bezpečnost, odolnost proti poškození	při poškození prototypu je nutno jej znovu vyrobit, čímž vzroste systematická chyba	jednotku lze zrealizovat kdykoliv znovu, se stejnou přesností, stačí, pokud se uchová pouze informace o tom, jak je definována

\*) Rozumí se buď mikroskopické parametry odvozené od vlastností atomových obalů, jader či elementárních částic nebo fundamentální parametry, jako je např. rychlost světla; nikoliv parametry makroskopických objektů, které mohou být proměnné a značně závislé na vnějších podmínkách. Přesnost kilogramu je omezena metodou vážení jeho prototypu.

Vážení prototypu v tomto případě spočívá v porovnávání jeho hmotnosti s hmotnostmi jeho šesti kopií. Při tomto měření získáme na základě statistického zpracování odhad velikosti náhodných chyb a také systematické odchylky, přičemž můžeme zjišťovat, jak se systematická odchylka změnila vlivem vnějších vlivů od minulého měření. Metodu vážení můžeme stále zdokonalovat a využít měřicí techniky, která ještě v 19. století nebyla k dispozici a tím můžeme snížit náhodnou chybu. Systematická chyba samotného prototypu se však může projevit za celou dobu existence prototypu stále stejným způsobem a při dosavadní definici ji nelze snížit s pokrokem měřicích metod. Při posledním měření se dokonce ukázalo, že mezinárodní prototyp ztratil od posledního měření přibližně 50  $\mu\text{g}$ , což odpovídá relativní chybě  $5 \times 10^{-8}$ . Takovému kolísání hmotnosti nezabránilo ani uchování prototypu za přísně hlídaných podmínek.

### „Nový“ kilogram a Avogadrova konstanta

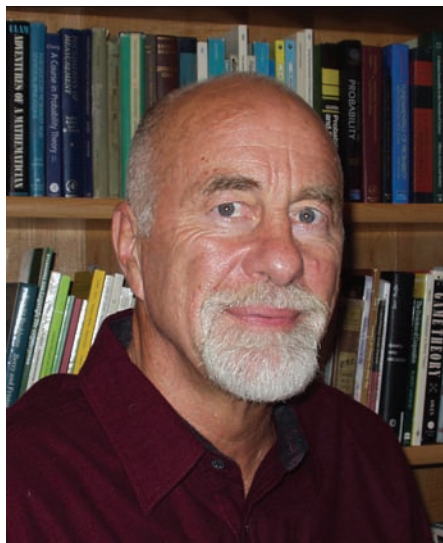
První možností, jak definovat kilogram pro budoucnost je jeho provázání s hodnotou Avogadrovy konstanty (počet molekul v látkovém množství 1 mol). „Je Avogadrova konstanta sudé nebo liché číslo?“ Tuto otázku položil ne zcela vážně v roce 2006 Theodor P. Hill, profesor matematiky z Technologického institutu v Georgii. Ve svém článku publikovaném v časopise Physics Archives spolu se svým ko-

**Vizmut** – *Bismuthum*, patří mezi těžké kovy, které jsou známy lidstvu již od starověku. Slouží jako součást různých slitin, používá se při výrobě barviv a keramických materiálů.

**Zlato** – *aurum*, chemicky odolný, velmi dobře tepelně i elektricky vodivý, ale poměrně měkký drahý kov žluté barvy. Již od dávnověku byl používán pro výrobu dekorativních předmětů a šperků a jako měnová záruka při emisích bankovek. V současné době je navíc důležitým materiálem v elektronice, kde je ceněna jeho vynikající elektrická vodivost a odolnost proti korozi. V přírodě se vyskytuje zejména ryzí.

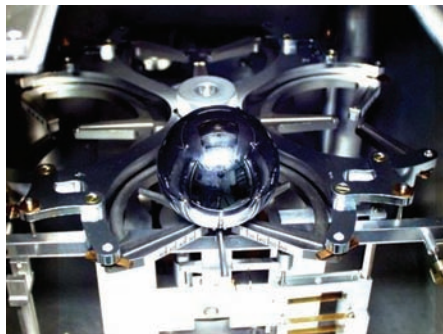
Theodor P. Hill. Technologický institut v Georgii.





Donald F. Fox. Technologický institut v Georgii.

Koule z čistého křemíku nazývaná Avogadrovou koulí jako jeden z kandidátů na vylepšení dosavadní definice kilogramu. NPL.



legou Ronaldem F. Foxem, profesorem fyziky, totiž navrhli definovat Avogadrovu konstantu jako přesné číslo. Tím by samozřejmě vyřešená otázka ztratila smysl, neboť odpověď by byla dána přímo novou definicí. Když Hill četl v září 2007 na webu CNN článek o zjištěné ztrátě hmotnosti prototypu kilogramu, vedlo to k publikaci dalšího článku ve Physics Archive, kde oba autoři navrhli změnu definice kilogramu.

Návrh učiněný Foxem a Hillem spočívá v definici kilogramu jako přesného počtu  $1000 \times 18 \times 14074481^3$  atomů uhlíku  $^{12}\text{C}$ . Je to vlastně matematická definice a z ostatních návrhů také asi nejjednodušší. „Čistě matematická definice je experimentálně neutrální, vědci mohou použít jakýchkoliv laboratorních metod, jež umožňují aproximovat přesnou hmotnost“, říká Hill. „Použití třetí mocniny přesného čísla v definici odpovídá stejné přesnosti, 8 až 9 platných míst, jako je nyní použito v přesné definici délky pomocí rychlosti světla“.

Přijetí zmíněné definice kilogramu by vedlo k určení hodnot Avogadrovy konstanty a atomové hmotnostní konstanty jako přesných čísel, podobně jako je tomu od roku 1983 s rychlostí světla.

Původně Fox a Hill navrhovali Avogadrovu konstantu jako  $84\,446\,888^3$ . Jejich návrh ovšem nešel pozornosti editora časopisu American Scientist, který si vyžádal obsáhlejší článek, jenž byl nakonec publikován v březnu roku 2007. Reakcí byla řada a nejvýznamnější připomínka byla od předsedy komise pro názvosloví, terminologii a symboliku Americké chemické společnosti Paula J. Karola, který přišel s požadavkem, aby navrhovaná hodnota Avogadrovy konstanty byla dělitelná číslem 12 (důvod je nasnadě, jeden mol je totiž definován jako počet atomů uhlíku  $^{12}\text{C}$ ).

Fox a Hill proto upravili poslední číslici z hodnoty 8 na hodnotu 6, navrhovaná Avogadrova konstanta tak nabyla hodnoty  $84\,446\,886^3$ . Počet atomů uhlíku  $^{12}\text{C}$  lze v tomto případě napsat jako  $18 \times 14\,074\,481^3$  a díky tomuto tvaru je zajištěno, že Avogadrova konstanta je dělitelná dvanácti. Podle definice totiž jeden mol obsahuje stejný počet atomů či molekul jako je obsaženo atomů ve 12 gramech uhlíku  $^{12}\text{C}$  a vynásobením dvanácti dostaneme číslo  $12 \times 18 = 216 = 6^3$ . Tak je zajištěno, že jak Avogadrova konstanta, tak i její třetí odmocnina je celé číslo.

Jiná možnost jak nahradit nevyhovující prototyp kilogramu spočívá v jeho nahrazení koulí z čistého monokrystalického křemíku. Nešlo by ovšem o další prototyp ale vlastně o návod, jak lze takový kilogram

kdykoliv vyrobit znovu, v budoucnosti samozřejmě z čistšího křemíku, s lepší přesností a tím by se mohla přesnost kilogramu zlepšovat spolu se zmenšujícími se systematickými chybami. Počet atomů v kouli by bylo možné například zjišťovat z ohybu rentgenových paprsků na pravidelné krystalové mříži. Tato definice by sice neumožnila stanovit Avogadrovu konstantu jako přesné číslo, vedla by však k jejímu zpřesnění, neboť by odpadla nutnost porovnávat hmotnost měřeného křemíkového vzorku s prototypem kilogramu a bylo by možné jeho hmotnost na základě definice přímo přepočítat, bez zhoršení výsledné chyby měření.

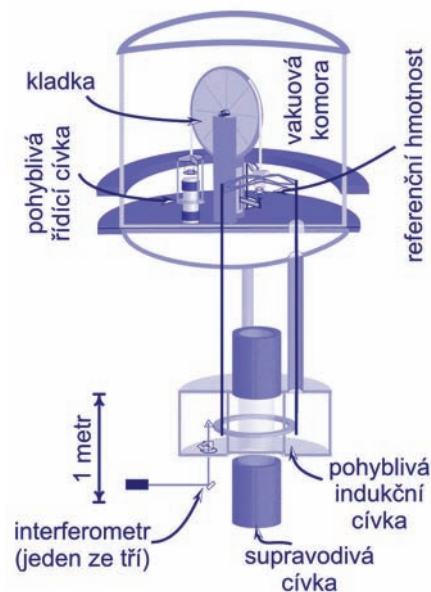
### „Nový“ kilogram a elementární náboj

Druhou možností je zafixovat velikost elementárního náboje a definovat jeden kilogram jako hmotnost tělesa, které získá zrychlení  $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ , působí-li na něho stejná síla jako na metr délky mezi dvěma nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 metru od sebe, kterými protéká  $6\,241\,509\,647\,120\,417\,390$  elementárních nábojů za sekundu. Šlo by o definici kilogramu odvozenou od definice ampéru. Bohužel tato metoda s sebou přináší problémy při realizaci kilogramového standardu (tzv. experiment Ampère Balance) a zatím nemůže dosáhnout vyšší relativní přesnosti než  $10^{-5}$ , což je nedostatečné. Fixace hodnoty elementárního náboje by s sebou přinesla novou definici elektrického náboje – jeden coulomb by se rovnal  $6\,241\,509\,647\,120\,417\,390$  elementárních nábojů přesně. Ampér by byl potom definován jako jeden coulomb za sekundu. V současnosti je tato volba nejméně pravděpodobná.

### „Nový“ kilogram a Planckova konstanta

Třetí možností je zafixovat velikost Planckovy konstanty a definovat kilogram jako těleso, jehož klidová energie je rovna energii fotonu s frekvencí  $1,356\,392\,733 \times 10^{50} \text{ Hz}$  přesně. Mechanický vztah  $E = mc^2$  je tak porovnáván s kvantovým vztahem  $E = \hbar\omega = hv$ . U této metody se zdá být realizace kilogramového standardu nejpřesnější, jde o tzv. experiment *Watt Balance*, ve kterém je tíže kilogramového standardu kompenzována magnetickou silou působící na cívku.

Experiment *Watt Balance* je dynamický experiment, ve kterém je tíhové zrychlení měřeného tělesa kompenzováno magnetickým polem supravodivých cívek. Vzniklý rovnoměrný pohyb soustavy je sledován



Základní schéma experimentu *Watt Balance* (výkonové váhy) v NIST.

**SI** – mezinárodní soustava jednotek, která byla přijata v roce 1960 na 11. konferenci CGPM. Její název je zkratkou z francouzského *Le Système International d'Unités*. Soustava SI vycházela ze systému MKS (metr, kilogram, sekunda) a nahradila dřívější soustavu CGS (centimetr, gram, sekunda). Za základní jednotky byly přijaty metr (délka), kilogram (hmotnost), sekunda (čas), kelvin (teplota), ampér (elektrický proud), kandela (svítivost) a mol (látkové množství). Kromě toho existují v SI vedlejší jednotky, odvozené jednotky a přesně stanovené předpony pro desítkové násobky a zlomky různých jednotek.



Realizace experimentu *Watt Balance* v americkém Národním úřadu pro standardy a technologie (NIST).

Realizace experimentu *Watt Balance* ve švýcarském Národním metrologickém ústavu (METAS) v Bernu.



interferometricky (z posuvu proužků). Zdrojem světla pro interferometr je He-Ne laser. Posun frekvence světla je měřen rubidiovými atomovými hodinami. V rovnici popisující rovnováhu vystupuje kromě rychlosti pohybu také hmotnost závaží, proud tekoucí pohyblivou indukční cívkou (je dán Josephsonovým jevem) a napětí generované v cívce (to je měřeno pomocí kvantového Hallova jevu). Měřením proudu a napětí v cívce lze určit výkon kompenzující pohyb tělesa, proto se experiment nazývá *Watt Ballance* (výkonové váhy). Výsledkem měření je při známé hmotnosti tělesa hodnota Planckovy konstanty. Naopak, při fixní hodnotě Planckovy konstanty je výsledkem měření hmotnost referenčního tělesa. Relativní přesnost měření je v současnosti  $5,2 \times 10^{-8}$ , pro redefinici kilogramu bude třeba dosáhnout relativní přesnosti  $1 \times 10^{-8}$ . Výhodou tohoto experimentu je, že měřené veličiny nezávisí na tvaru cívek. Právě závislost na geometrickém tvaru zařízení je největším problémem realizace kilogramu pomocí definice ampéru a fixace velikosti elementárního náboje (druhá z výše uvedených možností).

Experiment *Watt Ballance* navrhl v roce 1975 B. P. Kibble z anglické Národní fyzikální laboratoře (NPL). V NPL je také postavena jedna z variant experimentu. Další realizace experimentu *Watt Balance* se testují v americkém Úřadu pro standardy a technologie (NIST) a ve švýcarském Národním metrologickém ústavu (METAS). Relativní přesnost určení hmotnosti je zatím horší než u stávajících národních etalonů hmotnosti, nicméně očekává se, že brzo se přesnost měření výrazně zlepší. Nová definice kilogramu by znamenala konec fanatického uchovávání jediného prototypu kilogramu a jeho pracné čištění, které „mění“ hmotnost mezinárodního prototypu přímo před očima. Namísto toho by standard kilogramu mohl mít jen přibližnou hmotnost a jeho skutečnou hmotnost bude možné kdykoli přesně definovaným způsobem zjistit. Pro konstrukci standardů přichází v úvahu i řada nových slitin, například slitiny osmia s iridiem, která neabsorbuje tolik vodík, uhlovodíky a rtuť jako platina. Nové standardy by bylo možné pokrýt i keramickým povrchem. Podstatné je, že definice kilogramu bude nezávislá na standardu a kdykoli je možné vyrobit nový standard kilogramu a zjistit jeho skutečnou hmotnost, což u mezinárodního prototypu možné není, neboť jen on jediný na celém světě má dle současné definice hmotnost právě jeden kilogram.

■ Martin Žáček, Petr Kulhánek, 11. 7. 2008, AB 28, 29/2008





Váhy na čarodějnice. Muzeum ve Freiburgu.  
Licence CC-BY-SA 3.0, autor Flominator.



# Rejstřík

## A

ACS 85  
afelium 46  
AFM 115  
akumulační prsteneček 118  
ALMA 97  
amorfní látka 166  
AMR 155  
antigen 148  
APEX 97  
apocentrum 11  
Apollo 27  
astrograf 174  
ATLAS 119  
aurorální ovál 21  
Avida 183  
azimut 44

## B

Bajkonur 137  
baktérie 186  
bakteriofág 193  
baptistina 197  
bifurkace 191  
bílkoviny 187  
BIMP 199  
bolometr 97

## C

CALTECH 105  
CAST 104  
CERN 105  
CGPM 199  
CIPM 199  
cirkumzenitál 173  
citrát 187  
cluster 13  
CME 9  
CMOS 162  
COS 84  
CSA 132

## Č

černá díra 76  
číslo  
  nukleonové 118  
  protonové 118

## D

dalekohled  
  ALMA 97  
  APEX 97  
  CAST 104  
  GBT 61  
  HST 83  
  Chandra 62  
  LZT 169  
  Pierre Auger 65  
  SOHO 93  
  SST 68  
  TRACE 93  
  VLT 81  
  XMM-Newton 62  
Deinococcus radiodurans 182  
deklinace 44  
Delta II 93  
depletiční vrstva 166  
DESY 112  
deuterium 129  
diazenitál 175  
difrakce 115  
DNA 190  
DN-NIM 149  
doba slovanská 41  
dopant 162  
druhohory 196  
DST 21

## E

ekliptika 11  
ekvatoreál 174  
elektron 107  
  efektivní hmotnost 161  
elektronvolt 19  
eneolit 41  
ESA 131  
Escherichia coli 181  
ESO 97  
exoplaneta 39

## F

Fermilab 105  
feromagnetikum 168  
FGS 86  
FNPP 126  
FOC 84  
fotonásobič 107  
fotovoltaický panel 137  
Fourierova transformace 115  
frekvence  
  cyklotronní 64  
  plazmová 64  
  úhlová 65  
fúze 128

## G

galaxie 73  
  aktivní jádra 76  
  galaxie S0 72  
  jádro 73  
  kupa 73  
GBT 61  
glaciál 41  
glukóza 187  
gluony 117  
gnómón 46  
GPS 167  
GSI 118  
Gy 182

## H

hadrony 120  
H alfa 72  
heliosféra 9  
heteropřechod 165  
Higgsovy částice 122  
H II oblasti 74  
Hlavní pás planetek 32  
hodinový úhel 44  
holografie 134  
HST 83  
  COS 84  
  COSTAR 84  
  FGS 86  
  FOC 84  
  NICMOS 84  
  RSU 86  
  RWA 86  
  STIS 84  
  WFC 3 85  
  WFPC 2 85

## Ch

Chandra 62

## I

index lomu 152  
interakce  
  silná 116  
invertor 162  
in vitro 144  
in vivo 144  
ionosféra 17  
ITER 128  
izotopy 118

## J

jarní bod 43  
JAXA 132  
Jeansova hustota 56

jev

AMR 155  
difrakce 115  
Dopplerův 54  
fotovoltaický 166  
Hallův 157  
Hallův kvantový 157  
kosmologický posuv 77  
Ramanův rozptyl 143  
rekonekce 7

## K

klon 186  
klystron 122  
koherence 112  
kolider 122  
konstanta  
Avogadrova 200  
gravitační 200  
Planckova 200  
korona 6  
koronograf 94  
kosmická agentura  
CSA 132  
ESA 131  
JAXA 132  
NASA 130  
Roskosmos 130  
kosmologický posuv 77  
křída 196  
KT rozhraní 197  
Kuiperův pás 32  
kvarky 116

## L

LABOCA 97  
LASER 110  
LHC 103  
ATLAS 119  
SPS 119  
LH materiál 149  
lítografie 163  
luminozita 118  
Lunar Prospector 27

LZT 169

## M

MASER 110  
megalit 42  
menhir 42  
Měsíc 26  
metamateriál 149  
DN-NIM 149  
LH materiál 149  
Single Negative 149  
SN-NIM 149  
SRR 150  
Veselagova čočka 152  
mezosféra 16  
MH-1A 126  
Michiganská státní univerzita 184  
mikrogravitace 134  
mion 107  
Mir 135  
MIT 105  
model  
standardní 102  
moment hybnosti 37  
MOSFET 162  
MPI 99

## N

nadhlavník 167  
nanofyzika 146  
nanometr 146  
nanotechnologie 146  
NASA 130  
neolit 41  
nestabilita  
KH 22  
RT 58  
neutrino 106  
elektronové 106  
mionové 106  
taunové 106  
neutronová hvězda 61  
NICMOS 84

NIST 199

nositelé náboje  
majoritní 165  
minoritní 165  
nukleon 117  
nukleotidy 189  
nukleové kyseliny 189  
numerická simulace 33

## O

obecná relativita 60  
ohnisko  
Cassegrainovo 175  
Coudé 175  
Newtonovo 175  
Oortův oblak 32  
optika  
adaptivní 169  
aktivní 168  
OSO 99

## P

paralaktická montáž 175  
parazit 184  
pás  
valenční 160  
vodivostní 160  
zakázaný 160  
pericentrum 11  
perihelium 46  
permeabilita 150  
permitivita 150  
pH 194  
Pierre Auger 65  
p-i-n 146  
Planckovy škály 119  
planeta 31  
planetezimála 31  
planetka 31  
plazma 10  
plazmid 187  
plazmoid 94  
plazmon 155

povrchový 144  
počasí 55  
podnebí 55  
pohyblivost 161  
polarizace světla 144  
protilátka 148  
proton 118  
prvek  
iridium 202  
křemík 158  
platina 202  
uhlík 158  
vizmut 204  
zlato 204  
přechod  
PN 165  
pulzar 61

## R

radioizotopový termoelektrický generátor 28  
raketoplán 136  
Ramanův rozptyl 143  
RCW 98  
rekombinace v polovodiči 166  
rekonekce 7  
rektascenze 44  
RNA 190  
rondel 42  
Rosatom 125  
Roskosmos 130  
rovnodennost 43  
RSU 86  
RWA 86

## S

Saljut 135  
Saturn V 27  
SDSS 78  
SERS 143  
SI 206  
Sirrah 54  
Skylab 135

Slunce 6  
afelium 46  
CME 9  
heliosféra 9  
korona 6  
koronograf 94  
perihelium 46  
sluneční vítr 7  
sluneční záření 166  
slunovrat 43  
sluneční vítr 7  
sluneční záření 166  
slunovrat 43  
SN-NIM 149  
SOHO 93  
spektrální třída 54  
spektrum  
pásové 160  
spintronika 155  
SPS 119  
SQUID 201  
SRR 150  
SST 68  
stav  
Fockův 171  
kvantový 171  
STIS 84  
stratosféra 16  
středověk 41  
stříbro 150  
subluminózní 65  
superluminózní 65  
SUSY 102  
synchrotron 115

## Š

štěpení 129

## T

tauon 107  
TDRS 86  
tekutinové dynamo 55  
TEM 115  
temná energie 80

temná hmota 80  
termosféra 16  
Tierra 183  
tlak elektromagnetického  
záření 57  
TNT 197  
TRACE 93  
troposféra 16  
třetihory 196

## U

účinný průřez 103  
undulátor 111

## V

van Allenovy pásy 17  
Veselagova čočka 152  
virus 191  
vlna  
evanescentní 152  
gravitační 119  
magnetozyuková 64  
pravotočivá 17  
terminační 9  
vlnový vektor 65  
VLT 81

## W

WFC 3 85  
WFPC 2 85  
WIMP 103

## X

XMM-Newton 62

## Z

záření  
Čerenkovovo 107  
kosmické 63  
synchrotronní 112  
Země 35  
aurorální ovál 21  
doba slovanská 41

druhohory 196  
DST 21  
eneolit 41  
glaciál 41  
hvizdy 17  
ionosféra 17  
křída 196  
KT rozhraní 197  
magnetosféra 13  
mezosféra 16  
neolit 41  
počasí 55  
podnebí 55  
polární kasp 13  
polární záře 24  
stratosféra 16  
středověk 41  
termosféra 16  
troposféra 16  
třetihory 196  
van Allenovy pásy 17  
zenit 167  
zenitový úhel 44



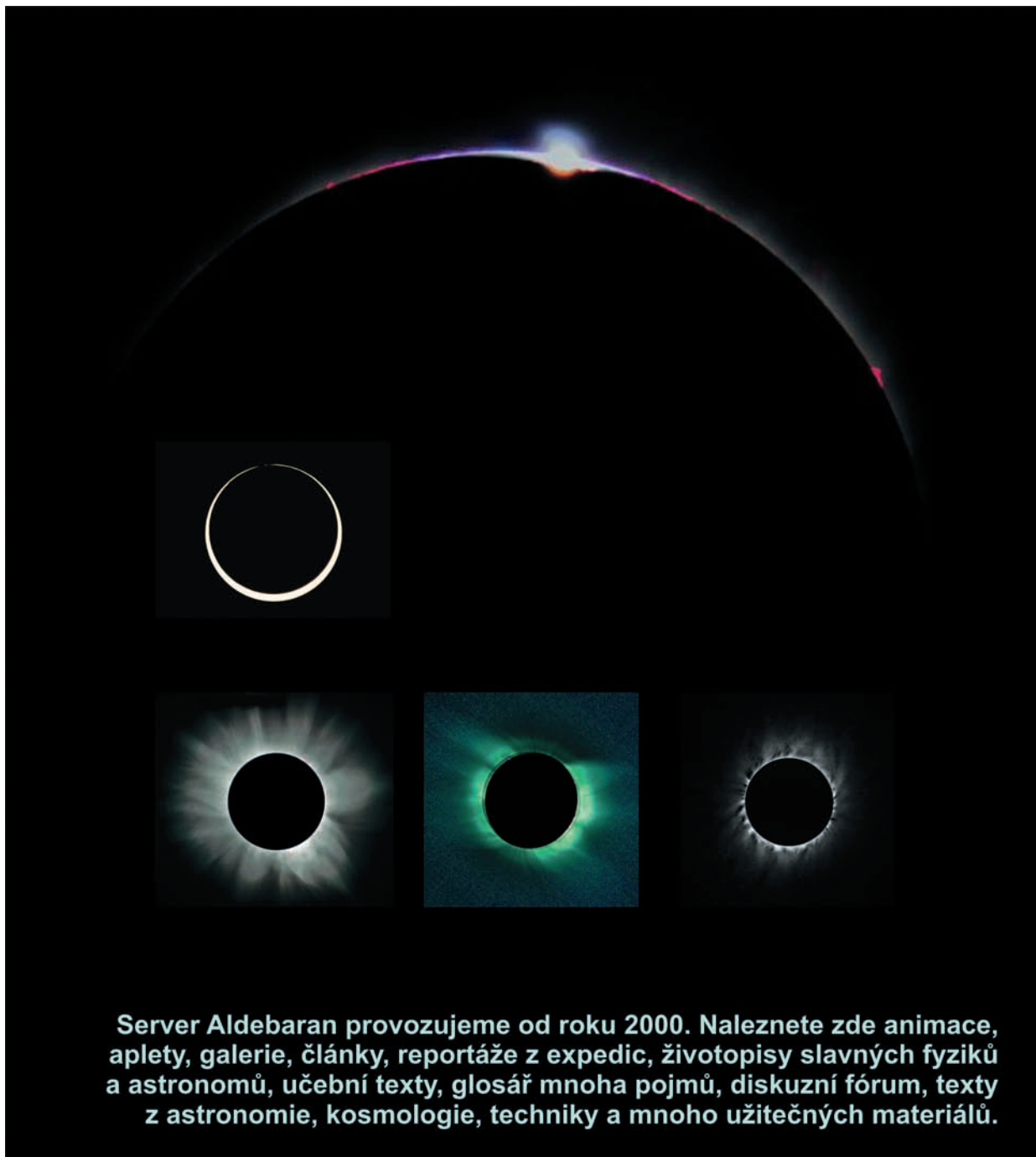
 **CELESTRON**<sup>®</sup>

*... hvězdám blíž*



**S**  
**SUPRA Praha**

**ASTRONOMICKÉ DALEKOHLÉDY**  
**www.celestron.cz • 284 820 939**  
**Mochovská 23/310 • Praha 9**  
**minutku od metra B - Hloubětín**



Server Aldebaran provozujeme od roku 2000. Naleznete zde animace, aplety, galerie, články, reportáže z expedic, životopisy slavných fyziků a astronomů, učební texty, glosář mnoha pojmů, diskuzní fórum, texty z astronomie, kosmologie, techniky a mnoho užitečných materiálů.




Sdružení Aldebaran Group for Astrophysics si klade za cíl propagaci fyziky a astrofyziky. Bylo založeno v roce 2002. Sdružení pořádá expedice, astronomická soustředění, vydává časopis Aldebaran bulletin a materiály s fyzikální a astronomickou tematikou. Poznáte na snímku polární záře nad horami Skjomedalen Velký vůz?



Expedice Aurora 2002,  
polární záře v severním Norsku

[www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz)



Astronomie a fyzika – dvě prolínající se vědní disciplíny, jejichž nové poznatky jsou odrazem lidského chápání světa. V knížce, kterou máte před sebou, se formou krátkých článků dočtete o blízkém i vzdáleném vesmíru, o nových technologiích, biofyzice i dalších souvisejících oborech. Články jsou doplněny velkým množstvím obrázků, schémat a tabulek. V bočních sloupcích najdete doplňující informace a na konci každé kapitoly je zařazeno malé překvapení. Hezkou četbu!

ISBN 978-80-904582-0-8



9 788090 458208