ASTRONOMIE A FYZIKA

na přelomu tisíciletí

Petr Kulhánek

a kolektiv autorů

dialog

ASTRONOMIE A FYZIKA NA PŘELOMU TISÍCILETÍ

Pod vedením Petra Kulhánka připravil kolektiv autorů:
Pavel Břichnáč, Milan Červenka, Tomáš Hála, Ivan Havlíček, Vavřinec Havlíček, Jiří Hofman, Marek Jasanský, Václav Kaizr, Lukáš Kupka, Petr Kulhánek, Jan Pašek, Jakub Rozehnal, Karel Řezáč, Martin Smetana, Lenka Soumarová, Michal Stránský a Martin Žáček

Poděkováni Ing. Martinu Hauptfoglovi

Vytiskla Severografia Most, a. s.
Copyright: Aldebaran Group for Astrophysics, 2004
Design a sazba: Jakub Rozehnal
Návrh obálky. Victory s.r.o.
Vydalo nakladatelství Dialog, Seifertova 1480, 436 01 Litvínov v roce 2004
Distribuce: tel./fax: +420 476 100 905, e-mail: victor-kniha@volny.cz
ISBN 97880-85843-49-1

ASTRONOMIE A FYZIKA

na přelomu tisíciletí

Někdy na počátku roku 2003 se zrodila u skupiny lidí z katedry fyziky FEL ČVUT a ze sdružení ALDEBARAN GROUP FOR ASTROPHYSICS myšlenka vydávat pravidelně jednou týdně kratičký článek o něčem zajímavém, co se stalo ve fyzice nebo astronomii v poslední době. V průběhu několika týdnů se zformoval kolektiv nadšenců, který zpočátku ani netušil, že se pod jeho rukama rodí budoucí knížka. Knížka, ve které najdete to, co nás zaujalo. Výběr témat je vždy dán přístupem autorů a tak i naše knížka nemůže být nikdy úplná. Myslíme si ale, že má čtenáři co nabídnout. Celkem nenáročnou formou se zde může dočíst o posledních objevech jak středoškolský student, učitel i specializovaný vysokoškolský odborník, který chce nahlédnout pod pokličku do sousedních oborů. A loňský rok stál opravdu zato. Poprvé jsme poznali díky sondě WMAP přesné stáří našeho vesmíru a jeho složení, v Evropě byl dostavěn obří detektor gravitačních vln VIRGO, pokračovaly fantastické experimenty se zastavováním světla, objevily se přímé detektory světla, které možná v budoucnu nahradí CCD technologii a mnoho dalších zajímavostí.

Text knížky je řazen do kapitol podle jednotlivých oborů, nikoli v pořadí v jakém vznikal. Oproti online verzi, kterou najdete na adrese www.aldebaran.cz/bulletin/, je text knihy doplněn novými informacemi, obrázky a každý článek obsahuje glosář základních pojmů. Za každou kapitolou je zařazen odlehčující text popisující některé naše cesty „za fyzikou“. Na závěr je zařazen článek o nositelích Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2003.

Děkuji všem spolupracovníkům, kteří se podíleli na psaní textu a různou měrou i na tvorbě této knížky. Jde o Pavla Břichnáče, Milana Červenku, Tomáše Hálu, Ivana Havlíčka, Vavřince Havlíčka, Jiřího Hofmana, Marka Jasanského, Václava Kaizra, Lukáše Kupku, Jana Paška, Jakuba Rozehnala, Karla Řezáče, Martina Smetanu, Lenku Soumarovou, Michala Stránského a Martina Žáčka. Zvláštní poděkování si zaslouží Jakub Rozehnal za obrovské nasazení při přeměně on-line verze na tištěnou knihu a Karel Řezáč za vektorizaci obrázků.

V celé knížce budete nacházet doprovodnou grafiku Aleny Pokorné. Jde o variace na Gell-Mannův obrázek kvarku charm. Alena Pokorná známou statickou postavičku rozpohybovala a doufám, že čtenáře pohled na Sandy, jak jsme ji pojmenovali, potěší a osvěží.

Po zralé úvaze jsme vypustili veškeré odkazy na další literaturu za jednotlivými články. Tyto odkazy byly většinou odkazy na WWW stránky v síti Internet a čtenář, který má přístup na Internet je najde v online verzi na adrese www.aldebaran.cz/bulletin/ a nebude muset složitě přepisovat stovky tištěných odkazů v knize.

Všem čtenářům přeji krásné počtení a pocit hrdosti nad některými možnostmi naší civilizace a radost z toho, že právě my žijeme v generaci, která může sledovat postupné odhalování tajemství vzniku a vývoje našeho vesmíru.

V Praze, 13. března 2004

Petr Kulhánek

Obsah

I. BLÍZKÝ VESMÍR **8**
Komety počátku roku 2003 10
Měsíc stínů 12
Objev uhličitanů na Marsu 15
Velká opozice Marsu 16
Jak se tvořilo jádro Země? 18
Zaprášený Vesmír 20
Existují další planety sluneční soustavy? 24
Exoplanety 28
Nestarší známá planeta? 31
Bonus: Expedice AURORA 2002 34

II. VZDÁLENÝ VESMÍR **42**
Zajímavá neutronová hvězda 44
Černá díra v centru Galaxie 47
Černé díry střední hmotnosti 49
Magnetické bubliny v kupách galaxií 51
Temná hmota ve vesmíru 53
První galaxie z temné hmoty? 61
Kvasar s rudým posuvem 6,4 63
WMAP: Co dnes víme o vesmíru? 65
Zvuk raného vesmíru 69
Topologie vesmíru – může být vesmír jako ementál? 74
Bonus: Expedice ZAMBIA ECLIPSE 80

III. PŘÍSTROJE, SONDY **86**
Švédský sluneční dalekohled 88
Velmi velký dalekohled (VLT) 89
Jaký bude nástupce HST? 92
Ultra extra velký dalekohled 95
Cassini a Rosetta – mise budoucnosti 98
Detektor gravitačních vln VIRGO dostavěn 100
Bonus: Expedice PARACHI 2003:
astronomie a poušť Atacama 103

IV. NOVÉ TECHNOLOGIE **110**
Aerogely a kosmický prach 112
Nanoclustery umožňují provádět logické operace 118
Křemíkové technologie pro optické systémy MEMS 120
Může být diamant supravodivý za pokojové teploty? 124
Laserové ochlazování 126
Magnetická chladnička 127
Supravodivý detektor fotonů 129
Cesta do jádra Země 130
Platí druhá věta termodynamická? 132
Z-pinč fúze: konec světa oddálen? 134
ITER – TOKAMAK nové generace 138
Kapalná lithiová stěna výrazně ovlivní fúzi 142
Sonofúze? 144
Expedice PARACHI 2003:
Paraguay očima fyzika 146

V. KVANTOVÁ TEORIE **152**
Jaký tvar má proton? 154
Pentakvark 156
Ultrachladný molekulární kvantový plyn 158
Fermiho atomární plyn 161
Narušení C symetrie 164
Antiprotonový zpomalovač 166
Výroba antivodíku ve velkém 170
ALICE 171
Honba za Higgsovými částicemi 174
Kvantové počítače 178
Zpomalení a zastavení světla 182
Zpomalení světla v rubínu 186
Attosekundový laser a zrod attofyziky 187
Bonus: Nobelovy ceny za fyziku v roce 2003 188

Kapitola I.
BLÍZKÝ VESMÍR

Rok 2003 byl z astronomického hlediska bohatým rokem. V dobách, kdy byl dalekohled ještě čerstvou novinkou, by se tolik různorodých nebeských úkazů jistě zasloužilo o výrazný posun našich znalostí o vesmíru. Velké komety podobné těm, které se objevily na zimním mrazivém nebi, byly dlouhou dobu ve středu zájmu astronomů a zejména studiem komet se astronomie změnila z pouhé statistiky a hromadění znalostí o „jevech na obloze" v dynamickou vědu, v níž lze ověřovat teorie a poskytovat předpovědi. Květnový přechod Merkuru přes sluneční kotouč byl podívanou, na kterou nemůže nikdo, kdo ji v dalekohledu spatřil, zapomenout. Neviděl jsem snad zřetelnější porovnání velikosti Slunce a planety, než ostré černé kolečko sunoucí se pozvolna na pozadí zářivé koule. Úkaz trvající přes šest hodin dal vnímavým lidem pocítit křehkost a nepatrnost planet v porovnání se sluneční koulí a přitom plně pocítit dynamiku sluneční soustavy. Vzápětí následovalo astronomicky téměř totéž, ale s jinými herci a v jiné vzdálenosti: zatmění Měsíce a na konci května prstencové zatmění Slunce. Je zajímavé, že když se ze stejného místa díváte na různé strany, tak totéž může vypadat úplně jinak. Vidět nad západním obzorem zapadat načervenalý Měsíc v posledních hodinách noci je něco úplně jiného, než pozorovat rohaté Slunce vystupující zpoza lesa za rozbřesku. Z hlediska fyziky jde přitom jen o úhel pohledu. Přes vlastní pocity se však k tomuto poznání musíte dopracovat abstrakcí, která nebyla vůbec běžná ještě před několika málo stoletími. Aby toho nebylo málo, tak koncem srpna rozsvítil oblohu Mars a byl tak blízko, že i malými dalekohledy byla vidět jeho černohnědožlutočervená krajina se zářivými polárními čepičkami. Nedovedl jsem si nikdy před velkou opozicí představit, že se mi podaří přímo uvidět měsíčky Phobos a Deimos. Dnes už vím, že tam opravdu jsou, viděl jsem je oba. Oproti tomu nabídnout pohled do jádra Země nebo najít stopy

prehistorické vody na Marsu, na to je potřeba víc, než čistou oblohu a vypůjčený dalekohled. Na vesmír je možno nahlížet na různých úrovních a hledat všemožné souvislosti. Jak je vesmír veliký? Co je blízko a co už je dál? Je hranice blízkého a vzdálenějšího uchopitelná jinak než lidskou myslí? Jaký má v astronomii smysl vše někam zařazovat a stavět do poměrů a porovnávat? Co je ještě planetou a co si už toto označení nezaslouží? Jelikož jevy nabývají významů jen při srovnání, tak se asi jisté klasifikaci astronomie nevyhne. Je však nutno být opatrný a nezavírat oči před ničím, co lze na obloze spatřit. Ještě před několika desítkami let byl vesmír jednoduše hierarchizován na oblast naší sluneční soustavy, naší Galaxie a vzdáleného vesmíru. Také pojem „hvězdný vesmír" se pro vzdálenost, kde něco tak malého jako planety již nebylo rozlišitelné, často používal. Dnes můžeme přímo pozorovat planety i u jiných hvězdných soustav a ty nejsou prozatím vůbec podobné té naší. Jakoby se dříve vzdálené oblasti vesmíru přiblížily a staly se přístupné měřítku, které používáme v blízkosti Slunce. Také se toho ve vesmíru děje mnohem více, než jsme si před pár lety dokázali představit. Většinu viditelné hmoty tvoří prachové plazma – směs prachu a elektricky nabitých částic. Mnohdy jde o velmi řídké prostředí a proto bylo donedávna opomíjeno jako nepodstatné. Avšak podle toho kolik je kde čeho a jak vše na sebe vzájemně působí v prostoru, se na obloze odehrávají nejrůznější děje, které dnes postupně zapadají do širšího rámce základních astrofyzikálních teorií. Nebo si ty elegantní popisy domýšlíme, abychom o nebi dokázali alespoň něco říci?

Ivan Havlíček

Komety počátku roku 2003

Kometa - *těleso obíhající kolem Slunce zpravidla po značně výstředné elipse s periodou několika let až tisíc roků. Prakticky veškerá hmotnost ($10^{12} \div 10^{18}$ kg) je soustředěna v jádru, které se při přiblížení ke Slunci vypařuje a tvoří komu a chvost.*

Jádro komety - *slepenec kamenů s ledem o průměru v rozmezí 1÷100 km.*

Koma - *plynný obal jádra komety. Vzniká při přiblížení kometárního jádra ke Slunci. Rozměr komy je typicky $10^4 \div 10^5$ km.*

Chvost - *velmi řídký prachoplynný útvar vybíhající z komy. Jde o charakteristickou část jasných komet v blízkosti Slunce. Jeho délka dosahuje až 10^8 km. Existují dva druhy chvostů: plynný a prachový. Oba míří směrem od Slunce.*

Hned začátek roku 2003 nám nabídl možnost shlédnout dvě jasné komety, které byly pozorovatelné i pouhým okem. Komety jsou a vždycky byly atraktivními úkazy na obloze, i když v minulosti byly spíše spojovány s neštěstím, válkami a hladomory a v lidech vzbuzovaly více hrůzu než obdiv. Dnes víme, že komety nejsou poslové špatných zpráv, ale pouze špinavé sněhové koule toulající se sluneční soustavou, které za svůj atraktivní vzhled vděčí Slunci. Když takové těleso zamíří z mrazivých končin okraje naší sluneční soustavy směrem ke Slunci, začne v jeho blízkosti tát a kolem jádra se vytvoří oblak plynů, tzv. koma. Sluneční vítr poté z komy většinou vytvoří i dlouhý chvost. Protože komety vypadají pouze jako mlhavé obláčky, je třeba pro jejich pozorování vyhledat nějaké místo za městem, kde pozorování neruší pouliční osvětlení, neboť na přesvětlené obloze lze kometu snadno přehlédnout. Dále je pro pozorování vhodné použít jen malý dalekohled, protože kometa je úhlově velký útvar (tzn. zabírá na obloze více místa než například hvězda nebo planeta), a nevešla by se do zorného pole velkého dalekohledu.

První z komet, která byla počátkem roku 2003 pozorovatelná, nese označení C/2002 X5 (Kudo-Fujikawa). Objevil ji 13. prosince 2002 japonský astronom Tetuo Kudo při rutinní prohlídce oblohy triedrem 20×120 jako mlhavý objekt 9. magnitudy v souhvězdí Pastýře. O den později ji nezávisle pozoroval Shigehisa Fujikawa větším dalekohledem a zjistil ohon o úhlových rozměrech 18'. Pro její pozorování nastaly nejlepší podmínky mezi 10. a 20. lednem. Kometa se pohybovala souhvězdím Orla, kde byla vidět ráno těsně před půl sedmou nízko nad východním obzorem a večer před šestou nad obzorem západním. Poslední šance na její spatření byla ráno 21. ledna necelou hodinu před východem Slunce, kdy se v blízkosti komety nacházela planeta Merkur. Kometa prošla perihéliem 29. 1. 2003, kdy se ke Slunci přiblížila na pouhých 25 milionů kilometrů. Nejnižší pozorovaná magnituda byla 5,5.

Kometa Kudo-Fujikawa 9. 1. 2003. Snímek je počítačově složen ze 46 expozic. Autory snímku jsou: Christian Clausen, Michael Jensen a Santhos Manokaran.

Koncem ledna vystřídala kometu Kudo-Fujikawa kometa s označením C/2002 V1 (NEAT), která byla objevena 6. listopadu 2002 pomocí stodvaceticentimetrového teleskopu vyhledávacího systému NEAT (*Near-Earth Asteroid Tracking*). Byla pozorovatelná večer nad západním obzorem na pomezí souhvězdí Pegasa a Ryb. V období kolem 10. února se přesunula do souhvězdí Vodnáře a nejlépe viditelná byla kolem 18. hodiny. Perihéliem prošla 18. 2. 2003, kdy byla od Slunce ve vzdálenosti menší než 15 miliónů kilometrů. V období největší svítivosti se na obloze jevila jako objekt 4. magnitudy.

Kometa NEAT dne 9. 2. 2003. Fotografie (expozice 2x5 min TP, 2x1 minuta E 100 S) pochází od Michaela Jagera.

■ *Lenka Soumarová*

Oortův oblak - *zásobárna kometárních jader daleko za hranicemi sluneční soustavy, jejíž existenci navrhl roku 1950 Jan Hendrik Oort (1900–1922). Poloměr Oortova mračna se odhaduje na 100 000 AU. Některé komety pocházejí z menší vzdálenosti, z tzv. Kuiperova pásu, který se na-chází hned za drahou Neptunu.*

Perihélium - *přísluní, okamžik, kdy je objekt na své oběžné dráze nejblíže ke Slunci.*

Afélium - *odsluní, okamžik, kdy je objekt na své oběžné dráze nejdále od Slunce.*

Magnituda (hvězdná velikost) - *svítivost hvězdy v logaritmické míře. Objekty lišící se o pět magnitud se svítivostí liší stonásobně. Slunce má magnitudu –26,6, Měsíc v úplňku –12,6, nejjasnější hvězda Sírius –1,6, nejslabší hvězdy viditelné okem mají 6. magnitudu a nejslabší objekty viditelné obřími dalekohledy 30. magnitudu.*

Měsíc stínů

Zatmění Slunce - *vzniká přímým zakrytím Slunce Měsícem. Stín Měsíce dopadá na povrch Země.*

Zatmění Měsíce - *vzniká, nachází-li se Země mezi Měsícem a Sluncem. Zemský stín dopadá na povrch Měsíce.*

Umbra - *stín, ve kterém dochází k úplnému zatmění.*

Penumbra - *stín ve kterém dochází k částečnému zatmění.*

Altumbra - *pokračování umbry, stín, ve kterém dochází k prstencovému zatmění Slunce.*

Úplné zatmění - *úplné zakrytí Slunce či Měsíce. Při úplném zatmění Slunce je patrná sluneční koróna a jsou vidět nejjasnější hvězdy.*

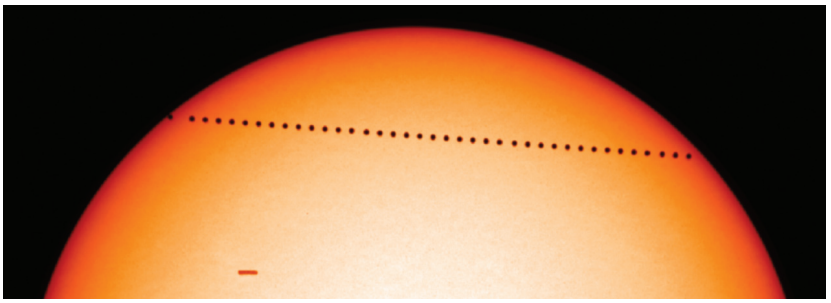
Částečné zatmění - *částečné zakrytí Slunce Měsícem nebo Měsíce zemským stínem.*

Květen 2003 byl astronomy pokřtěn jako „Měsíc stínů“. Do jediného měsíce se totiž vtěsnaly tři velmi zajímavé úkazy, které měly jedno společné – významnou roli zde sehrálo světlo a stín. Žádné těleso sluneční soustavy s výjimkou Slunce nesvítí vlastním světlem, pouze odráží světlo sluneční a směrem od Slunce proto vrhá stín. Jestliže stín dopadne na Zemi, pozorujeme zatmění. Přechod Merkuru či Venuše přes sluneční disk není ve skutečnosti ničím jiným než prstencovým zatměním Slunce, protože se v principu jedná o tytéž stínové úkazy. Jediný rozdíl je ve velikosti a vzdálenosti zakrývajících těles.

Merkur je planeta Slunci nejbližší, jeho oběžná dráha se nachází blíže ke Slunci než dráha Země. Může se stát, že se Slunce, Merkur a Země postaví do jedné přímky. V takovém případě se nám bude planeta promítat na sluneční disk a ze Země uvidíme neosvětlenou polokouli Merkuru jako tmavý bod na slunečním disku. Tento úkaz je však poměrně vzácný, neboť ve většině případů projde Merkur „nad“ nebo „pod“ Sluncem. V důsledku toho můžeme pozorovat pouze asi 13 přechodů Merkuru za století. V roce 2003 jsme na našem území byli svědky tohoto úkazu dopoledne 7. května (7:16 až 12:27 SELČ). Na pozorování přechodu Merkuru je třeba vždy použít dalekohled, protože úhlový průměr Merkuru je velmi malý. Dalekohled musí být samozřejmě opatřen náležitým filtrem, který chrání oči před poškozením.

Ještě vzácnějším úkazem je přechod Venuše, neboť průměr jejího stínu je ve vzdálenosti Země zhruba čtyřikrát menší než u Merkuru. Přechody Venuše se vyskytují ve dvojicích s přestávkou 8 let a opakují se v průměru po více než jednom století. My budeme mít příležitost pozorovat přechod Venuše 8. června 2004. Naposledy se tato příležitost naskytla v letech 1874 a 1882. Přechod Venuše je na hranici pozorovatelnosti pouhým okem, k pohledu na Slunce je však zapotřebí použít filtr, nejlépe svářečský.

Přechod Merkuru přes Slunce 7. 5. 2003. Série složených snímků ze sondy SOHO.



K zatmění Měsíce dochází tehdy, když se Země nachází mezi Měsícem a Sluncem. Měsíc musí proto být v úplňku a musí se nacházet v blízkosti uzlu (průsečíku dráhy

Měsíce kolem Země s ekliptikou - rovinou, v níž leží dráha Země). Za Zemí se táhne kuželovitý stín, a pokud do tohoto stínu vstoupí Měsíc, pozorujeme jeho zatmění. Kdyby Měsíc obíhal Zemi ve stejné rovině jako Země kolem Slunce, docházelo by k zatmění Měsíce každý měsíc. Jelikož je ale dráha Měsíce skloněna o 5°, projde Měsíc někdy nad a jindy pod zemským stínem. Zatmění Měsíce se vyskytují řidčeji než zatmění Slunce, ale vzhledem k tomu, že je lze pozorovat z celé noční polokoule, jsou pro dané místo na Zemi jevem častějším. V průběhu zatmění nezmizí Měsíc z oblohy zcela, neboť stín vržený Zemí není úplně temný. Díky lomu slunečních paprsků v atmosféře má stín červenou až hnědočervenou barvu a takovou barvu získá v průběhu zatmění i povrch Měsíce. V pátek 16. května 2003 nastalo úplné zatmění Měsíce, u nás viditelné jen v části svého průběhu, během fáze úplného zatmění Měsíc zapadl. Další úplné zatmění nastalo 9. listopadu a bylo z našeho území pozorovatelné v celém průběhu.

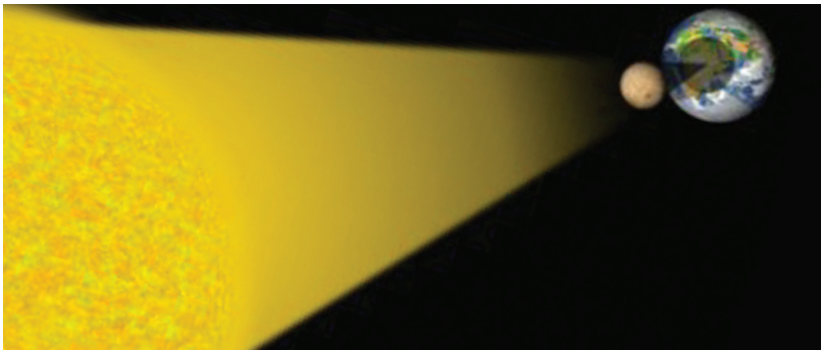


Schéma vzniku zatmění Slunce.

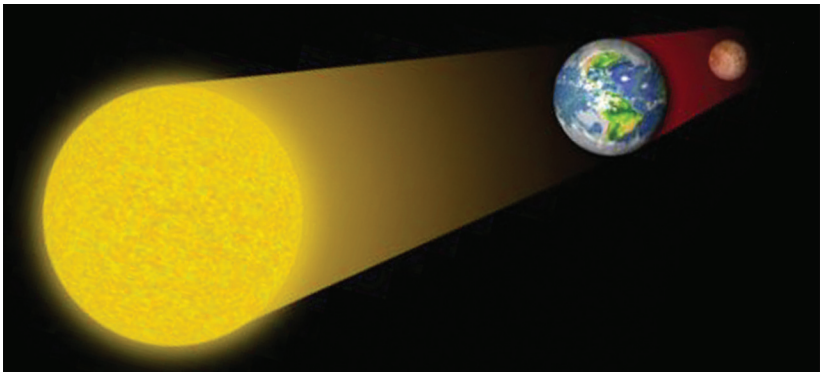


Schéma vzniku zatmění Měsíce.

K zatmění Slunce dochází tehdy, když se Měsíc nachází mezi Sluncem a Zemí, Měsíc musí proto být v novu a v blízkosti uzlu své dráhy. Zcela náhodou je disk Měsíce přibližně stejně velký jako disk Slunce, takže je schopen za určitých podmínek zakrýt Slunce celé. Pokud Měsíc zakryje jen část slunečního disku, mluvíme o zatmění částečném, je-li zakryto Slunce celé, jedná se o zatmění úplné. Měsíc obíhá Zemi po eliptické dráze. Nachází-li

Zatmění Měsíce 16. 5. 2003. Snímky z argentinské Patagonie, autor Guillermo Oyhenart.

Zatmění Slunce 31. 5. 2003. Newton 210/1000, kamera Philips ToUcam Pro, filtr z folie Baader, světelnost f/5, délka expozic 1/1500 s, kopec Nový, Hradec Králové, mozaika ze 6 dílčích snímků. Autor Ing. Martin Myslivec.

Prstencové zatmění - *zatmění, při kterém je úhlový rozměr Měsíce menší než Slunce a kolem zakryté oblasti zůstává nezakrytý prstenec.*

Hybridní zatmění - *začíná jako prstencové, ale díky zakřivení Země se stín pohybující se po Zemi dostane z oblasti altumbry do oblasti umbry a zatmění se změní na úplné.*

Pás totality - *oblast měsíčního stínu na povrchu Země, ve které dochází k úplnému zatmění. Typická šířka pásu totality je přes 100 km, maximálně 270 km.*

se Měsíc v nejvzdálenějším bodu své dráhy, je jeho úhlový průměr menší než zdánlivý průměr slunečního disku a dochází k zamění prstencovému, což je případ zatmění, které nastalo 31. 5. 2003. Z našeho území bylo pozorovatelné jako částečné. Zatmění Slunce jsou sice častější než zatmění Měsíce, ale vzhledem k tomu, že jejich úplná fáze je pozorovatelná jen z velice úzkého, maximálně 270 km širokého pásu, jsou pro určité místo na Zemi vzácností. Z daného místa můžeme spatřit úplné zatmění Slunce v průměru jednou za 360 let. V Praze nastalo poslední úplné zatmění Slunce v roce 1706 a to příští ji čeká až roku 2135.

■ *Lenka Soumarová*

Objev uhličitanů na Marsu

Na Marsu byla nedávno za pomoci sondy Mars Global Surveyor vůbec poprvé přímo detekována malá množství nerostů obsahujících uhlík. Tento objev by mohl vědcům umožnit lépe porozumět vývoji planety a podpořit tak jejich úsilí zjistit, zda jsou na Marsu podmínky vhodné k udržení primitivních forem života.

Joshua Bandfield a jeho kolegové z Arizonské univerzity zkoumali částečky z povrchu Marsu, které jsou schopné odrážet a absorbovat infračervené záření. Vědci zjistili, že tyto částečky jsou velmi podobné hořečnatým uhličitanům, které se v hojné míře vyskytují i na Zemi.

Uhličitany vznikají za přítomnosti kapalné vody a oxidu uhličitého a mohou proto být považovány za důkaz někdejší existence vody na Marsu. Vědci již dříve zjistili přítomnost uhličitanů na meteoritech pocházejících z Marsu, jejich přítomnost přímo na povrchu planety však byla objevena poprvé.

Bandfield a jeho spolupracovníci použili tepelný emisní spektrometr (TES) umístěný na povrchu sondy Mars Global Surveyor. TES může měřit spektra záření odrážená pod různými úhly. Tato technika umožňuje sledovat jednu oblast skrz různou tloušťku atmosféry a tak odlišit povrchovou a atmosférickou část záření. Arizonský tým nalezl anomálii ve spektru v blízkosti vlnové délky 7 mikronů a porovnával ji se spektry různých nerostů vyskytujících se na Zemi. Pouze spektra směsí obsahujících uhličitany odpovídala spektrům z Marsu (viz graf).

Vědecký tým také objevil, že uhličitany jsou plošně rozšířené v povrchovém prachu a že, podobně jako například vodní kámen (uhličitan vápenatý) v bazénu, nemají žádný ohraničený zdroj. „To dokazuje, že na povrchu Marsu se v minulosti nacházely rozsáhlé vodní plochy," říká Bandfield. „Navíc je možné, že Mars měl dříve v atmosféře ještě více oxidu uhličitého než dnes. Oxid uhličitý se mohl transformovat právě do uhličitanů," dodává.

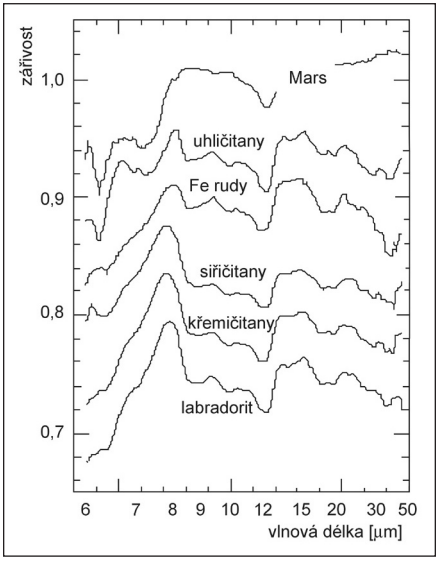
Banfieldova skupina nyní doufá, že se jí podaří ještě přesněji charakterizovat nerosty, které nalezla. K tomu by jí měl pomoci mini-TES na marťanském průzkumném vozidle (Mars Exploration Rover) vyvinutém v NASA.

■ *Marek Jasanský*

Mars Global Surveyor - *sonda vypuštěná v roce 1996, na Marsu přistála v roce 1997. Podrobně z oběžné dráhy snímkovala povrch, zejména různé útvary. Dále prováděla výzkum magnetického pole Marsu a prachových bouří.*

TES (tepelný emisní spektrometr) - *zařízení skládající se z interferometru a infračerveného senzoru. Interferometr rozloží tepelné (infračervené) záření na spektrum a senzor následně proměří intenzitu každé složky tohoto spektra.*

Spektra prachu z Marsu a ostatních nerostů. Převzato z publikace: Bandfield a kol., Science 301 (2003) 1084.



Velká opozice Marsu

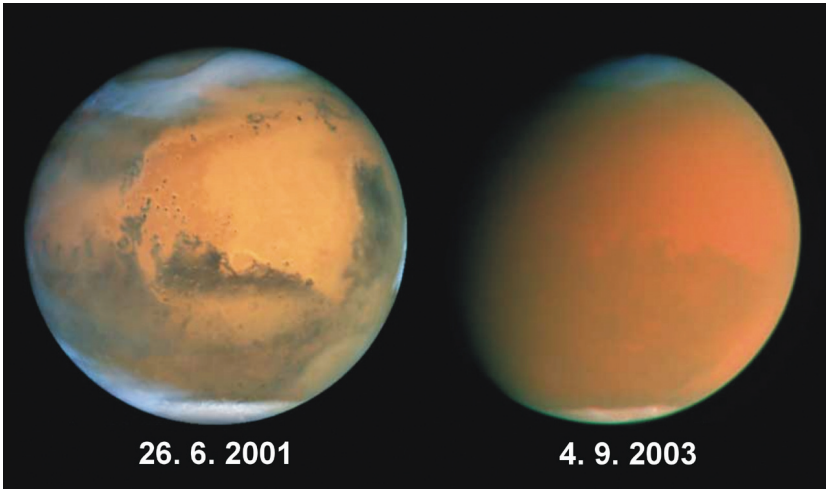
Opozice - *poloha, kdy rozdíl ekliptikálních délek dvou nebeských těles činí 180° (tzv. opozice v délce) nebo kdy rozdíl rektascenze dvou nebeských těles činí 12 h (opozice v rektascenzi).*

Konjunkce - *poloha, kdy planeta a Slunce mají stejnou ekliptikální délku nebo rektascenzi. Při horní konjunkci je Slunce mezi Zemí a planetou. U Merkuru a Venuše mů-že nastat také dolní konjunkce, při níž je planeta mezi Zemí a Sluncem.*

Kvadratura - *poloha vnějších planet, při níž je úhel planeta - Země - Slunce rovných 90°.*

V srpnu letošního roku jsme měli jedinečnou příležitost pozorovat planetu Mars v opozici se Sluncem. Opozicí míníme okamžik, kdy se planeta dostane na obloze do bodu, který leží přímo proti Slunci. V období opozice je planeta nejlépe pozorovatelná proto, že vychází při západu Slunce a zapadá až s jeho východem, takže je pozorovatelná prakticky po celou noc. Druhou skutečností, která příznivě ovlivňuje pozorovatelnost planety je fakt, že při opozici se planeta Mars nejvíce přiblíží Zemi. Má proto maximální úhlový průměr a v dalekohledu jsou pozorovatelné některé detaily na povrchu.

Nejvíce se Mars přiblížil k Zemi 27. srpna 2003 ve 12 hodin středoevropského letního času, a to na vzdálenost 55,757 milionu kilometrů. Při minulé opozici v roce 2001 byl Mars na severní polokouli velmi těžko pozorovatelný, protože dosahoval maximální výšky 13° nad obzorem. I když letošní opozice byla v tomto směru výhodnější (maximální výška při opozici byla přes 24° nad obzorem), na skutečně výborné podmínky pro pozorování si budeme muset počkat do další opozice, která nastane 7. listopadu 2007. Tehdy Mars vystoupí více než 55° nad obzor. Při letošním pozorování Marsu na tom byli lépe ti, kteří trávili dovolenou více na jihu – například v Řecku byl Mars viditelný až 35° nad obzorem.



Ukázka proměnlivého počasí na rudé planetě. Dvojice snímků byla pořízena při minulé opozici v létě 2001. Levý obrázek odhaluje na povrchu planety četné detaily, které jsou na pravém obrázku zcela skryty pod mohutnou prachovou bouří, která zuří nad celým povrchem. Oba snímky pořídil HST.

Planetu Mars lze na noční obloze poznat podle výrazně načervenalé barvy, která je důsledkem vysokého obsahu oxidů železa v povrchových vrstvách hornin.

V dalekohledu jsou na Marsu dobře pozorovatelné bílé polární čepičky – jistá analogie polárních oblastí na Zemi. Na rozdíl od Země jsou ale tyto čepičky tvořeny zejména pevným oxidem uhličitým a jen z menší části vodním ledem. Také tloušťka námrazy je značně rozdílná – zatímco polární ledovec v Antarktidě dosahuje tloušťky několika kilometrů, maxi-

mální tloušťka polárních čepiček na Marsu dosahuje pouze několika metrů, na okrajích pouze centimetrů.

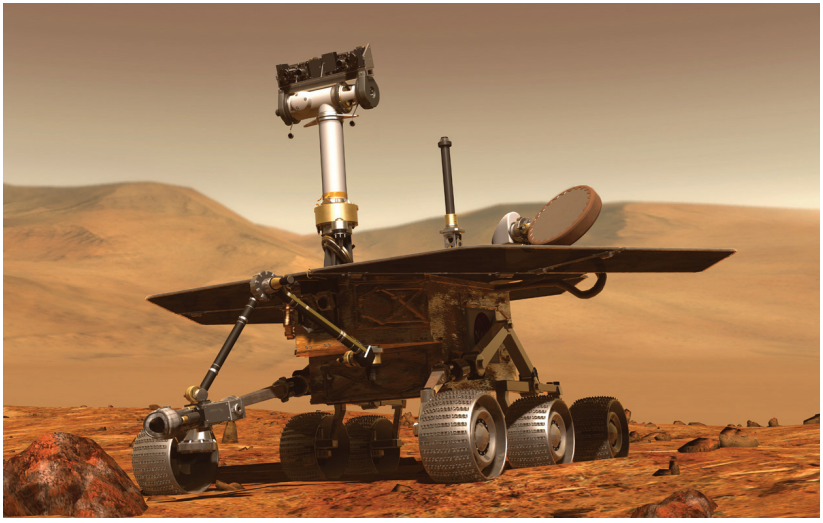
Za dobrých pozorovacích podmínek můžeme na povrchu planety sledovat i světlejší a tmavší skvrny – některé z nich jsou ve skutečnosti obrovskými prachovými bouřemi. Povrch Marsu tvoří kamenitá poušť, průměrná teplota na povrchu je kolem –60 °C. Maximální teploty mohou krátkodobě překročit +15 °C, minimální naopak klesají až k –140 °C. Na povrchu planety se dnes nenachází voda v tekutém stavu – díky nízké teplotě a malému atmosférickému tlaku (stokrát nižšímu než na Zemi) se voda na povrchu nachází pouze ve formě ledu, nebo v atmosféře v podobě páry. Pod povrchem Marsu se však ještě stále pravděpodobně nachází nezanedbatelné množství vody, které je pozůstatkem obrovských řek, moří a možná i oceánů, které se na planetě nacházely ještě nejméně před 3,5 miliardami let. Díky malé gravitaci (Mars je ve srovnání se Zemí poloviční) však planeta záhy přišla o svou atmosféru a urychlilo se tím i odpařování vody z povrchu.

Až do poloviny 20. století byli mnozí lidé přesvědčeni, že na Marsu existuje život. Sondy Viking, které na povrchu Marsu přistály v polovině 70. let minulého století, však žádné stopy po existenci života nenalezly. I tak se v současné době k Marsu chystá několik sond, které by měly po nějaké formě života nadále pátrat. K rudé planetě zamířilo roku 2003 několik meziplanetárních sond. Byla mezi nimi evropská sonda Mars Express, japonská sonda Nozomi a dvojice amerických sond Mars Exploration Rover. Zatímco japonská mise skončila neúspěchem a přistávací modul evropské sondy byl ztracen, americké sondy přistály bez větších obtíží. Úkolem všech sond bude vedle průzkumu podpovrchových vrstev hornin také potvrzení přítomnosti vody a hledání případných známek dávného života.

■ *Jakub Rozehnal*

Terestrické planety - *planety podobné Zemi, charakteristické jsou pro ně relativně malé rozměry a pevný povrch. Řadí se k nim Merkur, Venuše, Země a Mars.*

Joviální planety - *obří planety podobné Jupiteru. Jde o plynokapalné obří planety s nízkou hustotou (srovnatelnou s hustotou vody), malým pevným jádrem z kovového vodíku, prstenci a rozsáhlými systémy měsíců. Patří mezi ně obři Jupiter, Saturn, Uran a Neptun.*



Jedno ze dvojice vozítek Mars Exploration Rovers (Spirit a Opportunity), které se po povrchu Marsu rozjely v lednu 2004. Fotomontáž americké agentury NASA.

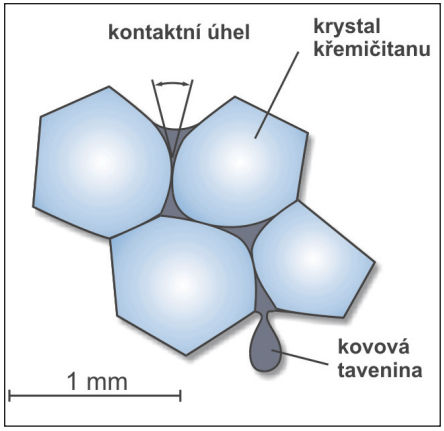
Jak se tvořilo jádro Země

Vnitřní jádro (jadérko) - *malé pevné kamenné jádro v centrální části, rozměry 1 250 km, tlak 360 GPa, teplota 5 100 K.*

Vnější jádro - *tekuté jádro složené zejména ze sloučenin železa, začíná 2 900 km pod povrchem, tloušťka je 2 200 km. V této oblasti je efektem magnetohydrodynamického dynama vytvářeno magnetické pole Země. Hustota jádra je cca 10 g/cm^3.*

Spodní plášť - *pevná vrstva o průměrné hustotě 4÷5 g/cm^3. Tloušťka je 2 300 km. Spodní plášť je tvořen především křemičitany s příměsemi hořčíku a hliníku. Od svrchního pláště je spodní plášť oddělen 250 km silnou přechodovou vrstvou.*

Kovové slitiny s nižším bodem tání formují taveninu mezi hranicemi křemíkových krystalů. Převzato z: Bill Minarik, Nature News and Views, Nature 422 (2003) 126.



O nitru Země jistě slyšela většina z nás ještě na základní škole. Říkali nám, že má několik vrstev: kůru, svrchní plášť, spodní plášť, vnější jádro a vnitřní jádro, které je velmi horké. To bylo asi vše. Bohužel, ani dnes toho nevíme o moc více. Vzhledem k tomu, že nejhlubší vrt vyhloubený lidmi zasahuje jen do zlomku tloušťky zemské kůry, pochází naše informace o vnitřku Země především z měření různých projevů zemské aktivity a jejich následnou matematickou analýzou pomocí počítačových simulací. Zkoumá se hlavně šíření seizmických vln – jejich rychlost, odraz a lom na rozhraních v různých hloubkách. Odtud také pochází onen známý model nitra Země. Z provedených simulací vyplývá, že teplota v jádru Země je jen o málo nižší než povrchová teplota Slunce (cca 5 100 °C) a tlak dosahuje přibližně 360 GPa.

Dnes věříme, že formování jádra probíhalo v době, kdy byla sluneční soustava ještě velmi mladá - bylo jí méně než 30 miliónů let. Země se vytvářela z oblaku plynů a prachu a shlukováním tohoto materiálu se vytvořilo množství malých planetek se zhruba kilometrovým průměrem známých jako planetezimály. Častými srážkami těchto planetezimál vznikaly větší planety s průměry již několik tisíc kilometrů. Vědci se domnívají, že jádro Země vzniklo právě v tomto raném stádiu vývoje.

Zemský plášť je tvořen převážně oxidem křemičitým (křemičitanem) a směsí oxidů železa a hořčíku. Za vysokých teplot kovová tavenina obsahující železo vyplňuje malé kapsy mezi krystalky křemičitanu a aby tento kov mohl tvořit jádro planety, muselo nějak dojít k jeho oddělení od křemičitanové mřížky. Tomoo Katsura a jeho kolegové z Institutu pro studium zemského nitra v japonské Okayamě ukázali měřením elektrické vodivosti, jak k tomu mohlo dojít. Měřili elektrickou vodivost křemičitanu a kovové taveniny při teplotách dosahujících 1 300 °C a tlaku až 3 GPa. Tyto podmínky odpovídají těm, které jsou asi 100 km pod povrchem Země. Protože je vodivost kovových sloučenin mnohem větší než vodivost křemičitanu, můžeme detekovat i malé množství kovových příměsí. Měřené vzorky vykazovaly vysokou vodivost odpovídající přibližně 6 % obsahu kovové taveniny a ta se zachovala i po snížení teploty. Vysoká vodivost poukazuje na to, že kovová tavenina v těchto extrémních podmínkách opouští kapsy v mřížce křemičitanu a vytváří spojovací kanálky, které umožňují od-

dělení kovu od křemičitanu. Kontaktní úhel mezi krystalky se stává měřítkem pravděpodobnosti spojení jednotlivých kapes taveniny a oddělení od křemičitanové mřížky.

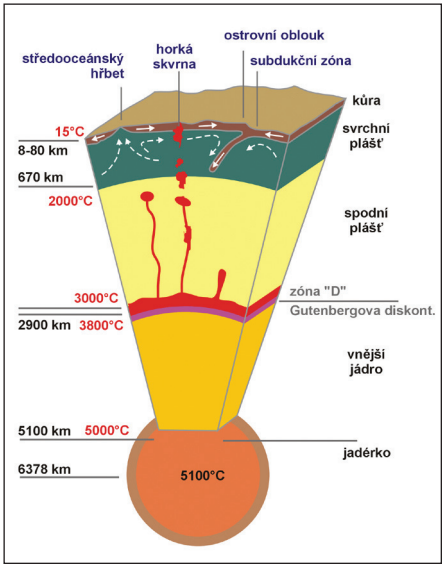
Aby tato teorie byla úplná, je třeba říci, odkud se v raném stádiu vývoje sluneční soustavy vzala tak vysoká teplota potřebná k roztavení železa. Jedna z možností je, že pochází z tepla uvolněného při radioaktivním rozkladu izotopů s krátkou dobou života, které byly v rané sluneční soustavě přítomny. Pokud vysoká vodivost pozorovaná při experimentech skutečně odpovídá proudění kovu skrz křemičitan, pak se oddělení jádra od pláště v planetezimálách s poloměry menšími než 30 km mohlo udát velmi rychle – během méně než 3 miliónů let. V dřívějších teoriích se předpokládalo, že jádro Země vznikalo naráz až po zformování Země jako takové. Nová teorie, kterou předložil T. Katsurou roku 2003 předpokládá, že jadérka byla již v jednotlivých planetezimálách a jádro Země je tedy kombinace těchto dříve vytvořených jadérek.

■ *Tomáš Hála*

Svrchní plášť - *pevná vrstva s plastickými vlastnostmi o tloušťce 500 km. Svrchní plášť je tvořen opět křemičitany s příměsemi hořčíku a železa. Spodní i svrchní plášť tvoří 83 % objemu a 63 % hmotnosti Země.*

Kůra - *pevná vrstva s tloušťkou 8÷80 km. Krusta je tvořena křemenem (SiO_2) a živci. Průměrná hustota je 2,8 g/cm^3, kůra tvoří 1 % hmoty Země. Největší tloušťka je pod horskými masivy, nejmenší pode dnem oceánů. Pevninské kry se pomalu posouvají po podloží tvořeném vnějším pláštěm.*

Schématický řez Zemí podle J. P. Montagnera, BSGF, 1999



Zaprášený vesmír

Plazma - *kvazineutrální soubor nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování.*

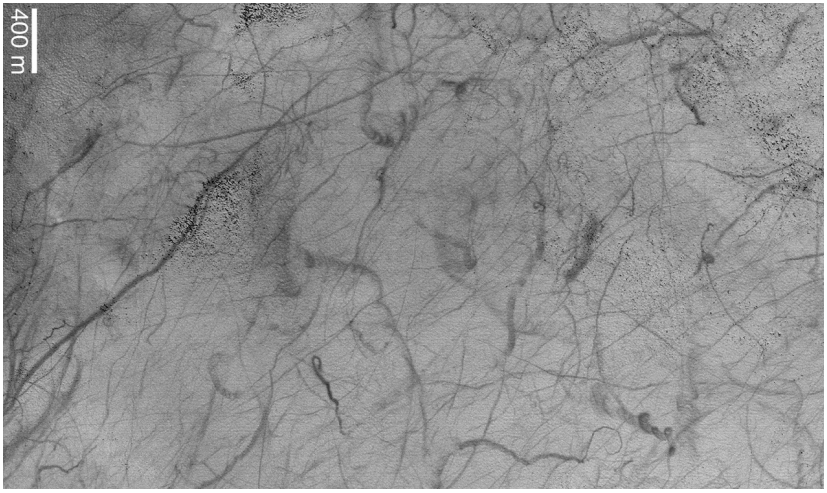
Kvazineutralita - *v makroskopickém objemu je vždy stejný počet kladně i záporně nabitých částic.*

Kolektivní chování - *nabité částice reagují jako celek na vnější elektrická a magnetická pole a jako celek jsou částice schopné generovat globální elektrická a magnetická pole, například v podobě elektromagnetických nebo magnetoakustických vln.*

Tak jako se dítě učí věcem od jednodušších k složitějším, tak se i vědci snaží pochopit přírodu od ideálních příkladů k těm reálnějším skutečnostem. Nejinak je tomu i ve fyzice plazmatu. Od dob, kdy se začalo vážně uvažovat o plazmatu jako o čtvrtém skupenství hmoty, uplynulo už mnoho let a naše znalosti jsou již natolik hluboké, že je na čase postoupit o další krok kupředu. Tím krokem je zavedení „nečistot" do ideálního plazmatu. Tento článek s názvem „Zaprášený vesmír" mapuje výskyt prachu ve vesmíru a v plazmatu. Vzhledem k tomu, že 99 % viditelné hmoty ve vesmíru se nachází v plazmatickém stavu, je to prakticky jedno a totéž: Výskyt prachu ve vesmíru.

Roku 1938 Adams nalezl molekuly CH, CN a CH_3 ve spektru hvězd, které zjevně vznikaly mimo atmosféru hvězdy. Šklovskij navrhl v roce 1953 použít radioastronomické metody k zjištění radikálu OH. Toho bylo dosaženo až v roce 1973. V roce 1955 předložil H. C. Townes na sjezdu Mezinárodní astronomické unie podrobný seznam vibračních a rotačních frekvencí možných mezihvězdných molekul. V této době se ještě věřilo pouze na existenci jednoduchých molekul. Avšak v roce 1968 byl nalezen čpavek NH_3, voda H_2O a formaldehyd HCHO, což vedlo vědce k určité změně názorů na mezihvězdný materiál. Obzvláště formaldehyd je jednou z velice hojných molekul. V letech 1968 až 1975 bylo objeveno celkem 23 molekul.

Pátrání po dalších molekulách není důsledkem honby nalézt co největší počet molekul. Jde o to, že budeme-li vědět, z čeho se naše okolí skládá, lze usuzovat, jaké fyzikální a chemické podmínky ve vesmíru panují. Současný stav je takovýto: radioastronomicky bylo objeveno více než 100 molekul, infračervenou spektroskopií bylo objeveno přes 40 druhů molekul, největší dnes známou molekulou ve vesmíru je fulleren C_{60}.



Prachoví ďáblíci (dust devils). Stopy po atmosférických vírech plných prachu, obdobě pozemských tornád, na povrchu Marsu. Oblast Promethei Terra o rozloze 5×3 km. Mars Global Surveyor (MGS), Mars Orbiter Camera (MOC), červenec 1998.

S výčtem oblastí, kde se vyskytuje prach, začneme v místech, která jsou pro nás nejdůležitější. Prach můžeme prakticky nalézt kdekoliv: u komet, planet, planetárních prstenců, mlhovin, atd.

Komety:
Typické koncentrace elektronů jsou $10^2 \div 10^3$ cm^{-3} v případě ohonu komety a $10^3 \div 10^4$ cm^{-3} v komě, teploty elektronů dosahují 0,1 eV v ohonu a jsou nižší než 1 eV v komě. Koncentrace prachových zrn dosahuje přibližně $10^{-8} \div 10^{-7}$ cm^{-3} v ohonu a 10^{-3} cm^{-3} v komě komety.

Jupiter:
V okolí Jupitera je oblast mezi měsíci Adrastea a Metis vyplněna prachem. Je vzdálena 129 000 km od planety a její šířka je 700 km.

Saturn:
Planetu Saturn obklopuje rozsáhlá soustava prstenců, ve kterých je přítomen nabitý prach. Největší množství se nachází v prstencích E a F. U ostatních planet (Uran, Neptun) lze taktéž nalézt obdobné prstence.

Mars:
Na Marsu, stejně jako na Zemi, zuří prachové bouře, prachové částice se díky malé gravitaci mohou vznášet nad povrchem po dobu mnoha týdnů.

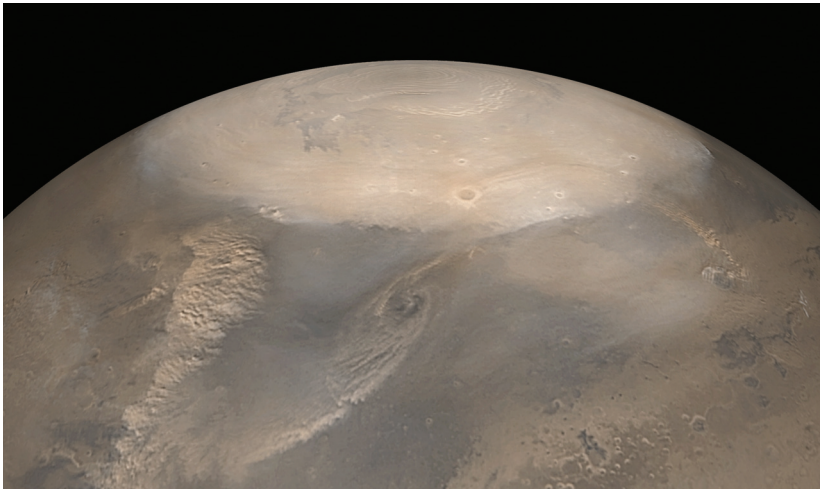
Měsíc:
I zde lze nalézt prach. V minulosti byla pozorována levitující mračna prachu. Sonda Surveyor pozorovala přímo z povrchu Měsíce levitaci 10÷30 cm nad povrchem a sonda Clementine tentýž úkaz pozorovala 10÷20 km nad povrchem Měsíce z oběžné dráhy.

Země:
Země se od jiných planet značně odlišuje tím, že na ní existuje život. To je sice fakt, který nenese žádnou

Důležitá kritéria:

$\lambda_D << L$: *Debyeovu délka λ_D je podstatně kratší než charakteristický rozměr systému L. Je-li podmínka splněna, plazma má schopnost odstínit elektrické náboje, které jsou do něj vloženy.*

$N_D >> 1$: *Počet částic N_D v Debyeově sféře je značný, hovoříme o ideálním plazmatu. V přírodě se samozřejmě vyskytuje i neideální plazma, pro které podmínka neplatí.*



Prachová bouře na Marsu v severní polární oblasti. Světlejší plocha je severní polární čepička. Mars Global Surveyor (MGS), květen 2002.

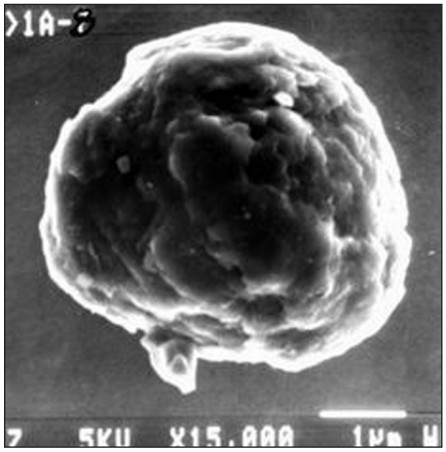
$\omega\tau > 1$: Frekvence ω typických dějů v plazmatu (například oscilací) je vyšší než frekvence srážek $1/\tau$ s neutrálními atomy. Podmínka říká, že doba mezi srážkami je větší než periody typických dějů, například Larmorovy rotace. Tím se tyto děje v plazmatu mohou vůbec uskutečnit.

Debyeova délka - *typická vzdálenost v plazmatu, ve které je potenciál bodového náboje odstíněn v poměru 1/e.*

Vlastnosti plazmatických krystalů:

- *velice jednoduchá vizualizace pomocí laseru a CCD,*
- *snadno ovlivnitelné vnějším elektromagnetickým polem,*
- *veliká rozmanitost tvaru krystalové mřížky*
- *mohou být používány jako makroskopický model systémů pro studium některých vlastností krystalů (dislokací, fázových přechodů)*

Ukázka prachové částice (grafit) o rozměrech cca 5 μm. Fotografie Max Planck Institute.



novou informaci, nicméně pro tento článek pojednávající o prachu je tento fakt více než zásadní. Neboť pod pojmem prach na Zemi si každý představí poletující nečistoty na silnicích, které nám znemožňují se dívat z okna v kanceláři ven a spoustu dalších příkladů.

Meziplanetární prach

Přímým důkazem meziplanetárního prachu je zvířetníkové (zodiakální) světlo, které vzniká rozptylem a odrazem slunečního světla na prachových částicích soustředěných v rovině sluneční soustavy. Název se odvozuje podle výskytu tohoto svitu, protože vzniká v souhvězdích zvířetníku podél ekliptiky. V zeměpisných šířkách střední Evropy ho lze pozorovat na západním obzoru večer v době jarní rovnodennosti, kdy při západu Slunce má ekliptika menší sklon k obzoru než nebeský rovník.

Vzhledem k tomu, že na Zem ročně dopadne přes 40 000 tun kosmického prachu, je pro další výzkum (pozemský) důležité určit, která prachová částice je původu pozemského a která mimozemského. Jako sběr prachových částic se používá buď speciálně vybavené letadlo, které má pod křídlem nádobu ve tvaru sudu nebo třeba veliký talíř položený na střeše. Poté následuje čištění vzorků a jejich analýza. Jednou z možností jak určit, zda se jedná o mimozemský prach, je následující. Zkoumaný vzorek se rozřízne a protože tok fotonů od Slunce je prakticky konstantní, lze z hustoty tmavých proužků (dráhy vniknuvších fotonů či iontů) určit stáří vzorku.

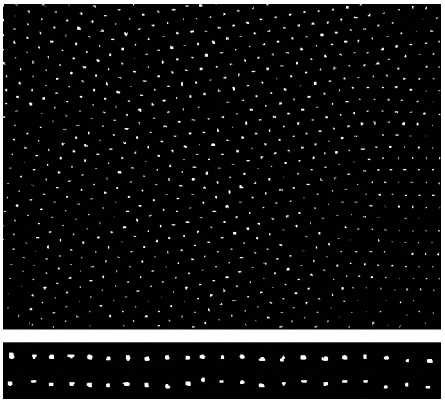
Prachové plazma

Pokud si dovedeme představit ideální plazma jako směs elektronů a iontů, pak pro představu prachového plazmatu si stačí domyslet ještě třetí složku, kterou tvoří prachové částečky. Jsou to velice hmotné částice, které mají zásadní vliv na chování plazmatu. Aby bylo prachové plazma plazmatem, je nutné, aby tyto částice byly nabité. Jsou-li nabité, jejich chování je ovlivněno elektromagnetickými silami, nejsou-li nabité, jejich primárním účinkem je gravitační působení. Náboj prachových zrnek dosahuje hodnot typicky 10 000 násobek, v extrémních případech až 100 000 násobek elementárního náboje. Většinou jde o záporný náboj, ale mohou se objevit i kladně nabité částice.

Jevy v prachovém plazmatu

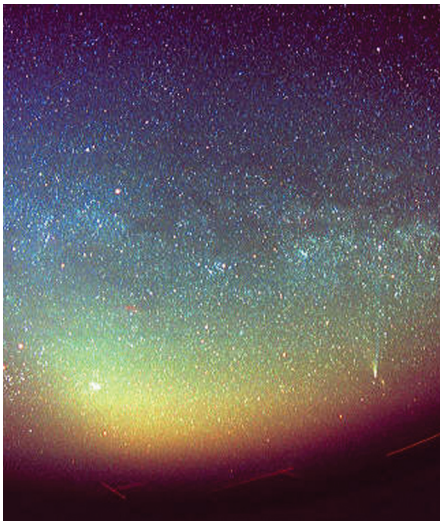
Prachové plazma vykazuje celou řadu nových jevů. V plazmatu dochází k novým typům nestabilit, nabitý prach může levitovat, zajímavý je způsob růstu prachových zrn a procesy jejich nabíjení, objevují se nové zajímavé struktury, například příčky v prstencích Saturnu nebo pravidelné uspořádání prachových zrn do krystalické mřížky (tzv. plazmové krystaly), jejichž výzkumem se zabývají jak laboratoře na Zemi tak probíhají i experimenty na Mezinárodní kosmické stanici (ISS). V prostředí makrogravitace na Zemi vznikají dvourozměrné struktury a v mikrogravitaci na ISS struktury trojrozměrné.

■ *Václav Kaizr*



Plazmový krystal v hexagonální krystalografické soustavě. V dolní části obrázku pohled na dvě vrstvy krystalu z boku. Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Christian-Albrechts-Universitat Kiel, 2002.

Zvířetníkové světlo. V pravé části je patrná kometa Ikeya Zang. Fotografie ze 4. 2. 2002, ostrov Terschelling.



Existují další planety sluneční soustavy?

Blízkozemní planetky - *poloosa jejich dráhy nepřesahuje 1,3 AU, anglická zkratka NEA (Near Earth Asteroids). Zvláštní skupinu tvoří potenciálně nebezpečné planetky PHA (Potentialy Hazardeous Asteroids), které se dostávají do blízkosti Země.*

Hlavní pás planetek - *jde o planetky mezi drahou Marsu a Jupiteru, kde vyplňují nápadnou mezeru v rozložení planet ve sluneční soustavě.*

Trojané - *planetky zachycené gravitačním vlivem planety Jupiter do jeho Lagrangeových bodů L4 a L5.*

Již od nepaměti se lidé zajímali o noční oblohu. Vymýšleli různé báje a spekulovali o objektech, které tam vidí. Je pochopitelné, že o jasných objektech jako je Měsíc a planety Jupiter, Saturn, Mars, Venuše a Merkur lidé věděli poměrně mnoho. Jak se technika postupně vyvíjela, objevovali lidé nové a nové objekty. Planeta Uran byla objevena v roce 1781 slavným pozorovatelem Williamem Herschelem, planeta Neptun v roce 1846 Johannem Gallem. Tehdy se na chvíli objevování planet zastavilo. Lidem to však nestačilo a tak začal lov na další objekty sluneční soustavy. Poslední dnes známá a uznávaná planeta Pluto, s průměrem přibližně 2 300 km, byla objevena v roce 1930 Clydem Tombaughem. Téměř o půl století později byl v roce 1978 objeven její souputník Charon s průměrem cca 1 200 km.

Tělesa sluneční soustavy bychom mohli zjednodušeně rozdělit na Slunce, planety a meziplanetární hmotu. A právě o té se zde podrobněji zmíníme. Budeme se zajímat hlavně o planetky. Klasifikovat bychom je mohli pro jednoduchost podle umístění ve sluneční soustavě – viz tabulka na protější straně. Poslední skupina uvedená v tabulce se nachází daleko za hranicemi sluneční soustavy, slouží jako zásobárna kometárních jader, slepenců kamenů a ledu o rozměrech desítek kilometrů a nebudeme se o ní v tomto článku zmiňovat.

Umělecké ztvárnění Kuiperova pásu, časopis Scientific American.

Blízkozemní planetky

První skupinu tvoří blízkozemní planetky (Near Earth Asteroids – NEA). Jedná se o tělesa na drahách s délkou velké poloosy menší než 1,3 AU. Předpokládá se, že je tvoří jádra komet a dále tělesa vymrštěná z Hlavního pásu planetek. Řadí se do tří skupin podle nejznámějších zástupců: Amor, Apollo, Aten. Podle jejich počátečních písmen se tato tělesa označují jako planetky AAA.

Název pásu	Vzdálenost od Slunce	Umístění
Blízkozemní planetky	~ 1 AU	Země
Hlavní pás	~ 2÷4 AU	Mars - Jupiter
Trojané	~ 5 AU	Jupiter
TNO pás	~ 30÷100 AU	za Neptunem
Oortův oblak	~ 100 000 AU	periferie sluneční soustavy

TNO - *objekty za drahou Neptunu (Trans Neptunian Objects), dělí se na několik typů podle svých drah. Je zde řada relativně velmi velkých těles. Největším do-sud známým TNO objektem je Pluto.*

Kuiperův pás - *pás malých těles pojmenovaných podle Gerarda Kuipera (1905 - 1973), který byl již v padesátých letech zastával teorii o existenci menších těles za drahou Neptunu. Dnes se používají oba názvy, jak TNO tělesa tak Kuiperův pás.*

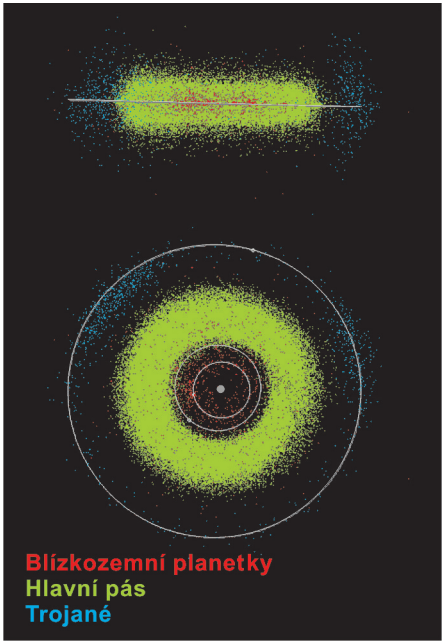
Typ Amor: Nedosahují až k dráze Země, oběžná dráha je větší než 1AU, například Eros (611 objektů).
Typ Apollo: Kříží dráhu Země a periodu mají větší než 1 rok, například Geographos (609 objektů).
Typ Aten: Kříží dráhu Země, perioda je menší než 1 rok (107 objektů).
(údaje v závorkách jsou platné k dubnu 2001)

Další skupinou jsou trochu zvláštní, potenciálně nebezpečné planetky (Potentialy Hazardous Asteroids – PHA), kterých ke 23. dubnu 2001 známe 305. Jsou to objekty, jejichž dráhy se přibližují na vzdálenost menší než 0,05 AU (dvacetinásobek střední vzdálenosti Země - Měsíc) k dráze Země a jejichž průměr je větší než cca 150 metrů (taková tělesa již mohou při pádu do oceánu způsobit přílivovou vlnu).

Hlavní pás planetek
Další vcelku početná skupina se nachází mezi Marsem a Jupiterem. Nazývá se Hlavní pás planetek. Má toroidální tvar a zasahuje do vzdálenosti 2÷4 AU od Slunce. Největším tělesem Hlavního pásu je Ceres o průměru přibližně 930 km. Celkový počet těles se odhaduje na několik set tisíc. Planetky Hlavního pásu vyplňují nápadnou mezeru mezi Marsem a Jupiterem.

Trojané
V libračních (tzv. Lagrangeových) bodech L4 a L5 soustavy Jupiter – Slunce se nachází více než 900 kamenných těles – Trojanů. V těchto místech se vyrovnává silové působení Jupiteru, Slunce a odstředivá

Ilustrace rozložení planetek. Znázorněny jsou dráhy Země, Marsu a Jupiteru.



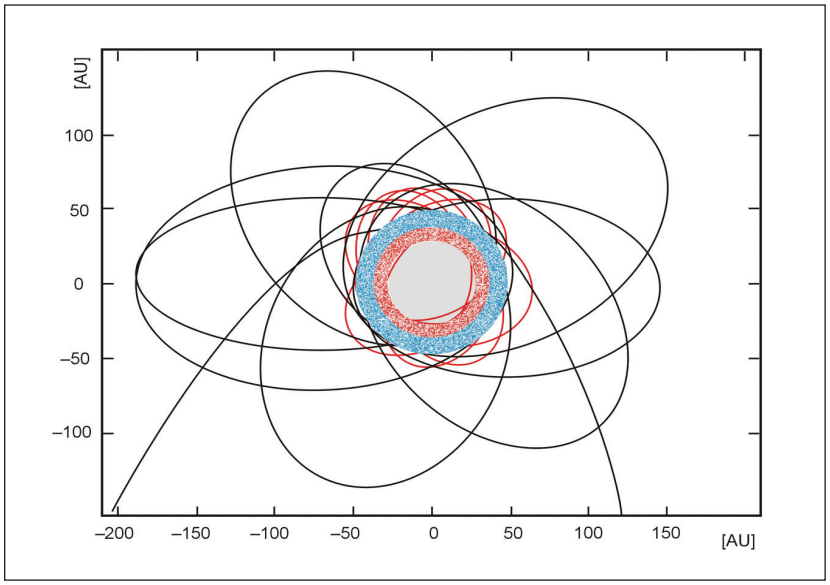
Oortův oblak - *zásobárna kometárních jader daleko za hranicemi sluneční soustavy, jejíž existenci navrhl v roce 1950 Jan Hendrik Oort (1900–1992). Vnější okraj Oortova mračna patrně dosahuje až do vzdálenosti přes 100 000 AU. Některé komety pocházejí z větší blízkosti, tzv. Kuiperova pásu, který se nachází hned za drahou Pluta.*

síla obíhajících planetek. Odborníci ještě rozeznávají Achillovu a Patroklovu skupinu a to podle toho, ve kterém z Lagrangeových bodů se těleso nachází.

TNO pás

Tělesa, která se nachází za drahou Neptunu, nazýváme TNO (Trans Neptunian Objects). Jde o souhrnný název pro planetky i kometární jádra, nacházejících se ve vzdálenosti asi 30 AU až několik set AU. Dělí se na Plutína, Klasické objekty Kuiperova pásu a Objekty rozptýleného disku (s velkou excentricitou).

V roce 1930 publikoval F. C. Leonard v časopise Leafletské astronomické společnosti článek, v němž se zmiňuje o mnoha tělesech za oběžnou drahou Pluta. Dalším, kdo se o těchto tělesech zmínil byl Essexe Edgeworthe (1880–1972) a to v roce 1943 a 1949. Třetí důležitou osobou byl Gerard Peter Kuiper (1905-1973), který otiskl svůj článek o těchto tělesech v roce 1951. Přestože byl prvním Leonard, dnes se pro pás planetek za Plutem používá velmi často název Kuiperův pás případně Kuiperův-Edgewortův pás. Jelikož je v pojmenování tak trochu zmatek a jak vidno pojmenování vůbec nebere v potaz první jméno člověka, který se těmito planetkami zabýval, dnes se nejčastěji hovoří o tzv. TNO tělesech.



Rozdělení TNO: Červeně jsou znázorněna Plutína, modře Klasické objekty Kuiperova pásu (CKBO) a černě Objekty rozptýleného disku (SKBO). Šedý kruh je sluneční soustava po dráhu Neptunu.

První skupinou TNO jsou tzv. Plutína, objekty s oběžnou dráhou podobnou Plutu a Charonu, která rezonuje s drahou Neptunu 2:3 (na tři o-běhy Neptunu připadnou dva oběhy Plutín). Několik příkladů: 1993 SB, 1994 TB, 1995 QY9. Přibližně čtvrtina těles TNO jsou právě Plutína. Odhaduje se, že takových Plutín s průměrem větším než 100 km je asi 1 400. Mezi Plutína patří jako nejvýznamější objekty Pluto a Charon.

Mezi další TNO (Trans Neptunian Objects) patří takzvané klasické objekty Kuiperova pásu, kte-

ré obíhají až za oběžnou dráhu Pluta. Někdy je nalezneme pod označením Cubewana, podle největšího zástupce této skupiny. Jejich dráhy jsou téměř kruhové nebo mají v porovnání s planetkami z rozptýleného disku jen nepatrnou excentricitu.

O tělesech s chaotickými trajektoriemi a s vysokou excentricitou mluvíme jako o objektech rozptýleného disku.

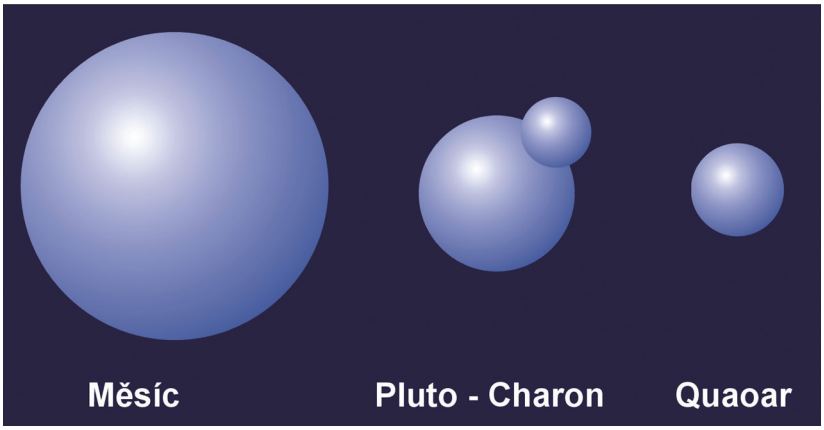
Na přelomu tisíciletí, v souvislosti se zlepšením pozorovacích technologií (adaptivní optika), byla objevena řada velkých TNO těles. Roku 2000 byla objevena planetka Varuna (2000 WR 106, planetkové číslo 20 000) s průměrem zhruba 800÷1 000 km. Chyba v určení průměru je u těchto objektů asi 15 %. Je to dáno metodou měření. Průměr se totiž určuje z absolutní jasnosti tělesa a pokud přesně nevíme z jakého materiálu je, musíme při určování hádat údaje jakými jsou například odrazivost – albedo (přesněji podíl odraženého a dopadajícího záření). O rok později byl objeven Ixion (2001 KX 76), těleso s průměrem 900÷1 230 km a v roce 2002 Quaoar (2002 LM 60, planetkové číslo 50 000) s průměrem 1 000÷1 400 km. Jde o těleso větší než Charon – Plutův souputník. Ještě tentýž rok nenabažené dalekohledy dychtivých nočních pozorovatelů spatřily objekt, který ještě nemá své definitivní „lidské“ jméno. Nese označení 2002 AW 197 a má průměr 770÷1 010 km.

S takovým úlovkem hned na počátku tisíciletí asi nikdo nepočítal, a tak se rozpoutala mezi odborníky i laickou veřejností, debata o tom, zda se ve školách budou děti učit o dalších planetách. V tuto chvíli je zřejmé, že Mezinárodní astronomická federace již nebude nadále další planetky schvalovat jako oficiální „planety“ sluneční soustavy, neboť se dá předpokládat, že takových objevů přijde v dalších letech ještě mnohem více a není vyloučen ani objev tělesa většího než Pluto. Konec konců, ani Pluto samotný vlastně není „opravdovou planetou“ a je jen jedním z těles TNO pásu.

■ *Pavel Břichnáč*

Gerard Peter Kuiper (1905-1973).

Poměrná velikost Quaoaru, Měsíce a dvojice Pluta s Charonem.



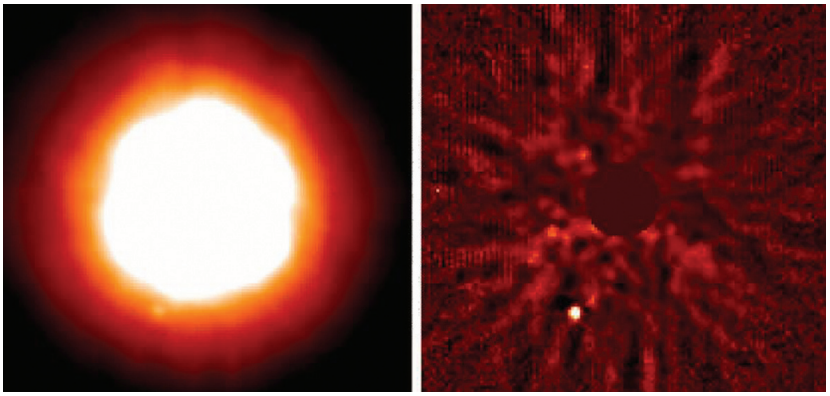
Exoplanety

Planeta - *těleso do hmotnosti 13 M_J. Podle standardní teorie vzniká postupnou akrecí z protoplanetárního disku. Nezáří ve viditelném oboru, u obřích planet pozorujeme emise v infračerveném a rádiovém oboru.*

Exoplaneta - *planeta mimo sluneční soustavu. Na konci roku 2003 je známo přes 100 exoplanet u jiných hvězd.*

Ke konci ledna 2003 bylo objeveno 105 extrasolárních planet (těles lehčích než 13 M_J). Nově objevené planetární soustavy potvrzují mnohé domněnky, které jsme si doposud o planetárních soustavách a jejich vývoji učinili. Na druhé straně nás překvapilo množství velmi hmotných planet, spíše hnědých trpaslíků, které obíhají ve velmi malých vzdálenostech s periodami někdy jen několik dnů. Dosavadní (velmi nepřesné) odhady, odvozené z pozorování, nám říkají, že nejméně u 5 % hvězd se vyskytují planety velkých hmotností, počet hvězd s planetami s hmotností srovnatelnou se Zemí bude zřejmě daleko vyšší, což posouvá počet oběžnic v naší Galaxii do řádu miliard. Vzhledem k prudkému rozmachu odvětví astronomie, které se věnuje hledání planet u cizích sluncí, jsme se dočkali snímku hnědého trpaslíka obíhajícího ve vzdálenosti pouhé 3 AU od centrální hvězdy. Tento článek je proto věnován přehledu metod, které v nedávné minulosti vedly k úspěšnému odhalení extrasolárních planet.

Planety vznikají postupnou akrecí z plochého disku, který je vedlejším, nicméně přirozeným, produktem vzniku (osamocené) hvězdy. Počátkem je gravitační kolaps rozsáhlého prachoplynného oblaku. Ten se skládá převážně z vodíku (ve formě molekul i atomů) a hélia. V mnohem menší míře jsou zastoupeny molekuly CO, CO_2, N_2, CH_4 a H_2O. Prachová zrna obsahují zejména C, Si a O. Jejich typické rozměry jsou 10^{-5} m. Po počátečním impulsu se materiál rychle hromadí směrem k centrální protohvězdě, ale velký rotační moment brání jeho úplnému zhroucení. Postupně vzniká plochý disk. Doba, kterou disk potřebuje ke svému vzniku, je velmi krátká – v řádu 10^5 let. Poslední fází ve vývoji disku před započetím vlastní tvorby planet je jeho „vyčištění“ od přebytečného plynu – ten je jednak částečně přitažen centrální hvězdou, zčásti vyfoukán velmi intenzivním hvězdným větrem. I tak zůstane v disku stále určité množství plynů – ty budou v budoucnu „použity“ na tvorbu obřích planet.



Snímek pořízený roku 2002 ukazuje hnědého trpaslíka o hmotnosti 65 M_J, který obíhá okolo hvězdy 15 Sge (58 ly od Země) ve vzdálenosti 14 AU. Matematické zpracování původního snímku (vlevo) dovolilo odečtení jasu hvězdy, který mnohotisíckrát převyšuje jas hnědého trpaslíka (vpravo). Fotografie Michael Liu, Gemini Observatory, University of Hawaii Institute for Astronomy, NSF.

Planety u pulsarů

První tělesa planetárních hmotností byla objevena metodou měření zpožďování záblesků pulsarů roku 1992. Tak, jak oběžnice hýbe pulsarem, sledujeme zpožďování nebo zrychlování časových period mezi jednotlivými záblesky. Touto metodou byla odhalena existence třetího tělesa v pulsaru PSR B1620–26 v kulové hvězdokupě M4 v souhvězdí Štíra, vzdálené od nás 1,8 kpc. Pulsar má za průvodce bílého trpaslíka a hnědého trpaslíka nebo exoplanetu o hmotnosti asi 10 M_J.

Dopplerův posuv

Roku 1995 byla objevena planeta u hvězdy 51 Peg měřením Dopplerova posuvu. Hvězda a planeta obíhají kolem společného těžiště. Jestliže se k nám planeta přibližuje, hvězda se vzdaluje a její spektrální čáry vykazují červený posuv. Naopak, pokud se od nás planeta vzdaluje, hvězda se přibližuje a absorpční čáry ve spektru jsou posunuty k jeho modrému konci.

Pokud vyneseme velikost posunu těchto čar na časovou osu, získáme periodickou křivku, ze které můžeme odhadnout velikost planety, její oběžnou dobu a velkou poloosu dráhy. Přestože je tato metoda již dlouhou dobu používána k měření radiálních rychlostí blízkých hvězd i vzdálených galaxií, k detekci extrasolárních planet mohla být využita teprve nedávno. Abychom zaregistrovali i relativně malé planety, musí být změna radiální rychlosti změřena s přesností asi 1 m/s nebo lepší – změna radiální rychlosti Slunce způsobená oběhem Jupitera je 12,5 m/s s periodou 11,9 roku, vliv Země se projeví změnou o velikosti 0,1 m/s.

Metoda měření radiálních posuvů je v současné době k detekci exoplanet nejužívanější, ale i ona má svá úskalí, protože spočítanou hmotnost planety je nutno brát pouze jako dolní mez její skutečné hodnoty, neboť neznáme sklon oběžné dráhy planety vůči nám.

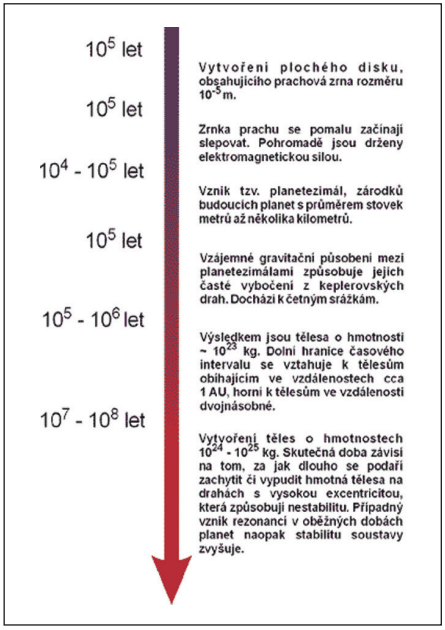
Mikročočky

Roku 1998 se v rámci projektu MACHO poprvé podařilo zaznamenat existenci planety metodou mikročoček. Je dobře známo, že v okolí velmi hmotných těles je dráha světelných paprsků znatelně zakřivená. Pokud před nějakou velmi vzdálenou hvězdou prochází slabě zářící, ale velmi hmotné těleso, můžeme zaznamenat postupný nárůst a pokles její jasnosti. Pokud okolo procházejícího tělesa obíhá ještě planeta, může se i ona na křivce jasnosti projevit jako krátkodobé zjasnění. Na obrázku je

Hnědý trpaslík - *těleso o hmotnosti 13÷80 M_J. Jde o objekt na pomezí hvězdy a planety s vlastnostmi blíže hvězdám. Po dobu několika miliard let září vlastním světlem. Podle standardního vývojového scénáře vznikají na rozdíl od planet zároveň se svými hvězdnými sourozenci kontrakcí z protomlhoviny.*

Hvězda - *těleso o hmotnosti větší než cca 80 M_J. V jádru je zpravidla plně rozvinuta termojaderná syntéza živící hvězdu energií, vzniká kontrakcí z protomlhoviny, září vlastním světlem.*

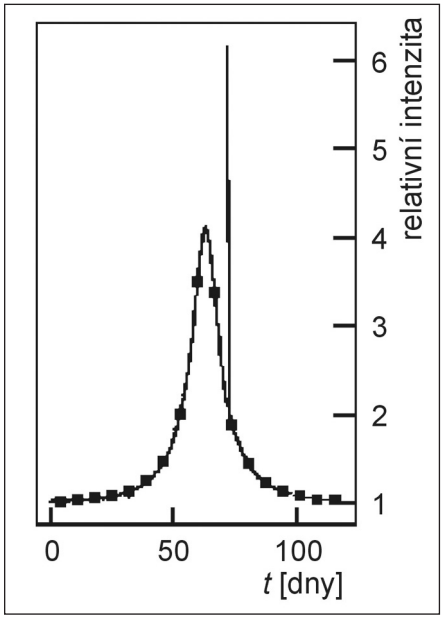
Časový vývoj vzniku planetární soustavy podle standarního vývojového scénáře.



Spektrální třída - *rozdělení hvězd na spektrální třídy bylo navrženo na Harvardově universitě před více jak sto lety. Původně byly hvězdy rozděleny do osmi skupin podle typu spektra (W, O, B, A, F, G, K, M). Ve skutečnosti typ spektra závisí na povrchové teplotě hvězdy a tak spektrální třída vypovídá spíše o teplotě hvězdy než o jejím složení, hvězdy spektrální třídy W mají teplotu až 80 000 K, hvězdy spektrální třídy M jen 3 800 K. Roku 1998 byla přidána spektrální třída L (1 700 K) pro hnědé trpaslíky.*

křivka, jejíž první maximum náleží maximálnímu úhlovému přiblížení zdroje k čočce. Jestliže čočku tvoří dva objekty, v našem případě hvězda a planeta, závisí tvar křivky na poměru jejich hmotností a na úhlové vzdálenosti hvězda – planeta. Po většinu času bude křivka stejná jako v případě jednoduché čočky. Pouze na několik hodin (primární zdroj má za následek zjasnění trvající typicky několik desítek dnů) se zde projeví další zjasnění. Doba, po kterou lze sekundární (z hlediska doby trvání, nikoli jasnosti) maximum pozorovat, závisí na hmotnosti čočkující planety.

Ukázka světelné křivky hvězdy, u které došlo k efektu mikročočky (simulace).



Zákryt hvězdy planetou

Metoda pozorování přechodů planety před kotoučkem hvězdy (tzv. tranzitní fotometrie) slavila svůj úspěch roku 1999.

Pokud při vhodném natočení cizí planetární soustavy vůči Zemi dojde k přechodu vzdálené planety přes kotouček hvězdy, mohla by její jasnost poklesnout v rozmezí několika tisícin až setin magnitudy. Například zákryt Slunce Jupiterem, pozorovaný ze vzdálenosti 10 pc způsobí pokles jasnosti o cca 0,02 mag. Takto se podařilo detekovat roku 1999 planetu u hvězdy HD 209458.

Další možné způsoby detekce

Vznikající planetární soustava se může prozradit během poslední fáze svého vzniku, kdy dochází ke srážkám těles s hmotností $10^{22} \div 10^{23}$ kg. Při srážkách těchto těles dojde k jejich roztavení, které se prozradí zvýšenou emisí v infračerveném oboru spektra. K tomuto jevu ovšem dojde pouze v případě malé rychlosti srážky – kolem 10 kms^{-1}. Předpokládá se, že teplota povrchu tělesa po srážce setrvá při teplotě 2 000 K po dobu několika tisíc let (impakty na větší tělesa budou svítivější, ale krátkodobější).

V minulosti jsme několikrát u hvězd spektrálních typů F až G pozorovali supererupce o energiích $10^2 \div 10^7$ krát větších, než největší erupce pozorované na Slunci. Jednou z možných příčin těchto erupcí, trvajících hodiny až dny, je rekonekce magnetických polí centrální hvězdy a velmi blízko obíhající planety typu Jupiter. Nicméně souvislost mezi supererupcemi a přítomností krátkoperiodických joviálních planet nebyla dosud prokázána.

■ *Jakub Rozehnal*

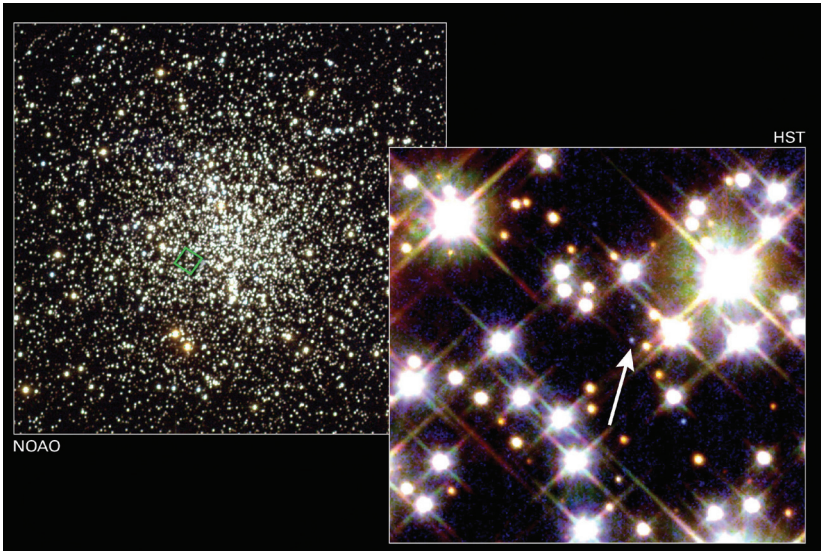
Nejstarší známá planeta?

Milisekundový rádiový pulsar PSR B1620–26 se nachází v blízkosti centra kulové hvězdokupy M4 v souhvězdí Štíra, ve vzdálenosti 7 200 světelných let od Země. Je součástí systému třech gravitačně vázaných těles – neutronová hvězda s hmotností cca 1,4 M_S obíhá okolo společného těžiště spolu s bílým trpaslíkem o hmotnosti 0,3 M_S s periodou 191 dní a tvoří tak vnitřní část systému. Okolo společného těžiště této soustavy však obíhá ve vzdálenosti 50 AU ještě další těleso s hmotností přibližně trojnásobku hmotnosti Jupitera.

Samotný objev planety, obíhající okolo neutronové hvězdy, nebyl pro astronomy ničím novým. Roku 1994 byly u pulsaru PSR B1257+12 objeveny tři planety s hmotností srovnatelnou se Zemí, obíhající po kruhových drahách do vzdálenosti 1 AU od neutronové hvězdy. Dosud není zcela jasné, zda mohly planety přežít takovou událost, jako je výbuch supernovy, který vzniku neutronové hvězdy předchází, nebo zda se zformovaly dodatečně z vyvrženého materiálu. Objev planety u pulsaru PSR B1620–26 však odhalil řadu dalších překvapivých skutečností.

V první řadě je to samotné odhalení původu vzniku této exotické soustavy. Jeden z možných scénářů vývoje systému začíná u staré neutronové hvězdy, vázané v binárním systému. Tato soustava se měkce střetla se soustavou hvězda-planeta. Doprovodná složka neutronové hvězdy byla gravitací vymrštěna mimo trojhvězdu a planeta zaujala místo na oběžné dráze okolo nově vzniklé soustavy neutronová hvězda – hvězda hlavní posloupnosti. Z té se postupem času stal červený obr, jehož hmota vyplnila celý Rocheův lalok a začala proudit přes akreční disk na neutronovou hvězdu. Tím došlo k jejímu rychlému roztočení a vzniku milisekundového pulsaru.

Neutronová hvězda - *těleso tvořené degenerovaným neutronovým plynem. Její hmotnost je menší než cca 3 M_S (Landau-Volkov-Oppenheimerova mez). Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu 10 km, průměrná hustota 10^{11} kg/m^3 dosahuje hodnot hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobrů, při výbuchu supernovy typu II. Obrovský tlak způsobuje „vtlačení" elektronů do protonů za vzniku neutronů a neutrin.*



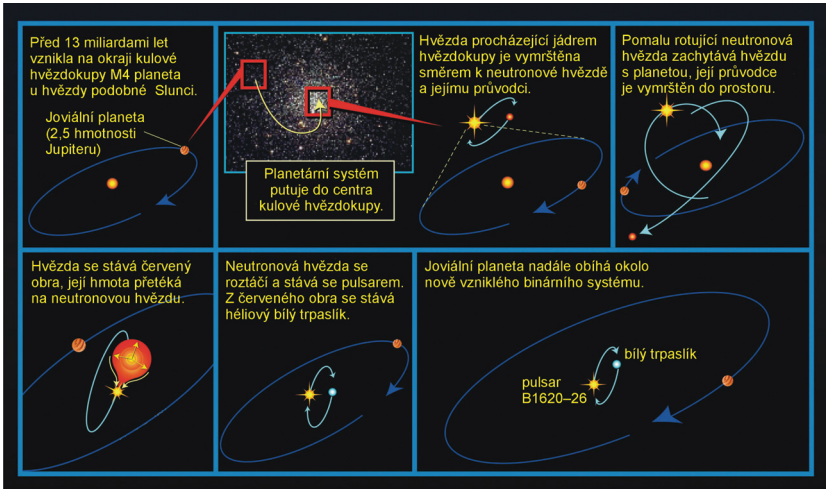
Kulová hvězdokupa M4 a poloha bílého trpaslíka – průvodce pulsaru B1620-26. Fotografie NOAO/HST.

Pulsar - *velmi rychle rotující neutronová hvězda, vysílající pravidelné záblesky. Jedná se o důsledek faktu, že rotační osa nesouhlasí s osou magnetickou. Rotující magnetosféra strhává a urychluje nabité částice, které unikají v úzkém svazku a vytváří tak efekt majáku.*

Milisekundový pulsar - *při přetoku látky z hvězdy na pulsar dochází k urychlování jeho rotace. Záblesky se proto zkracují a jejich perioda dosahuje milisekundových hodnot. Po ukončení přenosu látky se pulsar začíná vlastním vyzařováním opět zpomalovat.*

Počáteční podmínky tohoto scénáře byly podrobeny řadě numerických simulací a ukázalo se, že v 15 % případů dojde k vytvoření podobné soustavy, jako u pulsaru PSR B1620–26. Ve většině takových případů byla výsledná dráha planety 10 až 100 krát větší než původní vzdálenost složek binárního systému, což odpovídá pozorování. Tato teorie má však dva velké nedostatky. Prvním problémem je fakt, že stáří milisekundového pulsaru by muselo být alespoň zhruba srovnatelné se stářím trojitého systému. Výpočty ukazují, že planeta obíhá okolo centra po dráze s velkou poloosou cca 50 AU, takže její dráha je vzhledem k velké hustotě hvězd v centru hvězdokupy dosti nestabilní. Odhadovaná životnost objevené soustavy je 3×10^7 let, tedy podstatně méně než odhadované stáří pulsaru (10^9 let). Doba životnosti soustavy se však významně prodlužuje v závislosti na vzdálenosti od centra hvězdokupy, kde klesá hustota hvězd. V polovině vzdálenosti směrem od centra ke kraji je již životnost systému na úrovni 10^9 let. Takovýto model vyžaduje, aby byl celý sytém, který se nyní (v projekci) nachází v blízkosti centra, ve skutečnosti na oběžné dráze, jež sahá daleko od jádra a dovoluje soustavě trávit většinu času mimo husté středové partie.

Druhý problém se týká excentricity centrální dvojhvězdy. Uvedený model vzniku této soustavy ukazuje, že zároveň s přechodem planety na vnější oběžnou dráhu dojde díky působení slapových sil k cirkularizaci drah vnitřního systému. To je však v rozporu s nově naměřenými daty, takže vyšší excentricita vnitřní dráhy zůstává nevysvětlena. Bylo by možné jí vysvětlit druhotnou kolizí s další hvězdou, která by však zároveň s velkou pravděpodobností způsobila nestabilitu na vnější oběžné dráze. Výpočty ukazují, že k podobným druhotným setkáním skutečně může dojít, dokonce jsou vhledem k hustotě hvězd v centru hvězdokupy velmi častá. Od doby svého vzniku by tento systém prošel nejméně deseti takovými setkáními, což snižuje pravděpodobnost zachování planety na vnější oběžné dráze pod 1 %.



Vývojový scénář vzniku systému binárního pulsaru a exoplanety. Kresba A. Feild, NASA/STScI.

Jiný model proto předpokládá existenci milisekundového pulsaru již v době před kolizí se soustavou hvězda – planeta, ovšem numerické výpočty ukazují, že v tomto případě je pravděpodobnost zachycení planety oproti pravděpodobnosti zachycení hvězdy zhruba pětkrát menší.

Bez ohledu na výše uvedené problémy však nejnovější data naměřená s pomocí Hubbleova kosmického dalekohledu přikládají větší váhu prvnímu modelu. Například se ukázalo, že bílý trpaslík – sekundární složka trojčlenného systému, vznikl až v době po jeho vzniku. Pravděpodobná platnost prvního modelu však přináší obrovský zvrat do našich představ o vzniku planet a planetárních systémů. I když pomineme samotný fakt, že kulové hvězdokupy jsou vzhledem k častým gravitačním kolizím hvězd a vzhledem k malému zastoupení těžších prvků zcela nevhodnými místy pro tvorbu planet, ukazuje se, že pro splnění všech podmínek platnosti prvního modelu musíme předpokládat, že planeta se zformovala na okraji kulové hvězdokupy M4 před více než 12,5 miliardami let! Standardní teorie vzniku planetárních systémů postupnou akrecí z protoplanetárního disku však předpokládá, že obří plynné planety vznikaly až druhotně, nabalením plynů na pevná jádra o velikosti Země. Takový způsob vzniku je však vzhledem ke stáří planety téměř vyloučen – v době jejího zformování ještě neexistovalo dostatečné množství těžších prvků, potřebných k vytvoření pevného jádra. Ke slovu proto přichází alternativní teorie rychlého vzniku planet gravitačními nestabilitami přímo ze zárodečných disků. Je-li tato teorie pravdivá, pak musíme konstatovat, že planet se ve vesmíru nachází ještě mnohem více, než jsme se dosud domnívali – a to je další závažný důsledek modelu vzniku této bizarní trojčlenné soustavy.

■ *Jakub Rozehnal*

Rocheův lalok - *prostorové ohraničení ekvipotenciální plochy systému dvou hvězd. Tato plocha má tvar osmičky, složené ze dvou částí tvaru kapky – Rocheových laloků. Pokud hvězda zcela vyplní prostor svého laloku, dojde k přetoku látky na druhou složku.*

Kulová hvězdokupa - *systém obsahující statisíce až miliony hvězd, držený pohromadě gravitací. Hvězdy v kulových hvězdokupách neobsahují prakticky žádné těžší prvky a jsou proto velmi staré. Vznikly z prvotního plynu – vodíku a hélia v zárodcích budoucích galaxií.*

Teorie vzniku planetárních systémů - *standardní teorie vzniku planetární soustavy postupnou akrecí z protoplanetárního disku předpokládá postupné nalepování částeček prachu za vzniku prachových zrn a větších celků, tzv. planetezimál. Gravitačním působením mezi planetezimálami vznikají budoucí planety. Nutným důsledkem platnosti této teorie je však rozdílné stáří všech planet – planety blíže ke hvězdě vznikají i o řád rychleji než planety na periferii. Tato teorie také předpokládá vznik plynných obrů až sekundárním nabalením plynů na jádra o velikosti Země. Naproti tomu teorie vzniku gravitačními nestabilitami předpokládá rychlý vznik všech planet naráz zhroucením části prachoplynného oblaku.*

BONUS: Expedice AURORA

(vyšlo v Československém časopise pro fyziku 1/2003)

Ve dnech 12. 9. 2002 až 29. 9. 2002 uskutečnila katedra fyziky FEL ČVUT spolu se sdružením Aldebaran expedici za polárními zářemi do severských zemí. Expedice se zúčastnilo celkem dvanáct členů ze čtyř institucí. Hlavním cílem expedice bylo vizuální pozorování a fotografování struktur v polárních zářích. Převážná část pozorování probíhala v Norsku v blízkosti 70. rovnoběžky, kde je statisticky výskyt polárních září nejvyšší. Nejsevernějším námi navštíveným místem se stal Nordkapp (71°10'21"). V průběhu expedice se index aktivity polárních září pohyboval mezi stupněm 5 a 6 (v desetistupňové škále aktivity NOAA). Velmi intenzivní polární záře se nám podařilo spatřit celkem šestkrát, zjasněný aurorální pás byl několikrát vidět po téměř celou noc. Při expedici jsme ve třech autech ujeli 8 500 km, navštívili Dánsko, Švédsko, Norsko a Finsko. Hlavní cíl byl sice kladen na pozorování, ale neopomněli jsme také navštívit univerzitu v Oulu, která je známá právě výzkumem polárních září (Department of Space Physics, Department of Astronomy), univerzitu v Tampere a univerzitní hvězdárnu v Helsinkách. Podrobné výsledky a reportáž z expedice mohou zájemci najít na našich WWW stránkách.

Expedice na polárním kruhu 21. 9. 2002.

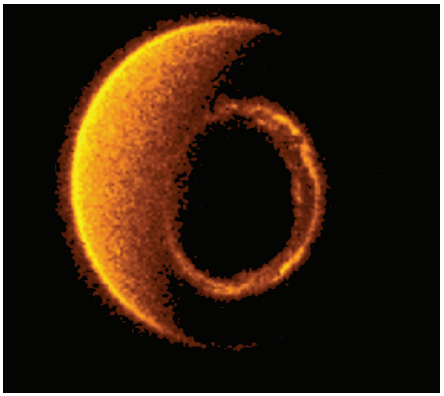
Polární záře nejčastěji pozorovaly severské národy – Laponci a Inuité, kteří je měli za plápolající duše mrtvých, svítící na cestu k nebeské bráně. První písemné zmínky o pozorování polárních září najdeme, jako obvykle, u starověkých Řeků, Římanů a Číňanů. Ti v nich viděli duchy mrtvých válečníků, kteří za svou chrabrost získali „výsadu“ bojovat za svého císaře i po smrti. Na odhalení pravého původu polárních září si však lidstvo muselo počkat ještě téměř dvě tisíciletí.

V 16. století pozoroval polární záře na své hvězdárně i Tycho Brahe, název Aurora Borealis pochází

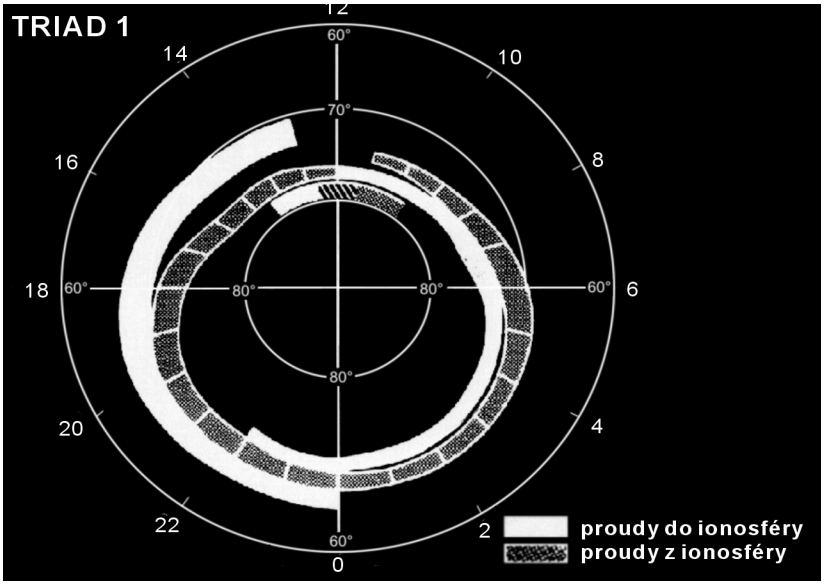
od Pierra Gassendiho z počátku 17. století. Prvním, kdo dal do souvislosti polární záře se Sluncem, byl J. J. Dortou de Mairan roku 1733. Nedlouho poté (1745) odhalili Anders Celsius a Olof Hiorter i magnetickou povahu polárních září při sledování komíhající se střelky kompasu. V roce 1775 Pehr Wilhelm Wargentin zjišťuje na základě mnohaletého pozorování, že polární záře se vždy vyskytují na mnoha místech současně a jejich výskyt pokrývá celý pás obklopující severní pól. Dnes tento pás nazýváme aurorální ovál.

Odhalení faktu, že polární záře se vyskytují i na jižní polokouli, a porovnání četnosti výskytu polárních září se sluneční aktivitou vedlo k první ucelené hypotéze o vzniku a povaze polární záře, kterou roku 1896 představil světu norský fyzik Kristian Birkeland. Předpokládal, že nabité částice vyvržené ze Slunce jsou zachytávány magnetickým polem Země, kde vznikají proudy tekoucí podél jeho silokřivek, a to jak směrem vzhůru, tak směrem dolů. Svou hypotézu podpořil Birkeland i experimentálně – sestrojil kovovou zmagnetizovanou kouli (terrelu), kterou ve vakuu (respektive za sníženého tlaku) ostřeloval proudem elektronů. Elektrony skutečně proudily do oblastí kolem pólů, kde budily k záření řídký plyn. Birkelandův experiment je vyobrazen na norské dvousetkorunové bankovce a poslední zkonstruovaná terrella z roku 1913 je dnes uložena v Muzeu polárních září v Tromsö.

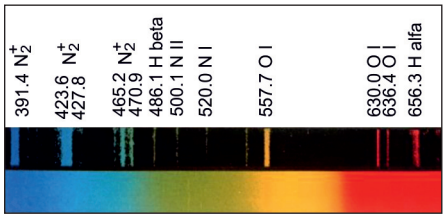
Po Birkelandově smrti v roce 1917 se stal nadlouho jediným zastáncem Birkelandovy teorie plošných proudů švédský fyzik Hannes Alfvén. Naopak zásadním odpůrcem Birkelandovy teorie byl světoznámý britsko-americký geofyzik Sydney Chapman. Ten zastával názor, že proudy tečou jen z ionosféry ven, a nikdy z ní nemohou směřovat dolů. V té době se bohužel vědecká veřejnost přikláněla spíše k Chapmanovým názorům. Hannes Alfvén položil základy magnetohydrodynamiky, zavedl pojem magnetických



První snímek aurorálního oválu Země. Dynamics Explorer 23. 11. 1981, UV obor.



Měření proudů satelitem Triad 1. Bíle jsou označeny proudy tekoucí do ionosféry, šrafovaně z proudy tekoucí z ionosféry. Diagram se stal podkladem pro znak expedice.



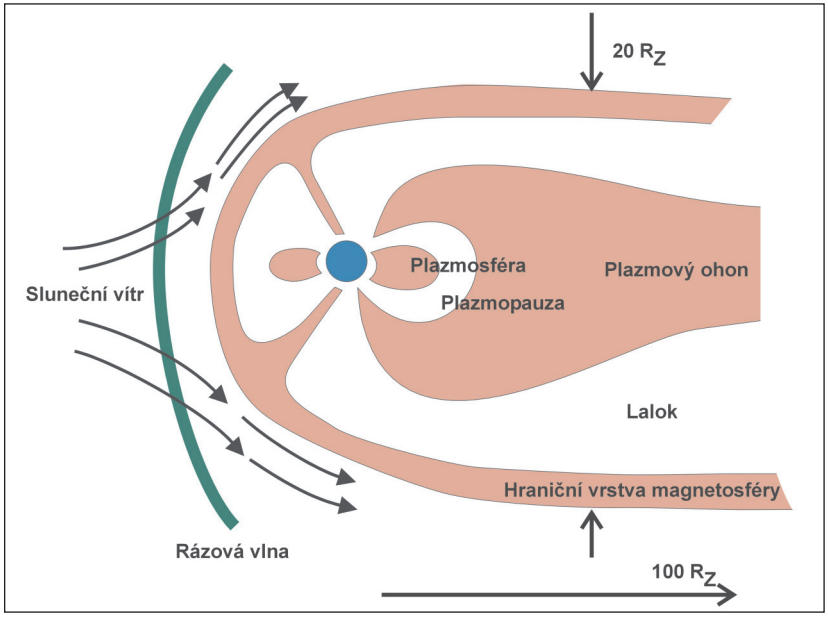
Typické spektrum polární záře s identifikací nejvýraznějších čar.

polí zamrzlých v látce, zabýval se pohybem nabitých částic v magnetosféře Země a navrhl několik mechanismů urychlování nabitých částic podél silokřivek zemského magnetického pole. Je také prvním autorem ucelené teorie magnetických bouří.

Elektrické proudy, tekoucí v horních vrstvách atmosféry, odhalil roku 1966 navigační satelit 1963-38C. První podrobná měření proudů tekoucích podél magnetického pole Země provedl satelit TRIAD 1 v roce 1973, který odhalil, že maximum tekoucích proudů leží na 70. rovnoběžce a tečou ve svislých stěnách, z nichž některé mají směr proudu vzhůru, jiné dolů. Birkelandova teorie se tak dočkala po tři čtvrtě století experimentálního ověření. Diagram, získaný satelitem TRIAD 1, je i základem loga naší expedice.

V dnešní době jsou polární záře zejména předmětem výzkumu mnoha satelitů. V roce 1981 byl poprvé pozorován celý aurorální ovál z vesmíru satelitem Dynamics Explorer (1981-1991). Fotografování z oběžné dráhy se zpravidla provádí v UV oboru, ve kterém září některé přechody atomů kyslíku. Aurorální ovál může být široký až 5°, vyskytuje se přibližně na 70. stupni a může být různě deformovaný. Jeho intenzita souvisí přímo se sluneční aktivitou. V 90. letech dvacátého století byly pomocí Hubbleova dalekohledu objeveny polární záře na Jupiteru, Saturnu i Uranu. Dnes se na výzkumu polárních září výrazně podílí dvojice spolupracujících sond Wind 1 (1994) a Polar (1996). V roce 2002 startoval již 17. meteorologický satelit NOAA. Síť těchto satelitů poskytuje dnes nejpodrobnější informace o stavu aurorálního oválu, včetně desetistupňové předpovědi aurorální aktivity dostupné online na WWW stránkách NOAA.

Magnetosféra Země.



V 19. století se velmi rozšířila klasifikace polárních září podle barvy do šesti skupin označovaných velkými písmeny A až F.

Polární záře typu A byly celé zelené, typu B zelené s horním červeným okrajem, atd. Tato klasifikace nevypovídala nic o intenzitě a struktuře polárních září a neměla vztah k fyzikálním mechanismům probíhajícím v polárních zářích. Dnes je již zcela zapomenuta a nepoužívá se.
V současnosti jsou nejpoužívanější klasifikace podle intenzity (IBC index), tvaru (Jonesova klasifikace) a index celkové aktivity (NOAA).

IBC index (International Brightness Coefficient) posuzuje polární záře z hlediska intenzity měřené v jednotkách R (rayleigh, 10^6 fotonů dopadajících na 1 cm^2 za jednu sekundu). Polární záře se podle intenzity dělí na 4 skupiny označované římskými číslicemi I až IV. Klasifikaci polárních září z hlediska morfologie zavedl Vallance Jones v roce 1974, a to do devíti základních skupin.

Další klasifikací je index aktivity NOAA (National Oceanic and Atmos-pheric Administration) poskytovaný sítí sedmnácti satelitů. Jde o deseti-stupňovou škálu aurorální aktivity dostupnou online včetně aktuálních snímků severního i jižního aurorálního oválu v UV oboru.

Pravděpodobnost pozorování polární záře je závislá na tzv. Kp-indexu (K-indexu), který je odvozen od fluktuací geomagnetického pole vzhledem k jeho klidovému stavu. Tento index je integrálně počítán přes tříhodinový interval. Ze statistického porovnání četností polárních září a hodnot Kp lze sestavit pravděpodobnostní tabulku, která určuje spodní hranici geomagnetické šířky, na které lze polární záři pozorovat. Vzhledem k tomu, že severní magnetický pól je vůči geografickému posunut o 11° směrem k americkému kontinentu (nachází se na 78,6° s. š. a 70,1° z. d.), jsou Američané a Kanaďané v pozorování Aurory značně zvýhodněni. Pro Prahu (geomagnetická šířka 45,5°) vyplývá, že k pozorování polární záře musí hodnota Kp dosáhnout svého maxima.

Slunce je zdrojem energie pro celou sluneční soustavu. Kromě elektromagnetického záření uniká ze Slunce celá řada částic, které mají díky vysokým teplotám ve vnější koróně rychlosti vyšší než únikové.

Tycho Brahe (1546-1601), provedl první vědecké pozorování polárních září.

Polární záře v horách Skjorndalen v Norsku (18. 9. 2002, 23:55 SEČ).
Foto Jakub Rozehnal, expoziční doba 15 s, clona 2,2, materiál Kodak Gold, 400 ISO.

Tyto částice, zaplavující sluneční soustavu, nazýváme sluneční vítr. Jde zejména o elektrony, protony a menší počet jader těžších prvků. Energie a množství částic slunečního větru úzce souvisí s aktuálním stavem sluneční aktivity. Ta se mění v pravidelných jedenáctiletých cyklech (s výjimkou Maunderova minima – výrazného snížení sluneční aktivity pozorované v letech 1645 až 1715). Sluneční vítr výrazně deformuje magnetosféry planet z původního dipólového pole do charakteristického ohonu na noční straně a typické rázové vlny na denní straně, kde se skokem mění koncentrace a rychlosti částic a hodnota indukce magnetického pole.

V blízkosti Země má sluneční vítr tyto typické parametry: koncentrace desítky částic v jednom krychlovém centimetru, rychlost částic 350 km/s až 700 km/s, energie částic 15 eV až 50 eV, magnetické pole přibližně 20 nT. V průběhu zvýšené sluneční aktivity může dojít při rekonekci slunečních magnetických silokřivek k výronu vysoce energetického oblaku částic se zamrzlým magnetickým polem. Dostane-li se takový oblak do blízkosti Země, vzrostou uvedené klidové parametry mnohonásobně a dojde k výrazným magnetickým bouřím.

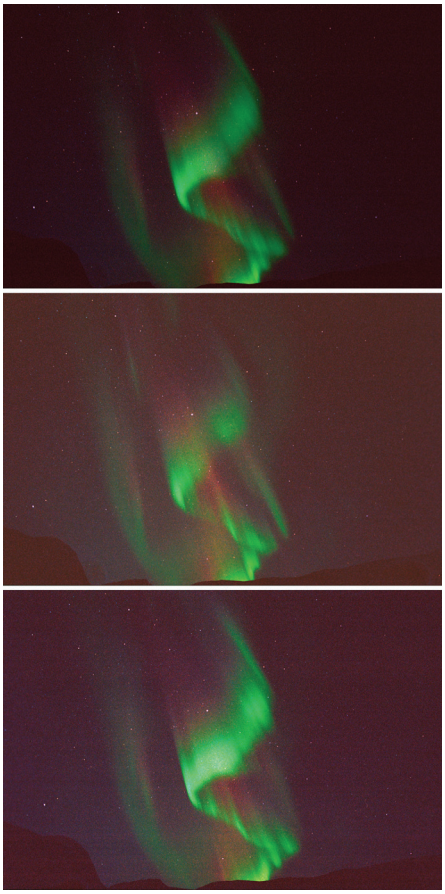
Polární záře s meteorem v horách Skjorndalen v Norsku (19. 9. 2002, 00:21 SEČ). Foto Pavel Břichnáč, digitální fotoaparát Nikon Coolpix 995, ekvivalentní citlivost ISO 400, expozice 12 s. Krátká expozice umožnila vyfotografování jemných podélných vláken v polární záři.

Nabité částice slunečního větru postupně pronikají do magnetosféry Země a formují zde několik výrazných oblastí. V korotující plazmosféře je teplota částic 1 eV, v plazmovém ohonu až 10 keV, koncentrace částic je 0,5 cm^{-3}. Plazmový ohon se táhne až do stonásobku poloměru Země a má tloušťku 20 poloměrů Země. Hraniční vrstva magnetosféry odděluje magnetické pole Země od okolí a má koncentraci částic přibližně 1 cm^{-3}. Částice, dostávající se do vlivu magnetického pole Země, konají rotační pohyby podél silokřivek pole. Typické poloměry rotačního pohybu jsou 200 m pro protony a 10 cm pro elektrony. Protony mohou v důsledku srážek zachytá-

vat elektrony a stát se vodíkovými atomy, na které již magnetické pole Země nemá vliv.

V aurorální oblasti (kolem pólů, zhruba na 70. rovnoběžce) dochází k elektrickému výboji, při kterém se vytvářejí proudové stěny s proudovou hustotou cca 30 μA/m^2. Proudy tečou podél silokřivek magnetického pole Země a to jak směrem z ionosféry, tak směrem do ionosféry. Dodnes nejsou známy všechny mechanismy urychlování nabitých částic podél magnetického pole Země. Může jít o urychlování elektrickými dvojvrstvami, o jevy způsobené rekonekcí magnetických silokřivek (magnetickým zkratem) nebo o další neznámé mechanismy. Při rekonekci vznikají silná lokální pole, která elektrony nasměrují k zemské atmosféře, kde nakonec polární záře vzniká. K maximálnímu urychlení částic dochází ve výškách od 15 000 km do 3 000 km nad zemským povrchem. Některé částice jsou přitom magnetickým polem odraženy zpět, což závisí především na úhlu jejich dopadu, jejich rychlosti a intenzitě magnetického pole. Zjednodušeně však můžeme říci, že čím je částice rychlejší, tím větší má šanci dostat se do atmosféry - proto jsou polární záře způsobeny většinou pouze proudem elektronů, které lze urychlit mnohem snáze než těžší protony.

Děj, který nastává ve chvíli, kdy urychlený elektron vstoupí do atmosféry, je již dobře znám. Polární záře vzniká ve výškách 100 km až 1 000 km, její barvu ovlivňuje zejména hustota atmosféry, která má přímý vliv na intenzitu a frekvenci emitovaného záření.
Nejčastěji pozorovanou barvou je zelená. Valenční elektron v atomech kyslíku je ve výškách pod 400 km, kde množství kyslíku začíná pomalu narůstat, excitován „o dvě hladiny nahoru“. V tomto stavu je schopen setrvat necelou sekundu. Poté elektron přechází o hladinu níže, což způsobuje emisi zeleného fotonu o vlnové délce 557,7 nm. V novém stavu je elektron schopen zůstat podstatně déle, necelé dvě minuty. Pokud během této doby nedojde k interakci atomu s jinou částicí, je vyzářen červený foton o vlnové délce 630 nm nebo 636 nm. Ke vzniku červené polární záře proto dochází ve vyšších vrstvách atmosféry, kde jsou interakce excitovaných atomů méně pravděpodobné a pozorování červené polární záře je proto méně obvyklé. Další možností vzniku červené barvy je excitace molekulárního dusíku ve výškách kolem 90 km nad povrchem. K vybuzení elektronu je však zapotřebí přibližně tisícinásobně větší energie, než u atomu kyslíku. Při návratu elektronu na původní hladinu může být emitováno několik odstínů červené.



Horní obrázek vznikl složením dolních dvou, čímž byla částečně potlačena jeho zrnitost. Snímky byly pořízeny v rozmezí 40 s dne 19. 9. 2002 v 0:40 SEČ v horách Skjorndalen (Norsko). Expoziční doba 30 s, clona 2,2, materiál Kodak Gold, 400 ISO. Foto Jakub Rozehnal.

Kristian Birkeland (1873–1917), autor prvních teorií o polárních zářích.

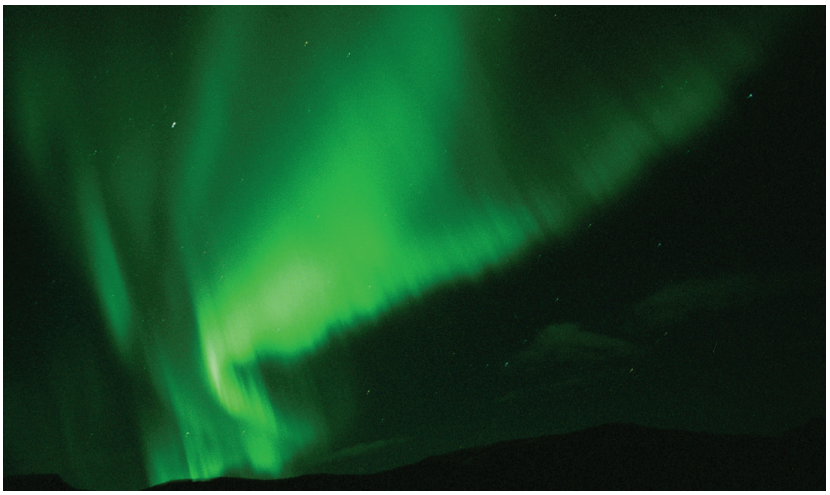
Čtenáři, kteří měli to štěstí a pozorovali polární záři v našich zeměpisných šířkách, měli možnost spatřit především červenou barvu. To souvisí zejména s faktem, že atmosféra je buzena k záření velice energickými částicemi, které stlačují aurorální ovál k nižším geografickým šířkám a pronikají do menších výšek nad povrchem, kde září právě molekulární dusík.

Modrá nebo fialová barva vzniká ve výškách kolem 1 000 km, kde dochází k excitaci iontů N_2^+, vzniklých ionizací molekul dusíku slunečním ultrafialovým zářením. A konečně, je-li molekula dusíku zasažena velmi energetickým elektronem, může být emitováno slabě růžové světlo.

Spektrum polární záře je tedy spektrem emisním. Kromě zmíněných čar lze tu a tam detekovat i čáry Hα a Hβ. Ty vznikají při rekombinaci protonů, obsažených ve slunečním větru, s volnými elektrony ve vysokých vrstvách atmosféry. Na rozdíl od ostatních jevů má tedy „protonová“ polární záře původ přímo v částicích slunečního větru. Vzájemnou kombinací vzniklých barev pak vznikají barvy další (například žlutá kombinací zelené a červené).

Zelená barva bývá ovšem často dominantní a všechny ostatní barvy snadno přezáří. My sami jsme na expedici pozorovali zejména zelené záře, místy s načervenalým nádechem. Chceme-li proto opravdu ocenit krásu barevných světel, měli bychom si vzít na pomoc fotografický film. Také my jsme po prvních okamžicích úžasu pod roztančenou světélkující oblohou začali exponovat jeden snímek za druhým.

Polární záře u Tromso v Norsku (17. 9. 2002, 23:35 SEČ). Foto Jakub Rozehnal, expoziční doba 15 s, materiál EPL 5075, 400 ISO.



Co říci závěrem? Když jsme 15. září 2002 dorazili do severské Alty, norského městečka na 70. rovnoběžce, obloha se zatáhla a začalo poprchávat. Pršelo celý další den a také v přestávkách mezi průtržemi se všude válely neproniknutelné mraky a hustá mlha. Na náladě to určitě nikomu nepřidalo – jeli jsme sem takovou dálku a teď tohle? Naštěstí se nad námi počasí slitovalo a již 16. září jsme dírou v mra-

cích měli možnost spatřit polární záři. Ale protože ji však předtím nikdo z nás neviděl, panovaly v našem týmu dohady, zdali se nejedná pouze o odlesky zapadajícího Slunce. Teprve večer 17. září nás nikoho nenechal na pochybách.

Jak známo, více než 95 % vesmíru je tvořeno plazmatem. Setkáváme se s ním téměř na každém kroku, byť si jeho všudypřítomnost neuvědomujeme. Naše expedice byla zejména vedena touhou spatřit to, čemu se v našich zaměstnáních věnujeme, co učíme a co nás přitahuje. A také to, o čem píšeme. A to se nám podařilo tak, jak nikdo ani ve skrytu duše nedoufal.

■ *Jakub Rozehnal, Petr Kulhánek*

Hannes Alfvén (1908–1995), otec magnetohydrodymamiky.

Polární záře v horách Skjorndalen v Norsku (19. 9. 2002 22:30 SEČ). Foto Jakub Rozehnal, exp. 40 s, clona 2,2, Kodak EPL 5075, 400 ISO.

Kapitola II.
VZDÁLENÝ VESMÍR

Proč je v noci tma? Kdo ví, možná proto, abychom se v noci mohli dívat na hvězdy a poznávat vesmír. Čím dále se díváme, tím více nám splývají drobné jednotlivosti a z nebe vystupují věci, které bychom v menší vzdálenosti nepostřehli pro jejich rozlehlost. Hory na horizontu nám neukazují stromy, ale z tvaru a barvy jejich úbočí můžeme usoudit, že jsou zalesněné. Při podobných úvahách však musíme být opatrní. Mnohdy nevědomky předpokládáme něco, co v dálce při horizontu platit nemusí. Mléčná dráha vypadá na našem nebi úplně jinak než ostatní galaxie. Tak sice odlišíme pohled zevnitř od pohledu zvnějšku, ale v naší mysli jsme se naučili vidět náš hvězdný ostrov velmi podobně jako galaxii v Andromedě.

Díky astronomii máme možnost si uvědomit, že vnitřní a vnější je dáno pouze způsobem vnímání světa. Neutronové hvězdy a černé díry jsou i dnes exotickými objekty, jako před půl stoletím, ale vedle posledních objevů se dostávají jaksi na druhou kolej. Astronomům se už podařilo vyfotografovat samotnou neutronovou hvězdu, v centrech galaxií už umíme rozpoznat projevy obrovských černých děr. Zatím se stále potvrzuje naše víra v poznatelnost zákonitostí, jimiž se vesmír řídí - i když právě pro tuto poznatelnost jsme zatím žádný zákon neobjevili. Astronomie je už nejméně od Descartových dob stavěna jako deterministická věda. Je podivuhodné, že lze velmi podobné jevy nalézat na nejrůznějších škálách. Jen je potřeba si vždy uvědomit, která vlastnost je tou podstatnou, abychom jev pochopili a pokusili se ho popsat. Magnetická bublina okolo velké galaxie M82 či v kupě galaxií Abell 2597 je ve srovnání s týmž jevem známým ze sluneční soustavy jen posun o několik řádů v rozměrové škále. Ve snaze pochopit vesmír jde však o důležitý objev. Ukazuje se, že s velmi podobným způsobem popisu se můžeme dívat na naše bezprostřední planetární okolí a zároveň na objekty ve velkých vzdálenostech. Skrytá, jenom

gravitačně se projevující hmota je již téměř 70 let klasickým astronomickým problémem. Pomocí největšího radioteleskopu na světě se podařilo nalézt galaxii složenou převážně z této neviditelné hmoty. Podle dnes všeobecně přijímané interpretace klasických kosmologických modelů jsou nám objekty a jevy přístupné jen ve svých minulých obrazech. Čím dále se díváme, tím vidíme hlouběji do minulosti. Právě začínající století si usmyslelo dohlédnout až na konec vesmíru. Velké dalekohledy, které by toho prý měly být schopny, se již projektují a některé dokonce i staví. Zatím si však nedovedeme představit, jak by takový „konec" měl vypadat a zda jej poznáme, až k němu dohlédneme. Podle našich dosavadních znalostí by konec očekávaný ve velké vzdálenosti měl být viditelným začátkem v čase. Při rozšiřování našich obzorů nastoupila na kosmologickou scénu topologie, která nabízí vesmír uzavřít do globálního pohledu. V minulosti se tento postup již mnohokrát opakoval. Musíme mít vesmír před sebou ve své mysli celý, abychom mu porozuměli? Nestačila by jen nějaká část, když stejná fyzika podle naší víry platí všude?

Astronomie touto křehkou nabídkou neustále znovu kladených základních otázek přiznává, že v pochopení podstaty světa není o moc dál, než v době Periklově, kdy byla spolu s matematikou, geometrií a hudbou základním pilířem vědy. Oproti starověkým astronomům dnes vidíme z vesmíru mnohem víc a je to nepředstavitelně nádherná galerie. Pokud ale chceme vědět, zda je vesmír konečný či nekonečný a co je vlastně zač, musíme v sobě nalézt odvahu v jeho poznávání pokračovat.

Ivan Havlíček

Zajímavá neutronová hvězda

Neutronová hvězda - *hvězda, jejíž jádro je složeno převážně z neutronů. Tlak degenerovaných neutronů odolává gravitaci. Extrémní hustota při malých rozměrech (do 50 km). Pole běžných neutronových hvězd do 10^8 T. Existence neutronových hvězdy byla teoreticky předpovězena ve 30. létech 20. století.*

Pulsar - *neutronová hvězda, jejíž magnetická a rotační osa nemají shodný směr. Zářící oblasti v magnetických pólech hvězdy díky rotaci vytvářejí pro pozorovatele majákovým efektem pulsy, zpravidla rádiové, výjimečně až rentgenové. První pulsar byl objeven roku 1967.*

Magnetar - *neutronová hvězda s mimořádně silným magnetickým polem o intenzitě až 10^{12} T. Kůra je již nestabilní, praská, dochází k pravidelným magnetotřesením doprovázeným záblesky v oboru měkkého záření gama. První magnetar byl spolehlivě detekován v roce 1998.*

SGR - *Soft Gama Repeater - záblesková zdroje v měkkém gama oboru, jejichž původcem jsou magnetary. První SGR byl objeven v roce 1979.*

XMM-Newton - *X ray Multi Mirror, rentgenový dalekohled na oběžné dráze (Evropská rentgenová observatoř), startoval v prosinci roku 1999.*

Neutronové hvězdy jsou extrémně husté, stabilní objekty v hydrostatické rovnováze, které mohou vzniknout jako jedno ze závěrečných stadií hvězdného vývoje. Neutronové hvězdy vznikají běžně zhroucením velmi hmotné hvězdy při výbuchu supernovy. Počáteční hmotnost takové hvězdy se pohybuje v rozmezí $4 \div 10\ M_S$. Je-li pozůstatek po supernově dostatečně hmotný, vznikne objekt s průměrnou hustotou cca 10^{14} kg/m^3 a s poloměrem okolo 10 km. Limitní hmotnost stability takové neutronové hvězdy se dnes pohybuje podle různých modelů mezi $1{,}4 \div 2{,}4\ M_S$. V jádru neutronové hvězdy se předpokládaná hustota pohybuje nad hodnotou 10^{17} kg/m^3, což je vyšší hustota než v atomovém jádru. Jedná se vlastně o gigantické atomové jádro s 10^{57} nukleony, které drží pohromadě gravitační silou. Minimální teoretická hmotnost by neměla být menší než $0{,}1\ M_S$, v méně hmotných objektech není dostatečný tlak, který by zabránil rozpadu neutronů. Neutronová hvězda by měla mít magnetické pole mimořádně vysoké, řádu 10^8 T.

Struktura neutronové hvězdy

Postupujeme-li neutronovou hvězdou směrem od povrchu k jádru, lze postupně rozlišit několik vrstev s různou strukturou:

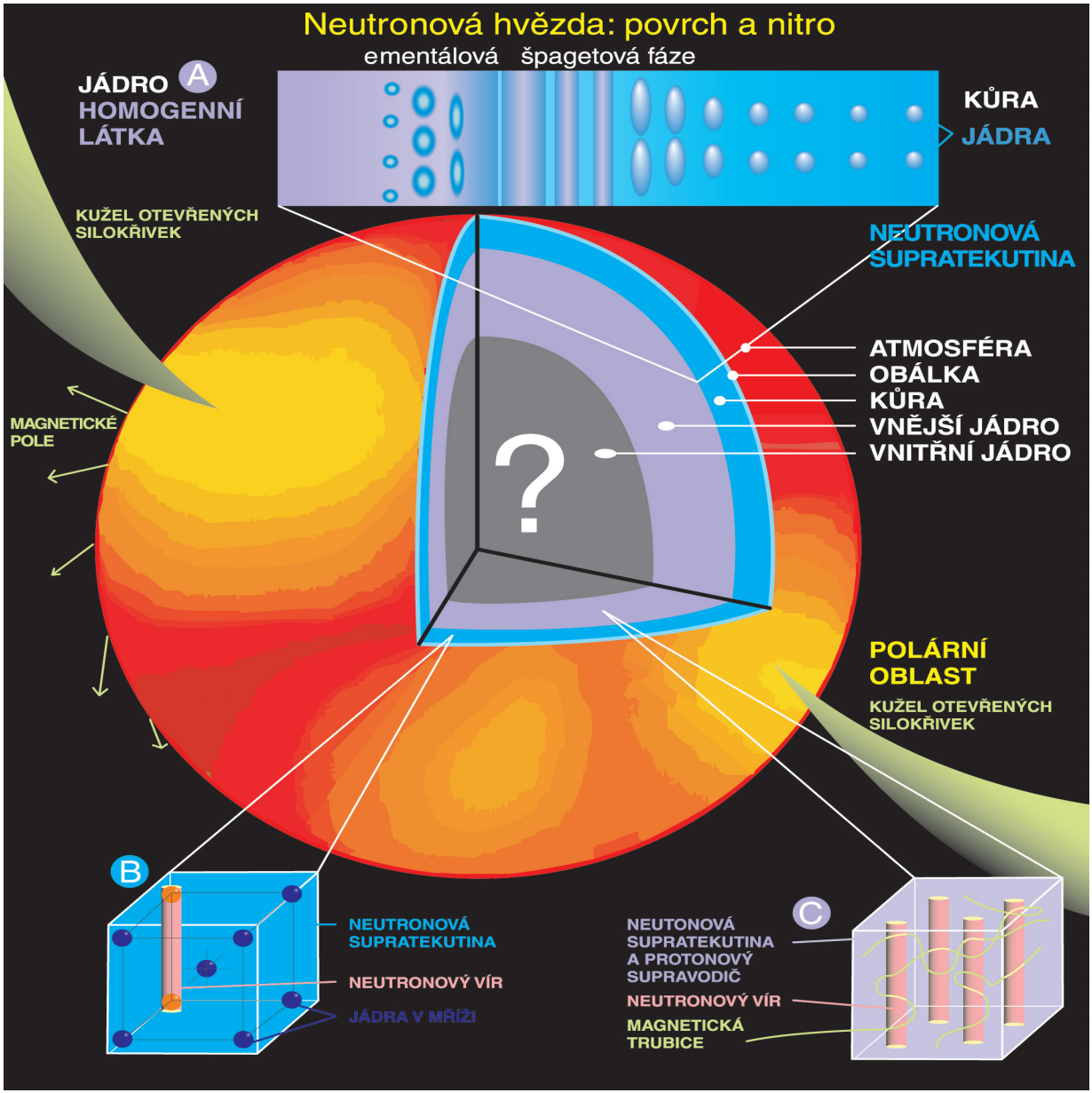
Atmosféra o tloušťce řádově cm, hustota je zde menší než 10^6 kg/m^3, lze zde nalézt povětšinou železná jádra, popřípadě i lehčí prvky. Povrchová gravitace je o 11 řádů vyšší než na Zemi.

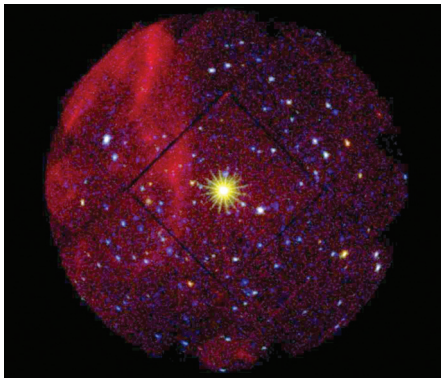
Vnější kůra, silná několik set metrů, kde dochází při hustotě nad 10^6 kg/m^3 k elektronové degeneraci.

Vnitřní kůra neutronové suprakapaliny o tloušťce cca 1 km. Při hustotách nad 4×10^{11} kg/m^3 vznikají neutronové kapky, které se postupně slévají ve větší oblasti, neutronová vlákna, a posléze v hmotu s homogenní strukturou. Tato přechodová vrstva končí s hustotou na vnitřní straně cca 10^{12} kg/m^3.

Jádro hvězdy o hustotě 10^{14} kg/m^3. Tato oblast je propočítána nejméně přesně. Předpokládá se, že hustota v centru dosahuje hodnot i nad 10^{18} kg/m^3, kdy zde vznikají a mohou i převládat jiné částice – mezony, pionový kondenzát, Λ_0 a kvark-gluonové plasma.

Neutronové hvězdy jsou nejlépe prozkoumány, co se týče hmotnosti,


Neutronová hvězda: povrch a nitro
ementálová
špagetová fáze
JÁDRO
HOMOGENNÍ
LÁTKA
A
KŮRA
JÁDRA
KUŽEL OTEVŘENÝCH
SILOKŘIVEK
NEUTRONOVÁ
SUPRATEKUTINA
ATMOSFÉRA
OBÁLKA
KŮRA
VNĚJŠÍ JÁDRO
VNITŘNÍ JÁDRO
?
MAGNETICKÉ
POLE
POLÁRNÍ
OBLAST
KUŽEL OTEVŘENÝCH
SILOKŘIVEK
B
NEUTRONOVÁ
SUPRATEKUTINA
NEUTRONOVÝ VÍR
JÁDRA V MŘÍŽI
C
NEUTONOVÁ
SUPRATEKUTINA
A PROTONOVÝ
SUPRAVODIČ
NEUTRONOVÝ VÍR
MAGNETICKÁ
TRUBICE



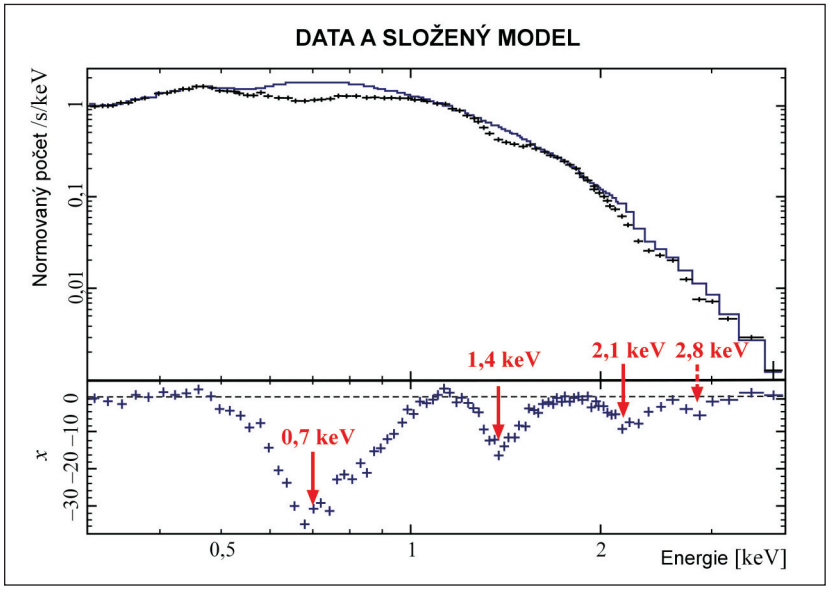
Fotografie neutronové hvězdy 1E1207.4-5209 pořízená rentgenovou observatoří XMM-Newton.

jako součásti těsných dvojhvězd a, co se týče dynamických projevů, jako pulsary. Fyzikální terminologie vycházející z určení limitních parametrů je však občas trochu zavádějící, jelikož o těchto objektech byly donedávna známy pouze dva výše uvedené sekundární projevy – pohyb druhé složky těsné dvojhvězdy a radioastronomické měření pulzů. V několika málo případech bylo souběžně pozorováno i záření v X emisi (například milisekundový pulzar v Krabí mlhovině).

Neutronová hvězda 1E1207.4–5209

11. června 2003 bylo oznámeno měření magnetického pole mladé neutronové hvězdy 1E1207.4–5209 použitím kamery EPIC na palubě rentgenové observatoře XMM-Newton. Tým profesora Giovanni Bignamiho z University of Pavia, astronomové z Laboratoří CESR v Toulouse a v IASF Institutu v Milánu spočítali hodnotu magnetického pole hvězdy na 8×10^6 T, což je 50 až 100 krát méně, než bylo očekáváno z teoretických předpovědí uvedených výše. Princip měření spočíval v analýze spektrogramu pořízeného za celkovou dobu 72 hodin a interpretaci absorp-čních čar na energiích 0,7 keV, 1,4 keV a 2,1 keV, a čtvrté slabě rozeznatelné 2,8 keV. Pohyb těchto absorpčních čar ve spektru kopíruje rotaci hvězdy. Nabízí se interpretace, že jde o základní rys rezonanční cyklotronové absorpce, podobně jako absorpce elektronů. Jde o historicky první přímé měření magnetického pole samostatné neutronové hvězdy. Na jeho základě bude možno upřesnit teoretické modely a teorie vysvětlující stavbu neutronových hvězd.

Spektrogram pořízený observatoří XMM-Newton.



■ *Ivan Havlíček*

Černá díra v centru Galaxie

Neudrží-li gravitaci gradient tlaku látky (normální hvězda), gradient tlaku degenerovaného elektronového plynu (bílý trpaslík) ani gradient tlaku neutronů (neutronová hvězda), nastává nezadržitelný kolaps hvězdy do černé díry.

Pojmenování černá díra pochází od J. A. Wheelera a je až z roku 1967. Samotnou myšlenku existence tělesa, ze kterého by nemělo unikat světlo poprvé zformuloval John Michell již v roce 1783 a hodnotu Schwarzschildova poloměru z newtonovské mechaniky odvodil Laplace v roce 1798. Černé díry jsou zkolabované objekty, které nejsou schopny odolat gravitaci. Po kolapsu si černá díra zachová tří základní veličiny: hmotnost, moment hybnosti a elektromagnetický náboj (tzv. „no hair“ teorém). V jejich okolí je silně deformovaná geometrie prostoročasu. Z oblasti pod tzv. Schwarzschildovým poloměrem $R_g = 2\,GM/c^2$ nemůže uniknout ani světlo.

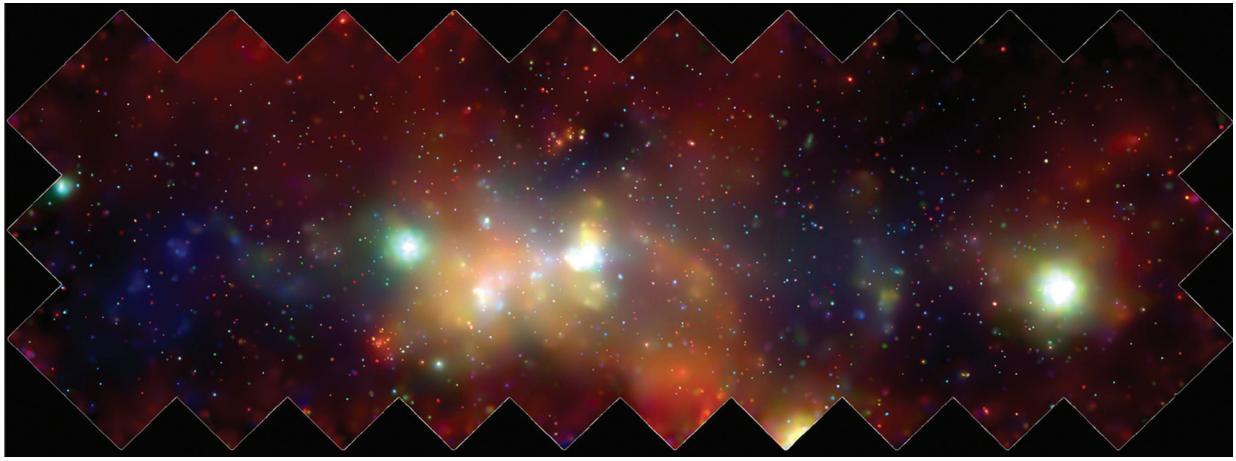
Již v roce 1974 byl objeven Brucem Balickem a Bobem Brownem radiový a infračervený zdroj v centru naší Galaxie, nazvaný Sgr A. Objekt byl pozorován s pomocí radiointerferometrické soustavy VLBA a Keckova dalekohledu (Andrea Ghez, University of California). Zjistilo se, že je obklopen hustou hvězdokupou, z rotace hvězd vyplynula hmotnost objektu cca $2{,}5\times10^6\ M_S$, horizont událostí se odhaduje na 1/20 AU. Musí tedy jít o černou díru.

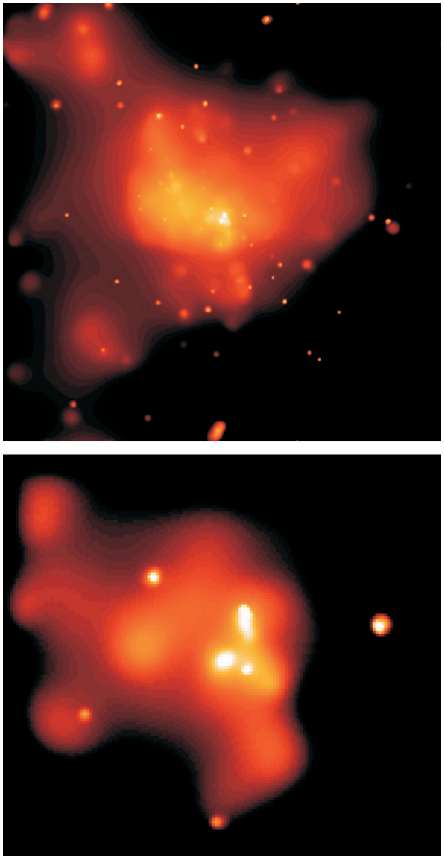
Schwarzschildova černá díra - *má nenulovou hmotnost, nulový moment hybnosti a elektrický náboj. Každý zkolabovaný sféricky symetrický objekt se stane Schwarzschildovou černou dírou.*

Kerrova černá díra - *má nenulovou hmotnost a moment hybnosti. Jde o výsledek kolapsu rotujících objektů, typickým jevem je existence ergosféry – oblasti mezi statickou mezí a Schwarzschildovým poloměrem.*

Reisnerova Nordströmova černá díra - *nejobecnější možná teoretická forma černé díry s nenulovým nábojem. V přírodě se pravděpodobně nevyskytuje.*

Snímek centra Galaxie pořízený sondou Chandra. Úhlové rozměry snímku jsou 400×900 ly. Přiřazená barva znázorňuje energii v kódování: červená – nízká, modrá – vysoká. NASA, UMass, D. Wang, 2002.





Nahoře: Sgr A, X obor, NASA, G. Garmire, 2001;
Dole: Sgr A, detail středu, NASA, MIT, 2000.*

V posledních letech (od roku 2000) se podařilo získat několik nových informací o středu naší Galaxie pomocí rentgenové sondy Chandra. Následující snímky ukazují výsledky dvou pozorování, díky kterým bylo zjištěno, že objekt Sgr A tvoří vlastně dva objekty. První obrázek ukazuje supernovu, která byla pojmenována Sgr A East. Snímek byl pořízen 1. 2. 2001 a je na něm zobrazena plocha o šířce 8,4'. Druhý snímek ukazuje detail středu, kde můžeme vidět samotné centrum Galaxie – obří černou díru pojmenovanou Sgr A*. Snímek je ze 14. 1. 2000 a je na něm zobrazena plocha o šířce 1,4'. Na obou snímcích je zobrazena intenzita rentgenového záření.

Několik vědeckých skupin se snažilo zjistit, kolik „váží“ samotná obří (supermasivní) černá díra. Dnes jsou známé dvě metody. K první je potřeba snímek s velikým rozlišením, ze kterého se spočítá hmotnost černé díry díky množství okolních objektů. Množství objektů se usuzuje ze svítivosti celé Galaxie. Druhý způsob „vážení“ vychází z pozorování oběhu hvězd blízkých středu Galaxie. Pro toto měření byly vybrány hvězdy s oběhem 15,2 let (jejich vzdálenost od středu je 17 světelných hodin). Z několikaletého pozorování byla spočítána hmotnost na $(3{,}7\pm1{,}5)\times10^6\ M_S$.

K určení polohy středu Galaxie lze také použít dvě metody. První vychází také z pohybu blízkých hvězd a druhá vychází z hledání zdroje rentgenových paprsků. Z obou těchto měření vychází, že centrum naší Galaxie se shoduje s radiovým zdrojem Sgr A, což je známo už déle.

■ *Karel Řezáč*

Černé díry střední hmotnosti

V polovině září roku 2002 oznámily dva týmy vědců objev nové skupiny černých děr – černé díry střední hmotnosti. Tyto objekty byly nalezeny v jádrech kulových hvězdokup, objektů, které se tvořily zároveň s galaxiemi, a jsou tak jedněmi z nejstarších objektů ve vesmíru.

Dosud jsme znali jen dva typy černých děr – černé díry s hmotnostmi v intervalu od desetin po několikanásobek hmotnosti Slunce (M_S) a obří černé díry v jádrech galaxií, jejichž hmotnost se pohybuje v řádech milionů M_S.

O existenci černých děr „střední třídy“ svědčí měření rychlostí hvězd v blízkosti jader kulových hvězdokup. Taková měření provedly týmy vedené Van der Marelem (STScI) a Micha-elem Richem (University of California) s pomocí Hubblova vesmírného dalekohledu (HST).

První tým zkoumal kulovou hvězdokupu M15 v souhvězdí Pegase. Tato hvězdokupa, která patří k těm nejhustším v naší Galaxii, se nachází ve vzdálenosti necelých 33 000 světelných let. Tým se zaměřil na oblast v blízkosti jádra hvězdokupy, kde zkoumal změny přírůstku oběžné rychlosti hvězd směrem k centru. Ty svědčily o více méně Keplerovském pohybu, který je důsledkem přítomnosti velmi hmotného centrálního tělesa. Tím je právě černá díra o hmotnosti přibližně 4 000 M_S.

Druhý tým se zaměřil na obří kulovou hvězdokupu G1, která se nachází mimo naši Galaxii – jejím domovem je galaxie M31 v Andromedě, ležící ve vzdálenosti 3 milionů světelných let. Tato kulová hvězdokupa je tvořena až deseti miliony hvězd. Vzhledem k její velké vzdálenosti se ani s pomocí HST nepodařilo rozlišit jednotlivé hvězdy. Měřeny byly proto oběžné rychlosti jednotlivých oblastí v blízkosti centra G1, z kterých plyne přítomnost černé díry o hmotnosti kolem 20 000 M_S.

Prvotní (primordiální) černé díry *- tyto černé díry by měly mít nepatrné rozměry elementárních částic a mohly vznikat v raných fázích vývoje Vesmíru. Jestliže existují, měly by díky Hawkingovu vypa-řování intenzivně zářit. Pozorované množství záření ve vesmíru znamená, že těchto objektů nemůže být více než 300 v krychlovém světelném roku. Pozorovat takový objekt by bylo možné jen v bezprostřední blízkosti (sluneční soustavě).*

Snímky kulových hvězdokup M15 a G1, pořízené Hubbleovým kosmickým dalekohledem.

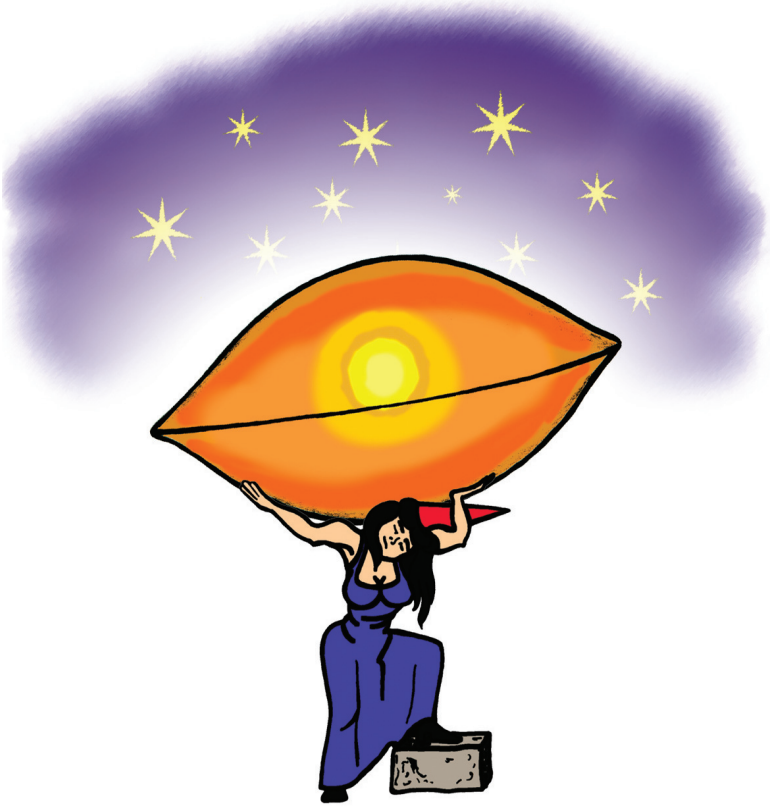
Hvězdné černé díry - *tyto černé díry vznikly jako závěrečné fáze hvězdného vývoje a jejich hmotnosti jsou několikanásobkem hmotnosti Slunce. Objekty tohoto typu se v naší Galaxii často pozorují.*

Galaktické černé díry - *černé díry s hmotností srovnatelnou s hmotností galaxií nebo jejich jader. Tvoří jádra některých aktivních galaxií, pravděpodobně i naší vlastní Galaxie a jádra kvasarů. Pozorována je řada objektů tohoto typu.*

Stáří hvězdokup M15 a G1 je odhadováno na 12 respektive 10 miliard let. Vzhledem k tomu, že máme mnoho důvodů domnívat se, že černé díry se v jejich jádrech vytvořily již v období jejich vzniku nebo bezprostředně po něm, máme zde zřejmě zároveň ukázku těch nejstarších černých děr ve vesmíru.

Objev těchto těles může vnést nové světlo do problematiky počátečního vývoje galaxií – zatímco vznik černých děr z osamocených hvězd nebo dvojhvězd o počátečních hmotnostech větších než 30 M_S je dobře popsán, okolo původu masivních černých děr v jádrech galaxií panují mnohé nejasnosti.

■ *Jakub Rozehnal*



Magnetické bubliny v kupách galaxií

Termín magnetická bublina se běžně používá v souvislosti s magnetosférami planet Sluneční soustavy nebo s magnetosférou Slunce samotného. Následující informace jsou ale o obřích magnetických bublinách pozorovaných v posledních třech letech v cizích galaxiích, konkrétně například v galaxii M82 a v kupě galaxií Abell 2597.

V roce 2000 byla objevena obří magnetická bublina (v průměru přes 3 000 světelných let) v galaxii M82. Tým astronomů, který pozoroval magnetickou strukturu galaxie M82, byl velmi překvapen. Pravděpodobným vysvětlením této bubliny jsou toky mimořádně energetických částic, které vytlačují magnetické pole směrem ven z galaxie. Tyto toky jsou tvořené mezihvězdným plynem pocházejícím z hvězd a supernov. Více je poznat z následujícího obrázku, kde červené a modré šipky ukazují pozorované směry magnetického pole, bílé šipky zobrazují směr toku částic z centra galaxie a čárkovaná čára tvoří předpokládaný obrys magnetické bubliny.

K pozorování M82 bylo použito radioteleskopu o průměru 15 m, umístěného na Havaji a pojmenovaného po Jamesi Clerku Maxwellovi (JCMT). Tento dalekohled je určen k pozorování záření o vlnové délce kolem 1 mm. Je vybaven kamerou SCUBA (Submillimetre Common User Bolometer Array), která byla postavena královskou hvězdárnou v Edinburghu. Tato kamera užívá detektory chlazené na 0,1 K a měří velmi malé rozdíly v tepelném záření vycházejícím z malých částic mezihvězdného prachu. SCUBA pomocí polarimetru detekuje obě na sebe kolmé roviny polarizace, z kterých je každé záření složeno. Polarimetr má velmi jemnou mřížku s roztečí 6 μm, která propouští jen jednu rovinu záření, a dvojlomný křemenný krystal, který otáčí rovinu polarizace. Výsledkem je obraz, který se každých 30 sekund mírně změní, a může se z něho analyzovat směr magnetického pole.

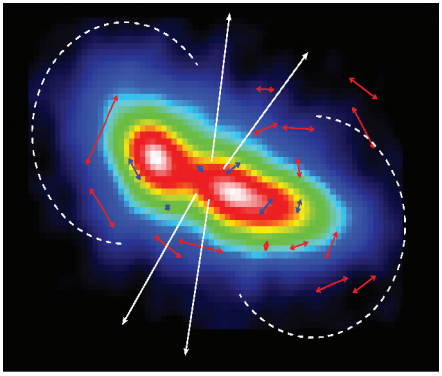
Kupa Abell 2597 je tvořena stovkami galaxií ponořenými v ohromném mraku horkého plynu (teplota cca $10^7 \div 10^8$ K), který rent-genově září. Na rentgenovém snímku z observatoře Chandra je vidět horký plyn v centrálních oblastech této kupy a dvě velké dutiny. Jedna dutina se nachází vpravo dole od středu a druhá vlevo nahoře. Napříč měří asi 60 000 světelných let, což je téměř stejně jako je velikost naší Galaxie.

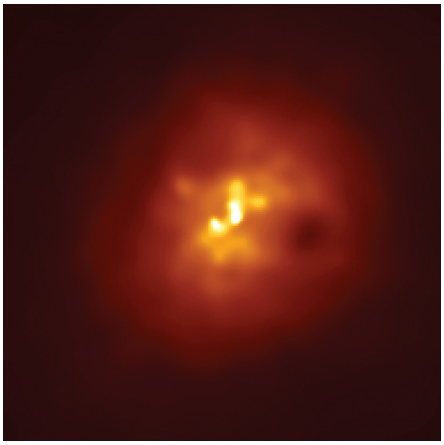
JCMT - *James Clerk Maxwell Telescope, dalekohled na hoře Mauna Kea na Havaji, na který byla v roce 1998 nainstalována kamera SCUBA.*

SCUBA - *Submillimetre Common User Bolometer Array, nejlepší přístroj na světě k pozorování záření o vlnové délce okolo 1 mm. V budoucnu by ho měla překonat soustava radioteleskopů ALMA, která se staví v chilské poušti Atacama.*

Chandra - *družicová observatoř v rentgenovém oboru vypuštěná v roce 1999.*

Obraz záření z galaxie M82 zpracovaný z radiového obrazu o vlnové délce 0,45 mm a polarizace na vlnové délce 0,85 mm. JCMT, Hawai, rok 2003.





Kupa galaxií Abell 2597, v pravé části je patrná magnetická bublina.

Tyto dutiny jsou pravděpodobně 100 miliónů let staré pozůstatky souvisící s aktivitou velmi hmotné černé díry v jádře kupy. Astronomové předpokládají, že dutiny jsou tvořeny magnetickým polem a horkým plynem vysoce energetických částic – jinak by se již dávno samy pod tlakem okolního plynu zhroutily. Tyto dutiny se vzdalují od místa svého vzniku podobně jako bublinky ve sklenici sodovky stoupají směrem vzhůru. Magnetické bubliny mohou nepřímo přispět k tvorbě nových hvězd v kupě. Na své cestě ochlazují okolní hmotu, která padá do černé díry zodpovědné za vznik bubliny. Plyn padající do černé díry září v radiovém oboru a může za určitých podmínek spustit mechanismus tvorby nových hvězd. Tento proces zřejmě probíhá během života galaktické kupy Abell 2597 několikrát a také se asi děje i v ostatních kupách galaxií. Z toho se dá usoudit, že magnetické síly mohly mít rozhodující vliv při vytváření vesmírných struktur v minulosti, kdy vesmír byl menší a záření bylo mnohem silnější.

■ *Lukáš Kupka*

Kupy galaxií - *největší gravitačně vázané objekty ve vesmíru tvořené třemi hlavními složkami: stovkami galaxií obsahujícími hvězdy, plyny a prach, obrovskými mraky horkých plynů o teplotě 30 až 100 miliónů kelvinů, které jsou neviditelné optickými dalekohledy a temnou hmotou zatím neznámé povahy.*

Galaxie M82 - *11 milionů světelných let vzdálená galaxie, která je tvořena asi padesátkrát větším počtem hvězd, než je běžné.*

Abell 2597 - *kupa galaxií, vzdálená více než 10^{12} světelných let od Země.*

Temná hmota ve vesmíru

Z čeho je tvořena většina hmoty ve vesmíru? Odpověď na tuto prostě znějící otázku je předmětem jedné z největších záhad, kterou se zabývá astrofyzika, kosmologie a fyzika elementárních částic. Za použití běžných astronomických metod je možné pozorovat zářící hmotu, zejména ve formě hvězd, které prozrazují svou přítomnost vyzařováním světla. Jinou možností je pozorování gravitačních projevů hmoty systémů, jakými jsou galaxie a jejich kupy, z jejich dynamiky pohybu. Tímto způsobem lze dojít k obrovskému nesouladu v určení hmotnosti. Za předpokladu platnosti známých zákonů gravitace docházíme k závěru, že zde existuje velké množství nezářící „temné hmoty". Tento termín zavedl Fritz Zwicky (1898-1974) roku 1933 při zkoumání dynamiky kupy galaxií ve Vlasech Bereniky.

Fyzikální vlastnosti nám dosud neznámé temné hmoty mohou být vymezeny některými omezeními astrofyzikálního a kosmologického charakteru. Z těchto omezení vyplývá, že baryonová hmota, jejímiž hlavními konstituenty jsou protony, neutrony a celé atomy (vodík, helium a těžší prvky), se podílí na celkovém množství temné hmoty pouze v menší míře. Nejpopulárnějším vysvětlením je takzvaná částicová temná hmota (PDM – Particle Dark Matter), pocházejícím z roku 1973, kdy se začalo uvažovat, že tuto roli mohou hrát neutrina. I když nedávné experimenty naznačují, že neutrina mají nenulovou klidovou hmotnost, zdá se nemožné, aby veškerá temná hmota byla tvořena právě jimi. Fyzikové jsou tedy nuceni uvažovat dosud neznámé částice, které předpovídají některé nové teorie a které by mohly tvořit temnou hmotu.

CDM - *Cold Dark Matter, chladná temná hmota.*

HDM - *Hot Dark Matter, horká temná hmota.*

LHC - *Large Hadron Collider, urychlovač budovaný v komplexu laboratoří CERN. Uvedení do provozu se předpokládá roku 2007.*

MACHO - *Massive Astrophysical Compact Halo Objects, hmotné astrofyzikální objekty v galaktickém halu.*

MOND - *Modified Newtonian Dynamics, modifikovaná Newtonovská dynamika*

PDM - *Particle Dark Matter, částicová temná hmota.*

WIMP - *Weakly Interacting Massive Particle, slabě interagující hmotné částice.*

Důvody k představě o temné hmotě

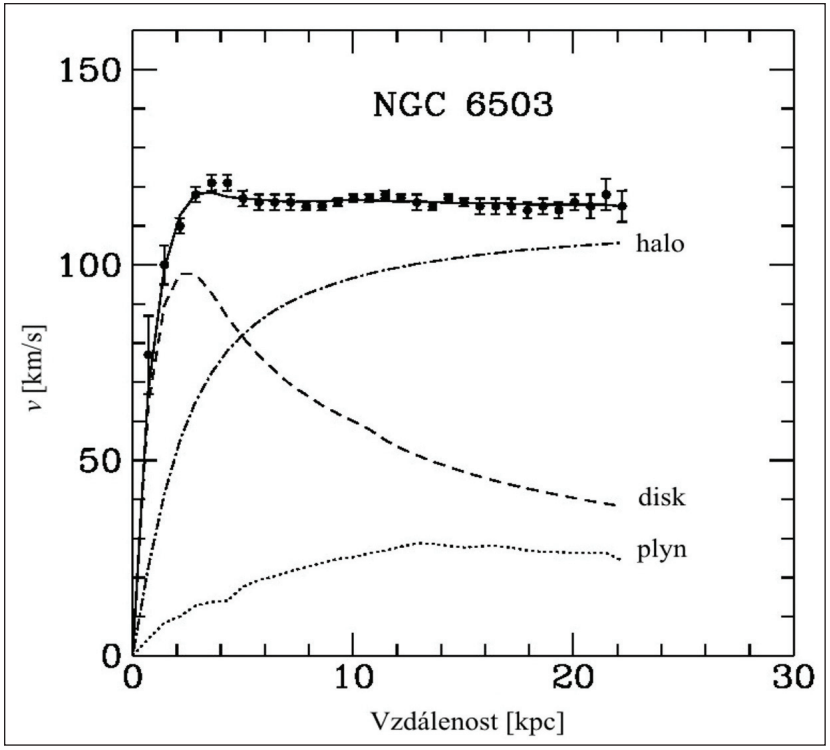
Rotační charakteristiky spirálních galaxií

Asi nejpádnějším argumentem pro existenci temné hmoty jsou rotační charakteristiky spirálních galaxií. Tyto systémy se sestávají z centrálního kulového podsystému a z relativně tenkého disku. Zde je možné měřit oběžnou rychlost jako funkci vzdálenosti od centra galaxie využitím Dopplerova posuvu jednotlivých spektrálních čar. Tato měření je možné provádět v radiovém oboru na vlnové délce 21 cm, kterou vyzařuje neutrální vodík. Takto lze získat rotační charakteristiky i pro mnohem větší vzdálenosti od centra galaxie než v oboru optickém.

V příkladě na obrázku je vidět, že orbitální rychlost od centra roste až na hodnotu zhruba 100 km/s, kde zůstává téměř konstantní až do nejvzdálenějších měřitelných poloh. Toto chování je neočekávané, neboť plošná svítivost klesá se vzdáleností od středu exponenciálně. Odtud vyplývá, že většina hmoty ve formě zářících hvězd je soustředěna právě v kulovém podsystému poblíž centra galaxie. Odtud by se dalo očekávat keplerovské otáčení analogické jako v případě planet obíhajících v naší sluneční soustavě kolem Slunce.

Nesoulad mezi očekávanými a naměřenými křivkami je připisován právě gravitačnímu působení temné hmoty. Existuje mnoho argumentů pro představu, že tato hmota není soustředěna pouze v galaktickém disku, nýbrž že kulový podsystém i celý galaktický disk jsou „ponořeny“ do obrovského hala tvořeného temnou hmotou.

Plato oběžné rychlosti naší galaxie je zhruba 220 km/s, čemuž podle teoretických modelů hala ve slunečním okolí odpovídá 300 MeV temné hmoty na cm^3 (1 atom vodíku na 3 cm^3).



Rotační křivky galaxie NGC 6503. Body jsou vyznačeny naměřené rotační křivky vodíku H I. Křivka označená „disk“ by odpovídala rotaci galaxie za předpokladu, že hmota v ní obsažená je pouze pozorovaná zářící hmota. Křivka označená „plyn“ odpovídá příspěvku galaktického plynu. Křivka označená „halo“ pak odpovídá nutnému příspěvku temné hmoty, aby bylo dosaženo naměřené ploché rotační křivky.

Hustota vesmíru

Z analýzy výsledků měření fluktuací reliktního záření sondou WMAP vyplývá, že ke kritické hustotě vesmíru přispívá baryonová hmota 4,0±0,2 %, nebaryonová (temná) hmota 23±2 % a vakuová (temná) energie 73±4 %. Nebaryonová hmota, jejíž zastoupení ve vesmíru bylo takto zjištěno, vykazuje gravitační projevy, ale neinteraguje elektromagneticky prostřednictvím fotonů.

Kupy galaxií

Kupy galaxií jsou největší gravitačně vázané objekty ve vesmíru. Fritz Zwicky si jako první, v roce 1933 všiml, že rychlosti jednotli-

vých galaxií v kupách jsou tak vysoké, že je zapotřebí ohromného množství temné hmoty, která by je udržela pohromadě. Typickým poměrem hmotnosti ku svítivosti ve slunečních jednotkách je 300.

Hmotnost kup galaxií je možné určit také pomocí jevu gravitační čočky, kdy vlivem gravitačního působení kupy je odchýleno světlo galaxií v pozadí, analýzou zkreslení obrazu je pak možné usuzovat na rozložení a celkové množství hmoty v kupě. Tato měření jsou ve shodě se Zwickyho výsledky a potvrzují vysoké poměry hmoty a jasnosti.

S rozvojem rentgenové astronomie bylo zjištěno, že právě kupy galaxií jsou nejvýkonnějšími zdroji rentgenového záření na obloze. K emisi dochází v celém objemu kup, což prozrazuje přítomnost ohromného množství plynu o teplotě $10^7 \div 10^8$ K, v němž k rentgenové emisi dochází brzděním elektronů. Hmotnost tohoto plynu tvoří 10÷20 % celkové hmotnosti kupy, což znamená, že tato hmotnost je větší než hmotnost všech hvězd.

Pohyby na velkorozměrových škálách

Na velkorozměrových škálách je pohyb galaxií způsoben celkovým rozpínáním vesmíru. Nicméně, jsou pozorovány zvláštní odchylky od tohoto pohybu, například Místní skupina galaxií se pohybuje rychlostí 627±22 km/s vzhledem k reliktnímu záření. Tyto pohyby jsou přisuzovány působení gravitace po celou dobu existence vesmíru a jsou způsobeny nehomogenitou rozložení hmoty ve vesmíru.

WMAP - *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, sonda umístěná v Lagrangeově bodě L2 soustavy Země-Slunce. Sonda startovala 30. 6. 2001 a získala nejpodrobnější měření fluktuací reliktního záření, ze kterého bylo možné přesně určit procentuální zastoupení temné hmoty ve vesmíru.*

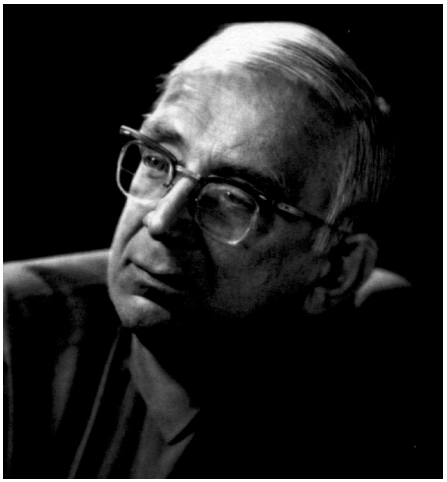
COBE - *Cosmic Backgroud Explorer, družice, která byla předchůdkyní sondy WMAP. Družice startovala dne 18. 11. 1989 a v roce 1992 objevila fluktuace reliktního záření způsobené zárodečnými strukturami ve vesmíru v období oddělení reliktního záření od hmoty.*

Spirální galaxie NGC 6503. Foto Adam Block, NOAO, AURA, NSF.

Astrofyzikální vymezení vlastností temné hmoty

Primordiální nukleosyntéza

Prvotní otázka je, zda by veškerá temná hmota nemohla být složena z nějaké nezářivé formy baryonové hmoty, jakou jsou například těžko pozorovatelné neutronové hvězdy či oblaka molekulárního vodíku. Celkové množství baryonové hmoty je však velice závislé na podmínkách primordiální nukleosyntézy.



George Gamow (1904-1968). Je autorem prvního horkého modelu vesmíru (1948), ve kterém předpověděl oddělení záření od hmoty několik set tisíc let po velkém třesku a jeho další samostatnou existenci.

Zhruba tři minuty po vzniku vesmíru se z protonů a neutronů začala formovat jádra těžších prvků: 22÷25 % helium, malé množství deuteria, lithia, … Podle standardního modelu je procentuální zastoupení těchto lehkých prvků závislé na vesmírné hustotě baryonů, velice citlivý je pak poměr deuterium-vodík. Takováto měření spočívají v pozorování absorpčních čar velmi vzdálených kvasarů způsobených mezigalaktickým vodíkem. Výsledky těchto měření jsou však poměrně nekonzistentní vzhledem ke značně nehomogennímu rozložení baryonové hmoty ve velkých měřítcích. Je odtud zřejmé, že ve vesmíru se nachází velké množství baryonové hmoty mimo hvězdy a galaxie (temná baryonová hmota), ale ještě mnohem více hmoty nebaryonového původu.

Formování struktur ve vesmíru

Podle teorie formování struktur byl vesmír zpočátku téměř perfektně homogenní až na jemné fluktuace hustoty, které byly časem zesíleny působením gravitace a staly se tak zárodky galaxií, kup galaxií a největších pozorovaných struktur ve vesmíru. Podle některých teorií byly tyto nerovnoměrnosti způsobeny kvantovými fluktuacemi a do kosmologických rozměrů byly zvětšeny během fáze exponenciálního rozpínání vesmíru (inflace). Charakter hustotních fluktuací je v současnosti zjišťován z měření teplotních fluktuací reliktního záření. Naměřená amplituda spektra fluktuací je příliš malá na to, aby mohly vzniknout pozorované vesmírné struktury, kdyby byl vesmír složen pouze z baryonové hmoty a záření. Pro slabě interagující částice je situace příznivější, neboť na ně nepůsobí tlak záření (neinteragují s fotony).

Kupa galaxií Abell 2218 funguje jako gravitační čočka pro galaxie v pozadí. HST, WFPC2, 2000.

Látka tvořící „vesmírnou tekutinu“ může difundovat, čímž by docházelo k částečnému vyrovnávání fluktuací hustoty. Tento jev je zvláště významný pro slabě interagující částice, které mohou difundovat do velkých vzdáleností, než je kosmickou expanzí dostatečně snížena jejich hybnost, přičemž tato vzdálenost je větší pro méně

hmotné částice. V tomto směru se hovoří o horké temné hmotě (HDM – Hot Dark Matter), pokud tato vzdálenost je větší než zárodečná fluktuace galaxie a chladné temné hmoty (CDM – Cold Dark Matter), v případě subgalaktických vzdáleností. Podle současných představ by temná hmota měla být z drtivé většiny tvořena chladnou temnou hmotou, horká temná hmota a temná baryonová hmota by neměly být zastoupeny ve významnějším měřítku.

Kandidáti na temnou hmotu

Neutrina

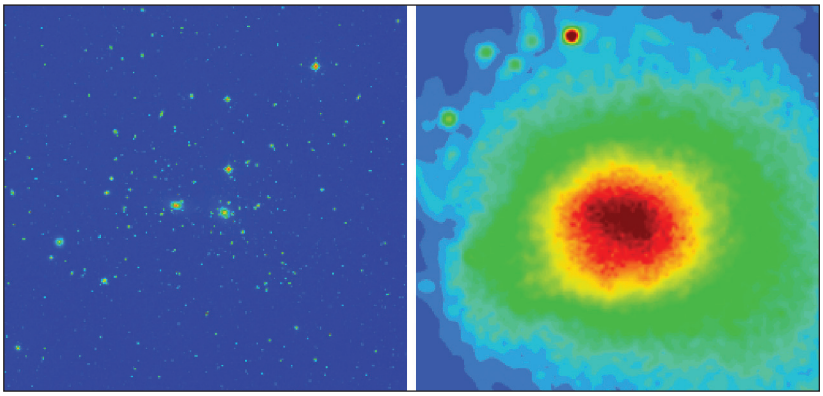
V současnosti převládá názor, že většina temné hmoty ve vesmíru je nebaryonového charakteru (PDM). Tyto částice mohou být relikty z období velmi raného vesmíru, kde vznikly v podmínkách velmi hustého a horkého plazmatu. Jedinými kandidáty ze sortimentu známých částic jsou neutrina. Neutrina, která by splňovala požadavky na temnou hmotu, by podle teoretických modelů musela mít klidovou energii v rozmezí 4÷40 eV, případně řádově jednotky GeV. Druhé řešení nepřipadá v úvahu, neboť z rodiny známých neutrin je laboratorní limit pro tauonové neutrino 18,2 MeV, mnohem menší pak pro neutrino mionové a elektronové. Nízkoenergetické řešení je problematické rovněž, neboť tato neutrina by tvořila tzv. horkou temnou hmotu (tvořenou relativistickými částicemi). Teoretické modely rovněž vyžadují různé klidové hmotnosti neutrin pro typické spirální galaxie a pro galaxie trpasličí, takže neutrina by nemohla tvořit temnou hmotu na všech škálách rozměrů. Z experimentálního zjištění oscilace neutrin vyplývá, že rozdíly klidových hmotností jednotlivých rodin jsou řádově zlomky eV, takže jejich hmotnosti by musely být řádově větší než jejich rozdíly hmotností (pro limit 40 eV by na jedno neutrino připadalo více než 13 eV).

Slabě interagující těžké částice (WIMPs – Weakly Interacting Massive Particles)

Gigaelektronvoltová neutrina, která

Fritz Zwicky (1898-1974). Roku 1933 zjistil nesoulad mezi teorií a experimentem při zkou-mání dynamiky kupy galaxií ve Vlasech Bere-niky. Jedním z vysvětlení tohoto nesouladu je existence temné hmoty ve vesmíru.

Kupa galaxií ve Vlasech Bereniky. Vlevo v optickém oboru, vpravo v oboru rentgenovém.

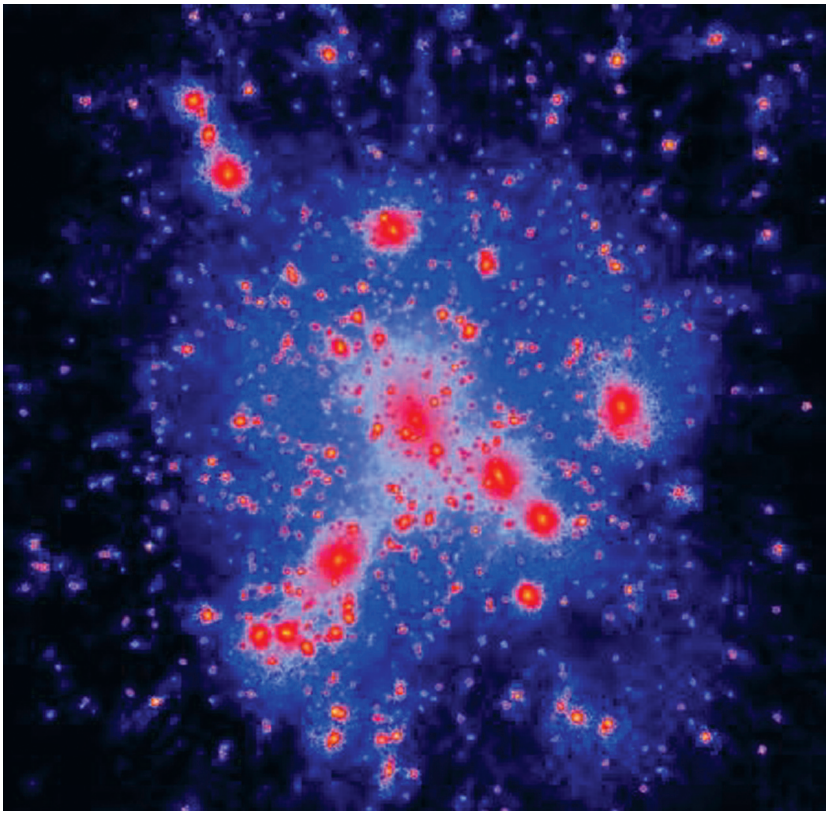


reprezentují chladnou temnou hmotu, vyhovují kosmologickým modelům, avšak s takovýmito klidovými energiemi se nevyskytují.

Tento problém lze vyřešit postulováním nových, slabě interagujících těžkých částic. Supersymetrie ke každé částici předpovídá jejího superpartnera, nejlehčí z těchto částic, neutralina, jsou vhodnými kandidáty. Nezávisle na řešení problému temné hmoty je hledání superpartnerů známých částic jedním z hlavních cílů urychlovače LHC.

Jestliže je temná hmota tvořena WIMP částicemi, měla by být i naše Galaxie vyplněna „plynem" tvořeným částicemi, které téměř bez odporu procházejí vším, tedy i fyzikálními laboratořemi. Experimentálním hledáním galaktických WIMP se zabývá mnoho laboratoří částicové fyziky. Obyčejně spočívá v detekci energie uvolněné srážkou galaktické částice WIMP s atomem krystalové mříže detektoru. K detekci se používají polovodičové (germaniové) krystaly produkující elektrický signál, jodid sodný se používá pro své scintilační vlastnosti, u vysoce podchlazených krystalů se měří případná zvýšení teploty spojená s kolizí WIMP.

Představa rozložení temné hmoty ve velké kupě galaxií. Výpočet byl uskutečněn programem CDMModel, University of Durham, UK.



Zásadním experimentálním problémem je velice malá předpokládaná četnost interakcí, odhaduje se řádově jedna událost na kilogram materiálu detektoru a jeden den. Experimenty rovněž vyžadují extrémně čisté materiály a umístění hluboko pod zemí kvůli odstínění kosmického záření.

Axiony

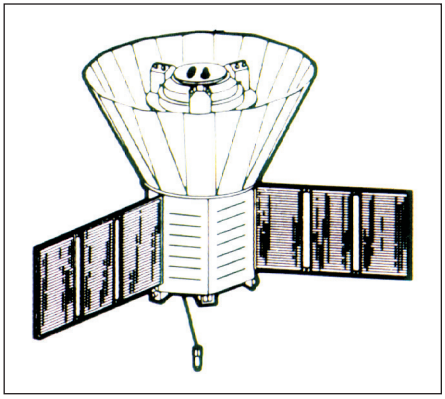
Velice nadějnými kandidáty na chladnou temnou hmotu jsou axiony, málo hmotné (10^{-5} eV) bosony postulované kvantovou chromodynamikou, vzniknuvší ve velmi raných stádiích vývoje vesmíru.

V současnosti jsou v chodu experimenty, jejichž citlivost je dostatečná pro detekci axionů s předpovězenými vlastnostmi.

Tmavé hvězdy
(MACHOs - Massive Astrophysical Compact Halo Objects)
Žádná z vhodných částic PDM dosud nebyla objevena. Uvažuje se, že část temné hmoty tvořící galaktická hala může být zastoupena obyčejnou (baryonovou) hmotou v nezářivém stavu. Z fyzikálního hlediska mohou MACHOs tvořit hvězdy, které jsou tak málo hmotné, že v nich nedošlo k zapálení termojaderné syntézy (hnědí trpaslíci) a hvězdné pozůstatky, u nichž již k termojaderné syntéze nedochází (bílí trpaslíci, neutronové hvězdy a černé díry). Případ hvězdných pozůstatků je však nepravděpodobný, neboť by se muselo jednat o pozůstatky velkého množství hvězd, které se ovšem v galaktickém halu nevyskytují.

Praktický způsob hledání těchto objektů je založen na jevu gravitačního ohýbání paprsku světla vzdálené hvězdy procházejícího poblíž galaktického MACHO. Tento jev není dostatečně silný pro vytvoření několika obrazů (silná gravitační čočka), působením MACHO dochází ke zdánlivému zjasnění hvězdy fokusací světelných paprsků – jev se nazývá gravitační mikročočka. Tyto jevy jsou velice vzácné, takže je nutné současně pozorovat milióny hvězd. Projekty MACHO, OGLE a EROS od počátku devadesátých let hledají gravitační mikročočky způsobené MACHOs v halu naší Galaxie pozorováním jasných hvězd Malého a Velkého Magellanova mračna. Doba trvání efektu dočasného zjasnění je závislá na vzájemné vzdálenosti mezi pozorovatelem, čočkou a hvězdou, závisí rovněž na hmotnosti fokusujícího objektu. Absence krátkodobých mikročoček vylučuje široké rozmezí hmotností MACHOs jakožto dominantní složku galaktického hala, jako kandidáty nevylučuje hnědé trpaslíky.

Primordiální černé díry
Zatímco je nepravděpodobné, že MACHOs tvoří hvězdné ostatky, mezi kandidáty zůstávají černé díry vzniklé v raném vesmíru. Nedostatkem této teorie je však neznámý mechanizmus jejich vzniku. Svou podstatou primordiální černé díry tvoří PDM, z hlediska způsobu jejich hledání se jedná o MACHOs.

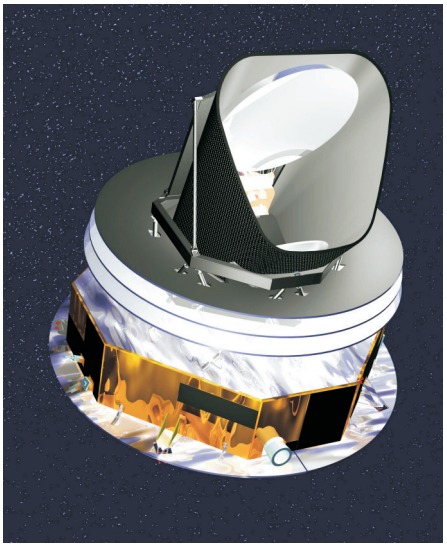


COBE (COsmic Bacground Explorer), družice NASA z roku 1989, která v roce 1992 objevila fluktuace reliktního záření.

BOOMERANG (Baloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics), balónový experiment uskutečněný v Antarktidě 29. 12. 1998 až 9. 1. 1999. Hlavním cílem bylo sledování fluktuací reliktního záření ze stratosférického balónu (ve výšce 38 km) pomocí radioteleskopu o průměru 1,2 m.

MAXIMA (Millemeter Anisotropy eXpriment IMaging Array). Další krátkodobé balónové experimenty z let 1998 a 1999 s cílem prozkoumat fluktuace reliktního záření.

Planck, sonda ESA, která by měla startovat roku 2007 a prozkoumat fluktuace reliktního záření s ještě vyšší citlivostí než slavná sonda WMAP.



Modifikovaná gravitace (MOND – MOdified Newtonian Dynamics)
Hypotéza o existenci PDM vyžaduje značný zásah do standardního modelu mikrosvěta. Vzhledem k tomu, že tyto částice dosud nebyly experimentálně potvrzeny, zdá se být méně radikální, pozměnit obecnou teorii relativity takovým způsobem, aby temnou hmotu nebylo třeba vůbec uvažovat. V minulosti dokonce existoval názor, že nutnost uvažovat temnou hmotu vychází pouze z neznalosti fyzikálních zákonů aplikovatelných na velkorozměrové struktury, pro něž neexistují nezávislé testy platnosti OTR.

Jedním z možných přístupů je modifikovaná Newtonova dynamika, podle níž pro velikost gravitačního zrychlení pod jistou mez platí mírně pozměněný gravitační zákon. Tento přístup je překvapivě úspěšný při řešení problému temné hmoty pro trpasličí galaxie, spirální galaxie i kupy galaxií. Bohužel, pro MOND neexistuje relativistická varianta fungující pro všechny škály, takže nemůže být použita pro řešení kosmologických problémů.

Závěr
Za posledních několik let se představa, že většina vesmíru je tvořena nám dosud neznámou nebaryonovou hmotou, nejspíše ve formě neutralin a axionů, stala ve vědeckých kruzích běžnou. To bývá často přirovnáváno ke kopernikovské revoluci, kdy Země a s ní i člověk byli odsunuti pryč ze středu vesmíru a bylo jim odebráno jejich výsadní postavení. Pravděpodobně jedním z největších kroků v této revoluci je určení podílu baryonové a temné hmoty ve formě PDM ve vesmíru měřením teplotních fluktuací reliktního záření sondou WMAP a předchozími pozemními, či balonovými experimenty. Tato revoluce však nebude u konce, dokud nebude experimentálně přímo objasněna podstata objektů a částic tvořících tuto temnou hmotu. Do té doby je nutno ponechat si mysl otevřenou, správné řešení problému temné hmoty možná dosud nebylo vůbec nalezeno.

■ *Milan Červenka*

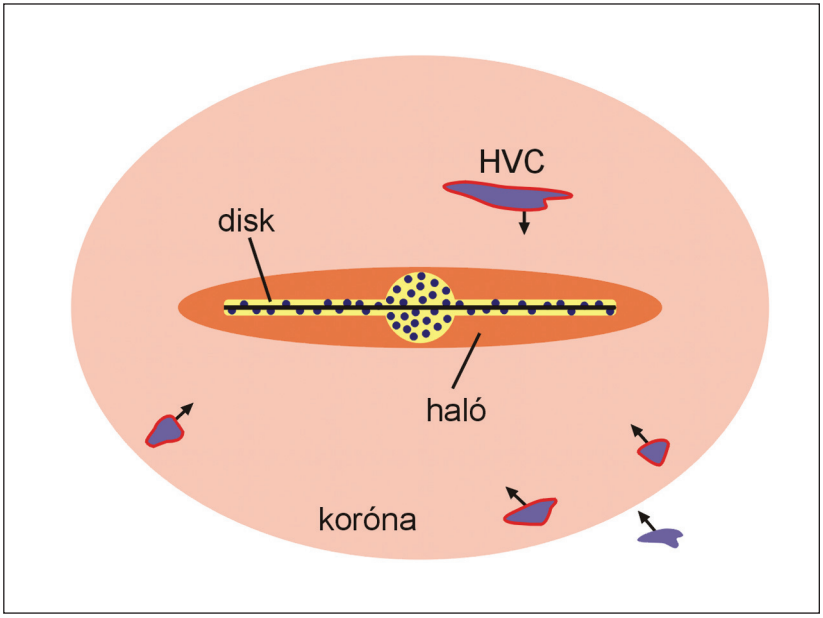
První galaxie ze skryté hmoty?

Již delší dobu je známo, že oblak s označením HVC 127–41–330 a trpasličí galaxie LGS 3 se nacházejí přibližně na stejném místě oblohy v souhvězdí Ryb. Jde jen o náhodnou projekci, nebo spolu oba objekty souvisí?

Jako HVC - High Velocity Clouds, označujeme ostře ohraničená oblaka plynů padající do Galaxie z mezigalaktického prostoru. Mají vysoké radiální rychlosti (větší než 200 km/s). Při průchodu galaktickou koronou se rozzáří podobně jako meteor při průchodu atmosférou. Spektrum oblaků HVC je obdobné spektru hvězd v počátečních fázích hvězdného vývoje, chybí absorpční čáry pozdních stádií hvězd. Velmi často lze zjistit rychlou rotaci oblaků HVC, která dopplerovsky rozšiřuje spektrální čáry. Usuzujeme-li z jejich vysoké svítivosti, pak se tato oblaka nalézají ve vzdálenostech desítek kpc. Jejich podrobná struktura a fyzikální mechanizmus vyzařování však nejsou známy především proto, že lze jen velmi obtížně určit jejich vzdálenost.

Joshua D. Simon, Timothy Robishaw a Leo Blitz z University of California uveřejnili 7. 10. 2003 článek o nových pozorováních trpasličí galaxie LGS 3 a oblaku HVC 127–41–330 radioteleskopem v Arecibu, která mají mnohem lepší rozlišení, než jakého bylo dosud dosaženo. Je zřejmé, že oblak HVC rotuje, byla naměřena jeho rotační křivka. Vlastní radiální rychlost HVC byla určena na –330 km/s (objekt se k nám přibližuje), což není příliš velký rozdíl oproti vlastní rychlosti galaxie LGS 3, ale dnes je již zřejmé, že HVC 127–41–330 a LGS 3 nejsou týmž objektem pozorovaným na různých vlnových délkách. Oblak HVC a galaxie LGS 3 jsou propojeny snadno rádiově

H I oblasti - *oblasti neutrálního vodíku, které jsou nerovnoměrně rozloženy v galaxiích. V naší Galaxii je výskyt H I oblastí koncentrován ke spirálním ramenùm, výrazně více se vyskytují v galaktickém disku. H I oblasti jsou relativně chladné – cca 80 K, vodík je zde v základním stavu. Díky přechodu mezi ortovodíkem (elektron a proton mají nesouhlasný spin) a paravodíkem (souhlasný spin) září tyto oblasti na vlně 21,105 cm, a lze je mapovat radioastronomicky.*



Oblaka HVC padají do Galaxie z mezigalaktického prostoru. V galaktické koróně se zahřejí a začnou svítit.

LGS 3 - *nepravidelná trpasličí galaxie v souhvězdí Ryb. Patří k Místní skupině galaxií. Galaxii lze také nalézt pod označe-ním PCG 3792 nebo Pisces Dwarf. Je sa-telitní galaxií galaxie v Trojúhelníku M33. Její parametry jsou: rektascenze 01:03,8; deklinace 21:53; radiální rychlost –277 km/s; vzdálenost 3 000 000 ly; zdánlivý průměr 2'; průměr viditelné soustavy 1 700 ly; magnituda objektu je 15,4 mag.*

Snímek trpasličí galaxie LGS 3 pořízený na Lowellově observatoři jako UBV kombinace. Obor U (UV) je na snímku modrý, obor B (Blue) je znázorněn zeleně a obor V (Visual) je znázorněn červeně. Autor: Deidre A. Hunter.

pozorovatelnou H I oblastí. Klíčová bude odpověď na otázku, zda jsou HVC a LGS 3 opravdu ve stejné vzdálenosti a zda pozorovaná H I oblast je zřetelným projevem slapového působení mezi nimi, tedy zda jsou v prostoru dostatečně blízko, aby se mohly gravitačně ovlivňovat. Předchozí pozorování nedokázala vyloučit, zda se oba objekty pouze nepromítají do stejného místa na obloze. Podrobná měření H I mostu poblíž LGS 3 a HVC lze vysvětlit jako projev slapového působení a pokud je tato interpretace správná, pak lze vzdálenost oblaku HVC určit pomocí galaxie LGS 3. Oba objekty by byly 700 kpc daleko, což je u oblaku HVC docela překvapující. HVC 127–41–330 by tak byl prvním objektem tohoto druhu v tak velké vzdálenosti. Ostatní oblaka HVC jsou od nás v menší vzdálenosti než 50 kpc.

Hmotnost složek komplexu odvozená ze vzdálenosti a svítivosti pozorované hmoty je u H I oblasti $M_{\mathrm{lum}} = 2{,}6\times10^5\ M_{\mathrm{s}}$ a u oblaku HVC $M_{\mathrm{lum}} = 2{,}7\times10^6\ M_{\mathrm{s}}$. Porovnáme-li takto získané hmotnosti s hmotnostmi určenými na základě dynamického projevu – tedy pomocí rotační křivky, tak dostaneme pro H I oblast $M_{\mathrm{dyn}} = 2{,}7\times10^6\ M_{\mathrm{s}}$ a pro oblak HVC $M_{\mathrm{dyn}} = 2{,}0\times10^7\ M_{\mathrm{s}}$.

Tedy jestli se HVC nachází ve stejné vzdálenosti jako LGS 3, pak je jednoznačně jeho rotace určována vlastní skrytou hmotou a to v poměru cca 83 % gravitačního projevu. Jedná se tedy o galaxii, která je tvořena převážně skrytou hmotou a na tuto hmotu se koncentruje H I oblast a oblak HVC, jejichž dynamické projevy jsou měřitelné.

■ *Ivan Havlíček*

Kvasar s rudým posuvem 6,4

J 1148+5251 je dnes nejvzdálenější a tudíž i nejmladší známý objekt, uvnitř něhož se nachází kvasar s kosmologickým rudým posuvem $z = 6{,}42$. V jeho jádru je pak nejhmotnější černá díra, jakou známe. Její hmotnost převyšuje 3 miliardy M_s.

Kvasar J 1148+5251 byl objeven začátkem tohoto roku v rámci „Sloan Digital Sky Survey", velkého astronomického přehlídkového projektu, na němž pracuje tým odborníků pod vedením Xiaohua Fana z Arizonské university. Tento kvasar je jedním z pěti dnes známých objektů z temného věku vesmíru, kdy se vesmír začal zprůhledňovat a kdy se explosivně zvyšující rychlostí začaly utvářet galaxie, hvězdy a černé díry. Naměřená data se dnes interpretují tak, že světlo prvních hvězd opustilo tento objekt 650 milionů let po události označované jako Velký třesk (některé zdroje uvádějí i hodnotu 850 nebo 870 milonů let po Velkém třesku a kosmologický posuv $z = 6{,}41$; v měřítku celkového časového určení je však tento rozptyl zanedbatelný).

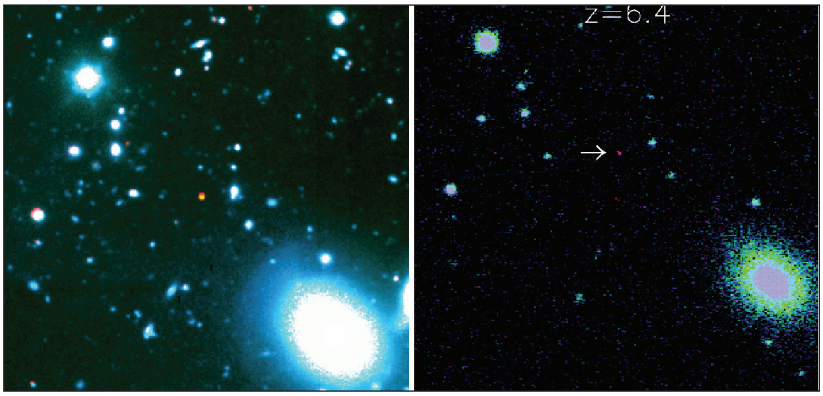
Kvasar se nachází uprostřed oblaku chladného molekulárního vodíku H_2, jehož hmotnost byla určena na 20 miliard M_s. V rozpínajícím se žhavém raném vesmíru se jako první chemické prvky utvořily vodíkové a heliové atomy a molekuly. První galaxie a hvězdy se zformovaly z tohoto materiálu, neměly by tedy obsahovat žádné jiné prvky. Hvězdy vzniklé později obsahují těžší prvky jako uhlík, dusík a kyslík. Tyto těžší prvky se mohly vytvořit až v nitru hvězd nulté generace jako výsledek nukleogeneze. Někdy pro první hvězdy bývá užíváno i označení „III. populace" podle historické klasifikace založené na rozdělení hvězd v naší Galaxii. Galaktický disk zde obsahuje mladé hvězdy I. populace, galaktické halo starší hvězdy II. populace. Dělení hvězd na generace je téhož základu, jen pořadí je opačné - staré hvězdy patří do generace označované nižším indexem. Potud je vše při starém.

Problém ve stárnoucích teoriích popisu raného vesmíru nastal, když

Kvasar - *kvazistelární objekt, objekt s malým úhlovým rozměrem (<1") a ob-rovským zářivým výkonem (řádově 10^{41} W). U kvasarù pozorujeme velké červené posuvy emisních čar. Předpokládá se, že červený posuv je kosmologického pùvodu; pak jsou ovšem kvasary nejvzdálenějšími a nejzářivějšími objekty, které ve vesmíru pozorujeme.*

Kosmologický posuv - *změna vlnové délky spektrální čáry způsobená rozpínáním vesmíru. Kvantitativně se udává kosmologický rudý posuv přibližným vztahem $z = \Delta\lambda/\lambda$.*

Vpravo: Objevitelský snímek quasaru získaný v říjnu 2003 na Apache Point Observatory. Zobrazený výřez má stranu velkou přibližně 2'. Vlevo: Snímek stejné části oblohy z Keckova dalekohledu. Většina objektù viditelných na snímku jsou velmi vzdálené galaxie. Autoři snímku: S. G. Djorgovski, A. Mahabal, M. Bogosavljevic, California Technology.



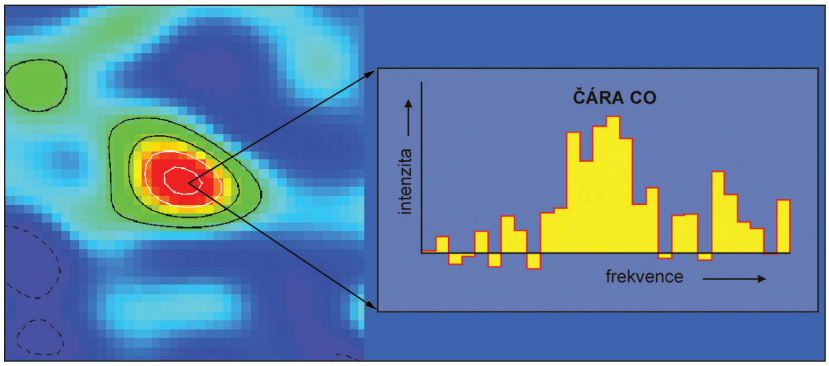
SDSS - *Sloan Digital Sky Survey, katalogizuje a mapuje všechny galaxie s mezní jasností 23 m na asi čtvrtině severní oblohy. Přehlídka zahrnuje asi 500 miliónů galaxií a ještě více hvězd. U každé galaxie je určena pozice, jasnost a barva. Navíc pro asi milión galaxií a 100 000 quasarů budou pořízena spektra. Získaný katalog zmapuje 1000 × větší oblast než současné mapy.*

VLA - *Síť 27 radioteleskopů poskládaných do tvaru písmene Y umístěná v Novém Mexiku. Průměr jedné antény je 25 metrů, hmotnost 230 tun. Základna sítě radioteleskopů činí 36 kilometrů. VLA provozuje observatoř NRAO (National Radio Asrtronomy Observatory), která patří nadaci NSF (National Science Foundation) a je řízena prostřednictvím sdružení universit AUI (Associated Universities, Inc.).*

ve zmiňovaném kvasaru J 1148+5251 byla nade vší pochybnost pomocí radioteleskopové interferenční spektroskopie zjištěna přítomnost oxidu uhelnatého CO. Jako interferometr byla zapojena síť Very Large Array v Novém Mexiku a radioteleskop Plateau de Bure (IRAM) ve Francouzských Alpách. Prachová emise byla zjištěna použitím IRAM třicetimetrového radioteleskopu umístěného na Pico Veleta poblíž Grenady ve Španělsku.

Oblak CO, jehož hmota se v hostitelské galaxii odhaduje na 10 miliard M_s, musel tedy vzniknout ve velmi rané fázi vesmíru. Jestli zdrojem těžkých atomů pro pozorovaný oblak CO byly první hvězdy, pak musely explodovat v průběhu zhruba 200 milionů let před dobou, ve které kvasar dnes pozorujeme. Je-li tedy správný časový údaj získaný interpretací naměřeného kosmologického posuvu, pak první hvězdy musely vznikat již nejpozději 650 milionů let po velkém třesku. Pozorovaný molekulární oblak, který kvasar obklopuje, je pro svoji extrémní svítivost (několiktisíckrát vyšší, než cokoliv z blízkého vesmíru) dosti přesným zdrojem informací o hustotě, teplotě a gravitačních poměrech sledovaného objektu. Jestli setrvá kvasar v tomto produktivním stavu něco okolo 10 milionů let, je otevřenou otázkou, zda tvorba nových hvězd bude i nadále pokračovat současným tempem (cca jedna hvězda za pět hodin) nebo zda se tato perioda bude prodlužovat.

Potud možnosti objevů s použitím dnešní techniky VLA a IRAM. Astronomové však očekávají v blízké budoucnosti přesnější data získaná s vyšším rozlišením pomocí právě budované sítě radioteeskopů v poušti Atacama – Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Síť by měla obsahovat 64 radioteleskopů s průměrem každé antény 25 metrů. Tento velký projekt je založen na mezinárodní spolupráci Evropy, USA, Kanady a Chile, měl by být uveden do provozu v roce 2011.



Emise oxidu uhelnatého CO zřetelná ve spektru quasaru J 1148+5251. Spektrogram je získán pomocí radioteleskopů IRAM – interferometrem Plateau de Bure.

■ *Ivan Havlíček*

WMAP: co dnes víme o vesmíru?

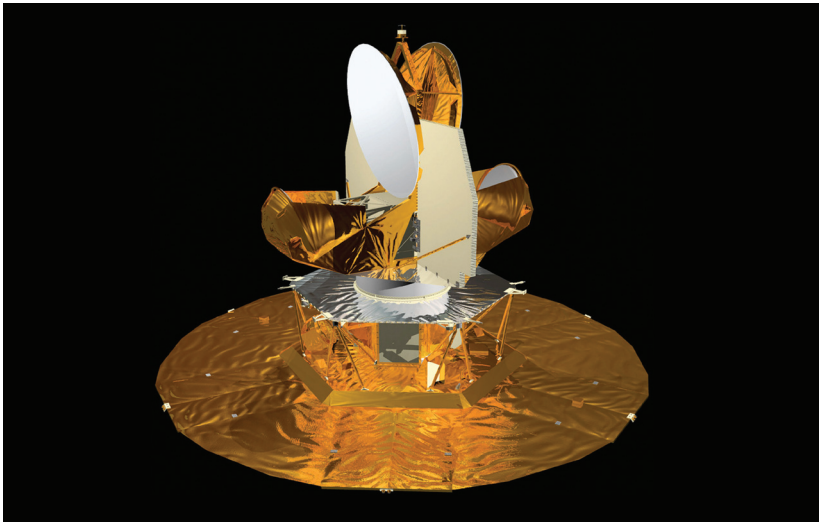
Za posledních 100 let se naše znalosti o vesmíru jako celku mimořádně zpřesnily. Dříve spíše filosofické úvahy se staly konkrétními fyzikálními teoriemi podloženými mnoha experimenty. Kosmologie si prosadila své místo a stala se disciplínou spojující moderní fyziku velkých i malých rozměrů. Sám Velký třesk je natolik mimořádným experimentem, který by nikdy žádný fyzik nebyl schopen připravit. Příroda to ovšem udělala za nás a my můžeme směle bádat a pozorovat. Mimořádně velké naděje byly vkládány do sondy MAP (Microwave Anisotropy Probe), jejímž hlavním cílem je detailní průzkum reliktního záření z období zhruba 400 000 let po vzniku vesmíru. První výsledky byly oznámeny 11. 2. 2003. S velkou přesností poprvé známe stáří vesmíru, Hubbleovu konstantu a kosmologickou konstantu. Na počest David T. Wilkinsona, hlavního autora projektu, byla sonda přejmenována na WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe).

Základy současné kosmologie vznikaly spolu s vybudováním obecné relativity na počátku minulého století (1916, Albert Einstein). Teorie popisuje gravitační působení jako vlastnost zakřiveného času a prostoru. Stala se mimořádně úspěšnou při objasnění mnoha jevů. V roce 1922 publikoval ruský matematik Fridman řešení v homogenním a izotropním vesmíru, která popisovala buď rozpínající nebo smršťující se vesmír. Stávající teorie nepřipouštěla tehdy oblíbený stacionární vesmír. Albert Einstein proto do rovnic OTR zavedl člen lineární v metrickém tenzoru ($\Lambda g_{\mu\nu}$), který zajišťoval existenci stacionárního řešení. V té době mnoho lidí (včetně Einsteina) věřilo, že vesmír je neměnný v čase. Po objevu Hubbleova rozpínání vesmíru Albert Einstein tento člen z rovnic opět vyškrtl a prohlásil, že šlo o největší omyl jeho života. Sporný člen, který se nazývá kosmologická konstanta, dnes zažívá svou renesanci.

COBE - *COsmic Background Explorer, družice, která měla za úkol změřit charakteristiky reliktního záření. Družice startovala 18. 11. 1989 a pracovala až do roku 2003. Kromě přesného změření teploty reliktního záření (1989) zjistila fluktuace a anizotropii reliktního záření (1992). Úhlové rozlišení sondy bylo 7° a teplotní rozlišení 10 μK.*

WMAP - *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, sonda umístěná v Lagrangeově bodě L2 soustavy Země-Slunce, která startovala 30. 6. 2001. Sonda pořídila podrobnou mapu fluktuací reliktního záření s úhlovým rozlišením 0,3° a teplotním rozlišením 20 μK. Sonda dosud pracuje.*

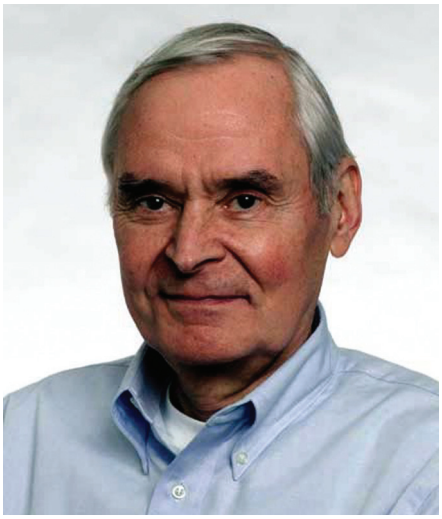
Sonda WMAP



Planck - *sonda pro výzkum reliktního záření, která bude startovat v roce 2007. Předpokládaná úhlová rozlišovací schopnost je 0,17° a teplotní rozlišení 2 μK.. Sonda je pojmenována podle Maxe Plancka, jednoho z průkopníků a zakladatelů kvantové teorie.*

David T. Wilkinson (1935-2002) - *světově uznávaný kosmolog z Princetonské university. Byl průkopníkem výzkumu reliktního záření, stál u zrodu družice COBE a byl myšlenkovým otcem mise MAP (Microwave Anisotropy Probe), která byla na jeho počest přejmenována 11. 2. 2003 na WMAP (Wilkinson MAP).*

Duchovní otec sondy David T. Wilkinson.



V roce 1929 bylo Edwinem Hubblem objeveno rozpínání vesmíru na základě červeného posuvu vzdálených galaxií. Spolu s rozpínáním vesmíru docházelo k chladnutí hmoty se zářením. Asi 400 000 let po Velkém třesku došlo k oddělení záření od hmoty v důsledku zachycení volných elektronů v atomárních obalech. Právě volné elektrony doposud udržovaly kontakt záření s látkou. Vesmír se stal pro záření průhledným a interakce záření s hmotou minimální. Toto reliktní záření bylo objeveno v roce 1965 Arno Penziasem a Robertem Wilsonem. Na konci 20. století se stále více objevují úvahy o tom, že vznik vesmíru není možné popisovat jen v rámci teorie gravitace, ale že dominantní vliv měly i ostatní interakce. Začíná se brát vážně úloha kvantové teorie. Ukazuje se, že člen úměrný metrickému tenzoru do rovnic skutečně patří, je však způsoben kvantově polními projevy vakua a jeho původ je v kvantových procesech. Ve velkých měřítcích se člen projevuje jako jakási „odpudivá“ gravitace, nebo chcete-li záporný tlak. Kosmologická konstanta je definována jako poměr hustoty vakuové energie ke kritické hustotě vesmíru.

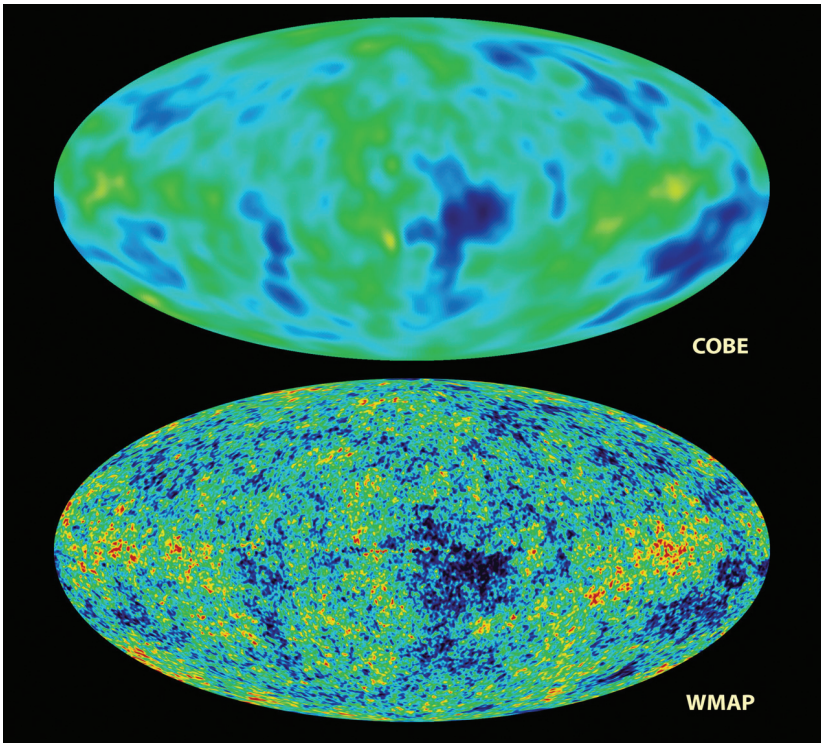
Experimentálně byla prokázána existence nenulové kosmologické konstanty v roce 1999 (A. G. Riess – 1998, S. Perlmutter – 1999). Měření byla prováděna na souboru supernov typu Ia, ve kterých je exploze způsobena rozmetáním bílého trpaslíka, který překročil mez stability (Chandrasekharovu mez). Shodná hmotnost trpaslíků při narušení jejich stability vede ke stejné absolutní magnitudě všech supernov tohoto typu. Supernovy tak slouží jako jakési standardní „svíčky“ s přesně definovaným výkonem v celém vesmíru. Vzdálenější supernovy byly méně jasné než podle propočtů. Z toho lze usuzovat na zrychlování expanze vesmíru způsobené nenulovou kosmologickou konstantou. Zrychlování expanze může v budoucnu přerůst v exponenciální fázi expanze vesmíru.

Kosmologická konstanta souvisí s vlastnostmi vakua. Vakuum je netriviální dynamický systém, který je ve stavu s minimální energií, ni-koli ovšem nulovou. Předpokládá se, že jsou zde přítomna tzv. Higgsova pole, která způsobují spontánní narušení symetrie, mechanismus potřebný v teorii sjednocení elektromagnetické a slabé interakce. Mo-hou zde být i další typy polí. V každém případě je ale hustota energie vakua (tzv. temná energie) nezávislá na expanzi vesmíru a je konstantní. Právě konstantní hustota energie ve vesmíru způsobuje fiktivní zá-porný tlak, který je odpovědný za zrychlující se expanzi.

COBE

První podrobný průzkum reliktního záření byl proveden koncem 90. let po vypuštění družice COBE (Cosmic Background Explorer) v roce 1989. V průběhu prvních osmi minut provozu zjistila, že reliktní záření je zářením absolutně černého tělesa o teplotě 2,725±0,02 K. V roce 1992 byla objevena anisotropie reliktního záření. Záření je nepatrně teplejší v jednom směru a nepatrně chladnější v opačném směru. Tomu odpovídá naše rychlost pohybu vzhledem k záření 390 km/s. Odečteme-li známý pohyb Slunce kolem středu Galaxie, vychází pro vlastní pohyb naší Galaxie rychlost 600 km/s. Jinak je záření vysoce isotropní. Záření sledované družicí COBE není zcela homogenní. Odchylky fluktuací od průměrné hodnoty jsou asi 10^{-5} K. Pravděpodobně jde o primordiální fluktuace z období oddělení záření od hmoty, které vedly ke vzniku galaxií. Družice COBE tak přispěla k lepšímu poznání mikrovlnného reliktního záření hlavně dvěma objevy: Objevem anisotropie záření a objevem fluktuací teploty záření. Rozlišovací schopnost COBE byla 7°.

Porovnání map fluktuací reliktního záření získaných družicí COBE a sondou WMAP.



WMAP

Tato nástupkyně družice COBE startovala 30. 6. 2001 a byla umístěna v blízkosti Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, vzdáleného 1,5 milionů kilometrů od Země na straně směrem od Slunce. Na své stanoviště dorazila sonda 14. 9. 2001. Hlavním cílem bylo pořídit podrobnou mapu fluktuací reliktního záření s mnohem vyšší citlivostí a rozlišením než družice COBE. Sonda má úhlové rozlišení kolem 0,3° a teplotní citlivost 20 μK. Sonda WMAP pozoruje v pěti oddělených frekvenčních pásmech od 22 do 90 GHz. Zrcadlo sondy má rozměry 1,4×1,6 metru a teplota chlazené části je nižší než 95 K.

WMAP výsledky:

Dne 11. 2. 2003 byly zveřejněny výsledky měření z WMAP. Stáří Vesmíru je 13,7±0,2 miliardy let, reliktní záření se oddělilo od látky 380 000 let po Velkém třesku, první hvězdy vznikaly již 200 miliónů let po Velkém třesku.
Hodnota Hubbleovy konstanty byla určena na 71±4 km s^{-1} Mpc^{-1} a hodnota kosmologické konstanty 0,73±0,04.
Sonda WMAP také s dostatečnou přesností určila složení našeho vesmíru. Pouhá 4,0±0,2 % vesmíru tvoří hmota atomární povahy, 23±2 % tvoří skrytá (neboli temná) hmota neznámé povahy a 73±4 % tvoří tzv. skrytá (neboli temná) energie související s netriviálními projevy vakua.

Náš vesmír je podle posledních výsledků přibližně plochý. To znamená, že celková hustota jeho hmoty je rovna hustotě kritické a vesmír v minulosti prošel pravděpodobně inflační fází (fází exponenciální expanze), která vesmír nastavila na přibližně kritickou hustotu. Z celkové hustoty vesmíru (rovné kritické) tvoří svítící hmota jen jeho nepatrnou část (4 %). Další část je tvořena nebaryonovou hmotou neznámé povahy (23 %). Vakuová energie tvoří celých 73 % kritické hustoty. Potvrdily se tak experimenty z let 1998 a 1999, které nalezly nenulovou hodnotu kosmologické konstanty. Vesmír je proto ve zrychlující se fázi expanze, která se nikdy nezastaví. V nejbližší době budou prováděny podrobné rozbory naměřených fluktuací reliktního záření. Ty v sobě skrývají jednoznačný otisk topologie vesmíru.

■ *Petr Kulhánek*

Zvuk raného vesmíru

V nedávné době byla provedena dvě nezávislá pozorování kosmického reliktního záření pomocí dvou souborů radioteleskopů - Cosmic Background Imager (CBI) v Chile a Very Small Array (VSA) na ostrově Tenerife. V rámci těchto experimentů byla provedena dosud nejpřesnější měření teplotních rozdílů reliktního záření. Tyto rozdíly odpovídají fluktuacím v rozložení primordiální látky, z nichž se později ve vesmíru formovaly struktury velkých rozměrů. Poslední pozorování ukazují, že rozložení fluktuací se přesně shoduje s dříve provedenými pozorováními. Získané výsledky doplňují předchozí měření a dovolují tak provést detailnější testy teorií vzniku vesmíru.

CMB - *Cosmic Microwave Background, mikrovlnné záření pozadí neboli reliktní záření. Jde o záření, které ve vesmíru zůstalo z období zhruba 380 000 let po velkém třesku, kdy se oddělilo od látky. Nese v sobě „paleolitický" otisk struktur vesmíru z tohoto období.*

CBI - *Cosmic Background Imager, radioteleskop pro sledování reliktního záření se třinácti anténami o průměru 90 cm. Je umístěn v Atacamské poušti v nadmořské výšce 5080 m.*

Podmínky v raném vesmíru

Podle dnes akceptovaného kosmologického modelu, vesmír vznikl před zhruba 15 miliardami let velkým třeskem, po němž následovalo krátké období velmi rychlého rozpínání, známé jako inflace. Během inflace, primordiální kvantové fluktuace vzniklé v době velkého třesku, byly zesíleny do makroskopických fluktuací hustoty vesmíru, fluktuací ze kterých se nakonec formovaly struktury galaxií a kup galaxií, které dnes pozorujeme. Po skončení etapy inflace se vesmír dále rozpínal pomaleji a chladl. V průběhu tohoto období docházelo k rozptylu elektromagnetického záření na volných elektronech v plazmatu tvořeném ionty vodíku a helia. Zhruba 380 000 let po velkém třesku poklesla teplota natolik, že mohlo dojít k vytvoření atomových obalů, a tím přestalo k rozptylu fotonů docházet. Fotony z tohoto období (reliktní záření) dnes mají spektrum jako absolutně černé těleso o teplotě 2,725 K.

Reliktní záření však není zcela uniformní a vykazuje drobné rozdíly v teplotě. Tyto odchylky, známé jako fluktuace reliktního záření, odpovídají jemným rozdílům v hustotě

Teleskop CBI je umístěn v poušti Atacama v nadmořské výšce 5080 m. Skládá se ze 13 antén o průměru 90 cm. Antény jsou zakryty teflonem, který propouští mikrovlnné záření. CBI pracuje v kmitočtovém pásmu 26÷36 GHz (vlnová délka cca 1 cm) při pracovní teplotě 20 K. Rozlišovací schopnost dosahuje až 4´.

VSA - *Very Small Array, interferometr složený ze 14 antén o průměru 14 cm a ze dvou 3,5 metrových antén. Přístroj je umístěn na ostrově Tenerife na hoře Teide v nadmořské výšce 2 500 m.*

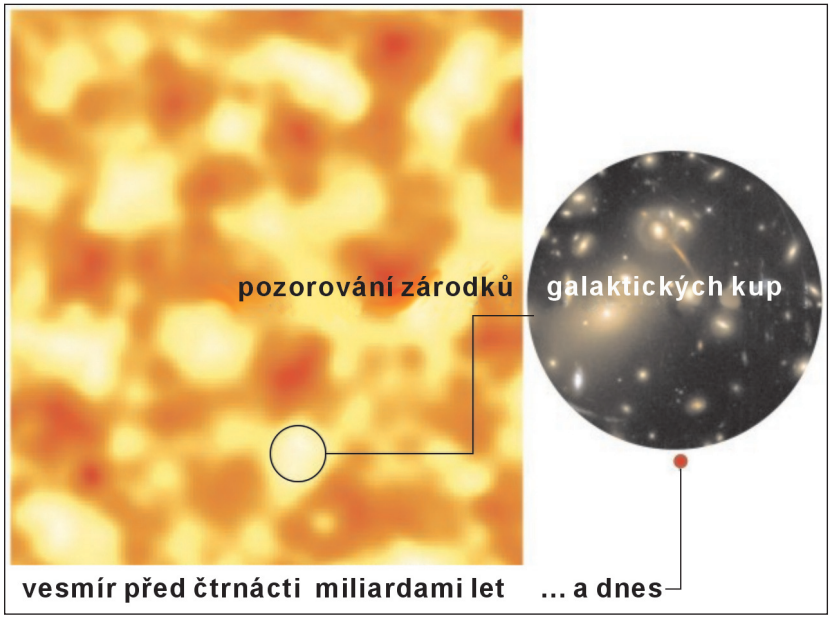
DASI - *Degree Angular Scale Interfero-meter, přístroj umístěný v Antarktidě na Amundsenově Scottově základně. Jde o 13 antén o průměru 20 cm.*

vesmíru v době, kdy naposledy docházelo k rozptylu fotonů. Výsledky měření fluktuací reliktního záření jsou obvykle vykre-slovány jakožto druhá mocnina amplitudy fluktuací teploty (střední kvadratická fluktuace, je úměrná výkonu) v závislosti na úhlu Ω (rozměru fluktuací) nebo v závislosti na sférické harmonické $l = 180°/\Omega$, která je nepřímo úměrná rozměru fluktuací. Cílem je měřit teplotu co možná nejpřesněji s co možná největším úhlovým rozlišením – dosáhnout nejmenší Ω nebo největší l.

Počátkem devadesátých let minulého století měřila sonda COBE teplotu reliktního záření s přesností 1/100 000 K a s úhlovým rozlišením 7°, tyto výsledky plně podporovaly inflační kosmologický model. V průběhu dalších deseti let byly provedeny tři experimenty s větším rozlišením na balonových sondách BOOMERANG a MAXIMA a pomocí interferometru DASI, umístěném na jižním pólu. Tato pozorování umožnila astronomům provést fundamentálnější testy povahy fluktuací.

Primordiální fluktuace způsobovaly nerovnováhu v tlaku a hustotě látky a záření vyplňujícího raný vesmír. V místech, kde byla vyšší hustota, docházelo ke gravitačnímu smršťování, nicméně při dosažení jisté hustoty převládly odpudivé síly záření a tak vznikly oscilace ve formě zvukových vln šířících se primordiálním plazmatem. Rychlost těchto zvukových vln odpovídá zhruba rychlosti světla ve vakuu dělené druhou odmocninou ze tří. Největší zhuštěniny, „horké skvrny“, měly rozměry kolem 200 000 světelných roků, což zhruba odpovídá rychlosti zvuku v tomto prostředí násobené stářím vesmíru v té době. Největší „chladné skvrny“ měly rozměry zhruba poloviční, neboť zvuková vlna těmito oblastmi musela projít dvakrát (zhuštění a následné zředění). Podobně v místech, kde došlo ke zhuštění podruhé, bylo zapotřebí trojího průchodu zvukové vlny a ty-

Zárodky kup galaxií pozorované CBI. CBI-Press Release Image.



to oblasti tedy mají velikost zhruba třetinovou oproti velikosti největších horkých skvrn. Experimenty Boomerang, Maxima a DASI poskytly důkaz o existenci prvních tří maxim, poslední výsledky z CBI a VSA to potvrdily a CBI naznačil existenci čtvrtého maxima, jak předpovídá teorie.

Maxima na křivkách

Očekává se, že z fluktuací reliktního záření bude možné vyčíst mnoho podrobností o fyzikálních jevech spojených s interakcemi protonů a elektronů. Z polohy a amplitudy jednotlivých maxim mohou astronomové vyčíst mnoho kosmologických parametrů. Poloha a veli-kosti jednotlivých maxim je závislá například na křivosti vesmíru a cel-kové hustotě hmoty a energie v něm. Z polohy prvního maxima výkonového spektra lze vyčíst, jaká je celková křivost vesmíru. Případu plochého vesmíru odpovídá poloha prvního maxima poblíž $l = 200$ (to odpovídá rozměru fluktuací cca 1°). Kdyby měl vesmír kladnou křivost, původně rovnoběžné paprsky by konvergovaly, horké skvrny by se jevily jako větší a maxima by byla posunuta k menším hodnotám l. V případě vesmíru se zápornou křivostí by situace byla opačná.

Výsledky experimentů VSA a CBI ukazují, ve shodě s výsledky předchozími, že vesmír je eukleidovský (plochý) a že celková hustota hmoty a energie odpovídá s 5 % přesností kritické hodnotě vyplývající z Einsteinovy obecné teorie relativity.

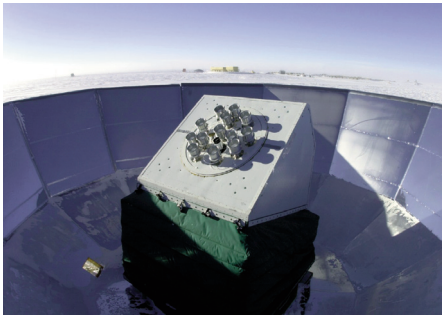
Množství baryonové hmoty ovlivňuje poměr velikostí lichých a sudých maxim, která jsou důsledkem stlačování a zřeďování látky zvukovými vlnami. Baryonová hmota je zodpovědná za síly kompenzující změny tlaku. Výsledky z aparatur CBI a VSA ukazují, že z kritické hustoty odpovídá 5 % baryonové hmotě.

Astronomové již dlouhou dobu vědí, že pohyb hvězd v nejvzdálenějších částech galaxií je ovlivněn nezářivou, „temnou“ hmotou. I temná hmota ovlivňuje velikost maxim

MAXIMA - *Millimiter Anisotropy eXperiment IMaging Array, balónový experiment z let 1998 až 1999 určený ke sledování reliktního záření.*

BOOMERANG - *Baloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics, balónový experiment z přelomu roku 1998 a 1999 určený ke sledování reliktního záření. Anténa měla průměr 1,2 m.*

Teleskop VSA je umístěn na hoře Teide na ostrově Tenerife v nadmořské výšce 2 400 m. VSA je složen ze 14 antén, přičemž každá z nich má velikost 14 cm a ze dvou 3,5 metrových parabolických antén. Zařízení pracuje na kmitočtu 31±5 GHz se šířkou pásma 1,5 GHz při pracovní teplotě 15 K. Rozlišovací schopnost dosahuje až 12 úhlových minut.



DASI - Degree Angular Scale Interferometer, interferometr umístěný na Amundsenově-Scottově základně v Antarktidě.

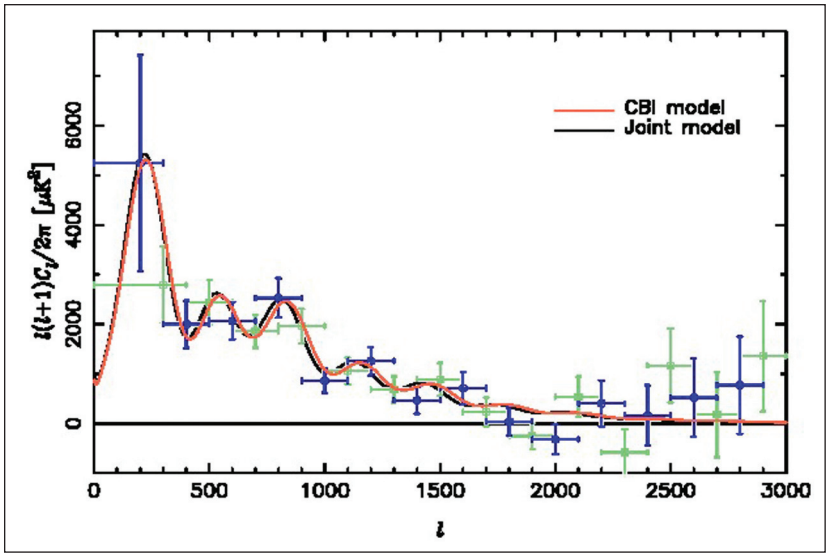
ve výkonovém spektru. Se zářením neinteraguje, avšak na okolní hmotu působí gravitačně. Celkovou hustotu hmoty (baryonová + temná) lze vyčíst z absolutní velikosti prvního maxima. Poslední experimenty ukazují, že látka tvoří z celkové kritické hustoty 30±20 %. Z toho vyplývá, že zbylé 2/3 kritické hustoty jsou zřejmě tvořeny nějakou zvláštní formou „temné“ (vakuové) energie, která má však zcela odlišný charakter než temná hmota.

Klesající tendence amplitud jednotlivých maxim způsobená zejména viskozitou primordiálního plazmatu, pozorovaná CBI, souhlasí se základními předpověďmi kosmologických modelů. Z těchto modelů vyplývá, že dnes pozorované fluktuace v reliktním záření o rozměrech 4 úhlových minut jsou zárodky kup galaxií, které byly expanzí vesmíru zvětšeny do rozměrů desítek miliónů světelných let.

Rozptylové jevy

Jediným překvapením ve výsledcích z CBI je zvýšení amplitud výkonového spektra poblíž hodnoty $l = 3\,000$, které svou velikostí odpovídá maximálnímu očekávanému příspěvku od kup galaxií. Horký plyn v kupách galaxií může rozptylovat reliktní záření charakteristickým způsobem a tak změnit jeho spektrum. Tento efekt, který je znám jako Sunyaevův-Zeldovičův (SZ) jev, je relativně velký pro jednotlivé skupiny galaxií. Radiová pozorování ukazují, že SZ jev může snížit teplotu záření až o 1 mK. Skupina kolem CBI poprvé měřila tento jev pro všechny kupy galaxií v zorném poli a výsledky ukazují, že tento jev mění teplotu o 15 μK, což je mnohem méně, než pro jednu kupu galaxií.

Výkonové spektrum reliktního záření. Modré a zelené intervaly vyznačují výsledky měření CBI, zatímco červená a černá křivka odpovídá předpovědím modelů s různě zadanými kosmologickými vstupními parametry.



Kosmologové nemají velkou radost z naměřeného přebytku záření pro velké hodnoty *l*. Při relativně malé ploše pozorované CBI, pouze 40 čtverečních stupňů, je třeba uvažovat o statistických nejistotách spojených se vzorková-

ním nehomogenního vesmíru. Dalším problémem mohou být radiové zdroje záření, které nemusely být zcela eliminovány. Astronomové vědí, že radiové galaxie jsou často seskupeny do kup galaxií, takže vliv SZ jevu mohl být nadhodnocený.

Vysvětlení zvýšení amplitud reliktního záření pro vysoká l bude vyžadovat pozorování na mnoha různých vlnových délkách přes mnohem větší plochu oblohy. Tato pozorování by měla rovněž zahrnout submilimetrové vlnové délky, aby byly pozorovány i rozptýlené SZ fotony. Při dalších pozorováních buď bude SZ jev potvrzen, nebo bude třeba hledat další, exotičtější vysvětlení.

■ *Milan Červenka*

Topologie vesmíru - může být vesmír jako ementál?

Geometrie - *geometrie vesmíru je lokálně určována obecnou relativitou, čas a prostor jsou zakřiveny přítomností těles a v tomto zakřiveném časoprostoru se tělesa pohybují po geodetikách.*

Topologie - *nauka o globálních vlastnostech a struktuře množin, v našem případě o chování vesmíru jako celku. Za topolo-gicky ekvivalentní považujeme množiny, kte-ré lze spojitě deformovat jednu na druhou.*

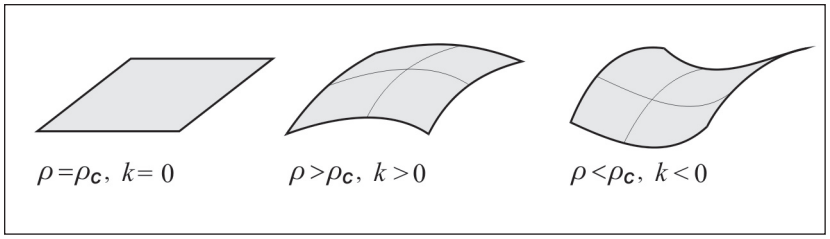
Genus topologie - *číslo, které charakterizuje danou topologii z hlediska počtu „děr" nebo „držadel". Genus se určuje pomocí skupin křivek, které nelze stáhnout do bodu (jsou natažené kolem díry či držadla).*

Když Arno Penzias a Robert Wilson objevili v roce 1965 reliktní záření, netušili, jaký dopad bude jejich objev mít na budoucí fyziku. Reliktní záření je záření, které se oddělilo od látky 380 000 let po Velkém třesku a nese v sobě odkaz toho, jak vesmír vypadal v dávné minulosti. Záření má dnes již nízkou teplotu (zhruba 3 stupně nad absolutní nulou) a vlnovou délku v mikrovlnné oblasti. Záření podrobně zkoumala družice COBE (Cosmic Background Explorer) vypuštěná v roce 1989 a v posledním roce sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) vypuštěná v roce 2001. Reliktní záření není ve všech směrech stejně teplé, v některých směrech nalezneme teplejší a v některých chladnější skvrny. Rozdíl teplot je velmi nepatrný - řádově pouhá jedna stotisícina stupně. Ale současná technika dokáže tyto skvrny (odborně fluktuace) pečlivě sledovat. Právě tyto skvrny jsou jakýmsi paleolitickým otiskem struktur raného vesmíru. Jejich průzkumem je možné určit stáří vesmíru, zastoupení různých složek a zdá se, že i celkový tvar (topologii) vesmíru. Pojďme ale začít od počátku.

Geometrie vesmíru

Geometrie vesmíru je určována rozložením hmoty ve vesmíru. Hmota a energie zakřivují čas a prostor kolem sebe a v tomto pokřiveném světě se pohybují částice po nejrovnějších možných drahách - geodetikách. Míru zakřivení časoprostoru je možné určit z obecné relativity navržené A. Einsteinem v roce 1916. Z geometrického hlediska mohou nastat tři případy, které odvodil v roce 1922 ruský vědec A. Fridman a které si představujeme pomocí jednoduché dvourozměrné analogie (zakřivené plochy) - viz obrázek. Již Fridman věděl že toto dělení nic nevypovídá o celkové topologii (globálním tvaru) našeho vesmíru. Fridman ukázal, že pokud je vesmír jednoduše souvislý (každou křivku v něm lze stáhnout do bodu, nejsou zde „díry"), potom je kladně zakřivený vesmír konečný a záporně i nulově zakřivený vesmír je nekonečný. Jednoduše souvislou množinou není třeba duše automo-

Možné geometrie vesmíru:
Vesmír je lokálně podobný rovině (vlevo), má nulovou křivost a právě kritickou hustotou.
Vesmír je lokálně podobný povrchu koule (uprostřed), s kladnou křivostí a nadkritickou hustotou.
Vesmír je lokálně podobný horskému sedlu (vpravo), má zápornou křivost a podkritickou hustotou.



bilu nebo ementál. Fridman věděl, že pokud by vesmír nebyl jednoduše souvislý, může být konečný i pokud má nulovou či zápornou křivost. Albert Einstein prý kdysi na Fridmanovy návrhy odvětil, že vesmír přece nemůže vypadat jako ementál a nepřipustil možnost existence jiného než jednoduše souvislého vesmíru.

Topologie vesmíru

Obecná relativita pomáhá určit lokální vlastnosti vesmíru, ale neřeší, jak vesmír vypadá jako celek. Právě vesmírná topologie je oborem, který se bouřlivě rozvíjí několik posledních let a snaží se určit celkový vzhled našeho vesmíru. Podobně jako nerosty mohou existovat v několika základních krystalografických strukturách, může mít vesmír, podle současných teorií, jen některé topologické varianty. Někdy se tyto úvahy nazývají kosmická krystalografie. Pojďme se nejprve pro jednoduchost na chvíli zabývat jen dvourozměrnou topologií obdélníku a jejím zobrazením.

Příklad – dvourozměrný vesmír z obdélníku

Představme si placaté bytosti, které žijí jen v rovině obdélníku. Znají dva směry, ale neznají třetí - výšku. Z obdélníku můžeme vytvořit pomocí ztotožňování jeho protilehlých hran čtyři topologické útvary:

Ztotožníme souhlasně jednu dvojici hran, například levou a pravou. Pozorovatel, který by opustil obdélník napravo se objeví ve stejné pozici nalevo.

Ztotožníme nesouhlasně jednu dvojici hran, například levou a pravou. Pozorovatel, který by opustil obdélník napravo se objeví v zrcadlově převrácené pozici nalevo.

Ztotožníme souhlasně obě dvojice hran - levou s pravou a horní s dolní. Pozorovatel, který by opustil obdélník napravo se objeví nalevo, pozorovatel, který by opustil obdélník nahoře se objeví dole. Tuto situaci známe dobře z monitoru počítače u počítačových her.

Ztotožníme obě dvojice hran, jednu souhlasně a jednu nesouhlasně.

Jak si tyto obdélníkové 2D vesmíry představit? Existují celkem tři způsoby. První jsme právě použili. Ztotožňování předem stanovených hran. Druhou možností je využít našich třírozměrných zkušeností a začít lepit z obdélníku kosmické origami. Obdélník ale musí být z nějaké

Kosmická krystalografie - *jde o způsob zobrazování konečné (kompaktní) topologie za pomoci vyplnění prostoru opakujícím se základním útvarem. Jde o podobný proces jako skládání krystalu z elementárních opakujících se buněk.*

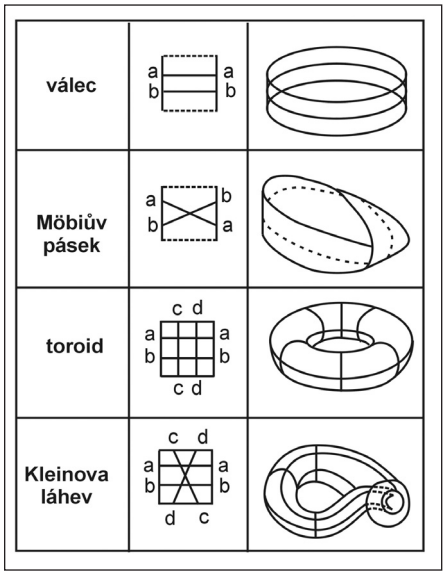
Geodetika - *nejrovnější možná dráha v zakřiveném časoprostoru.*

Jednoduše souvislá množina - *množina, která nevypadá jako „ementál". Nemá žádné díry ani držadla, každou uzavřenou křivku lze stáhnout do bodu.*

Parametr W - *podíl hustoty vesmíru ku kritické hustotě, v našem vesmíru je přibližně roven jedné, tj. vesmír je téměř plo-chý.*

Sféra posledního rozptylu - *horizont, na kterém bychom pomyslně viděli oddělení záření od hmoty. Ve vzdálenějším pohledu již nevidíme reliktní záření, protože záření silně interagovalo s hmotou a nee-xistovalo samostatně.*

Reliktní záření *(CMB - Cosmic Microwave Background) - záření, které se od hmoty oddělilo 380 000 let po vzniku vesmíru, dnes má teplotu 2,73 K a z jeho fluktuací usuzujeme na vlastnosti našeho vesmíru.*

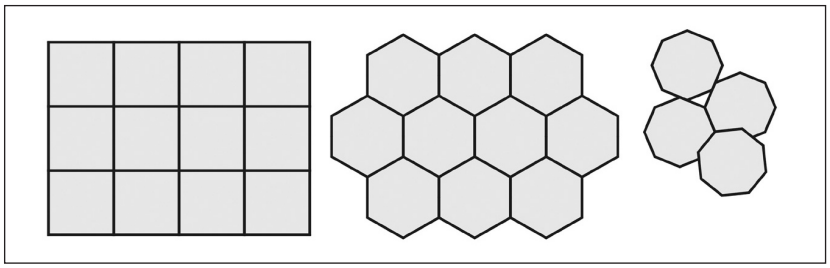


Ztotožòování hran ve 2D topologii a nadhled na útvar ve 3D.

tvarovatelné hmoty, takové, aby šel deformovat. První vesmír povede po stočení papíru a slepení hran na válcovou plochu, druhý na Möbiův pásek. U třetího musíme ve válci ještě slepit horní a dolní hranu, dostaneme útvar podobný pneumatice nazývaný v topologii toroid. Není jednoduše souvislý, existují křivky, které nelze stáhnout do bodu, genus prostoru je roven jedné. A čtvrtý? Tady budeme mít s lepením problémy i v třírozměrném světě, jde o útvar nazývaný Kleinova láhev. Kosmické origami je pro nás snadno představitelné, ale pouze v dvourozměrném světě. V třírozměrném vesmíru již nic takového provést nemůžeme, nemůžeme se odstěhovat mimo vesmír do nějaké čtvrté dimenze a začít lepit skládanku.

Další způsob představy konečného vesmíru je nejelegantnější a vychází z toho, co takový pozorovatel v konečném vesmíru uvidí. Uvidí totiž mnohonásobné obrazy své i svého okolí, jakoby v zrcadlové síni. I kdyby byl v celém vesmíru sám, uvidí mnoho postav. Pohne-li se, pohnou se postupně všechny postavy, počká-li dostatečně dlouho. Když bude chytrý, zjistí, že jeho vesmír je konečný a vidí stále svůj obraz v různých fázích vývoje. Této představě můžeme říkat dláždění, chceme-li. Vesmír jsme vydláždili z opakujících se obdélníků, můžeme to provést například i z opakujících se šestiúhelníků. Jde to ale i z osmiúhelníků, nemůžeme s nimi sice vydláždit rovinu, ale konstantně záporně zakřivený prostor, ve kterém jsou vrcholové úhly menší než v rovině, ano! Vznikne známý topologický útvar, který je podobný dvoutoroidu (jsou v něm dvě díry, kolem kterých nestáhneme křivku do bodu).

Znázornění uzavřeného vesmíru s nulovou křivostí pomocí dláždění čtverci a šestiúhelníky. Prostor s nulovou křivostí osmiúhelníky nelze vydláždit.

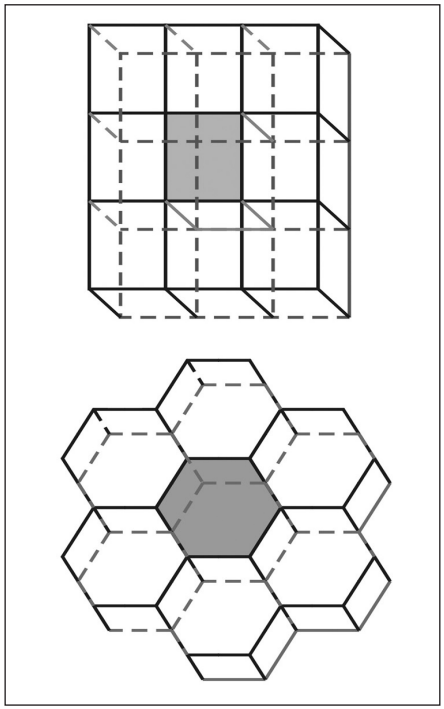


Třírozměrná topologie

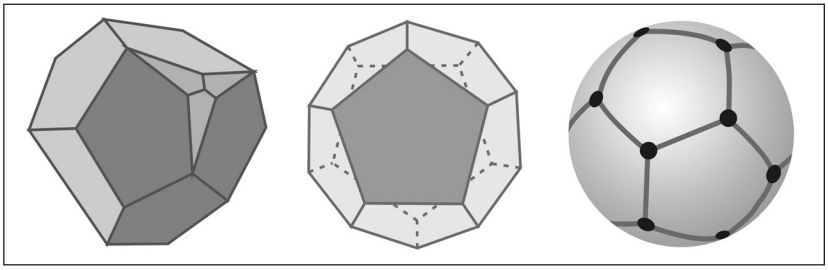
Zobrazit třírozměrný zakřivený svět, navíc ještě jako celek, tj. jeho topologii, je velmi nesnadný oříšek. Snad nejjednodušší metodou pro konečné uzavřené vesmíry je použít dláždění, skládat vesmír z mnohostěnů, pravidelně se opakujících (jejich některé stěny jsou ztotožněny). Tento postup vede na nekonečné množství možností. Uvážíme-li ale vesmíry s nejmenším objemem a vyhovující obecné relativitě, počet možností výrazně kle-

sá. První pokus o klasifikaci těch nejjednodušších případů provedl W. P. Thurston pro hyperbolické geometrie (zápornou křivost) a existuje kompletní klasifikace pro sférické geometrie (kladnou křivost). Konečných vesmírů, které by mohly přicházet v úvahu a jsou z hlediska kosmologie zajímavé, je méně jak 20. Nejčastěji se zkoumá následujících pět:

Prostor vydlážděný z kvádrů: nejjednodušší prostor, ztotožnění stěn vede na analogii toroidu jako ve dvou dimenzích, hovoříme o hypertoroidu. Existuje zde několik neekvivalentních křivek, které nelze stáhnout do bodu (ementál se třemi dírami, hrnek se třemi uchy, třítoroid, genus topologie je 3). Kvádry lze vydláždit prostor s nulovou křivostí.
Prostor vydlážděný z šestibokých hranolů: druhá nejjednodušší varianta, ne příliš pravděpodobná, ale snadno popsatelná. Šestibokými hranoly lze opět vydláždit prostor s nulovou křivostí.
Poincarého prostor: je vytvořen z pravidelného sférického dvanáctistěnu. Pokud jsou vrcholové úhly přesně 120° a ne přibližně 117° jako u eukleidovského dvanáctistěnu, vyplní povrch 4D hyperkoule podobně jako u fotbalového míče zakřivené pětiúhelníky vyplní povrch 3D koule. Poincarého prostor má kladnou křivost.
Bestův prostor: je vytvořen z pravidelného dvacetistěnu, kterým sice nelze vydláždit plochý prostor, ale prostor s konstantní zápornou křivostí ano.
Weeksův prostor: je vytvořen z takového mnohostěnu, aby byla jeho velikost nejmenší možná.



Konečné vesmíry s nulovou křivostí vydlážděné z kvádrů a šestibokých hranolů.

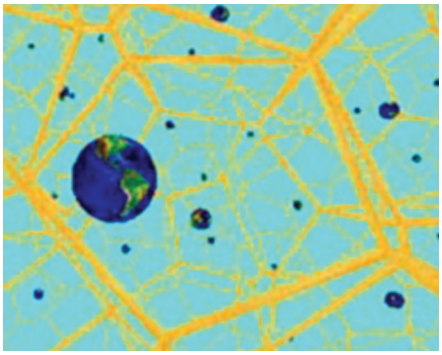


Základní mnohostěny Weeksova prostoru, Poincarého prostoru (dvanáctistěn), napravo je sférický dvanáctistěn.

V třírozměrných konečných vesmírech vidíme stále se opakující obraz v různých fázích vývoje. Kdo ví, zda některá ze vzdálených galaxií, které pozorujeme, není naše vlastní před dávnými časy.

Fluktuace reliktního záření

Vraťme se nyní k fluktuacím reliktního záření, které byly popsány v úvodu. Díky kvantovým procesům je raný vesmír neklidný a jeví zárodky budoucích struktur.



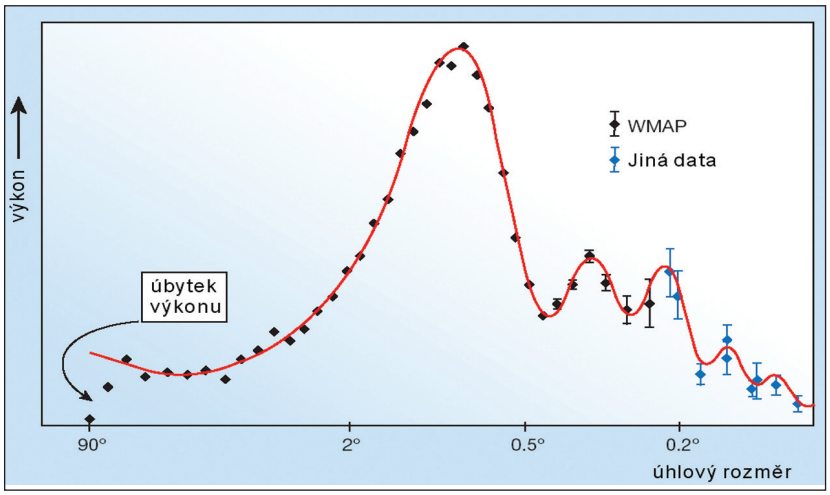
Mnohonásobný obraz ve vesmíru pospojovaném z mnohostěnů.

V době oddělení záření od hmoty se prvopočáteční fluktuace chovají jako zvukové vlny v zárodečné látce, vesmír jako by celý zvučel podivnými zvukovými vlnami. Průchod světla těmito vlnami znamená procházení fotonů různým gravitačním potenciálem a jejich nepatrný ohřev či ochlazení. Tyto teplejší a chladnější skvrny právě pozorujeme v reliktním záření jako otisk dávných časů. Podobně jako zvuk u hudebního nástroje můžeme rozložit na základní harmonické frekvence, můžeme i fluktuace reliktního záření rozložit do takzvaných sférických harmonických. To si lze představit jako statistické sledování procentuálního zastoupení skvrn určité úhlové velikosti. Výsledkem je křivka zvaná výkonové spektrum (viz Milan Červenka: Zvuk raného vesmíru). Právě charakter fluktuací bude silně záviset na topologii vesmíru, pokud je vesmír malý a konečný. Proto se pečlivě zkoumají fluktuace reliktního záření naměřené sondou WMAP a v těchto dnech probíhají intenzivní pokusy určit topologii našeho vesmíru.

Současný stav

Zjištěné fluktuace v reliktním záření odpovídají velmi dobře modelu plochého nekonečného vesmíru až do fluktuací o velikosti zhruba 60°. Jakékoli teplotní korelace však mizí na větších škálách. Co to znamená? Žádná zvuková vlna nemůže mít nikdy vlnovou délku větší než je prostor, ve kterém se rozvinula. Jen v nekonečném vesmíru by se mohly vyskytovat i velmi nízké frekvence. Absence nízkofrekvenčních vln (korelací fluktuací s velkými úhlovými rozměry) by tak měla znamenat konečnost našeho vesmíru!

Výkonostní spektrum fluktuací (WMAP). Nejčastější fluktuace mají úhlový rozměr 1°.



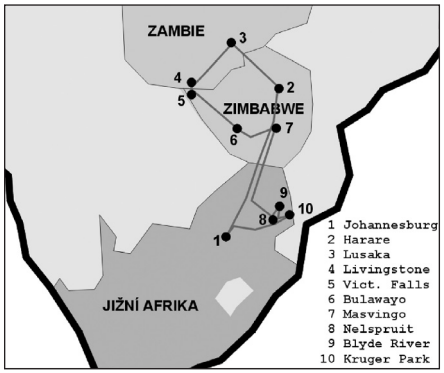
Dne 9. 10. 2003 publikovala pětice vědců z Francie a USA sdělení, že fluktuacím reliktního záření měřeného sondou WMAP odpovídá ze všech navrhovaných topologií nejblíže konečný vesmír s velmi malou kladnou křivostí, $k = 1{,}012 \div 1{,}014$ a s topologickou strukturou založenou na Poincarého sférických dvanáctistěnech. Po-

dle tohoto modelu by měl být vesmír pospojován tak, že protilehlé stěny dvanáctistěnu jsou totožné. Nikdy v takovém světě nenarazíme na žádnou hranici, i když je ve skutečnosti konečný.

Je třeba si uvědomit, že jde o jeden z mnoha navržených modelů, který v tuto chvíli nejlépe odpovídá měřeným datům. K jeho potvrzení či vyvrácení bude ale třeba ještě několika měsíců tvrdé práce vědců. Jsou navrženy další testy modelu, například vyhledávání kružnic podobných fluktuací, které by se měly vyskytovat na průsečíku sfér posledního rozptylu s protilehlými stěnami elementárního mnohostěnu Zdá se, že data z WMAP budou dostatečně podrobná. Kdyby se ukázalo, že nikoli, budeme muset vyčkat až na měření z ještě přesnější sondy Planck, jejíž start je plánován na rok 2007. Pokud by se uvedená topologie vesmíru potvrdila, šlo by bezesporu o jeden z nejvýznamnějších okamžiků moderní kosmologie a pravděpodobně fyziky vůbec.

■ *Petr Kulhánek*

Expedice ZAMBIA ECLIPSE



Trasa expedice ZAMBIA ECLIPSE 2001.

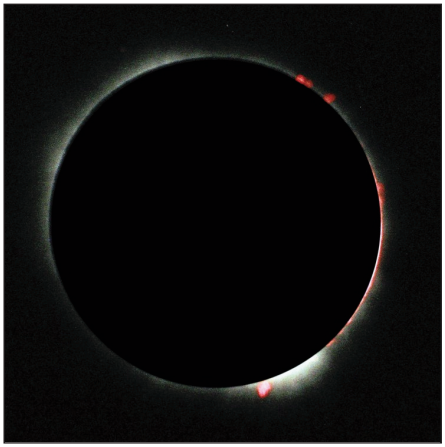
Ta zdánlivě šílená myšlenka se urodila v našich hlavách někdy těsně po zatmění v roce 1999 v Maďarsku. V prvopočáteční euforii padaly návrhy typu: „Pronajmeme si jachtu a zatmění budeme pozorovat z oceánu“. Myslím, že málokdo bral tenkrát tyhle návrhy vážně. Jak postupoval čas, plány získávaly realističtější podobu, až nakonec padlo rozhodnutí: pojede se do Lusaky, hlavního města Zambie. Důvodů bylo tenkrát několik: jde o jediné mezinárodní letiště v pásu úplného zatmění, v místě je universita, která by mohla poskytnout pomoc v případě problémů a jde o hlavní město, které by mělo být relativně civilizované. A tak začala expedice „Zambia Eclipse 2001“.

Cesta za zatměním

Po zcela očekávaném, ale naprosto vyčerpávajícím kolotoči zařizování a vyplňování mnoha a mnoha formulářů se blíží den odletu do Johannesburgu. Máme s sebou dva fotoaparáty, videokameru, pokovený kondenzor jako celooblohovou komoru, zrcadlový teleobjektiv MTO 1000 s montáží zapůjčený Rokycanskou hvězdárnou, modul pro měření osvětlení a průběhu teploty, notebook a handheld. Expedice je čtyřčlenná: Petr Kulhánek, Pavel Břichnáč, Martin Žáček a David Břeň. Odlétáme v pátek večer do Jihoafrické republiky, zatmění je ve čtvrtek 21. 6. 2001. První srovnávací měření modulem chceme uskutečnit o jeden den dříve, tj. ve středu. Máme tedy čtyři dny na cestu neznámým prostředím, musíme projet Jihoafrickou republiku, Zimbabwe a Zambii. V Zimbabwe nedávno vyvraždili několik rodin farmářů, v Zambii o několik dnů dříve zastřelila policie při demonstraci člověka. Připadáme si nesmírně statečně, ale každý si tajně přejeme být už zase zpátky. Ze strachu, jak stihneme projet tisíc kilometrů během čtyř dnů „ne-

civilizovanou“ černou Afrikou nás vyvádí již naše letecká společnost ČSA. Letadlo vylétá o dvě hodiny později. Letištní personál nás ujišťuje, že se nic neděje, v Londýně o nás prý vědí a po příletu se o nás postarají. Letadla prý na sebe čekají. Jak naivní představa. V Londýně žádný zástupce ČSA není, letadlo do Johannesburgu samozřejmě odletělo bez nás a my tak nabrali jednodenní zpoždění. Personál letiště je milý, každý nás vyslechne a převede přes jím střežený úsek, ale to je tak všechno. Pomáhá až úřednice z Air France. Nejenom, že zajistí jiný let o 24 hodin později, ale vyřídí i celkem slušné ubytování v hotelu, včetně stravování na účet ČSA. Dá nám i lístky na místní dopravu, ale žádná už nejede (je už po půlnoci), takže to končí taxíkem za třicet liber.

Celý následující den neplánovaně trávíme v londýnském hotelu Sheraton Heathrow. Venku prší, bydlíme na periferii blízko letiště, nic k vidění tu není. Večer se přesouváme na letiště a s jednodenním zpožděním konečně ve 21:30 místního času odlétáme do Johannesburgu. Tam také po jedenácti hodinách letu přistáváme kolem desáté místního času. Všichni máme pocity nejistoty a strach, který v nás vypěstovali před odletem kamarádi a známí. Taxíkem se přesouváme na nádraží, všude kolem jsou černoši a my úzkostlivě hlídáme přístroje i osobní věci. V kapsách máme každý slzný plyn pro případ napadení. Na nádraží se dozvídáme, že nejezdí žádné vlaky, které by spojovaly alespoň hlavní města sousedních států, a že autobusy do Lusaky jsou na několik dní dopředu vyprodány. Prodělváme první vážnější krizi. Zdá se, že díky jednodennímu zpoždění se představa zatmění odsouvá do neznáma. V méně reprezentativních prostorách nádraží objevujeme místní autobusovou společnost „City To City“. Za přepážkou i před přepážkou je veliké množství černochů a ještě větší množství odpadků, nicméně mají volné místo v autobusu odjíždějícím ve 20:30 (více než hodinu po západu Slunce) do Harare, hlavního města sousední Zimbabwe. Ve



Vnitřní část korony s protuberancemi. Objektiv MTO 1000, film Kodak Royal Gold 200, expouice 1/1000 s, fotografie David Břeň..

Kompozice zpracovaná metodou radiální masky, Nikon CoolPix 995, fotografie Pavel Břichnáč.

Místo našeho pozorování.

všech průvodcích jsme zrazováni od cestování místními linkami a pohybem po setmění venku, doslova: „...a jen blázen vychází po setmění z hotelu“, nicméně s touto společností navečer odjíždíme správným směrem, ale s pocity obětního beránka. Kolem šesté hodiny ráno přecházíme hranici do Zimbabwe. Ranní odbavení na celnici trvá čtyři hodiny a zdá se nám, že všude kolem panuje pekelný chaos. Možná to mělo nějaký řád, který jsme neobjevili. Potkáváme první opice, kterých cestou ještě uvidíme mnoho. V průběhu devatenáctihodinové cesty v autobuse navazujeme i první plodné kontakty s domorodým obyvatelstvem. Večer pokračujeme z Harare dalším autobusem, opět přes noc do Lusaky v Zambii. Autobusová společnost je ještě méně reprezentativní než „City To City“, autobus je jedním slovem příšerný. Deprimuje nás, že všichni házejí odpadky z oken. Jako sardinky strávíme další noc na cestě. K ránu přechod hranic, opět několikahodinová anabáze, vstupní víza do Zambie vystavují přímo na hranici. Hurá! Naše informace byly správné.

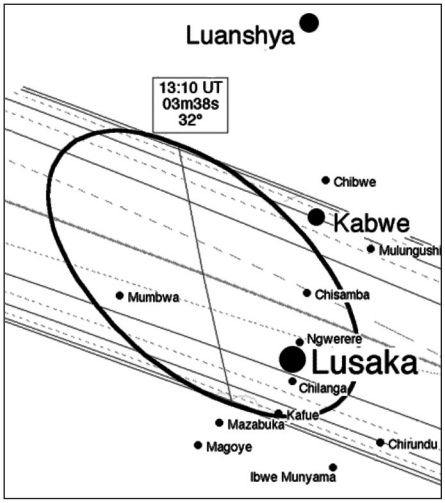
Lusaka

Po příjezdu do Lusaky nemůžeme uvěřit, že těch pár domů je skutečně hlavní město Zambie. Jsme mile překvapeni, že jsme cestu absolvovali beze ztrát na životech, na zdraví a dokonce neokradeni a naše obavy z místních obyvatel získávají první trhliny. Následujícího dne ve středu provádíme kontrolní měření modulem na universitním hřišti. Měření trvá 4 hodiny a tak máme čas si prohlédnout universitu, navštívit katedru fyziky a odeslat mail. Na universitě je prodejna potravin zející prázdnotou, prodejna knih pro šest fakult zející prázdnotou a zavřený poštovní úřad (zející prázdnotou).

21. 6. 2001: Den zatmění. V průběhu dne se objevuje ohromné množství lidí. Zatmění připomíná pouťovou atrakci. Všude se prodává pivo, pečou vuřty, domorodci pijí, zpívají a tančí. Na některých je vidět, že zatmění již neuvidí. Prezident Zambie pro tisk prohlásil, že

Kompozice zpracovaná metodou radiální masky, objektiv MTO 1000, film Kodak Royal Gold 200, fotografie David Břeň.

jde o boží zázrak. Počasí je skvělé. V 13:09 začíná úplná fáze. David fotografuje objektivem MTO, Pavel Nikonem, Martin má na starosti kameru a modul a Petr předvádí kašpárky a opičky místnímu obyvatelstvu, vede s ním řeč a nenásilně je tak odvádí od přístrojů. Je vidět Jupiter, Saturn, Aldebaran a další hvězdy. V blízkosti disku jsou vidět nádherné protuberance. Jediným záporem, který zjistíme až večer, je, že se Martin místo kameře bohužel věnoval domorodcům, přesněji domorodkyním.



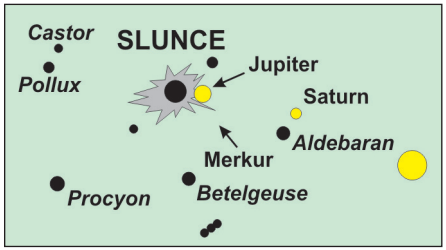
Pás totality v okolí Lusaky.

Další cesta

Následující den brzy ráno odjíždíme z hlavního města Zambie do Livingstonu. Jde o nejodpornější a nejsmradlavější minibus, který jsme kdy viděli. Po osmihodinové cestě jsme úplně černí, všemi otvory pronikal dovnitř černý mastný dým. V pozdním odpoledni přijíždíme do Livingstonu. Martin vyhledal ubytování za rozumnou cenu (pro tuhle činnost se osvědčil a tak mu již zůstala do konce pobytu). Necháme si tu udělat i večeři a kupodivu se nám po ní nic nestane. V sobotu ráno nás čeká prohlídka Zambijské strany Viktoriiných vodopádů na řece Zambezi. Jsou prostě nádherné. Délka vodopádů je asi 1700 m, hloubka necelých 100 metrů. Všude je vodní tříšť a krásné duhy. Pavel fotografuje jak o život, některé záběry i dvacetkrát. Taky tu vidíme prvního slona. V podvečer přecházíme pěšky hranici Zambie a Zimbabwe.

Na neděli jsme si připravili prohlídku Viktoriiných vodopádů, pro změnu ale ze Zimbabwské strany. Vodopády jsou stejně krásné jako včera, pobíháme kolem do úplného promočení. Večer odjíždíme vlakem třetí třídy do Bulawaya. Pojedeme přes noc, ušetříme za hotel. Ve vlaku odporně páchne domorodec a čile pobíhá různý hmyz. Vlak sice občas vyvine značnou rychlost, ale v zápětí někde stojí třeba i hodinu. Výsledek je průměrná rychlost 30 km/h a zkušenost, že v Africe může vlaky jezdit jen ten, kdo na to má žaludek a dostatek času. Což jak vypadá, jsou všichni. Máme pocit, že polovina domorodců někde něco koupí a jede to prodat na druhou stranu země.

Protuberance viditelná při zatmění. Objektiv MTO 1000, film Kodak Royal Gold 200, fotografie David Břeň



Hvězdy a planety pozorovatelné při úplném zatmění Slunce 21. 6. 2001.

Hvězdy a planety pozorovatelné při úplném zatmění Slunce 21. 6. 2001.

Druhá polovina je vozí. Ti co je okrádají tvoří mizivé procento. Vlak má zpoždění jen dvě hodiny, do Bulawaya přijíždíme kolem deváté. V jízdním řádu je s pomalou rychlostí vlaku zřejmě počítáno. Odjíždíme co nejrychleji dál do Masvinga. V Masvingu najde Martin opět skvělý hostel, takže se jednu noc pořádně vyspíme.

Další den navštívíme vykopávky, které jsou poblíž. Jedeme k pozůstatkům královského města lidu civilizace Shona. Ruiny jsou mimořádně krásné. Navštěvujeme domorodou vesnici (jakýsi skanzen), kde nám místní černošky pěkně zatančily. Vidíme také zajímavou jeskyni, která sloužila jako megafon pro komunikaci krále se vzdálenými vesničany. Civilizace Shona uctívala jako symbol nějakého ptáka, jehož sošky se všude dochovaly. Je také na vlajce Zimbabwe, na státním znaku a jako hologram na našich vízech. Prohlížíme si v reálu obří falický symbol, který je vyobrazen na místních penězích. Potulující se opice nás již nepřekvapí, jsou drzé a jsou všude. Večer odjíždíme minibusem do Beitbridge, na hranici Zambie/JAR.

Po celonoční cestě čekáme na otevření hranice. Vyměníme peníze a pěšky přecházíme hranici po mostě přes řeku Limpopo. Zoraný pás půdy s ostnatými dráty na obou stranách hovoří za všechno. Zimbabwský režim v lecčems připomíná bývalý totalitní režim u nás. Hurá, jsme v JAR. Je to kouzelná změna. Civilizovaná země. Přes značné výhrady některých členů expedice se dále přemisťujeme stopem. Jde to jako po másle. Řidiči zastavují téměř okamžitě a čtyřsetkilometrovou vzdálenost do Nelspruitu zvládáme v rekordním čase. Martin jako obvykle vyhledá ubytování v hostelu Sun Lodge, tentokrát skutečně mimořádně kvalitní.

Dalšího dne si na dva dni pronajímáme auto s řidičem a průvodcem. První den jedeme ke kaňonu Blyde River. Jde o třetí největší kaňon na světě. Je dlouhý 32 kilometrů a hluboký až 850 metrů. Je to nádhera a jen pro ten úchvatný pohled by stálo za to sem jet. Násle-

dujícího rána vstáváme velmi brzo. Je totiž na programu Krugerův národní park a chceme být uvnitř před východem Slunce. Tenhle zážitek asi slovy nejde pořádně vylíčit. Všude spousta zvěře, lví rodinka na silnici, vyhřívající se krokodýl, spousta antilop a ptactva, žirafy, sloni, leopard, hroši, nosorožci. Prostě super. Krugerův park je dlouhý 350 kilometrů a široký 60 až 70 kilometrů. Večer nás čeká bouřlivé rozloučení s průvodcem Brianem v místní hospodě a poslední nocleh v Africe. 30. 6. 2001 brzy ráno odjíždíme autobusem (velmi kvalitním) do Johannesburgu, pak taxíkem na letiště a letadlem přes noc letíme do Londýna. Příběh se opakuje, letadlo má zpoždění a ulétl nám další spoj do Prahy. Jsme již natolik otrlí, že taková drobnost nás nemůže rozhodit. Vždyť za pouhých 8 hodin letí další letadlo. 1. července v šest večer dosedáme s osmihodinovým zpožděním na letištní plochu v Ruzyni a končí jedna moc hezká kapitola v našem životě.

■ *David Břeň, Petr Kulhánek*

Viktoriiny vidopády.

Great Encloser, Masvingo.

Kapitola III.
PŘÍSTROJE, SONDY

Poznání světa kolem nás by nikdy nebylo možné bez přístrojové techniky. A v astronomii to platí dvojnásob. Lidské oko je sice velmi výkonný orgán, ale na poznání tajemství vesmíru nestačí. Již první pohled na oblohu dalekohledem přinesl obrovský skok kupředu. Galileo Galilei spatřil to, co žádný smrtelník před ním: Jupiterovy měsíce, detaily kráterů na Měsíci, Mléčnou dráhu. Od té doby je dalekohled základním nástrojem astronomů a prodělal neuvěřitelný vývoj. Nad snímky slunečních skvrn z nového švédského slunečního dalekohledu SST na španělské La Palmě se tají dech. Detaily struktur jsou fascinující.

Systém aktivní a adaptivní optiky eliminuje nízkofrekvenční průhyby primárního zrcadla i vysokofrekvenční turbulence atmosféry. Lidstvo se naučilo stavět obří segmentované dalekohledy, uvažuje se dokonce o stavbě stometrového optického dalekohledu OWL. V roce 2003 pokračovala stavba dosud největšího dalekohledu světa VLT – čtveřice spojených 8,2 metrů velkých dalekohledů na hoře Cerro Paranal v Atacamské poušti. Měli jsme to štěstí rozestavěný dalekohled navštívit a tak není divu, že bonus zařazený za touto kapitolou je věnován právě astronomii v Atacamské poušti. V roce 2003 se také začala stavět obří síť radioteleskopů ALMA. Za několik let se celkem 64 dvanáctimetrových antén ve výšce 5 000 metrů nad mořem stane největším přístrojem světa pro milimetrové vlny. OWL, VLT, ALMA – tři špičkové projekty evropských astronomů na jižní polokouli. Jako by se Evropa najednou snažila předehnat v astronomii celý svět.

A nejde jen o dalekohledy klasického typu. V roce 2003 byl dostaven italsko-francouzský detektor gravitačních vln VIRGO. Jedná se o interferometr s délkou ramen 3 kilometry. Těmito parametry je přístroj srovnatelný se slavným detektorem LIGO v USA.

Máte pocit, že se v Evropě pro astronomii v roce 2003 udělalo hodně? To ještě zdaleka není vše. V březnu 2004 startovala sonda

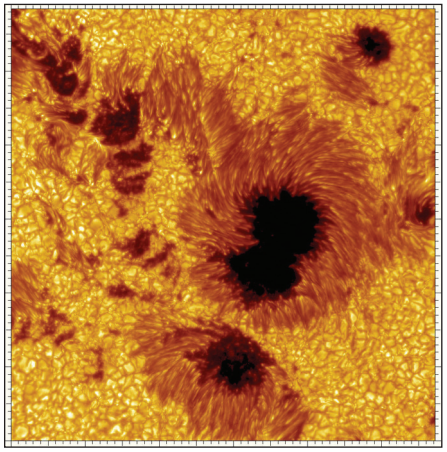
Rosetta, která má za cíl přistát na jádře komety 67P/Churyumov-Gerasimenko v roce 2014. Bude-li to možné, pokusí se sonda přiblížit k některé planetce. Sonda je dílem Evropské kosmické agentury, stejně jako další sonda s názvem Mars Express, která odstartovala 2. 6. 2003 k Marsu. Spojení s přistávacím modulem Beagle 2 bylo sice ztraceno, ale většina přístrojů je na orbitální části a ta funguje bez závad. Je příjemné sledovat, jak se evropské země stávají rovnocennými partnery Spojených států ve výzkumu vesmíru.

Petr Kulhánek

Švédský sluneční dalekohled

Švédský sluneční dalekohled.

Sluneční skvrny v blízkosti středu Slunce. Značky na okrajích obrázku jsou vzdálené 1 000 km. SST, 2002.



Švédský sluneční dalekohled (SST) je postaven na španělském ostrově La Palma. První světlo jím prošlo 2. 3. 2002, kdy byl ještě zacloněn na aperturu 60 cm. Plný průměr objektivu 97 cm se využívá k pozorování sluneční fotosféry od 21. 5. 2002. Typem konstrukce jde o vakuový věžový dalekohled.

Na vrcholu sluneční věže je umístěn coelostat, optická soustava nejméně dvou rovinných zrcadel, která směřuje obraz pozorovaného objektu do optické osy nepohyblivého dalekohledu. První zrcadlo je nastavitelné v deklinaci a směřuje obraz pozorovaného objektu na druhé zrcadlo, které pak odráží obraz přímo do objektivu. Ve starších přístrojích řízených mechanicky bývala optická osa vycházejících paprsků shodná s osou rotace Země. V novějších konstrukcích je používána již alt-azimutální montáž řízená digitálně – optická osa může být orientována svisle i při použití jen dvou zrcadel. Obraz v ohniskové rovině pak již jen rotuje kolem středu, a to jedenkrát za den.

SST používá adaptivní optiku vyrovnávající chvění zemské atmosféry s frekvencí 1 kHz. Se svým průměrem je, co do velikosti, největším evropským a druhým největším slunečním věžovým dalekohledem na světě, hned po dalekohledu McMath-Pierce na Kitt Peaku, který je však dalekohledem zrcadlovým. SST je umístěn na nejlepším místě pro sluneční dalekohledy na zeměkouli a dovoluje spatřit a fotografovat mnohem větší podrobnosti slunečního povrchu než bylo doposud možné.

Jeho rozlišovací schopnost je tak vysoká, že dokáže rozeznat podrobnosti o velikosti cca 70 km na povrchu Slunce. Toto rozlišení je zhruba třikrát vyšší, než bylo doposud běžné u srovnatelných pozemských přístrojů. To vše je možné díky kombinaci předností refraktoru a adaptivní optiky. Objektiv je zhotoven pouze z jediné čočky, tedy bez korekce barevné vady. Použitím jednočočkového objektivu v kombinaci s vakuovou věží se výrazně zvýší ostrost obrazu – minimalizuje se parazitní světlo. Navíc jednoduchá čočka vytváří pro každou vlnovou délku samostatný obraz Slunce v jiné vzdálenosti a obraz se tím stává čistý a jasný. Kvalita optiky dovoluje rozlišit ve viditelné oblasti spektra až 2000 samostatných spektrálních čar. SST se bude zabývat magnetickým polem Slunce, pohyby horních vrstev sluneční atmosféry a vznikem hvězdného spektra.

■ *Vavřinec Havlíček*

Velmi velký dalekohled (VLT)

V dějinách Velmi velkého dalekohledu (VLT, Very Large Telescope) jsou nejdůležitější především tyto dva letopočty: 1962, kdy byla založena Evropská jižní observatoř (ESO) a 1987, kdy její vedení rozhodlo o vybudování největšího pozemského optického dalekohledu. V následujících letech se začala odlévat první zrcadla a hledala se příhodná lokalita. Ta byla nalezena na 2 635 metrů vysoké hoře Cerro Paranal v Chile (24°40' j. š., 70°25' z. d.), asi 120 km jižně od města Antofagasta uprostřed proslulé pouště Atacama, která je nejsušším místem na Zemi.

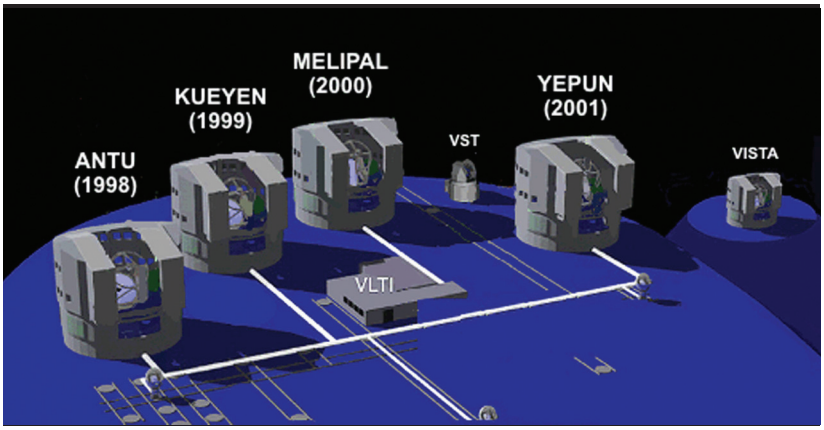
VLT se skládá ze čtyř osmimetrových dalekohledů (průměr 8,2 m), které mohou pracovat samostatně nebo společně, kdy se celkový výkon vyrovná jednomu šestnáctimetrovému dalekohledu. Sběrná plocha každého zrcadla je 53 metrů čtverečních. Jména hlavních dalekohledů (Antu, Kueyen, Melipal a Yepun) pocházejí z mapušštiny a znamenají postupně Slunce, Měsíc, Jižní kříž a Venuše. Dalekohledy mohou být použity v kombinovaném režimu pro interferometrická měření o základně 200 m, která poskytují obrázky vysokého rozlišení. Každý z dalekohledů využívá tři ohniska (Nasmyth, Coudé, Cassegrain), do kterých lze umístit řadu přístrojů. Optický systém dalekohledů je typu Ritchey-Chretien. Rozlišovací schopnost je 0,18" a se systémem adaptivní optiky je pod hranicí 0,05". Kromě systému adaptivní optiky jsou primární zrcadla vybavena systémem aktivní optiky. Tenké primární zrcadlo je ohebné a lze aktivně měnit jeho zakřivení pomocí počítačových povelů podpůrnému systému. Povely jsou vydávány na základě sledování kvality obrazu referenční hvězdy.

Ke čtyřem velkým dalekohledům patří ještě tři menší (průměr 1,8 m) podpůrné dalekohledy a pomocný dvouapůlmetrový VST (Very Large Telescope Survey Telescope) pro širokoúhlé optické zobrazení. K tomu všemu se má v roce 2004 dokončit stavba britského čtyřmetrového dalekohledu pro pozorování v infračervené oblasti (VISTA).

VLT - *Very Large Telescope, Velmi velký dalekohled. Soustava čtyř 8,2 metrových a několika dalších podpůrných dalekohledů na Cerro Paranal v Atacamské poušti. Dalekohledy patří evropské organizaci ESO.*

ESO - *European Southern Observatory, Evropská jižní observatoř. Organizace založená v roce 1962. V Atacamské poušti staví dalekohledy na třech místech: na hoře La Silla, na hoře Paranal a na planině Chajnantor.*

HST - *Hubble Space Telescope, dalekohled na oběžné dráze Země, kam byl umístěn v roce 1990. Průměr zrcadla 2,4 m.*



Rozmístění dalekohledů na Cerro Paranal.

Chandra - *rentgenová družicová observatoř na oběžné dráze Země, kam byla umístěna v roce 1999. Na palubě observatoře je rentgenový dalekohled o průměru 1,2 m a ohniskové délce 10,05 m, tvořený čtyřmi soubory souosých parabolicko-hyperbolických zrcadel o délce 0,85 m, se zorným polem o průměru 1,0° a s úhlovým rozlišením 0,5".*

Na konci roku 2003 zveřejnila ESO výsledky několika zajímavých pozorování, a to jak z velmi vzdáleného, tak blízkého vesmíru, včetně naší sluneční soustavy. Dva nejvzdálenější obrázky vznikly při pozorování oblastí ze známých fotografií CDFS (Chandra Deep Field South) a HDFS (Hubble Deep Field South) pořízených v rentgenovém oboru družicí Chandra a ve viditelném oboru dalekohledem HST. Do prvního obrázku se po padesáti hodinách expozice vešlo neuvěřitelných sto tisíc galaxií a ve druhém se spojily síly HST a VLT, čímž vznikl pestrý obrázek, v němž barvy odpovídají typu a vzdálenosti jednotlivých galaxií.

Dalekohledem VLT byla pozorována galaxie 3C 445 ve Vodnáři, která je 1 miliardu světelných let daleko. Galaxie má v centru supermasivní černou díru, ze které tryskají dva, jeden a půl milionu světelných let dlouhé plasmové výtrysky se silným synchrotronním zářením pocházejícím z rychle se pohybujících elektronů v magnetickém poli. Pomocí VLT byly získány detailní infračervené (1,25 μm a 0,9 μm) obrázky „horké skvrny" – místa, kde se výtrysk střetává s mezigalaktickým vodíkem. Dvě „horké skvrny" jsou zřejmě způsobené elektrony urychlenými při sekundárních procesech.

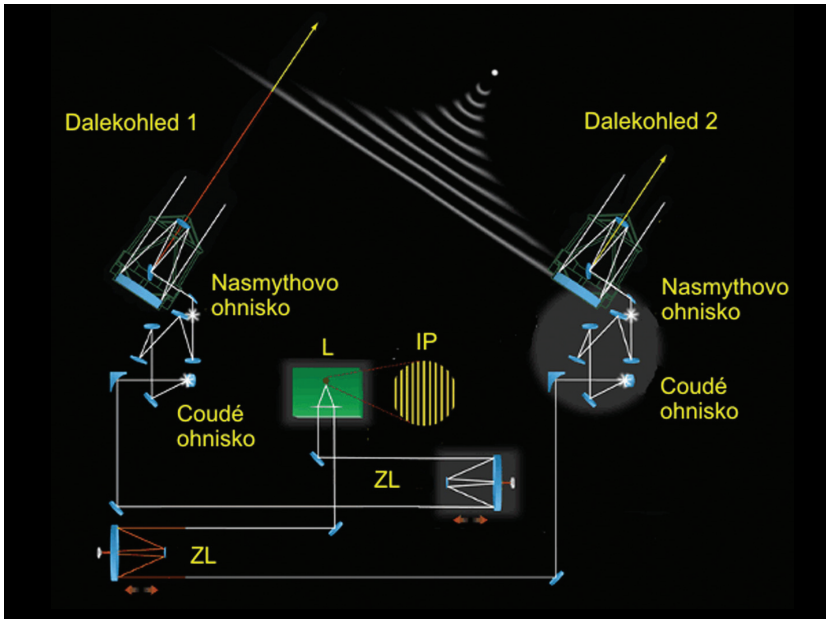


Schéma VLT interferometru: ZL - zpožďovací linka, L - laboratoř, IP - interferenční proužky. VLT interferometr má být zprovozněn v roce 2005. Po doplnění dalšími dalekohledy bude mít základnu o délce 200 metrů.

Při pozorování nejbližší kupy galaxií v souhvězdí Panny (50 milionů světelných let daleko) se v prostoru mezi galaxiemi této kupy našly planetární mlhoviny. V lednu 2002 VLT při svém spektroskopickém experimentu poprvé ukázal, že některé z nich jsou „napájeny" mladými masivními hvězdami. Vzájemné vztahy s okolními objekty budou předmětem dalšího zkoumání.

V prosinci roku 2002 se podařilo uvést do provozu MID Infrared interferometric instrument (MIDI), unikátní doplněk k VLT interferometru, který jako první měří na vlnové délce 8,7 μm s tak velkými zrcadly (průměr 8,2 m) a se základ-

nou 100 m. Měření na této vlnové délce je extrémně obtížné, protože v tomto oboru září vše kolem nás. Interferometr umožní sledování ohřevu kosmického materiálu (prachu a plynu) v blízkosti horkého objektu. Uplatní se při výzkumu exoplanet a černých děr. Jeden z prvních objektů, na kterých se MIDI vyzkoušel, byla i záhadná obří hvězda Eta Carinae.

Avšak pozorují se nejen velké objekty. Koncem roku 2002 VLT odpověděl i na otázku, jak malé jsou vlastně malé hvězdy. K měření byla zvolena naše po Slunci nejbližší hvězda – Proxima Centauri (4,2 světelných let daleko), která je tak malá, že ztěží může ve svém nitru spalovat vodík. Pro malé hvězdy neplatí, že jejich průměr závisí na jejich hmotnostech. To je způsobeno degenerací plynu ve hvězdě. Velikost Proximy Centauri o hmotnosti 15 % hmoty Slunce byla odvozována pouze z teoretických modelů. Měřením se však potvrdilo, že ačkoli je tato hvězda 150 krát hmotnější než Jupiter, má ve srovnání s ním jen 1,5 krát větší poloměr. Změřený úhlový průměr Proximy Centauri je 1,02 ± 0,08 obloukových milivteřin, což se dá srovnat s úhlovou velikostí špendlíkové hlavičky na povrchu Země, pozorované z Mezinárodní kosmické stanice.

Pomalu se dostáváme až do naší sluneční soustavy. Na začátku roku 2003 VLT objevil tři nové měsíce planety Neptun. Jsou to první měsíčky tohoto plynného obra, které byly objeveny od průletu sondy Voyager 2 v roce 1989, a zároveň první nalezené ze Země od roku 1949. V prosinci 2003 VLT překvapil snímkem, který si nezkušený po-zorovatel může splést s fotografií planety Saturn. Nicméně, planeta se zářivě jasným prstencem je ve skutečnosti Uran v blízkém infračerveném oboru spektra. Samotná planeta toto záření díky metanové atmosféře pohlcuje, zatímco ledový disk ho velmi dobře odráží.

■ *Jiří Hofman*

HDF - *Hubble Deep Field, slavný snímek malého výseku oblohy (úhlově odpovídá malému penízku sledovanému ze vzdálenosti 25 metrů) v souhvězdí Velké Medvědice z konce roku 1995. Byl složen ze 342 různých snímků pořízených HST v průběhu deseti dnů. Doba expozice se pohybovala od 15 do 40 minut. Snímky byly exponovány v různých oborech spektra. Bylo na nich nalezeno celkem 1 500 ga-laxií v různých stupních vývoje. Obdobné snímky jsou od té doby pořizovány různými přístroji a v různých místech oblohy.*

HDFS - *Hubble Deep Field South – obdobný snímek jako HDF. Ukazuje část oblohy v souhvězdí Tukana. Byl pořízen roku 1998.*

CDFS - *Chandra Deep Field South – obdobný snímek jako HDF z oblasti souhvězdí Pece na jižní obloze. Je pořízen v rentgenovém oboru spektra.*

Snímek Uranu s prstencem a měsíci, pořízený dalekohledem VLT na počátku roku 2003.

Jaký bude nástupce HST?

HST - *Hubble Space Telescope, dalekohled na oběžné dráze Země, kam byl umístěn roku 1990. Průměr zrcadla 2,4 m.*

NGST - *New Generation Space Telescope, původní název dalekohledu JWST.*

JWST - *James Webb Space Telescope.*

NASA - *National Aeronautics & Space Administration.*

ESA - *European Space Agency.*

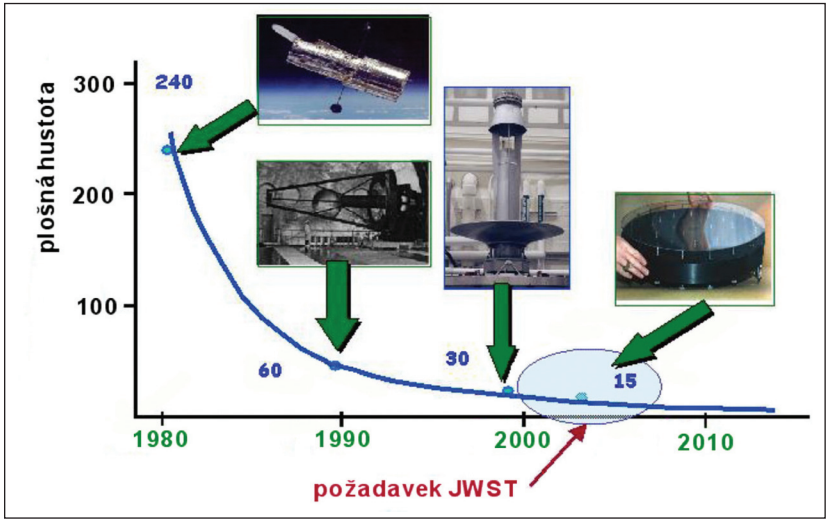
CSA - *Canadian Space Agency.*

Hubbleův kosmický dalekohled (HST), který je na oběžné dráze již od roku 1990, má v blízké budoucnosti nahradit dalekohled James Webb Space Telescope (JWST). Jeho úkolem bude odhalení a studium prvních galaxií, které se ve vesmíru tvořily po velkém třesku. Jeho dalším úkolem bude určení velikosti a geometrie vesmíru, vysvětlit vznik skryté (nebaryonové) hmoty a zkoumat procesy tvorby hvězd a planet. Původní název dalekohledu JWST byl Next Generation Space Telescope (NGST), ale 10. září 2002 byl dalekohled přejmenován na počest Jamese E. Webba.

James E. Webb (1906-1992) byl v šedesátých letech minulého století ředitelem NASA a měl nemalý podíl na celé éře Apolla a sérii výzkumných programů na Měsíci. Zodpovídal za více než 75 kosmických letů, včetně vystoupení prvního Američana do meziplanetárního prostoru. Již v roce 1965 se podílel na výzkumu a přípravě vesmírného dalekohledu, později přejmenovaného na Hubble Space Telescope.

Hlavním autorem projektu JWST je NASA, spolupracuje s European Space Agency (ESA) a Canadian Space Agency (CSA), což znamená, že do projektu je zapojeno 17 států (z toho 15 evropských). Hlavním průmyslovým partnerem je TRW Redondo Beach v Kalifornii, který teleskop postaví a také připraví raketu pro vypuštění. JWST bude vypuštěn na klasické nosné raketě a na svoji oběžnou dráhu poletí tři měsíce.

Vývoj hmotnosti zrcadel na jednotku plochy.



JWST bude mít 2,7 krát větší průměr zrcadla a 7,3 krát větší plochu než HST. Primární zrcadlo zabere značnou část hmotnosti teleskopu, přesto bude nesrovnatelně lehčí než u HST, který je přibližně dvakrát těžší než JWST. Důvodem jsou nové technologie, které byly vyvinuty po zkonstruování HST. Dnešní zrcadla jsou výrazně lehčí než před dvaceti lety. Technologický vývoj ukazuje graf. Jednotlivé milní-

ky vývoje patří k HST (240 kg/m^2), Adaptive Large Optics Technologies (60 kg/m^2), Space Infrared Telescope Facility (30 kg/m^2) a James Webb Space Telescope (15 kg/m^2).

Primární zrcadlo dalekohledu bude složeno ze 36 ultratenkých a velmi lehkých zrcadlových částí, které budou ve správné poloze a na správném místě drženy velkým množstvím držáků napojených na hlavní rám. Jakékoli odchýlení od správného tvaru zrcadla musí být menší než je nejkratší pozorovaná vlnová délka. Pro HST je tato hodnota 0,1 μm (ultrafialová oblast spektra) a pro JWST 0,6 μm (zelené světlo). Plošná hustota primárního zrcadla bude menší než 15 kg/m^2 a pracovat by mělo při teplotách 30÷60 K. Rozlišovací schopnost by měla být menší než 0,1", což umožňuje pozorovat detaily mince na vzdálenost 40 km nebo ostrý obraz fotbalového míče umístěného 550 km daleko.

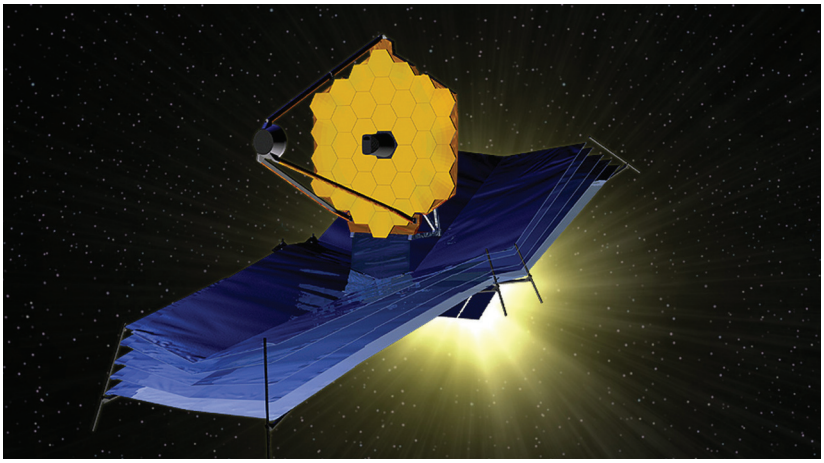
Největší částí JWST bude sluneční clona, která musí být schopna ochránit primární zrcadlo a také věž s pomocným (sekundárním) zrcadlem. Její rozměry přibližně odpovídají velikosti tenisového hřiště. Tato clona bude chránit teleskop před dopadem přímého slunečního světla, a udrží teplotu přístrojů a zrcadel na hodnotě pod 45 K (což odpovídá –228 °C). Přístroje v pásmu blízkého IR budou pracovat při teplotě asi 30 K, čehož dosáhnou za pomoci pasivních chladicích zařízení. Detektory v oblasti IR budou chlazeny na teplotu kolem 7 K. JWST bude používat dva typy detektorů, které budou pracovat v oblastech viditelného a blízkého infračerveného pásma záření s rozlišením 2048×2048 pixelu a v oblasti středního infračerveného pásma v rozlišení 1024×1024 pixelu.

Cena JWST by se měla pohybovat v rozmezí čtvrtiny až třetiny ceny HST. Největší úspory v nákladech jsou díky progresivním technologiím vyvinutým od doby vzniku HST, dále kratší době existence a nulovým nákladům na údržbu, neboť JWST bude příliš daleko od Země a tudíž nebude možné provozovat servisní mise.

Komunikace mezi Zemí (konkrétně JWST Science & Operation

Hlavní fakta o JWST

Předpokládaný rok vypuštění: 2010
Délka mise: 5 až 10 let
Hmotnost: 5 400 kg
Průměr primárního zrcadla: 6,5 m
Ohnisková vzdálenost: bude určena
Počet segmentů primárního zrcadla: 18
Optické rozlišení: 0,1"
Rozsah vlnových délek: 0,6÷28 μm
Rozměry sluneční clony: 22 m × 10 m
Vzdálenost od Země (v L2): 1 500 000 km
Provozní teplota: 50 K
Cena: 825 mil. USD



JWST s protisluneční clonou (umělecká vize).

Hlavní cíle mise:

- *určit topologii vesmíru*
- *vysvětlit vývoj galaxií*
- *porozumět vzniku a vývoji hvězd*
- *určit, jak se planetární systémy tvoří a jak na sebe působí*
- *určit, jak se tvořil vesmír*
- *zkoumat povahu a množství skryté (nebaryonové) hmoty*

Přístroje JWST:

- *kamera v pásmu blízkého IR – Near Infrared Camera (NIRCam)*
- *spektrograf v pásmu blízkého IR – Near Infrared Spectrograph (NIRSpec)*
- *detektory v pásmu IR – Mid Infrared Instrument (MIRI)*
- *senzory jemného navádění – Fine Guidance Sensors (FGS)*

Významnější inovace chystané na JWST:

- *optika z vylehčených materiálů*
- *stínění proti slunečnímu svitu*
- *sklápěcí segmentované zrcadlo*
- *zlepšené detektory*
- *kryogenní zařízení a aktivní optika*
- *mikrouzávěrky*

Center v Space Telescope Science Institute v Baltimore) a JWST bude probíhat na vysokofrekvenčních radiových vlnách, k čemuž bude přístroj vybaven velkými radiovými anténami.

A kdo bude používat JWST? Všichni astronomové a vědci z univerzit nebo jiných výzkumných ústavů mohou napsat návrhy svých výzkumných projektů pro využití JWST. Všechny tyto návrhy budou posouzeny týmem nezávislých odborníků, který na základě předpokládaného vědeckého přínosu rozhodne, které projekty se budou realizovat.

■ *Lukáš Kupka*

Ultra extra velký dalekohled

Zdá se, že v blízké budoucnosti (10 až 15 let) by se mohl v astronomii objevit přístroj, který ponese na dlouhou dobu přívlastek největší. Autorem projektu je organizace ESO. Ta je řízena ústředím v Garchingu blízko Mnichova. V současné době probíhají v ESO intenzivní přípravy dalekohledu budoucí generace, jehož prozatimní název je OWL (OverWhelmingly Large). Tento název byl vybrán záměrně, neboť zkratka OWL je anglický výraz pro sovu, která je, jak známo, pták s bystrým zrakem.

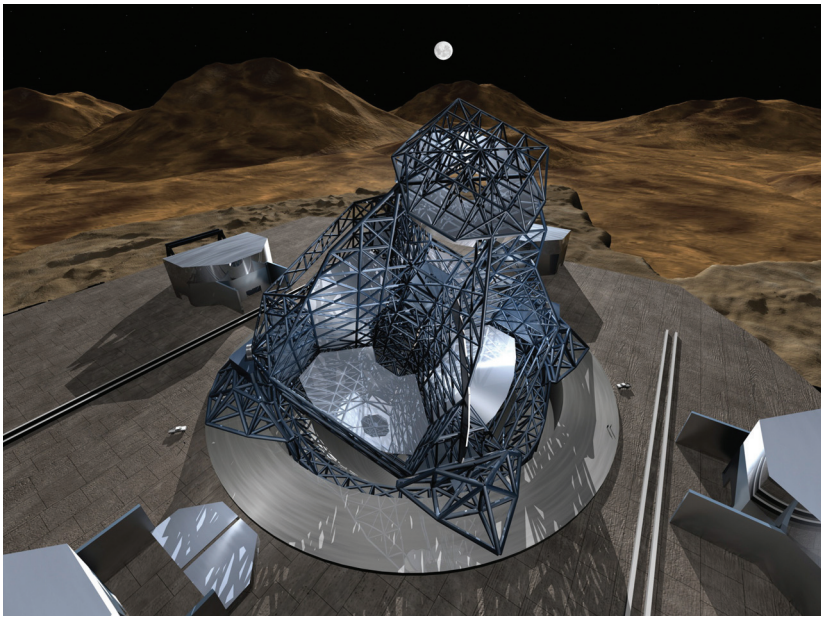
Primární zrcadlo má mít průměr 100 metrů a bude složeno z mnoha segmentů opatřených aktivní optikou. Bude možno jím pozorovat oblohu ve všech směrech, a to nejen v oblasti viditelného spektra, ale také v infračervené oblasti. Rozlišovací schopnost OWL se bude pohybovat kolem tisíciny úhlové vteřiny.

V minulosti se každých 30 až 40 let ve světě objevil nový dalekohled, který byl dvakrát větší než ten dosud největší. Roku 1917 byl postaven Hookerův dalekohled na Mt. Wilson s průměrem hlavního zrcadla 100" (2,54 m). Roku 1949 byl uveden do provozu Haleův dalekohled na Mt. Palomar s dvojnásobným průměrem zrcadla 200", tedy 5 m. Další znásobení rozměrů zrcadla se podařilo u desetimetrového (390") Keckova dalekohledu na Mauna Kea, jehož první část pracuje od roku 1993. Stavba nových dalekohledů je především otázkou financí a technologických možností dané doby. Podle Roberta Gilmozziho z ESO dojde s dvojnásobným zvětšením dalekohledu k šestinásobnému růstu nákladů. To by u dalekohledu s průměrem 100 metrů, jakým by OWL měl být, znamelo náklady 20 až 30 miliard dolarů.

Dalekohledy z první poloviny dvacátého století byly postaveny

OWL - *OverWhelmingly Large. Projekt segmentového dalekohledu o průměru zrcadla 100 metrů. Má být umístěn v Ata-camské poušti.*

Teleskop - *řecky tele = daleko, scopeo = hledím. Obvykle se jím v astronomii rozumí dalekohled.*



Projekt budoucího dalekohledu OWL. Materiály Evropské jižní observatoře (ESO)..

Aktivní optika - *koriguje nízkofrekvenční deformace primárního zrcadla způsobené vlastní tíží, větrem a výrobními nepřesnostmi. Aktivní hydraulické prvky korigují správný tvar zrcadla podle pokynů počítače, který vyhodnocuje tvar vlnoplochy referenční hvězdy v ohnisku.*

Adaptivní optika - *slouží ke korekci vysokofrekvenčních změn obrazu způsobených především turbulencí atmosféry. Jako referenční hvězda se používá skutečná hvězda v blízkosti sledovaného objektu (takových je ale velmi málo) nebo umělá hvězda vytvořená zpětným rozptylem laserového paprsku na sodíkových atomech ve výšce zhruba 90 km.*

pomocí stejného technologického postupu. Jednalo se o jednolitá zrcadla. Například u firmy George Ellery Hale byla postavena během let 1908 až 1949 60", 100" a 200" zrcadla. Později došlo ke změně technologie a jednolité zrcadlo bylo nahrazeno zrcadlem sestaveným ze segmentů, které jsou v poslední době za chodu korigovány systémem adaptivní optiky.

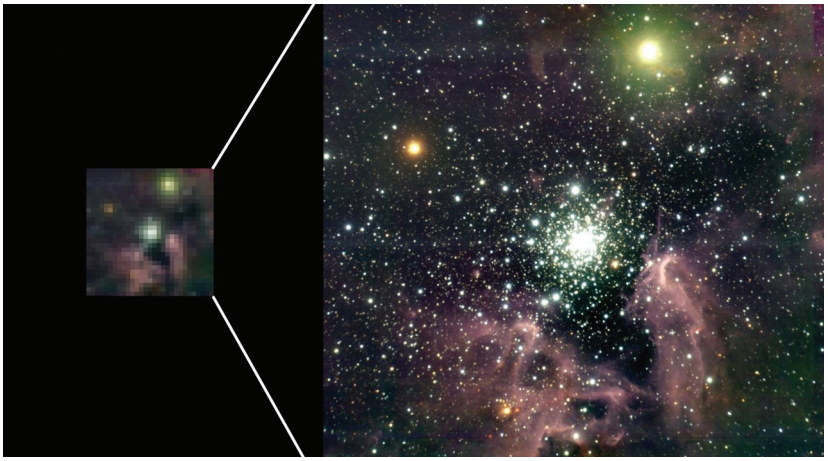
OWL

Dosavadní techologické postupy vylučují postavení monolitického zrcadla o průměru 100 m. Proto by mělo být postaveno ze segmentů. První odhady hovoří o 2 000 segmentech o hraně 2,3 m. Hotovy by měly být za deset let, což při 250 pracovních dnech v roce dává průměr 1,3 segmentu denně. To je jeden z důvodů snížení celkové ceny. Hromadná výroba snižuje náklady. Aby byly plně využity možnosti dalekohledu, je nutné použít systém aktivní a adaptivní optiky. Pro OWL se vyvíjí speciální systém sdružené adaptivní optiky. Touto metodou bude možno pozorovat větší oblast oblohy s možností odstranění rušivých vlivů atmosféry.

Optika

Předpokládané parametry nového dalekohledu jsou zcela mimořádné. Rozlišení by mělo dosáhnout 1 tisíciny úhlové vteřiny, pro srovnání HST má rozlišení 0,05 úhlové vteřiny. Dalším parametrem je mezní magnituda objektu. Zde udává plán pro OWL hodnotu 38 mag při desetihodinovém integračním pozorování. Současný návrh počítá s klasickou alt-azimutální montáží dalekohledu. Hmotnost celého zařízení včetně zrcadel by měla být „pouhých" 12 500 tun. „Vyspělost" technologie se někdy udává poměrem hmotnosti skla a kovu. Tento parametr dosahuje u OWL hodnoty přibližně 20. Ve skutečnosti se zde ale nejedná o kov, nýbrž o karbid křemíku. Sběrná plocha primárního zrcadla je větší než 6 000 m^2.

Očekávané zvětšení dalekohledu OWL ve srovnání s HST. Vlevo: simulovaný snímek HST, expozice 1 600 s, velikost pixelu 0,006". Vpravo: simulovaný snímek OWL, expozice 1 s, velikost pixelu 0,0005". Podle materiálů ESO.



Umístění

Nalezení idealního území je také velice důležité, neboť při velikosti OWL hrají i sebemenší vlivy podstanou roli (zemětřesení, vítr, prach, atd...). Další skutečností je, že spousta „ideálních“ míst je již obsazena funkčními dalekohledy. Další podstanou částí studie je tepelná vodivost konstrukce a klimatické poměry uvnitř dalekohledu. Některé tyto aspekty jsou již, alespoň teoreticky vyřešeny, nicméně stále zbývá ještě mnoho detailů.

■ *Václav Kaizr*

Zrcadla dalekohledu OWL

Primární zrcadlo - *segmentované zrcadlo o průměru 100 metrů.*
Sekundární zrcadlo - *ploché segmentované zrcadlo o průměru 34 metrů.*
Terciální zrcadlo - *aktivní, mírně asférické zrcadlo o průměru 8,2 metru.*
Čtvrté zrcadlo - *silně asférické zrcadlo o průměru 8,2 metru.*
Páté zrcadlo - *zaostřovací asférické zrcadlo o průměru 4,2 metru.*
Šesté zrcadlo - *rychle se pohybující ploché zrcadlo o průměru 2,35 metru.*

Cassini a Rosetta

Cassini - *sonda, která startovala 15. října 1997. Hlavním cílem je planeta Saturn a její měsíc Titan, ke kterému dolétne v červnu roku 2004.*

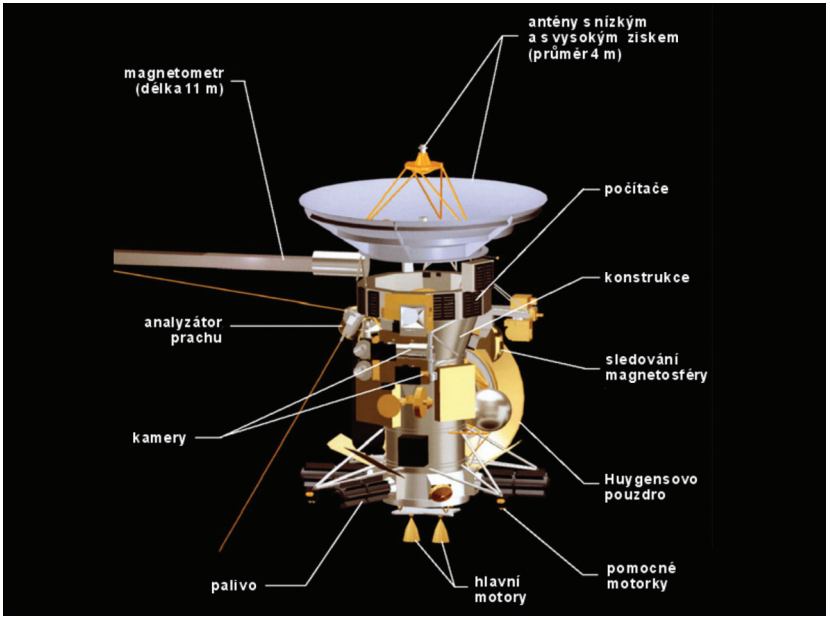
Rosetta - *sonda, která odstartovala dne 2. března 2004. Hlavním cílem je přistání na kometě 67P/Churyumov-Gerasimenko roku 2014. Během své cesty navštíví nejméně jednu planetku. Projekt dostal jméno podle Rosettské desky, která napomohla jazykovědcùm rozluštit tajemství egyptských hieroglyfù.*

V dnešní době mají kosmické agentury po celém světě rozpracováno několik projektů výzkumu vesmírných těles pomocí sond. Patrně nejrozsáhlejší jsou mise sond Cassini a Rosetta. Obě mise mají společné některé rysy – velice dlouhý let k cíli. K cestě, kterou musí sonda urazit, je zapotřebí tolik energie, kolik nám nemůže poskytnout žádný doposud vyrobený raketový nosič, a tak sondy využívají několikrát gravitační energii těles sluneční soustavy (Slunce, Země a dalších planet). Obě sondy nesou přistávací pouzdro určené k bližšímu a podrobnějšímu průzkumu malých těles sluneční soustavy (měsíc Titan – Cassini, kometa 67P/Churyumov-Gerasimenko – Rosetta). Tato pouzdra se blízko cíle oddělí od mateřské sondy. V případě Cassini je to Huygensovo pouzdro, v případě Rosetty se jedná o pouzdro Philae.

Cassini

Práce na projektu cesty k Saturnu začala v roce 1989, vlastní stavba pak v roce 1995. V dubnu roku 1997 byly provedeny závěrečné zkoušky a poslední úpravy. Sonda obsahuje množství složitých přístrojů pro výzkum Saturnu a jeho měsíce Titanu. Sedmiletá cesta sondy Cassini k Saturnu začala 15. 10. 1997 startem rakety Titan IV B/Centaur ze startovacího komplexu Cape Canaveral Air Force Station. Raketa vynesla orbitální modul sondy Cassini s připojeným pouzdrem Huygens. Tato mise je jednou z nejrozsáhlejších meziplanetárních výprav, jaká kdy byla uskutečněna.

Sonda Cassini s pouzdrem Huygens (umístěno v zadní části).



Úkolem Cassini je dopravit pouzdro Huygens do Saturnova systému, a poté uchovávat a posílat zpět na Zemi data, která získá. Při komunikaci se projeví její ohromná vzdálenost od Země. Příkazy k ní na vzdálenost 10 AU poletí asi 84

minut. Pouzdro Huygens se oddělí od orbitální části 6. listopadu 2004 po provedení poslední kontroly všech systémů, a pak bude klesat k Titanu. Do Titanovy atmosféry vstoupí o 21 dnů později rychlostí 6,1 km/s. Sonda prozkoumá Titanovy mraky, hustou atmosféru a vyfotografuje jeho povrch. Během sestupu se ke zpomalování použije postupně tří padáků.

Rosetta

Rosetta je jednou z několika mála sond, které byly vyvinuty k výzkumu komet. Její cesta začala startem dne 2. března 2004, zakončení mise se předpokládá koncem roku 2015. Sonda nese malého robotického průzkumníka, který by měl přistát na jádře komety 67P/Churyumov-Gerasimenko, která byla objevena v roce 1969. Její oběžná doba činí 6,57 roku a vzdálenost od Slunce v přísluní je 1,29 AU. Sonda má být klíčem k odhalení tajemství malých ledovcových světů, skrývajících odpovědi na základní otázky vzniku planet a snad i života.

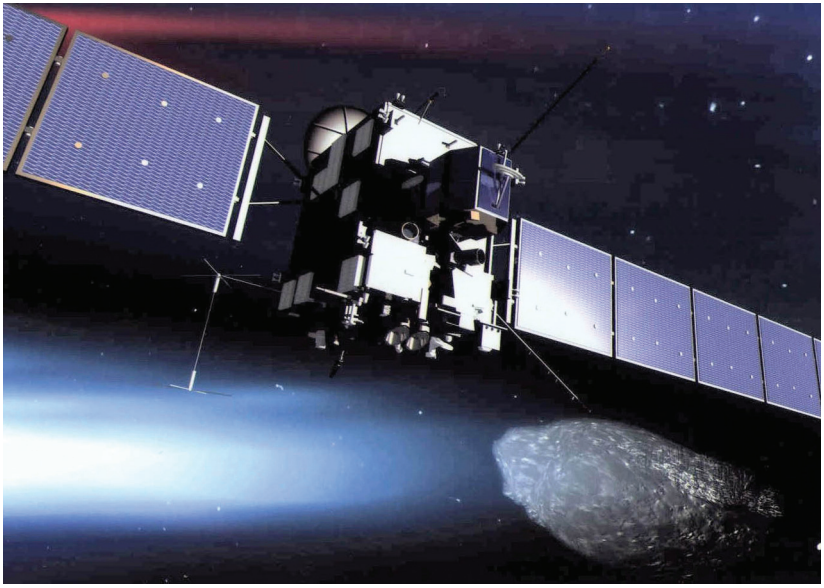
Nejvýznamnější cíle mise jsou: navést sondu na oběžnou dráhu kometárního jádra, provést řízené přistání na jádře komety, podrobný výzkum pomocí přistávacího pouzdra. Na své cestě sonda navštíví nejméně jednu planetku. Přiblížení ke kometě by podle plánu mělo nastat v květnu 2014. Kromě detailního průzkumu povrchu pomocí kamer budou data sbírat také spektrometry a další přístroje jako například zařízení pro analýzu kometárního prachu. Během výzkumu povrchu bude vytipováno několik vhodných míst pro přistání pouzdra Philae, které by se mělo uskutečnit v listopadu 2014.

■ *Karel Řezáč*

Huygens - *přistávací pouzdro sondy Cassini. Přistání na měsíci Titanu by se mělo uskutečnit v listopadu 2004. Je pojmenováno podle holandského fyzika, který prosazoval vlnovou povahu světla a objevil měsíc Titan.*

Rosettská deska - *deska s egyptskými hieroglyfy, která byla náhodně objevena roku. 1799 při kopání zákopù Napoleonovými vojáky u města Rosetty pobliž Nilu.*

Philae - *přistávací pouzdro sondy Rosetta, které by mělo přistát v roce 2014 na kometě 67P/Churyumov-Gerasimenko. Pouzdro je pojmenováno podle ostrova na řece Nil, který hrál klíčovou roli při rozluštění egyptských hieroglyfù.*



Kosmická sonda Rosetta spolu s jádrem komety 67P/Churyumov-Gerasimenko (umělecká vize).

Detektor gravitačních vln VIRGO dostaven

Po mnoho let se stavěl v blízkosti vesničky Cascina, 10 kilometrů od slavné Pisy, italský detektor gravitačních vln. Projekt je společnou akcí italské společnosti INFN (Instituto Nazionale di Fisica Nucleare) a francouzské společnosti CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique). V roce 2000 vznikla společnost EGO (European Gravitational Observatory) pro řízení observatoře a 23. 7. 2003 byla observatoř slavnostně otevřena.

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 pokřiveném světě pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách.*

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.*

Gravitační vlny

Existenci gravitačních vln předpověděl Albert Einstein již v roce 1916. Jde o periodické zakřivení prostoru a času, které se šíří od svého zdroje, podobně jako například vlna zvuková nebo elektromagnetická. Je zde ale mnoho odlišností. Představte si tři tělesa v prostoru tvořící například pravoúhlý trojúhelník. Bude-li přes náš trojúhelník přecházet gravitační vlna, budou se tělesa „pohupovat“ na zakřiveném prostoročase a periodicky se bude měnit jejich vzdálenost podobně jako vzdálenost tří lodí pohupujících se na mořských vlnách.

Neexistuje prostředí, ve kterém by se gravitace vlnila, jako je tomu u zvukových vln. Rozvlněný je samotný prostoročas. U elektromagnetických vln existují dva nezávislé mody vln skloněné o 90°. Podobně i gravitační vlny kmitají ve dvou nezávislých směrech, ale jejich roviny jsou skloněny jen o 45°. To souvisí s odlišným spinem (elektromagnetické pole má spin roven jedné, gravitační pole dvěma). Elektromagnetické vlny mohou vznikat u těles s dipólovým a vyšším momentem. To znamená, že kulově symetrické těleso nemůže být zdrojem elektromagnetických vln, zatímco osově symetrické těleso (dipól) ano. Zdrojem gravitačních vln nemůže být ani monopól ani dipól. Až teprve kvadrupólové rozložení

Letecký pohled na detektor VIRGO.

látky může generovat gravitační vlny. Nelekejte se slova kvadrupól. Nejde o nic jiného, než o takové rozložení hmoty, které není symetrické vzhledem k bodu ani vzhledem k ose. Tyč rotující podél své osy nemá kvadrupólový moment. Tyč rotující kolmo na svou osu kvadrupólový moment má (rozložení látky je symetrické vzhledem ke dvěma osám) a může generovat gravitační vlny.

Nejjednodušším zdrojem gravitačních vln ve vesmíru může být dvojice hvězd rotujících kolem společného těžiště. Aby měly gravitační vlny velkou intenzitu, je nutné aby obě hvězdy značně zakřivovaly prostoročas a byly dostatečně blízko. Ideální je například dvojice neutronových hvězd.

Pomineme-li první neúspěšné pokusy o detekci gravitačních vln (Joseph Weber, 60. a 70. léta), došlo k jejich první nepřímé detekci u podvojného pulsaru 1913+16, který byl objeven již v roce 1974 radioteleskopem v Arecibu. Rozměry obou složek i celého systému jsou tak malé, že systém je téměř ideální relativistickou laboratoří.

Oběžná perioda podvojného pulsaru činí 7 h 45 min a zkracuje se o 76×10^{-6} s/rok díky vyzařování gravitačních vln. Zkracování periody objevili R. A. Hulse a J. H. Taylor a nepřímo tak detekovali gravitační vlny. Za tento objev získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1993.

VIRGO - *největší evropský interferometr pro hledámí gravitačních vln s délkou ramen 3 km. Je umístěn u vesničky Cascina, 10 km od italské Pisy proslulé svou šikmou věží. Tubus je svařovaný, bez těsnění, a je vakuován. Má průměr 120 cm. Frekvenční rozsah detektoru je v rozmezí 10÷6000 Hz. Paprsek generuje Nd:YAG laser o výkonu 20 W. Laser pracuje na vlnové délce 1 064 nm. Maximální relativní citlivost interferometru má být h ~ 10^{-23}.*

LIGO (Laser Interferometry Gravitation Observatory) - *největší světový interferometr pro hledání gravitačních vln s délkou ramen 4 km. Postaveny jsou dva detektory stejného typu, jeden v Livingstonu a druhý v Hanfordu (USA).*

Současné detektory

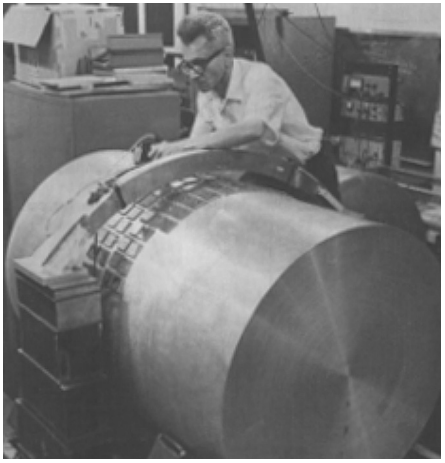
Většina dnešních systémů pro přímou detekci gravitačních vln je postavena na laserové interferometrii. Laserový svazek je polopropustným zrcadlem rozdělen do dvou vzájemně kolmých ramen, na jejichž koncích jsou dokonale vybroušená odrazná zrcátka na zavěšených testovacích tělesech. Právě pohyb těchto tělísek se sleduje. Odražené paprsky se rameny vrací přes rezonanční dutinu zpět, interferují a elektronicky jsou zaznamenávány změny interferenčních proužků. Citlivost těchto zařízení závisí na velikosti ramen a může dosáhnout velmi vysokých hodnot.

Gravitační vlna v okolí dvojice neutronových hvězd.

LISA (Laser Interferometry Satellite Antenna) - *budoucí projekt tří sond obíhajících kolem Slunce. Vzájemná vzdálenost sond bude 5 000 000 km a budou tvořit obří interferometr pro zjišťování gravitačních vln.*

Rezonanční detektory - *využívají rezonančního chvění válce nebo jiného tělesa. První takový detektor sestrojil v roce 1965 Joseph Weber. Dvojice válců byla umístěna 1 000 km od sebe (v Marilandu a Aragonu) a hledány byly koincidence v zachvění obou válců. Na podobném principu fungují i některé současné detektory, například válcové ALLEGRO v Lousianě, EXPLORER v Římě a nebo sférické rezonanční detektory GRAVITON v Brazílii, GRAIL v Holandsku, ELSA v Itálii a TIGA v USA.*

Joseph Weber (1919-2000). Autor prvního rezonančního detektoru gravitačních vln z roku 1965. Šlo o hliníkový válec s rezonanční frekvencí 1 660 Hz.



Největším systémem tohoto druhu na světě je nedávno dostavěný detektor LIGO. Projekt vznikl ve spolupráci univerzit Caltech (California Institute of Technology) a MIT (Massachusetts Institute of Technology). Jde o dvojici zařízení vzdálených 3 200 km. Dva interferometry existují proto, aby mohla být detekce gravitačních vln potvrzena koincidencí ze dvou nezávislých zdrojů.

Nový evropský detektor v kilohertzové oblasti, dokončený nedlouho po obřím americkém detektoru LIGO, dává naději na přímou detekci gravitačních vln jak v USA, tak v Evropě. Odhady jsou optimistické, k detekci by mělo dojít v nejbližší době. Otevřením observatoře VIRGO se Evropa dočkala velkého funkčního detektoru gravitačních vln.

■ *Petr Kulhánek*

Expedice PARACHI 2003: Astronomie a poušť Atacama

Na světě je mnoho míst, kde se daří pozemské astronomii. Jsou ale pouhá dvě místa, která by se dala nazvat astronomickým rájem. Jde o horu Mauna Kea na Havajských ostrovech a Atacamskou poušť v Chile.

V obou lokalitách je neobvyklá koncentrace přístrojů díky mimořádně kvalitním podmínkám pro astronomická pozorování. Atacamská poušť má pro nás Evropany mimořádný význam. Evropská jižní observatoř zde zčásti vlastní a zčásti má pronajaty již tři lokality, na kterých se intenzívně staví dalekohledy evropských zemí. Když jsme letos v září zavítali do paraguayského Asuncionu na konferenci o fyzice plazmatu, byl cíl naší další cesty naprosto jasný. Přejet Andy z Argentiny do Chile a prohlédnout si zatím největší atacamský přístroj – VLT.

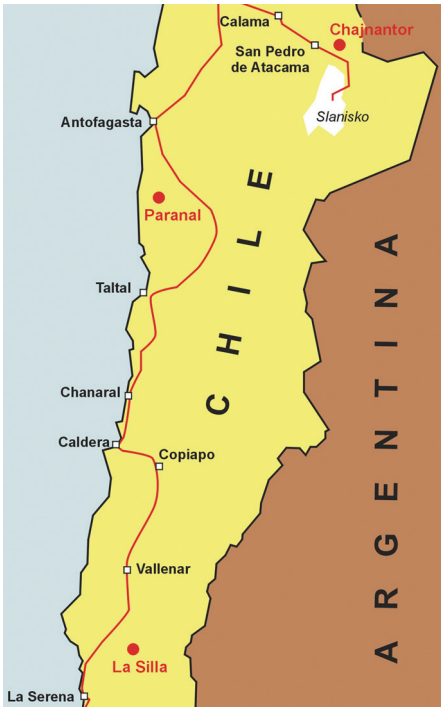
Evropská jižní observatoř

Loni v říjnu uplynulo 40 let od založení organizace ESO (European Southern Observatory, Evropská jižní observatoř). V roce 1962 podepsali zástupci pěti evropských zemí dokument o společné snaze vybudovat evropskou observatoř na jižní polokouli. Financování stavby mělo probíhat z jednotlivých členských zemí úměrně jejich národnímu důchodu. Původně se zvažovaly lokality v jižní Africe, ale po dvou letech hledání vhodného místa padlo definitivní rozhodnutí: Atacamská poušť v chilských Andách.

Atacamská poušť je mimořádně rozlehlé území táhnoucí se na sever a na jih od Antofagasty. Celková délka území je zhruba 700 kilometrů. V propagačních materiálech ESO se o Atacamské poušti hovoří jako o nejnehostinnějším místě na Zemi. A skutečně – stovky kilometrů kamenné drtě bez známek života připomínají spíše krajinu na Měsíci nebo na Marsu. V některých místech za posledních 400 let neexistují záznamy o dešti. Průměrná vlhkost je 10 %, počet jasných nocí v roce 350, Humboldtův proud stabilizuje oblačnost ve výšce 1 km. Co více si můžeme pro astronomii přát?

V průběhu čtyř desetiletí získala ESO v Atacamské poušti tři území. První z nich je hora La Silla vysoká 2 400 metrů (160 km severně od města La Serena). Evropská jižní observatoř zde zakoupila území o rozloze 627 km^2, na kterém je tu dnes postaveno celkem 9 funkčních dalekohledů. Druhým územím je hora Cerro Paranal s nadmořskou

Mapa Atacamské pouště s územími Evropské jižní observatoře (ESO). Kresba autora.



PŘÍSTROJE, SONDY

Logo expedice PARACHI.

výškou 2 635 metrů (130 km jižně od Antofagasty), kde je postavena čtveřice dalekohledů VLT. O jejich stavbě bylo definitivně rozhodnuto v roce 1987. Poslední území bylo získáno relativně nedávno – roku 1995. Jde o planinu v nadmořské výšce 5 080 metrů vzdálenou 40 km na východ od městečka San Pedro de Atacama. Od roku 1999 je zde funkční soustava radioteleskopů CBI, v letošním roce se započalo se stavbou obří sítě radioteleskopů ALMA a do budoucnosti se zde počítá se stometrovým optickým dalekohledem OWL. Území o rozloze zhruba 200 km^2 je pronajato za roční příspěvek 700 000 USD na vědecký výzkum v Chile.

ESO má dnes deset členských zemí (Belgie, Dánsko, Francie, Holandsko, Itálie, Německo, Portugalsko, Švédsko, Švýcarsko a Velká Británie) a stalo se největší evropskou astronomickou organizací. Ředitelství ESO je v Garchingu u Mnichova, v Chile má ESO stálé úřady v Santiagu, Antofagastě a La Sereně. Jen v Chile pracuje 160 stálých zaměstnanců. Ve znaku ESO je Jižní kříž s vepsanými písmeny ESO.

La Silla

La Silla je hora situovaná v jižní části Atacamské pouště. Území bylo zakoupeno za velmi výhodných podmínek v roce 1964, kdy tehdejší Chilská vláda byla nakloněna rozvoji astronomie v zemi a zcela správně předpokládala vliv přítomnosti velké observatoře na rozvoj vědy v zemi. V nedalekém městečku La Serena byl zřízen první trvalý úřad ESO v Jižní Americe. Na hoře La Silla byla postavena řada malých a středních dalekohledů patřících různým evropským zemím. Mnoho z nich již dnes není funkčních. V tuto chvíli na La Silla pracuje devět dalekohledů.

Celkový pohled na La Silla. Fotografie ESO.

K nejslavnějším dalekohledům na La Silla bezesporu patří společný 3,6 metrový dalekohled ESO, jehož stavba byla dokončena v roce 1976. Právě kvůli tomuto přístroji byla kdysi ESO založena. Dalším významným dalekohledem je NTT

(New Technology Telescope), kterým první světlo prošlo v roce 1989. Šlo o první použití systému aktivní optiky na světě. Nízkofrekvenční deformace primárního zrcadla jsou korigovány soustavou hydraulických pístů umístěných pod zrcadlem. Odzkoušení systému aktivní optiky znamenalo významný technologický zlom v konstrukci dalekohledů na celém světě. Dnes jsou již velké dalekohledy nemyslitelné bez korekce nízkofrekvenčních i vysokofrekvenčních poruch. A do třetice ještě jeden slavný přístroj na La Silla: Patnáctimetrový radioteleskop SEST (Swedish ESO Submillimetre Telescope) pracující v rozsahu frekvencí 70 GHz až 365 GHz. Dalekohled byl uveden do provozu v roce 1987.

Kromě těchto velkých přístrojů byla na La Silla postavena řada národních dalekohledů malých rozměrů (například 40 cm francouzský, 50 cm dánský, 61 cm německý a další). Většina těchto malých přístrojů již dnes není v provozu.

Logo ESO.

Cerro Paranal

Hora Cerro Paranal leží 130 km jižně od Antofagasty. Na jejím vrcholu, který byl při výstavbě VLT snížen o 28 metrů, jsou čtyři dalekohledy s celistvými zrcadly o průměrech 8,2 metrů. Po propojení se budou chovat jako jediné zrcadlo o průměru 16 metrů a stanou se největším dalekohledem světa. Původně byly dalekohledy označovány symboly UT1 až UT4 (z anglického Unit = jednotka). Dnes mají i svá jména, která pocházejí z domorodého indiánského jazyka – mapušštiny: Antú (UT1, zprovozněn roku 1998), Kuyen (UT2, 1999), Melipal (UT3, 2000) a Yeapun (UT4, 2001). Tyto názvy znamenají Slunce, Měsíc, Jižní kříž a Venuše. Dalekohledy jsou postaveny ve výšce 2 635 metrů nad mořem.

VLT. Fotografie Expedice PARACHI.

Stavba dalekohledů započala v roce 1991 a zakončení celé stavby se předpokládá v roce 2005. Čtyři obří dalekohledy budou ještě doplněny třemi 1,8 metrovými podpůrnými dalekohledy, které zvětší

Kopule jednoho ze čtyř dalekohledù VLT. Fotografie expedice PARACHI.

Zaměstnanecké centrum s bazénem a rozevíratelným krytem. Fotografie Expedice PARACHI.

základnu budoucího interferometru (VLTI) na 200 metrů, 2,5 metrovým dalekohledem VST (Very Large Survey Telescope) a 4 metrovým dalekohledem VISTA (Visible and Infrared Telescope for Astronomy).

Všechny dalekohledy jsou vybaveny systémem aktivní a adaptivní optiky. Aktivní optika koriguje nízkofrekvenční deformace primárního zrcadla způsobené vlastní tíží, větrem a výrobními nepřesnostmi. Celkem 150 aktivních hydraulických prvků koriguje každých 40 sekund správný tvar zrcadla podle pokynů počítače, který vyhodnocuje tvar vlnoplochy referenční hvězdy v Nasmythově ohnisku. Adaptivní optika slouží naopak ke korekci vysokofrekvenčních změn obrazu způsobených především turbulencí atmosféry. Jako referenční hvězda se používá buď skutečná hvězda v blízkosti sledovaného objektu (takových je ale velmi málo) nebo umělá hvězda vytvořená zpětným rozptylem laserového paprsku na sodíkových atomech ve výšce cca 90 km. Podle pokynů počítače deformuje 185 motorků pětsetkrát za sekundu pomocné jedenácticentimetrové zrcátko. Systém adaptivní optiky není v tuto chvíli ještě zprovozněn u všech čtyř jednotek.

Každý dalekohled nyní pracuje jako samostatný dalekohled. Byly konány testy propojení dalekohledů do jednoho celku i pokusy se spojením dalekohledů po dvojicích jako interferometr. V roce 2004 budou tyto testy pokračovat. Cílem je plný kombinovaný režim všech čtyř dalekohledů v roce 2005.

Kopule dalekohledů jsou po celý den chlazeny na noční teplotu tak, aby se minimalizovaly turbulence vznikající tepelným prouděním. Každá jednotka má své vlastní řídící počítačové centrum. Na úpatí hory jsou tři elektrárny a obří vakuová napařovací komora, ve které se zrcadla trpící prachem Atacamské pouště pravidelně pokovují každých 18 měsíců. Do lokality je každý den dovážena cisterna s vodou a nafta pro výrobu elektřiny. Pro 150 stálých zaměstnanců je vybudováno podzemní ubytovací a rekreační centrum s bazénem a ba-

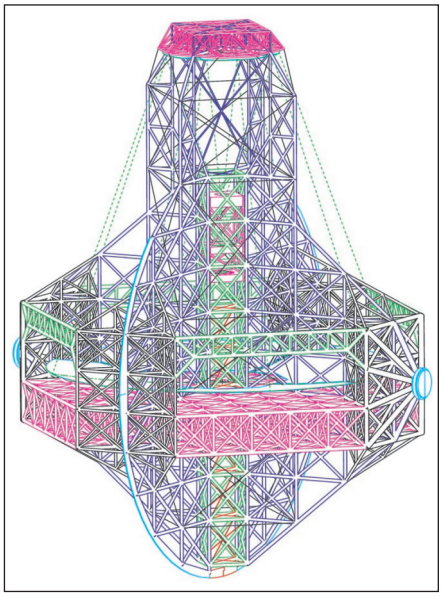
rem. Nad zem vyčuhuje jen oblá střecha, pod kterou se v noci rozevře zástěna bránící úniku světla ven.

Llano de Chajnantor

Planina Chajnantor se rozkládá v nadmořské výšce 5 080 m, 40 km východně od městečka San Pedro de Atacama, které leží na vysokohorské silnici spojující Argentinu s Chile. Obzor je mimořádně nízký, jediný vrcholek dosahuje 8°, ostatní obzor je pod hranicí 6°. V lokalitě je od roku 1999 dostavěn přístroj CBI (CALTECH + NRAO), letos se začala stavět síť radioteleskopů ALMA a do budoucna se počítá se stavbou obřího optického dalekohledu OWL.

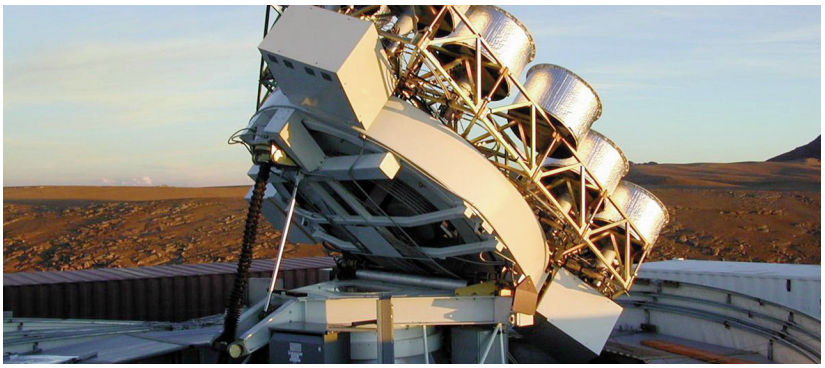
CBI – Cosmic Background Imager. Jde o soustavu třinácti radioteleskopů umístěných na společné montáži o průměru 6 metrů. Každá anténa má průměr 90 cm a je zakrytována proti prachu speciálním teflonovým krytem, který je průchozí pro radiové vlny. Největším problémem je pravidelný odpolední vítr o rychlosti 15 m/s. Zařízení CBI může být zakryto stažitelnou látkovou kopulí z polyesteru, ve které se provádějí nejnutnější opravy. V místě jsou přepravní kontejnery (jakési větší ma-ringotky) s řídícím centrem, laboratoří, dílnou, dvěma pokoji pro za-městnance a koupelnou. Sto metrů východně od CBI je umístěna elektrárna s dvojicí dieselových generátorů, které v nadmořské výšce 5 000 metrů dodávají výkon 150 kW. Voda a palivo jsou pravidelně dováženy v cisternách.

Přístroj CBI je určen zejména ke zkoumání reliktního záření, jde o nejcitlivější pozemský přístroj vůbec, úhlové rozlišení je mezi 4,5' až 10', celkové zorné pole 44'. Frekvenční rozsah přístroje se pohybuje mezi 26 až 36 GHz. CBI vhodně doplňuje měření sondy WMAP, která má větší zorné pole, ale nižší rozlišovací schopnost. Přístroj CBI se využívá zejména ke sledování fluktuací reliktního záření, ze kterých se po rozložení do jednotlivých sférických harmonických dají vyčíst údaje o stáří vesmíru, procentuální zastoupení běžné a temné hmoty, zakřivení časoprostoru a další parametry. Přístrojem CBI se



Konstrukce dalekohledu OWL.

Kopule přístroje CBI. Fotografie California Instiute of Technology.



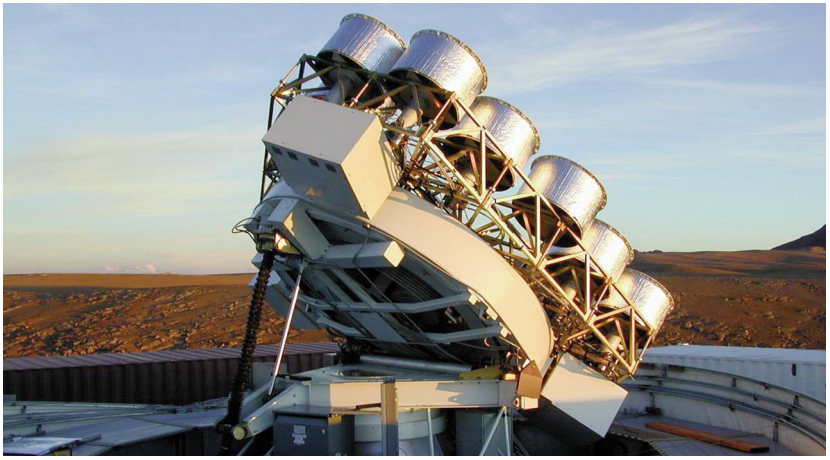
ALMA - *Atacama Large Millimeter Array, v roce 2003 započatá stavba obří sítě 64 radioteleskopů v nadmořské výšce 5 080 metrů na planině Llano de Chajnantor v Atacamské poušti.*

CBI - *Cosmic Background Imager, třináct radioteleskopů o průměru 90 cm na společné montáži. Dalekohled je umístěn na planině Llano de Chajnantor a je určen pro sledování reliktního záření.*

ESO - *European Southern Observatory, Evropská jižní observatoř, organizace založená v roce 1962 za účelem vybudo-vání observatoře na jižní polokouli. Dnes spravuje síť observatoří v Atacamské poušti.*

NTT - *New Technology Telescope, 3,5 metrový dalekohled na La Silla z roku 1989. U dalekohledu byl poprvé použit systém aktivní optiky.*

Soustava radioteleskopů CBI na společné montáži, pohled zezadu. Fotografie CALTECH.



pozorují i jiné jevy než je mikrovlnné záření pozadí. Jde například o záření prachu v mezihvězdném prostoru, synchrotronní záření vznikající v mlhovinách za přítomnosti magnetického pole a záření způsobené srážkami elektronů.

ALMA - Atacama Large Millimeter Array. O stavbě této obří sítě radioteleskopů bylo rozhodnuto 25. 7. 2003. Místo stavby je v těsné blízkosti CBI. Na území o rozloze 170 km^2 vznikne síť 64 radioteleskopů s anténami o průměru 12 metrů. Projekt je společným dílem severoamerické nadace NSF (National Science Foundation), která dnes provozuje síť radioteleskopů VLA (Very Large Array) v Novém Mexiku a Evropské jižní observatoře.

Soustava radioteleskopů ALMA bude pracovat ve frekvenčním rozsahu 30 GHz až 860 GHz s fantastickým maximálním rozlišením 0,01". U rozsáhlejších objektů o velikosti řádově jednotek úhlových stupňů bude možné udržet úhlové rozlišení kolem jedné obloukové vteřiny. Prototypy antén se vyvíjejí v Socorru v Novém Mexiku. Na planině Chajnantor v době naší návštěvy právě započaly pozemní výkopové práce. Soustava ALMA by se měla po dostavění stát nejcitlivější sítí radioteleskopů na světě. Využití se předpokládá při vyhledávání extrasolárních planet, při studiu vzniku hvězd, galaxií a k detekci rotačních a vibračních spekter molekul mezihvězdného plynu.

OWL - OverWhelmingly Large. Jde o projekt největšího optického dalekohledu světa v budoucnosti. Uvažuje se o stometrovém zrcadle složeném z více jak 2 000 segmentů, jejichž výroba potrvá celých 10 let. Využitelná plocha primárního zrcadla překročí 6 000 m^2. Sekundární zrcadlo by mělo mít průměr 34 metrů. Prozatímní název dalekohledu znamená angliky „sova“. Dalekohled by měl být postaven v časovém horizontu 10 až 15 let. Konstrukce bude vyrobena z lehkého karbidu křemíku, čímž dojde k podstatnému snížení hmotnosti tohoto kolosu.

Předpokládané rozlišení dalekohledu by mělo být lepší než jedna

tisícina obloukové vteřiny, celkový zobrazený prostorový úhel bude deset obloukových minut. Při desetihodinové expozici by měly být zobrazeny objekty až do 38. magnitudy. V tuto chvíli ještě není definitivně rozhodnuto o místě stavby tohoto dalekohledu budoucnosti, ale jednou z uvažovaných alternativ je opět planina Chajnantor.

Závěr

Aktivity ESO v Atacamské poušti započaly zhruba před 40 lety. Za tu dobu získaly evropské Země na jižní polokouli řadu cenných přístrojů a ESO významnou měrou ovlivňuje světovou pozemskou astronomii. Odzkoušení systému aktivní optiky na dalekohledu NTT na La Silla v roce 1989 znamenalo průlom v technologii stavby dalekohledů pro celý svět. Rozestavěné VLT se během dvou let stane největším optickým přístrojem světa. V letošním roce započatá stavba sítě radioteleskopů ALMA bude po svém dokončení nejcitlivějším přístrojem v radiovém oboru na Zemi. ESO tak bude mít v blízké budoucnosti k dispozici nejvýkonnější přístroje v optickém i radiovém oboru. A co teprve uvažovaný ambiciózní projekt OWL? Nad projektem optického dalekohledu s průměrem primárního zrcadla 100 metrů se nám tají dech. Pokud se projekt uskuteční, půjde bezesporu o nejvýznamnější počin astronomie počátku nového tisíciletí.

■ *Petr Kulhánek*

OWL - *OverWhelmingly Large, projekt obřího 100 metrového dalekohledu ESO v Atacamské poušti.*

SEST - *Swedish ESO Submillimetre Telescope, patnáctimetrový radioteleskop pracující od roku 1987 na La Silla.*

VISTA - *Visible and Infrared Telescope for Astronomy, čtyřmetrový dalekohled, který v budoucnu rozšíří základnu interferometru VLTI na Cerro Paranal.*

VLA - *Very Large Array, síť radioteleskopů v Novém Mexiku.*

VLT - *Very Large Telescope, čtveřice 8,2 m dalekohledù na Cerro Paranal.*

VLTI - *Very Large Telescope Interferometer, VLT zapojené v interferometrickém režimu, plná funkčnost se předpokládá v roce 2005.*

VST - *Very Large Survey Telescope, 2,5 m dalekohled, který v budoucnu roz-šíří základnu interferometru VLTI.*

ALMA. Obří síť 64 radioteleskopů v poušti Atacama. Fotomontáž ESO.

Kapitola IV.
NOVÉ TECHNOLOGIE

Na novou techniku si velice snadno zvykáme, obklopuje nás téměř všude, je součástí našeho života. Co ale předchází tomu okamžiku, kdy si třeba můžeme poprvé koupit malé přenosné tranzistorové rádio místo velkého a těžkého elektronkového přijímače? A přitom netušíme, že za několik dalších desetiletí budeme skoro všichni nosit podobný maličký přístroj, s nímž se budeme moci dorozumět s kýmkoliv na Zemi, kdo má takový přístroj také. Nebo že poneseme v batohu na výletě užitečnou věcičku, která nám sdělí naši polohu kdykoli to budeme potřebovat. Skutečně globální navigační přístroj, fungující kdekoliv na zemském povrchu, okamžitě bez složitého měření a výpočtů a bez ohledu na to, zda svítí Slunce, hvězdy nebo je zrovna zataženo. Přístroj, o kterém snily celé generace středověkých mořeplavců a nyní ho může mít každý. To nám příliš fantasticky nezní, protože zmíněné příklady dobře známe a u prvního se možná čtenář v duchu i trochu pousmál. Ale co když nám někdo řekne, že některé nemoci budeme léčit pomocí miniaturních robotů, které v našem těle sami rozpoznají škodlivé bakterie od těch užitečných a sami si budou umět s nimi poradit? Nebo že budeme mít doma okenní tabulky z průsvitného materiálu, který při stejné tloušťce propustí třicetkrát méně tepla než obyčejné sklo a navíc bude neuvěřitelně lehký a bude se skvěle hodit na tepelné izolování všeho možného, od budov, ledniček, až po automobily? Řekli bychom asi, že jsme potkali spisovatele Sci-Fi literatury a že to se svou fantazií přinejmenším dost přehání. Kdo se ale aspoň trochu zajímá o to, na čem se bádá ve významných světových výzkumných laboratořích, bude vědět, že spíše než o fantazii jde o skutečně reálné vize o tom, jak by se právě objevované a zkoumané jevy mohly za několik let využívat. Od objevení tranzistorového jevu po první tranzistorový přijímač přeci také uplynulo několik let a poznání, jak může být jev v budoucnu využit, bylo v tu dobu většině lidem skryto.

Pokud jste předmluvu k této kapitole dočetli až sem, je myslím velká šance, že již kapitolu dočtete až do konce a nebudete se chtít dobrovolně zařadit k té početnější skupině lidí, která v této oblasti zatím nedokáže

rozlišit realitu od fantazie a bude muset pasivně čekat, až se věci založené na nových objevech v technologiích stanou každodenní součástí našeho života a budou všeobecně známé. Navíc získáte jistou výhodu ve schopnosti jak toto všechno nové rychle vstřebat a začít efektivně používat, neboť budete vědět nebo mít aspoň určitou představu, co na jakých principech funguje, co lze od toho očekávat a také co předcházelo, než se přešlo od experimentování k masovému využívání. Část populace totiž mívá k novým technologiím odmítavý přístup, často i k vlastní škodě, ale většina ne proto, že by si lépe než ostatní uvědomovala všechny důsledky, ke kterým využívání nových objevů vede. Je to naopak neznalost a podvědomý strach z neznámého a nevyzkoušeného. Paradoxně ale tito lidé jindy neváhají vynaložit značné prostředky na nejrůznější výrobky slibující to či ono a fungující na údajných tajemných ale ve skutečnosti pouze domnělých principech, když často na jednoduchém teoretickém rozboru, založeném na znalostech ze střední školy se dá ukázat, že slibovaná účinnost je nulová.

V této části knihy Vám nabídneme pohled do reálného avšak úžasného světa překvapivých a dříve netušených možností, založených na nových objevech technologií, v němž nebudou chybět ani tajemství a nezodpovězené otázky. Sami si budete moci domyslet, co všechno za pár let bude možné a jaké obzory se nám otevřou. Nemusí to ani příliš dlouho trvat, například inovační interval v elektronice je dnes pouhých několik let a mnohé z toho, co je zde uvedeno, se již nyní využívá – zatím třeba jen ve špičkových aplikacích pro kosmický výzkum, kde víc než na výrobní ceně záleží na dosažených parametrech. Může být jen otázkou času, kdy budou tyto technologie dostupné pro každého z nás. Pojďme tedy nyní ochutnat lákavé pokrmy, které se připravují v kuchyních těch nejlepších světových vědeckých pracovišť. Jsou totiž určeny jen a jen pro nás a na rozdíl od obyčejných kuchyní, zde je ochutnávání dovoleno, ba přímo se doporučuje.

Martin Žáček

Aerogely a kosmický prach

Aerogel - *vysoce porézní látka vyrobená z kapalného gelu odpařením kapalné složky za nadkritické teploty a tlaku.*

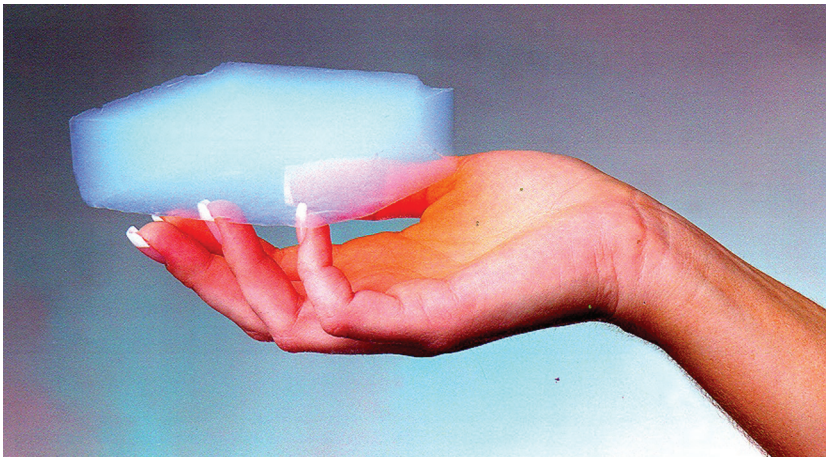
Alkogel - *mezifáze při výrobě aerogelu, kapalnou složku tohoto gelu tvoří alkohol, který je možné z gelu odstranit za technologicky příznivějších nadkritických parametrů.*

TMOS - *tetramethylorthosilikát, sloučenina na bázi křemíku, jejíž hydrolyzací je možné připravit alkogel v jediném kroku.*

Aerogely jsou vlastně tím co zbyde, když se nám z kapalného gelu podaří nějakým způsobem odstranit kapalnou složku tak, aby se nepoškodila pevnolátková struktura. Ta pak může obsahovat až 99,8% vzduchu, ale protože mikroskopické póry jsou nepatrné, řádově desítky nanometrů, v mnoha ohledech se aerogel navenek chová jako kompaktní hmota podobná například lehkému sklu. Bez nadsázky lze říci, že jde o nejlehčí pevnou látku, kterou známe. Někdy se pro ně používá přirovnání, že jsou jako zamrzlý kouř.

Z historie aerogelů

První aerogel byl vyroben v roce 1931 Stephensem S. Kistlerem, pracujícím tehdy v College of the Pacific ve Stocktonu v Kalifornii. Kistler své bádání založil na hypotéze, že obyčejný, kapalný gel se skládá jednak z kapalné fáze, jednak z pevnolátkové sítě, jejíž póry vyplňuje kapalná složka. Přímočarý nabízející se způsob, jak tuto hypotézu ověřit, spočíval v odstranění kapalné složky gelu, aniž by se poškodila pevnolátková síť. Při běžných způsobech sušení se však tato snaha ukázala jako marná. Gel se scvrkl na zlomek původní velikosti a z původní gelové sítě nezbylo nic, co by dokazovalo přítomnost pevné složky v gelu. Navíc, při sušení vznikaly různé praskliny a svraštěliny a vysušený gel kromě velikosti změnil podstatně i tvar. Kistler správně vytušil, že pevná struktura gelu je mikroporézní a poškodí se tlakem vypařující se kapaliny a záhy objevil klíč, jak tuto potíž odstranit. To, co poškodí gelovou strukturu, je totiž rozhraní kapalina-plyn, které je vždy přítomno při běžných způsobech vysoušení. Bezpečné odstranění kapaliny je nutno provést postupem, kdy se během zahřívání současně zvyšuje tlak tak, aby byl vyšší než tlak nasycených par odpovídající dané teplotě a to až do nadkritických hodnot teploty a tlaku. Pak totiž přestane existovat rozhraní kapalina-plyn a gel lze bezpečně



Vzhled aerogelu drženého v ruce (snímek NASA).

vysušit. Ani poté však nebyl tento postup snadný, Kistler po mnoha experimentech zjistil, že úspěšný postup vede přes mezikrok, kdy je voda v gelu nahrazena alkoholem a pak teprve se provede vysušení za nadkritické teploty a tlaku pro alkohol.

První Kistlerem připravené aerogely byly velmi podobné těm, které jsou připravovány dnes. Byly průsvitné, vysoce porézní a lehké. V dalších šesti letech Kistler připravil aerogely z celé řady materiálů a prozkoumal jejich vlastnosti. Dokonce po několika letech opustil univerzitu a stal se zaměstnancem firmy Monsanto Corporation, která začala aerogely na bázi křemíku komerčně vyrábět v granulové formě. Tyto komerčně produkované aerogely se používaly zejména jako aditiva a thixotropická činidla v kosmetice. V následujících třiceti letech však nebyl v poznání aerogelů učiněn téměř žádný pokrok, v šedesátých letech Montsano Corporation ukončila jejich výrobu a na jedno desetiletí se na aerogely skoro zapomnělo.

V sedmdesátých letech se obrátila francouzská vláda na Stanislause Teichnera z univerzity Claud Bernard v Lyonu, který hledal metodu, jak ukládat kyslík a raketové palivo v porézních materiálech. Následující událost patří k legendě mezi komunitou vědců specializovaných na aerogely. Teichner přidělil jednomu ze studentů úlohu připravit a studovat aerogely pro tuto aplikaci. Když student přípravu aerogelů zvládl, Taichner ho informoval, že k tomu, aby dokončil svou dizertaci, bude potřebovat velmi mnoho vzorků aerogelu. Avšak vzhledem k pracnosti jejich přípravy (Kistlerovou metodou, zahrnující dva časově náročné kroky, trvala příprava jednoho vzorku aerogelu zhruba dva týdny) by bylo potřeba mnoho let. Zklamaný student se proto rozhodl opustil Teichnerovu laboratoř. Dlouho to však nevydržel a po krátké pauze se do laboratoře opět vrátil, silně motivovaný k nalezení lepšího procesu syntézy. To se mu skutečně podařilo a uskutečnil tak bezpochyby největší pokrok v aerogelové vědě. V jeho postupu se využívá chemie pevných gelů. Tento proces nahrazuje sodné křemičitany používané Kistlerem alkoxysilany. Jejich hydrolizací v roztoku methanolu je možné získat alkoholový gel v jediném kroku (nazývaném alkogel), což eliminovalo dva Kistlerovy kroky. Vysušení těchto alkogelů za nadkritických podmínek poskytlo vysoce kvalitní aerogely. Teichnerova skupina a další uzpůsobili tento postup k přípravě široké škály aerogelů na bázi oxidů kovů.

V roce 1980 se v částicové fyzice přišlo na skutečnost, že aerogely jsou ideální médiem pro detekci Čerenkovova záření. Tím se rozvoj

TEOS - *tetraethylorthosilikát, sloučenina méně toxická než TMOS a navíc bezpečnější, používaná při výrobě aerogelů od roku 1983.*

ISA - *International Symposium on Aerogels, mezinárodní sympozium o aerogelech, vědecká konference specializovaná pouze na výzkum aerogelů, opakuje se každé tři roky, první proběhla v roce 1985 ve Würzburgu.*

Samuel Stephens Kistler(1900–1975).

Stardust - *hvězdný prach, také stejnojmenná kosmická mise, sonda, jejímž úkolem je během sedmi let posbírat a donést na zem vzorky mezihvězdného a kometárního prachu. Sonda Stardust startovala 6. února 1999 na nosné raketě Delta II. Celková hmotnost sondy je 350 kg. Hlavním cílem této mise bylo doletět ke kometě P/Wild 2 a sebrat vzorky prachových částic a par z ohonu komety. Tyto vzorky pocházejí z vnějšku sluneční soustavy a představují základní látky, z nichž byla kdysi naše soustava utvořena. Po návratu na Zemi (2006) budou vzorky podrobeny detailnímu průzkumu.*

Aerogely udrží až 1 000 krát větší hmotnost než jaká je jejich vlastní. Cihla na aerogelu, snímek NASA.

aerogelů ještě více urychlil, neboť pro tyto experimenty bylo potřeba připravit velké bloky transparentních křemíkových aerogelů. Za použití TMOS metody byly vyrobeny dva první velké detektory. Jeden, o objemu cca 1,7 m^3 na zařízení DESY (Deutsches Elektronen SYnchrotron) v Hamburku a druhý, o objemu 1 m^3, připravený na univerzitě v Lundu ve Švédsku, sloužil v evropské laboratoři vysokých energií CERN. První pilotní provoz na výrobu aerogelových monolitů byl tak zřízen členy skupiny Lund v Sjöbo ve Švédsku v roce 1984. Jejich autokláv měl objem 300 litrů a byl navržen pro nadkritické parametry methanolu, 240 °C, 80 atmosfér.

Rok 1983 znamenal další pokrok v technologii výroby, kdy vědecká skupina Arlona Hunta z Berkeley zjistila, že toxická sloučenina TMOS se dá nahradit tetraethylorthosilikátem (TEOS), která je bezpečnější, a kvalita aerogelů přitom zůstává zachovaná. Téhož roku vědci z Microstructured Materials Group zjistili, že alkohol lze nahradit kapalným CO_2 před nadkritickým ohřevem, aniž by se poškodila struktura gelu – stačí nyní jen 31 °C a 52 atmosfér a navíc CO_2 nevybuchuje. Totéž souběžně vyvinuli ve společnosti BASF a aerogel vyráběli do roku 1996 pod názvem BASOGEL.

Pokud by byl okamžik, od kterého by byla nějaká lidská činnost považována za samostatné vědecké odvětví, určen podle toho, kdy se pro daný obor konala poprvé specializovaná vědecká konference, u aerogelů by to byl právě rok 1985. Tehdy totiž profesor Jochen Fricke uspořádal první mezinárodní sympozium na téma aerogely (ISA). Konference probíhala ve Würzburgu v Německu a na poměry v jiných vědeckých oborech se jednalo o skutečně maličkou konferenci; prezentováno bylo 25 příspěvků. Poslední, šesté aerogelové symposium ISA proběhlo v říjnu 2000 v Albuquerque, v USA.

Za posledních 15 let věda o aerogelech skutečně tvoří samostatný vědecký obor zařaditelný někam na pomezí fyziky pevných látek, chemie a materiálového inženýrství. Na každé další konferenci byly publikovány rekordní dosažené parametry zejména v hustotě (podle jednoho článku je dokonce rekordně nízká hustota aerogelu zapsaná v Guinessově knize), ale i v dalších vlastnostech, jsou odkrývány nové metody syntézy a hledána nová složení a zároveň se přichází na nové aplikace. Například poměrně důležitý krok provedl Rick Pekala z LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), když rozšířil technologii užívanou na přípravu anorganických aerogelů na aerogely z organických po-

lymerů. Získal tak aerogely z čistého uhlíku, což otevřelo zcela novou oblast v jejich výzkumu.

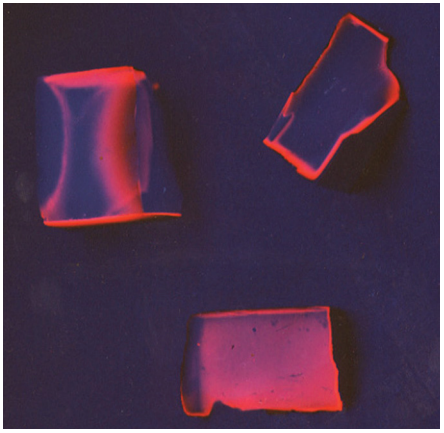
Mechanické vlastnosti:
O aerogelech se říká, že mohou udržet tisíckrát větší hmotnost než samy váží. To je na jednu stranu pravda, na druhou stranu je potřeba říci, že jsou velice křehké a podle toho je s nimi potřeba zacházet. Jde přeci jen o jinou formu skla a se sklem je třeba, jak každý ví, zacházet opatrně. Jemný prach vznikající při přelomení nebo rozdrcení je hladký a kulovitý a nevzniká proto takové nebezpečí jako například u azbestu, nicméně je dobré se při práci s aerogely vhodně chránit.

Jedna ze zajímavých vlastností aerogelů je jejich schopnost dobře absorbovat kinetickou energii. Zdálo by se, že vzhledem ke křehkosti aerogelu se jako absorbér energie příliš nehodí. Obzvláště pokud víme, že k tomuto účelu se používají nejrůznější pěnové materiály jako polystyrén, polyuretan a další. Avšak vzhledem k tomu, že aerogely mají velice nízkou hustotu, ke stlačování pevné síťové struktury dochází postupně a energie nárazu se pohlcuje delší čas. Navíc křemíkové aerogely mají strukturu s otevřenými póry a při deformaci uniká vzduch zevnitř porézní strukturou ven. Třecí síla působící na unikající vzduch je nepřímo úměrná průřezu pórů. Protože velikost pórů je v případě křemíkových aerogelů řádově desítky nanometrů, může materiál absorbovat při průchodu vzduchu značné množství energie.

Tepelné vlastnosti:
Jedna ze skutečně mimořádných vlastností aerogelů je jejich velmi nízká tepelná vodivost. Již Kistler zjistil, že v některých případech tepelná vodivost dokonce klesá pod hodnotu odpovídající vakuu (jedná se o celkovou, experimentálně zjišťovanou vodivost, zahrnující součet vedení tepla pevnou a plynnou složkou a také přenos tepla radiací). Přitom ale samy vydrží obrovský rozsah teplot, od jednotek stupňů nad absolutní nulou až po teploty přes tisíc stupňů. Aerogely jsou tak zajímavou alternativou k tradičním izolačním materiálům a to, co zatím brání jejich masovému rozšíření, jsou jejich vyšší výrobní náklady. To však nemusí být vždy ta podstatná překážka. Okenní tabule vyrobená z aerogelu by stála sice třikrát více než tabule z obyčejného skla, cena skleněné tabule však obvykle představuje jen asi 10 % celkové ceny okna. Zato bude aerogelové okno při stejné tloušťce izolovat teplo 32 krát lépe, než

Kometa 81P/Wild 2 - *nová periodická kometa, do roku 1974 ležela její dráha mezi Jupiterem a Uranem. Dne 10. září 1974 se kometa přiblížila na vzdálenost 0,006 AU k Jupiteru a byla vymrštěna do vnitřních částí sluneční soustavy. Dnes obíhá na dráze mezi Marsem a Jupiterem. Kometa má průměr přibližně čtyři kilometry a byla objevena Paulem Wildem dne 6. ledna 1978. Vzhledem k tomu, že kometa je ve vnitřní části sluneční soustavy relativně krátkou dobu, očekává se, že materiál nasbíraný sondou Stardust bude původním materiálem z období formování sluneční soustavy.*

Křemíkový aerogel při prosvícení světlem se spojitým spektrem. Snímek z Berkeley National Laboratory.



Aplikace aerogelů

Z nejdůležitějších aplikací aerogelů připadají v úvahu následující:

- *tepelná izolace,*
- *optické součástky využívající jejich průhlednost a fotoluminiscenci,*
- *pracovní medium pro pro detekci Čerenkovova záření,*
- *materiál pro sběr kosmického prachu*

stovky dalších nejrůznějších aplikací.

kdyby bylo použito obyčejné sklo. Použití místo okenních tabulí brání také zatím jejich ne zcela dokonalá transparentnost. Proto se jejich výroba zkouší v podmínkách beztížného stavu, kdy by se mělo podařit vyrobit vzorky s větší homohgenitou a tím i s lepší transparentností. Typická tepelná vodivost křemíkových aerogelů je asi 0,017 W/mK, což je hodnota asi 40 krát nižší než u skelných vláken. Při speciálních požadavcích lze celkovou tepelnou vodivost různými metodami ještě snížit. Jedna z možností, jak zmenšit tepelný tok přenášený plynem, je snížit tlak. Ukazuje se, že rozumná hodnota tlaku je kolem 5 kPa, při dalším snižování tlaku již tepelná vodivost výrazně neklesá. Při vyšších teplotách zase dominuje radiační složka, jíž lze zmenšit přidáním uhlíku jako pohlcovače infračerveného záření.

Ilustrace tepelné odolnosti aerogelů a izolační schopnosti. Snímek NASA.

Optické vlastnosti:

Nejcharakterističtější optickou vlastností aerogelů je jejich průsvitnost. Nejsou však průsvitné zcela. Pozorujeme-li křemíkový aerogel, jímž prochází světlo, proti tmavému pozadí, jeví se mírně namodralý, kdežto prošlé světlo se spojitým spektrem nepatrně zčervená. Je to důsledek Rayleighova rozptylu, což je stejný optický mechanismus, díky němuž pozorujeme modrou oblohu a červené slunce při západu. Křemíkové aerogely jsou ideálním materiálem pro aktivní i pasivní prvky optických senzorů. Vědecký tým v národní laboratoři v Berkeley totiž objevil proces způsobující v aerogelech trvalou fotoluminiscenci a navíc skutečnost, že míru fotoluminiscence lze ovlivňovat koncentrací plynného kyslíku v aerogelu.

Fyzikálně-chemické vlastnosti:

Primární částice, z nichž je křemíkový aerogel složen, mají velmi malou velikost, 2 až 5 nm. Důsledkem je mimořádně velký poměr povrchu k objemu, přibližně 2×10^9/m, čemuž odpovídá specifický povrch zhruba 900 m^2/g. Fyzika vnitřního povrchu aerogelu tak má dominantní roli pro určení jeho vlastností. Aerogel se tak stává atraktivním materiálem pro použití jako katalyzátor nebo absorbent. S použitím vhodných aditiv při jeho výrobě je možné připravit aerogel jak hydrofilní, tak hydrofobní a ovlivnit řadu dalších jeho vlastností.

Použití aerogelů se prosadilo převážně pro speciální účely ve vědě, v kosmické technice a podobně, pro běžné použití se zatím nerozšířily kvůli vysoké ceně a komplikované výrobě, jejich čas však pravděpo-

dobně teprve přijde a bude záležet na tom, jak rychle a jakým způsobem se bude vyvíjet technologie jejich výroby. Všimněme si nyní blíže jedné zajímavé aplikace aerogelů, kdy jsou používány jako materiál schopný bezpečně posbírat kosmický prach a uchovat ho pro pozdější analýzu.

Použití aerogelů pro sběr kosmického prachu

Jde o jednu z nejdůležitějších aplikací křemíkových aerogelů v poslední době, při níž se využívá již zmíněné schopnosti tohoto materiálu velmi účinně absorbovat energii. Bez aerogelů by totiž byl problém, jak zpomalit prachové částice o velikosti řádově mikrometry z rychlostí několik kilometrů za sekundu, aniž by se poškodila nárazem a zahřátím jejich fyzikální a chemická struktura. Zachycením v aerogelu se prachová částice zpomalí na relativně dlouhé dráze tak, aby se nezahřála nad nežádoucí teplotu. Dráhy částic jsou navíc díky průhlednosti aerogelů dobře viditelné a lze je analyzovat například stereomikroskopem. Zrnko kosmického prachu vytvoří v aerogelu stopu mrkvového tvaru.

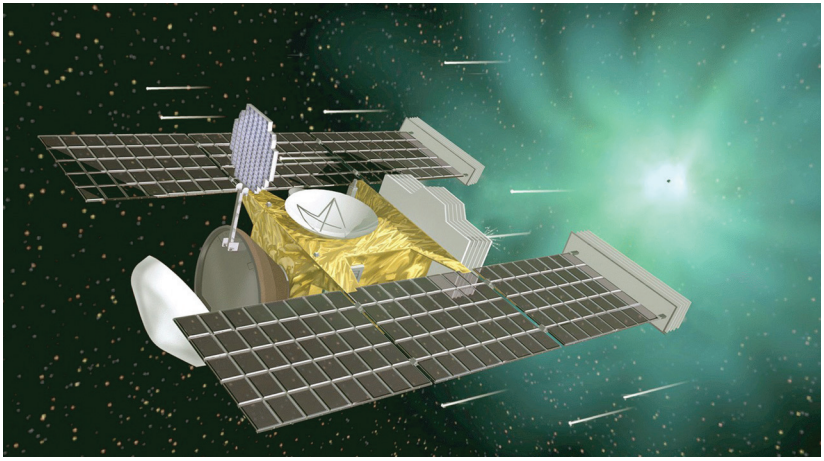
V současné době se pohybuje na oběžné dráze kolem Slunce sonda Stardust, která odstartovala v roce 1999 a její návrat je naplánován na 15. 1. 2006. Je určena pro sběr kometárního a mezihvězdného prachu. Mezihvězdný prach byl objeven v Německu vyrobeným prachovým dalekohledem na sondě Odysseus v roce 1993 a tento objev byl později potvrzen sondou Galileo. Stardust tedy bude sbírat prach, který se dostává do Sluneční soustavy z velmi dalekého mezihvězdného prostoru a vědci doufají, že sonda tak prostřednictvím nasbíraného prachu přinese přímé informace o prvcích vzniklých v jiných hvězdách. Dalším úkolem, který má sonda Stardust provést, je proletět ohonem komety Wild 2 a nasbírat vzorky kometárního prachu.

■ *Martin Žáček*

Kometární prach - *při opakovaných návštěvách komet ve vnitřní části sluneční soustavy dochází k dezintegraci jádra komety, často k rozpadu na několik menších jader, a k uvolňování prachu podél celé dráhy komety. Tento prach se může dostat do zemské atmosféry a vytvářet efekty mikrometeorů. Kometární prach má typickou porézní strukturu.*

Mezihvězdný prach - *vniká do sluneční soustavy ze směru souhvězdí Štíra. Tyto částice jsou menší a mají vyšší rychlost než kometární prach. Charakteristickou složkou jsou prachové částice nazývané GEMS.*

GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides) - *částečky prachu o rozměrech typicky stovky nanometrů. Prach je složen z drobných kulových zrn (10 nm). které obsahují železo, nikl a sulfidy. Tato kulová zrna jeví stopy po ozáření v mezihvězdném prostředí.*



Představa, jak by mohla vypadat Sonda Stardust při sběru kometárního prachu. Obrázek NASA.

Nanoclustery umožňují provádět logické operace

Nanofyzika - *obor fyziky, zabývající se vlastnostmi látky v nanometrových měřítkách. Spadá do fyziky pevných látek.*

Nanotechnologie - *obor zabývající se aplikováním výsledků nanofyziky. Zkoumá možnosti, jak vytvářet zařízení molekulových rozměrů a jak manipulovat s jednot-livými 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 při dodržení malých rozměrů.*

Clustery - *shluky vytvořené z omezeného počtu atomů nebo molekul. Představují mezičlánek mezi jednotlivými molekulami na jedné straně a kompaktní látkou na straně druhé.*

Svět, se kterým přicházíme do styku prostřednictvím nanofyziky, se zdá být rok od roku stále menší a zároveň přibývají možnosti, které nám poskytuje. Výsledky tohoto oboru nabízejí další a další aplikace zejména v mikroelektronice, ale také v jiných oborech, například v biologii. Již několik let se experimentuje s elektronovými turnikety, umožňujícím dávkovat náboj po elementárních kvantech, s iontovými pastmi, kdy manipulujeme s jediným atomem atd. Urychlení ve vývoji tohoto oboru nastalo roku 1981, kdy Binnig a Rohrer vynalezli rastrovací tunelový mikroskop. Ale už dávno před tím, v začátcích nanofyziky, mnozí odhadovali její budoucí vývoj. Například Richard Feynman předpovídal v roce 1959 ve své přednášce na Caltechu, že budoucí počítače budou mít rozměry několik nanometrů při srovnatelném výkonu tehdejších počítačů sálových. Aplikace nanotechnologie v medicíně možná jednou umožní ovlivňovat imunitní systém pomocí nanorobotů menších než červená krvinka, založených na hexagonální nebo fullerenové struktuře uhlíku.

O další posunutí hranic nanotechnologie se zasloužili vědci z Technologického Institutu v Georgii Robert Dickson a Tae-Hee Lee, když se jim podařilo přimět stříbrné clustery provádět logické operace. Protože stávající logické obvody realizované polovodičovými součástkami mají elektrické vstupy a výstupy, snaha o jejich zmenšování naráží mimo jiné na omezení dané velikostí jejich vývodů. Zařízení vyrobené v Georgii pracuje s optoelektronickým výstupem a toto omezení nemá, neboť výstup může být čten bez elektrického kontaktu.

Svítící clustery, obrázek, na němž je možné rozeznat světlo jednotlivých emitujících molekul stříbra. V podstatě jde o nejmenší vytvořený elektroluminiscenční zdroj na světě. Barva se mění podle velikosti clusteru.

Dickson a Lee vytvořili nanoclustery tak, že nechali procházet tenkou vrstvičku oxidu stříbra elektrický proud. Tok náboje způsobí migraci elektronů, čímž se proud tekoucí napříč vzorkem přeruší. Pole nanoclusterů, z nichž každý je složen ze dvou až osmi atomů stříbra, se seskupí podél místa, kde je proud přerušen. Vědci využili skutečnosti, že tyto nanoclustery lze

ovládat přesně definovanou úrovní energie a tak emitují světlo pouze při určitém napětí. Vystavili součástku dvěma odděleným elektrickým pulzům. První způsobí nahromadění děr uvnitř a v těsném okolí stříbrných molekul. Druhý pulz, vyslaný do 4 ns po prvním, znovu injektuje elektrony do diskrétních energetických hladin nanoclusteru. Tato kombinace pulzů umožňuje, aby součástkou tekl proud. Světlo je emitováno v případě, kdy elektrony a díry spolu zrekombinují uvnitř nanoclusteru po druhém pulzu.

Pokud budeme sledovat výstup emitovaného světla ze dvou korelovaných molekul, můžeme spolu pulzy sčítat a vytvářet tak velmi jednoduché, ale velmi důležité základní sčítací operace. Různými pulzy lze přimět jednotlivé clustery k tomu, aby pracovaly ve dvoustavové logice s funkcemi AND, OR, NOT a XOR. Vědecký tým se nyní snaží vytvořit optoelektronické pole sestávající z většího množství clusterů, než se podařilo doposud.

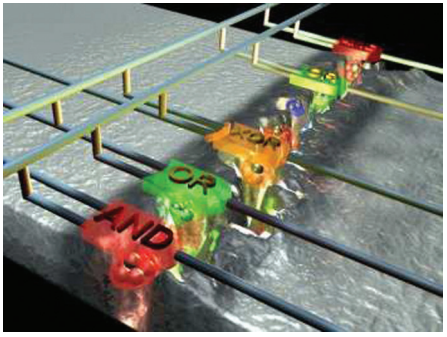
V srpnu loňského roku prezentoval Dickson a jeho spolupracovníci první experimenty, při nichž použili film, který za běžných podmínek nevykazuje žádnou elektroluminiscenci. Když filmem nechali procházet střídavý elektrický proud, podařilo se jim „aktivovat“ některé z molekul. Tenký řetězec clusterů se rozzářil různobarevnými emisemi, v závislosti na rozměrech jednotlivých clusterů. Zatímco obvykle je elektroluminiscence vyvolávána stejnosměrným proudem, tým vědců použil proud střídavý, přičemž světelná odezva prudce naroste při vysokých frekvencích. Při frekvenci nad 150 MHz je uváděno zesílení emise až 10 000krát. Odezva souvislé látky nemůže být nikdy tak rychlá, aby odpovídala proudu o takové frekvenci a ta proto nemůže dosáhnout takového stupně elektroluminiscence. Podle Dicksona je světelná účinnost při aplikaci střídavého proudu větší než u stejnosměrného proudu proto, že se náboj injektuje právě ve správný čas a minimalizují se ztráty energie, vedoucí k produkci tepla. Na základě těchto experimentů se možná dočkáme mnohem účinnějších a rychlejších optoelektronických součástek a jejich aplikací v nejrůznějších oborech. Autoři experimentů se však hodlají zaměřit spíše na základní výzkum a na pochopení základních vlastností clusterů emitujících světlo.

■ *Martin Žáček*

Clusterová fyzika - *obor fyziky zabývající se vlastnostmi clusterů. Clusterová fyzika existuje zhruba posledních 15 let a postupem času se rozdělila na dva hlavní směry. První z nich se zaměřuje na základní vlastnosti volných clusterů, druhý na jejich interakci s povrchem.*

STM - *Scanning Tunneling Microscope, rastrovací tunelový mikroskop. Zařízení založené na tunelovém jevu, umožňující zobrazit povrch pevné látky v rozlišení jednotlivých atomů. Povrch je doslova osahován piezoelektricky vychylovaným wolframovým hrotem. Ve směru povrchu je jeho rozlišení řádově 10^{-10} m. Na špičce wolframového hrotu se v ideálním případě nachází jediný atom. Rastrovací tunelový mikroskop umožňuje nejenom zviditelnit polohu atomů na povrchu krystalové mříže ale také je přenášet z místa na místo, když se pomocí přiloženého elektrického napětí překoná chemická vazba s povrchem a atom se hrotem mikroskopu přenese.*

Takto lze znázornit, jak clustery provádějí logické operace. Vstupy jsou elektrické, výstup optický.



NOVÉ TECHNOLOGIE

Křemíkové technologie pro optické systémy MEMS

Systém MEMS - *mikro-elektro-mechanický systém.*

Systém MOEMS - *mikro-opto-elektro-mechanický systém.*

Technologie DRIE - *deep reactive ion etching, hluboce působící iontové leptání.*

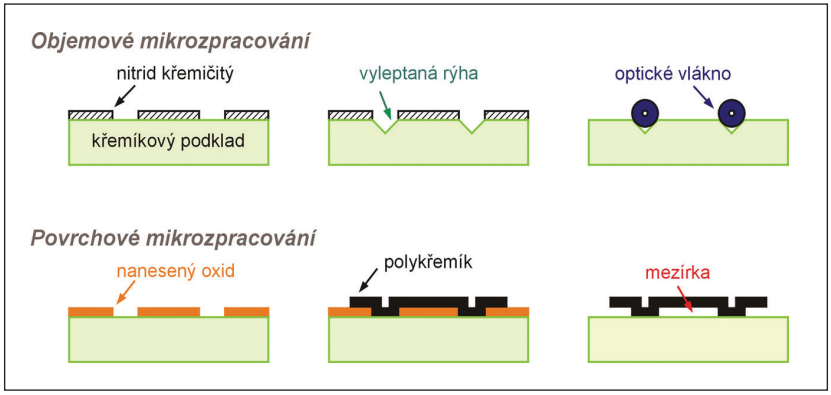
Struktura SOI - *Silicon On Insulator, křemík na izolátoru.*

Rychlý vývoj v optických systémech (větší rozsah použitelných frekvencí, terabitová rychlost přenosu dat na jednom vlákně) si žádá dokonalejší senzory a ovladače optických systémů. Tyto senzory a ovladače, případně i napojení optických vláken na jiné vlnovody nebo na laserové paprsky souhrnně nazýváme mikro-elektro-mechanickými systémy (MEMS). Abychom byli přesní, název MEMS se využívá i mimo optoelektroniku; čistě optoelektronické systémy nazýváme MOEMS (mikro-opto-elektro-mechanické systémy). V dalším textu se budeme zabývat materiály a technologiemi využívanými při výrobě MEMS.

Výrobní technologie MEMS

První běžně používaný způsob je objemové mikrozpracování. Při něm je nejprve křemíková destička ovzorkována vrstvou materiálu, který odolává leptání. Používá se buď SiO_2, který se na povrchu vytvoří sám reakcí křemíku s kyslíkem, nebo nanesený Si_3N_4. Leptáním se potom v křemíku vytvoří rýhy tvaru písmene V. Tyto V-rýhy mohou být osazeny optickými vlákny, jak je vidět na obrázku. Zapouzdřené struktury jsou vyrobeny tavným spojením skla s objemově zpracovanou destičkou, mnohovrstevné struktury jsou vystavěny spojováním více křemíkových destiček dohromady.

Druhý způsob, polykřemíkové povrchové mikrozpracování, využívá odlišnosti mezi vrstvou polykřemíku a vrstvou SiO_2 k vytvoření trojrozměrné struktury, jak je vidět na druhé řádce obrázku. Tento způsob vznikl upravením technologie výroby běžných integrovaných obvodů a technologie napařování polykřemíkových vrstev (standardně umožňuje nanést vrstvu o tloušťce 2 μm). Tloušťka nanesené vrstvy může být maximálně několik desítek mikrometrů, a to kvůli elektrickým a mechanickým vlastnostem polykřemíku, které jsou horší než vlastnosti křemíku monokrystalic-



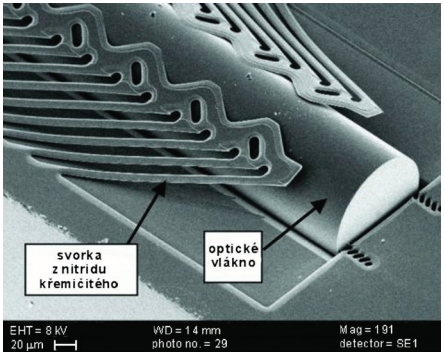
Schematické znázornění výroby MEMS objemovým a povrchovým mikrozpracováním.

kého. Nicméně opakovaným nanesením, ovzorkováním a naleptáním mohou být vytvořeny mnohovrstvé struktury v podstatě jakékohokoli tvaru.

Alternativní povrchové mikrozpracování se nazývá perspektivní technologie, která je stále ještě ve vývoji. Pokud vytvářená struktura musí být tlustší více, než dovolují vlastnosti polykřemíku, využije se litografické nanesení vrstvy fotorezistu (plastu měnícího se působením elektromagnetického záření) a následného elektrolytického pokovování k vytvoření mechanických částí, jak je znázorněno na prvním řádku dalšího obrázku. Ozáření hotové součástky rentgenem umožní odejmutí fotorezistu.

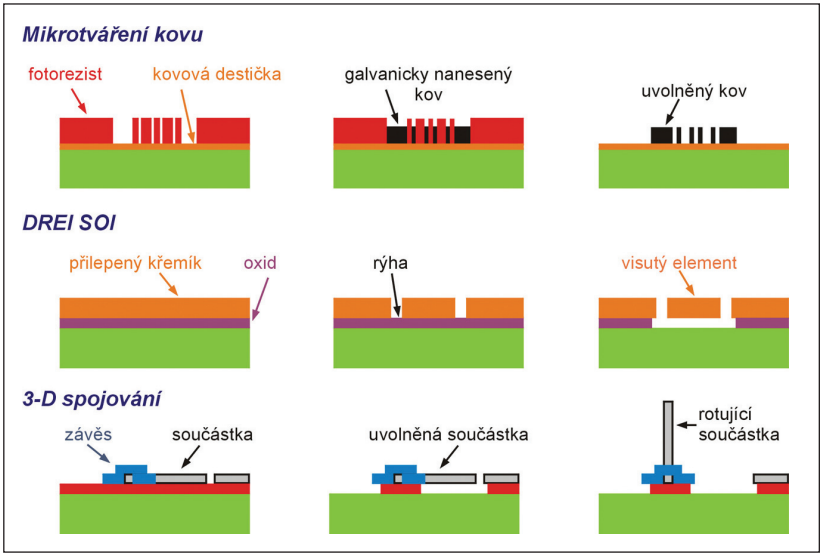
Nedávno objevený způsob výroby pružných monokrystalických struktur využívá vázaný silicon-on-insulator (SOI, česky křemík na izolátoru), což je materiál vznikající jako vedlejší produkt při výrobě moderních integrovaných obvodů. Jak je vidět na druhé řádce obrázku, výchozím materiálem je křemíková destička s vrstvou oxidu křemíku. Tato destička je vybroušena na požadovanou tloušťku, obvykle v rozsahu 5÷200 μm. Nanesená vrstva je pak opracována hluboce působícím iontovým leptáním (deep reactive ion etching, DRIE). Tímto způsobem se vyrábí většina pohyblivých součástí, například mikromechanické klapky pro optické vypínače.

Všechny z výše uvedených způsobů jsou kvazi třírozměrné. Zcela trojrozměrné struktury (tzv. 3D-MEMS) jsou vyrobeny z polykřemíku a SOI rotací částí vyrobených povrchovým mikrozpracováním, jak je vidět na třetím řádku obrázku. Jednotlivé části jsou drženy miniaturními závěsy.



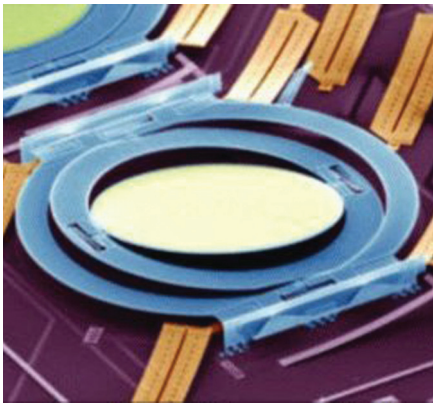
Upevnění optického vlákna ve V-rýze pomocí pružné svorky.

V současnosti vyvíjené technologie výroby MEMS.



MEMS v optoelektronice

Požadavky na spojení jsou v podstatě dva: buď potřebujeme dvě součástky spojit pevně, nerozebíratelně nebo rozebíratelně pomocí konektorů. Nerozebíratelné spojení vytváříme například slepením nebo



Mikrozrcadlo.

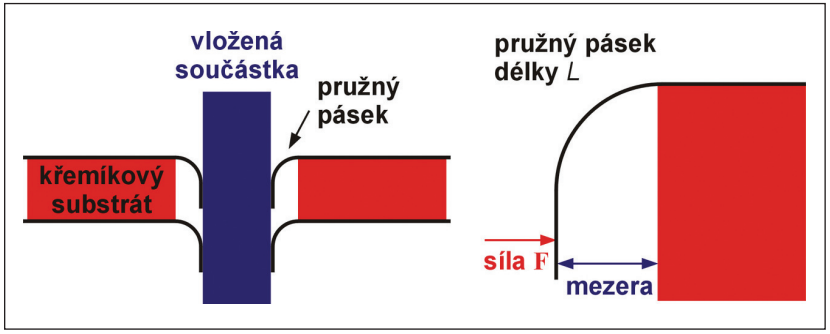
pomocí pružných nosníků z nitridu křemičitého Si_3N_4. Specielně pro výrobu konektorů byla vyvinuta technologie silica-on-silicon. Typická součástka vyrobená touto metodou je složena z monokrystalu křemíku s vyleptanými rýhami pro optická vlákna, silné vrstvy SiO_2 izolující elektrické řídící impulsy probíhající ve vrstvě křemíku a vodivých kanálů z dotovaného křemíku. Zařízení vyrobená touto technologií jsou levná a mohou mít velký počet portů. Proto jsou takto vyrobené součástky nejběžnější a můžeme se s nimi setkat v každém běžném optickém propojení (například optické připojení internetu nebo mezibankovní sítě).

V současné době se vyvíjí mnoho dalších spojovacích technik. Zde však zmíníme již jen jednu. Na hrany rýhy v substrátu se připevní pružný pásek. Síla pružnosti působí z obou stran na vloženou součástku a fixuje ji v určité poloze. Přesnost, s jakou může být optická součástka takto zafixována, je dána technologií leptání, neboť leptáním se připojuje pásek k rýze.

Optické součástky z MEMS

Výhodami MOEMS jsou nízká cena, malé rozměry a jednoduchost, se kterou mohou být integrovány i složitější systémy. Oproti interferometrickým vlnovodům mají menší ztráty, větší odolnost proti rušení a větší rozlišitelnost signálu. Tyto výhody převažují nad nevýhodami (relativně nízká rychlost mechanického přepínání, pomalé vylaďování). Velké zastoupení mají MOEMS na poli optických přepínačů.

Přepínače mohou být založeny na elektrostatickém vychylování. Nosník, ke kterému je přichycen vstupní kanál, je volně pohyblivý uvnitř vyleptané rýhy. Na stranách rýhy jsou povrchové elektrody, které vychylují nosník podle toho, s jakým výstupním kanálem má být spojen kanál vstupní. Přepínací doba v řádu milisekund je příliš dlouhá pro porovnávání dat, nicméně je dostatečná pro nastavování parametrů optických sítí.



Upevnění součástky v rýze pomocí pružných pásků

Jiné přepínače jsou založeny na vložení malých zrcadel do uzlů obyčejné křížové matice. Vhodná zařízení mohou být vyrobena

metodou DRIE. DRIE můžeme současně vytvořit svislá zrcadla, V-rýhy a jednoduchý elektrostatický pohon pro vložení nebo vyjmutí zrcadla do místa, kde se protínají optické osy. Přepínací časy jsou také v řádu milisekund. Optická izolace je velmi dobrá. Tato zařízení však mohou být použita pouze ve velmi malých přepínacích polích.

Ke konstrukci větších zařízení jsou používány dynamicky spojené 3D MOEMS. Přepínače tohoto typu jsou již dnes komerčně dostupné a navzdory mechanické složitosti jsou spolehlivé. Jiná zařízení využívají minizrcadla jako optický tlumič. Malé zrcadlo je vloženo do cesty části optického svazku a odrazí tuto část do pohlcovače záření.

Tento přehled zdaleka není úplný. Neustále se pracuje na vývoji jiných technologií výroby MEMS, umožňujících překonat současná omezení. Vývoj v tomto odvětví jde dopředu tak rychle, že za rok mohou být MEMS vyráběny úplně jinak.

■ *Marek Jasanský*

Může být diamant supravodivý za pokojové teploty?

BCS teorie - *počátkem 60. let 20. století vytvořili John Bardeen, Leon N. Cooper a J. Robert Schrieffer teorii supravodivosti založenou na myšlence párů elektronů s opačným spinem a směrem pohybu. Tyto páry elektronů (tzv. Cooperovy páry) se chovají jako bosony a mohou za nízké teploty sdílet přesně stejnou deformaci v krystalické mřížce. Díky tomu se chovají jako koherentní makroskopická kapalina.*

Bosony - *částice s celočíselným spinem. V témže stavu jich může být libovolný počet a díky tomu mohou vytvářet bosonovou kondenzaci v nejnižším kvantovém stavu.*

Vysokoteplotní supravodivost probíhající za pokojové teploty je snem fyziků mnoha generací. Vlastnit materiály s nulovým odporem při pokojové teplotě by znamenalo revoluci v elektronice. Samotný jev supravodivosti byl objeven již v roce 1911. Kammerling-Onnes detekoval supravodivé vlastnosti u rtuti ochlazené pod teplotu 4,5 K. S objevem nových supravodivých materiálů se hranice kritické teploty pro supravodivost velmi pomalu zvyšovala až na hodnotu 23 K. K prvnímu většímu průlomu došlo v roce 1986, kdy byly objeveny speciální keramické materiály s teplotou přechodu do supravodivé fáze kolem 150 K. Tyto materiály se stanou supravodivými při ponoření do relativně snadno dostupného kapalného dusíku. Obrovské nadšení postupně ochladlo pod tíhou technických problémů.

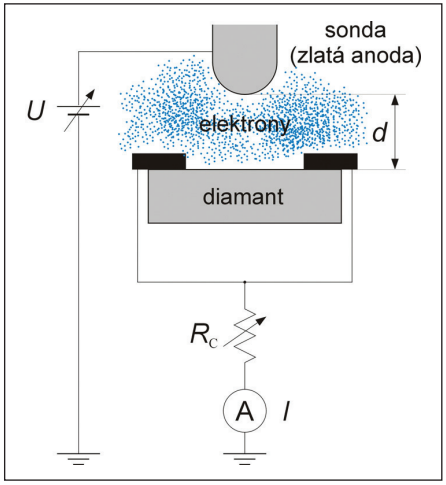
Johan F. Prins z Pretorijské univerzity v Jižní Africe pravděpodobně objevil vysokoteplotní supravodivý stav během experimentu s diamanty dotovanými kyslíkem. Supravodivé vlastnosti ve skutečnosti nevykazuje diamant samotný, ale oblak elektronů mezi katodou (diamantem) a velmi blízkou pozlacenou anodou (pohyblivou sondou). Celý experiment probíhá za pokojové teploty a sníženého tlaku. O tom, zda jde skutečně o supravodivost nebo jiný jev, ukáže až blízká budoucnost a další potřebné experimenty.

Diamant dotovaný kyslíkem je polovodič typu n a má zápornou elektronovou afinitu. Za pokojové teploty je schopen uvolňovat elektrony z povrchu tunelováním do vakua. Extrahované elektrony vytvoří vrstvičku mezi diamantem a anodou, která je vysoce vodivá a má zajímavé vlastnosti.

Diamant (katoda) i sonda (anoda) jsou uloženy ve vakuové komoře za tlaku 10^{-6} mbar při pokojové teplotě. Vzdálenost sondy od diamantu je možné měnit. Při napětí +1000 V se proud ustálí kolem hodnoty 0,5 mA a pro vzdálenosti elektrod větší než 16 μm klesá na nulu. Proud také teče opačným směrem při napětí –1000 V, ale vymizí při ještě menší vzdálenosti elektrod.

Elektrony opouštějící povrch diamantu jsou přitahovány zpět kladnou vrstvou vzniklou pod povrchem diamantu, nemohou se ale z energetických důvodů vrátit do diamantu. Těsně pod povrchem diamantu se formuje kladná vrstva a nad povrchem vrstva záporných elektronů.

Schématické znázornění aparatury použité pro měření elektronových emisí z diamantů. Sonda je vyrobena z nerezavějící oceli pokryté zlatem. Vakuum je nižší než 10^{-6} mbar.



Tyto dvě vrstvy vytváří dipól stínící povrchové elektrické pole. Velikost vzniklé dipólové vrstvy lze řídit polem přiloženým na sondu. Pokud elektrony dosáhnou až k anodě, začne mezi katodou a anodou téct elektrický proud. Elektrické pole mezi diamantem a anodou způsobuje nárůst počtu elektronů a snížení jejich rychlosti. Profesor Prins argumentuje tím, že dosažení stacionárního proudu znamená efektivní nulové elektrické pole v mezeře mezi katodou a anodou a přechod elektronové vrstvy do stavu Boseho – Einsteinova kondenzátu. Elektrony z nějakých, ne zcela jasných příčin formují Cooperovy elektronové páry. Proud pokračuje z diamantové katody skrz tuto vrstvu do anody, dokonce i tehdy, když tu není žádné napětí. Právě to je základní vlastností supravodivosti.

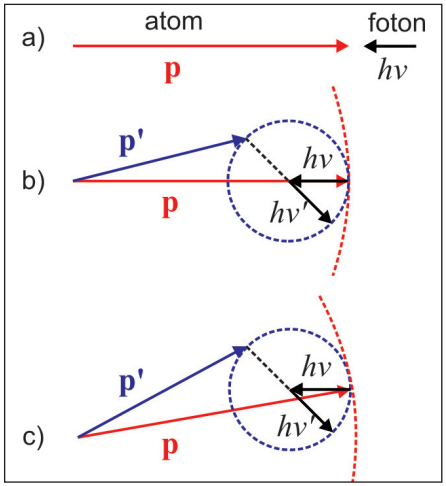
Avšak zbytek diamantové komunity zůstává skeptický. Richard Jackman z Univerzitní koleje London, který editoval speciální zprávy časopisů, ve kterých Prins publikoval, popisuje práce jako „velmi teoretické dokumenty, provokující, kontroverzní a otevřené k debatě". Prins připouští, že musí ukázat, že tento stav není závislý na magnetickém poli a přesvědčivě prokázat, že tento stav je supravodivý. Nicméně Prins nedávno odešel do důchodu a pokračování v experimentech je nejisté. Prins a jeho dva společníci se pokusili dosavadní pokusy patentovat. Na odpověď, zda se skutečně jedná o objev tolik žádané vysokoteplotní supravodivosti, si budeme proto muset ještě nějaký čas počkat.

■ *Jan Pašek*

Boseho – Einsteinův kondenzát - *představuje nový stav hmoty, ve kterém jsou atomy plynu v jednom jediném kvantovém stavu. Atomy plynu se vzájemně překrývají a společný kvantový stav se chová jako jediná „superčástice". Boseho – Einsteinova kondenzace vzniká u bosonů, které se mohou nacházet všechny v nejnižším energetickém stavu. Jde o kondenzaci nikoliv v prostoru určitých periodických uzlů, jako je tomu u fázových přechodů plynů na pevné látky, ale o kondenzaci v prostoru hybností. Přechod od klasického stavu ke kvantovému je náhlý, až dramatický.*

Přírodní diamant v hornině kimberlit.

Laserové ochlazování



Před srážkou *(a): Hybnost atomu je p, fotonu hν/c.*

Přímá srážka *(b): Atom s hybností p pohltí foton hν/c. Výsledný excitovaný atom má menší hybnost (střed modré kružnice), po samovolné emisi fotonu v náhodném směru (hν/c') dostane atom zpětný impuls, a jeho výsledná hybnost je p'. Konec vektoru hybnosti v rovině srážky tedy může ležet kdekoliv na modré kružnici. Červenou kružnicí je označena původní velikost hybnosti atomu. Je zřejmé, že modrá kružnice leží celá v oblasti vyhraničené červenou kružnicí, tedy velikost výsledné hybnosti je menší nebo rovna počáteční.*

Nepřímá sážka *(c): Proces již nelze nakreslit do jedné roviny, protože existuje rovina pohlcení a rovina vyzáření. Nicméně roviny lze natočit podle osy střed červené – střed modré sféry do jednoho obrázku. Část obrázku je v rovině pohlcení: červený a navazující černý vektor, část je v rovině vyzáření: modrý a druhý černý vektor. Část modré kružnice již přesahuje červenou, tudíž je možné že se atom urychlí. V průměru se tak ale neděje.*

V roce 1997 byla za objev principu laserového ochlazování Stevenovi Chuovi, Claudeovi N. Cohen-Tannoudjimu a Williamovi D. Philipsovi udělena Nobelova cena za fyziku. Těmto fyzikům se podařilo postavit laserové zařízení umožňující ochladit atomární plyny na teploty tisícin až miliontin Kelvinů. Teoreticky už byla možnost ochlazování laserem delší dobu předpovězena, ovšem technická realizace přišla mnohem později.

Princip

Je obecně známo, že atom může pohltit foton o určité energii, pokud v něm existuje možný přechod elektronu z nižší do vyšší energetické hladiny s daným rozdílem energií shodným s příchozím fotonem.

Ve skutečnosti ale foton nemusí mít tuto energii úplně přesně. Atom může absorbovat s menší pravděpodobností i fotony s blízkou frekvencí. Celé kouzlo laserového ochlazování spočívá v tom, že se frekvence laseru naladí na nižší frekvenci než atom absorbuje, a pouze atomy pohybující se směrem proti laseru díky Dopplerovu jevu budou „vnímat“ posunutou frekvenci a foton mohou absorbovat.

Foton ale kromě energie nese hybnost a díky tomu, že pouze vstřícné fotony jsou pohlceny, je o tuto hybnost snížena hybnost atomu. Po krátké době (cca 10^{-8} s) atom přebytečnou energii samovolně vyzáří ve formě fotonu, ale v náhodném směru, což předá atomu zpětný impuls ve směru opačném než odletěl foton. Díky trojúhelníkové nerovnosti bude velikost hybnosti atomu po vyzáření fotonu nižší než na začátku. Nižší hybnost znamená nižší rychlost a tedy nižší teplotu, energii. Atomy si pak srážkami energie přerozdělí. Tento princip ovšem není jediný a konečný, který se používá k získání atomárních plynových kondenzátů. Laserové ochlazování má své hranice a po jejich dosažení se používá principu evaporativního ochlazování, při kterém je postupně snižována hladina energetické pasti atomů, přičemž unikají nejener-getičtější atomy z pasti ven.

■ *Michal Stránský*

Magnetická chladnička

Některé směsi obsahující přechodné prvky mohou být využity jako chladicí látka. Podmínkou je, aby na tuto látku působilo magnetické pole. Jak by chladnička zkonstruovaná na tomto principu fungovala?

Mějme látku s doménovou magnetickou strukturou (feromagnetickou látku). Pokud na látku nepůsobí magnetické pole, domény jsou uspořádány nahodile. Jestliže však látku vložíme do magnetického pole, domény se uspořádají souhlasně s tímto polem a klesne tak neuspořádanost magnetických momentů látky. Druhá věta termodynamická nám však říká, že v makroskopickém uzavřeném systému (tyto podmínky splnit můžeme: použijeme relativně velké množství látky a izolujeme ji od ostatního prostředí např. Dewarovou nádobou) entropie neklesá. Proto začnou částice, uspořádané magnetickým polem, konat tepelný pohyb a látka se zahřívá na teplotu vyšší než je teplota okolí. V magnetické chladničce pak látku ochladíme například vodou nebo vzduchem na teplotu okolí. Když na naši látku poté přestane působit magnetické pole, její teplota klesne pod teplotu okolí, neboť její vnitřní energie bude menší o takové množství tepla, které jsme odebrali ochlazováním vodou nebo vzduchem.

Výhodou takovéto chladničky je téměř 60-ti procentní účinnost (účinnost kompresorových chladniček je zhruba 40 %) a to, že nevyužívá látky zatěžující životní prostředí.

Vývojem magnetické chladničky se dnes zabývá zejména Ames Laboratory v USA a skupina vědců na Walls Zeemanově Institutu univerzity v Amsterodamu. V Ames Laboratory jako chladící látku používají směsi gadolinia, v Amsterodamu směsi manganu.

Přechodné prvky (tedy i gadolinium) mají velkou hodnotu magnetického momentu, což je pro magnetickou chladničku výhodné. Ve slabém magnetickém poli se však entropie těchto látek výrazně změní

Magnetický moment - *základní charakteristika elementárních magnetů, kterými mohou být například elementární částice. Původem magnetického momentu je buï kroužení nabité částice nebo spin částice. Pro krouží náboj je magnetický moment dán číselně součinem elektrického proudu a plochy, kolem které náboj krouží.*

Feromagnetika - *snadno zmagnetovatelné látky, které jsou složeny z elementárních magnetků, pro které je při nízkých teplotách energeticky výhodná souhlasná orientace. Obecně mají feromagnetické vlastnosti slitiny železa, kobaltu, niklu a některé prvky vzácných zemin, například gadolinium.*

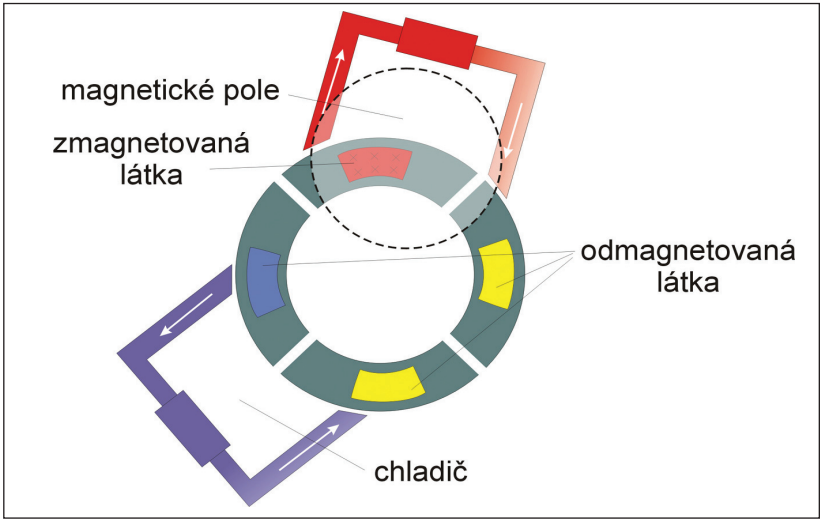


Schéma chladničky zkonstruované v Ames Laboratory. Chladicí látka je umístěna na prstenci rotujícím mezi magnetickým polem a chladičem.

Magnetické domény - *oblasti shodně orientovaných spinů. Vznikají ve feromagnetikách při teplotách nižších než je Curieova teplota. Magnetické domény jsou odděleny doménovými stěnami. V silném magnetickém poli dochází ke kompletnímu zorientování elementárních magnetů, tzv. saturaci.*

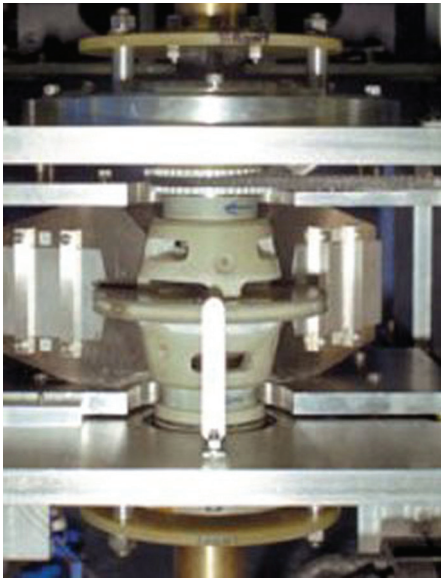
Chaotická fáze - *při teplotách vyšších než je Curieova teplota jsou ve feromagnetiku magnetické momenty orientovány náhodně, látka je odmagnetována, neexistuje doménová struktura.*

až při velmi nízkých teplotách. Při pokojové teplotě by mohly pracovat pouze při použití nákladných a na údržbu náročných supramagnetů. Nicméně Vitalij Percharsky z Ames Laboratory říká, že vlastnosti gadolinia lze zlepšit přidáním nečistot a že chladničky využívající gadolinium a pracující za běžných podmínek se už brzy dočkáme.

Mangan, jehož směsi používají Ekkes Brück a jeho kolegové na amsterodamské univerzitě, má oproti přechodným prvků zhruba poloviční magnetický moment, jeho Curieova teplota je však 300 K, takže může být použit i za běžných, byť nijak vysokých teplot.

■ *Marek Jasanský*

Magnetická chladnička, která byla zkonstruována v Ames Laboratory podle schématu na prvním obrázku.



Supravodivý detektor fotonů

Jonas Zmuidzinas a jeho kolegové z Laboratoře tryskových pohonů na Kalifornském technologickém institutu vyrobili detektor schopný měřit energii jednoho fotonu. Toto zařízení, které využívá hliník v supravodivém stavu, by mohlo mít velké uplatnění v astronomii.

Současné detektory

Dnes se zachycení světla využívá zpravidla CCD kamer, připojených na dalekohledy. Bohužel, kvůli vysoké úrovni šumu nemohou tyto detektory zaznamenat energii jednotlivého fotonu. Nově objevený „jednofotonový" detektor by mohl významně zlepšit výkon současných teleskopů a umožnit tak například lépe zkoumat kosmické mikrovlnné pozadí.

Konstrukce detektoru

Základem je zhruba 0,2 nm silná vrstva hliníku. Po ochlazení této vrstvy na teplotu blízkou 1 K jí může téci proud složený z Cooperových elektronových párů. Foton, který na vrstvu dopadne, způsobí rozbití několika Cooperových párů. Následkem toho se sníží proud vrstvou. Tento proud může být měřen například mikrovlnnou sondou.

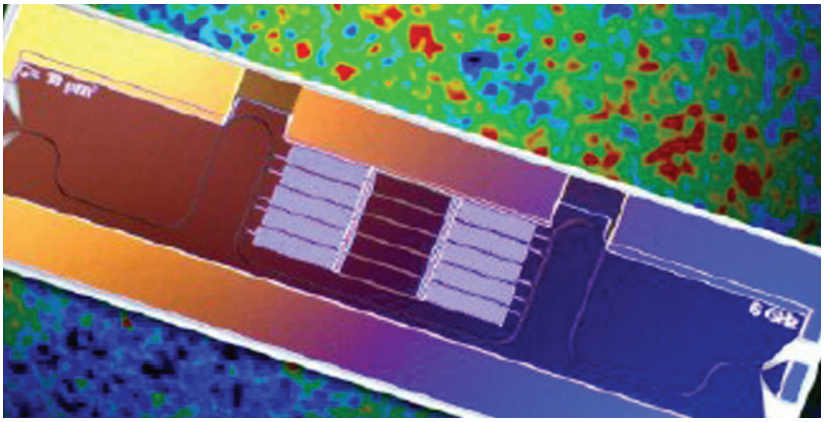
Díky velmi nízké pracovní teplotě nekonají částice detektoru téměř žádný tepelný pohyb, který by jinak rušil energetický pulz vytvořený fotonem. Právě tepelný šum snižuje výkon CCD senzorů.

Budoucnost

Tyto supravodivé senzory se mohou poměrně snadno vyrábět a měly by jít i lehce spojit do matic o velikosti stovek pixelů. Co tedy brání jejich co nejrychlejšímu využití v observatořích? Malá citlivost měření změn proudu v supravodivé destičce. Pokud se tento problém podaří vědcům vyřešit, zcela jistě se se supravodivými světelnými detektory setkáme.

■ *Marek Jasanský*

CCD - *(Charged Coupled Detector; senzor s nábojově vázanou strukturou) - každý pixel těchto senzorů je tvořen elektric-kým kondenzátorem z SiO_2. Pod každým z kon-den-zátorů je vytvořena oblast ochuzená o díry, tzv. potenciálová jáma, ve které se zachycují elektrony generované přicháze-jícími fotony.*
Potenciálovou jámu můžeme vytvořit buď přiložením kladného napětí na elektrodu kondenzátoru přivrácenou ke světlu, nebo přidáním polovodičového PN přechodu pod vrstvu SiO_2.
Z množství elektronů uvízlých v potenciá-lové jámě se určuje intenzita dopadajícího světla. Nejmenší rozměry jednoho pixelu jsou 9×9 mikrometrů a plošné senzory jsou tvořeny maticí až 5120×5120 pixelů velkou. Chlazené CCD senzory pracují se šumem od-povídajícím 4 až 7 elektronům za sekundu.



Obdélníčky uprostřed jsou detektory IR, svě-telného a UV záření. Drátky procházející ce-lou destičkou tvoří mikrovlnnou sondu (MKID).

Cesta do jádra Země

TNT - *trinitrotoluen, klasická trhavina připravovaná postupnou nitrací toluenu. Jde o žlutý prášek s teplotou tání 82 °C. Výbušný je při teplotách nad 240 °C. Je relativně necitlivý k otřesům. K explozi je zapotřebí rozbuška.*

Richterova stupnice - *široce užívaná logaritmická stupnice pro posouzení síly zemětřesení (amplitudy seismických vln). Byla zavedena v roce 1935 seismology Beno Gutenbergem a Charlesem Francisem Richterem. Skutečná zemětřesení nepřesahují 9. stupeň této stupnice.*

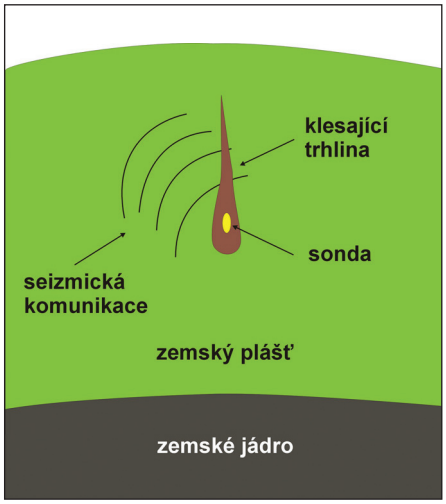
Vše, co dnes víme o nitru Země, se zjišťuje pouze nepřímo z různých projevů zemské aktivity, jako je šíření seizmických vln a jejich lom či odraz na rozhraních v různých hloubkách zemského masivu nebo z teoretických modelů podpořených počítačovými simulacemi. Takto získané informace jsou nepřesné a silně omezené charakterem pozorovaných vln. Spektrum seizmických vln je velmi úzké ve srovnání s elektromagnetickými vlnami, s jejichž pomocí zkoumáme okolní vesmír. A tak máme dnes o okolním vesmíru podstatně více informací než o nitru naší Země. Vysílání nejrůznějších sond do prostoru kolem nás je již na denním pořádku, zatímco vyslání sondy do jádra naší planety je stále považováno za science fiction.

David J. Steveson, který se prakticky celý život zabývá výzkumem vnitřních struktur planet a jejich měsíců, se snaží poukázat na propastný rozdíl v úsilí věnovanému zkoumání okolního světa a nitra Země. Tento americký fyzik vystudoval teoretickou fyziku na Cornell University v New Yorku, jeho diplomová práce se zabývala vnitřní strukturou Jupitera. V současné době je profesorem na katedře geologie a planetárních věd na California Institute of Technology a mimo jiné se zabývá interpretací dat naměřených různými sondami. Podle jeho názoru je vyslání sondy do jádra Země možné, pokud se o to začnou zajímat potřebné vědecké síly a pokud do tohoto projektu někdo investuje peníze. Zdánlivou neuskutečnitelnost této mise srovnává se stejnou dřívější nedůvěrou ve vesmírný program, který je v současné době již denní rutinou.

David J. Steveson tedy přichází s hrubým nástinem, jak by taková mise do jádra Země mohla vypadat: v Zemi se musí vytvořit trhlina, do které se nalije obrovské množství roztaveného železa a malá sonda. Tato tavenina díky vysoké hustotě sama vlivem gravitace proteče až do nitra Země odkud by sonda pomocí zvukových vln vysílala na povrch naměřená data.

Na vytvoření dostatečného tlaku pro průchod zemskou litosférou je potřeba vytvořit trhlinu o objemu zhruba 10 000 m^3. K tomu bude potřeba asi 10^{15} Joulů energie, což odpovídá několika megatunám TNT nebo zemětřesení o síle sedmi stupňů Richterovy stupnice. Správné využití takového množství energie k vytvoření trhliny je podle Stevesona menší problém než projekt Manhattan. Uvedené číslo představuje

Principielní schema mise.



horní hranici, protože množství potřebné energie se dá podstatně zredukovat využitím existujících tlaků pod povrchem Země.

Tato trhlina se následně vyplní železem roztaveným na teplotu 10 000 K. Na to bude potřeba zhruba 10^8 kg železa, takové množství vyprodukují světové slévárny za pouhou hodinu. Každého asi napadne otázka, co bude udržovat teplotu této taveniny během sestupu. Steveson se domnívá, že ke chladnutí taveniny bude docházet jen chvíli, blízko povrchu, než trhlina klesne dostatečně hluboko. Hlouběji pod povrchem je totiž tepelná difúze do okolních stěn natolik pomalá, že tavenina dosáhne svého cíle dříve než by stihla vychladnout. Předpokládanou rychlost sestupu vypočítal na zhruba 5 m/s, to znamená dosažení jádra Země za pouhé dva týdny. U taveniny narážíme na závažnější problém než je chladnutí: Je známo, že se zvyšujícím se tlakem stoupá teplota tání látek a teplota poblíž jádra Země je při uvážení okolního tlaku pod teplotou tání železa. Abychom zabránili zatuhnutí taveniny, je třeba provést výzkum vlastností nerostů pod vysokými tlaky a nalézt vhodné příměsi do taveniny, které by mohly značně zvýšit cenu projektu.

Dalším oříškem je samotná sonda. Měla by obsahovat miniaturní čidla pro měření okolní teploty, látkového složení, elektrické vodivosti atd. A to vše musí odolávat extrémním podmínkám v jádře Země. V neposlední řadě je tu problém komunikace se sondou. Dopravit naměřená data zpět na povrch je nelehký úkol. Země je v krátkodobém horizontu pro elektromagnetické vlny neprůhledná a použití neutrin pro komunikaci je asi skutečně nereálné. Jako schůdné řešení se nabízí použití seizmických (akustickýchh) vln. Země se totiž chová jako akustická čočka, což usnadňuje dopravení detekovatelného signálu na povrch. Zdrojem energie pro vysílání by mohlo být například zařízení fungující na principu Stirlingova motoru.

Celý tento projekt zní jistě velmi šíleně, ale šílené myšlenky stály u zrodu mnoha velkých projektů a objevů, které posunuly hranice lidských schopností zase o něco dále. Práce vynaložená na výzkum struktury Země určitě není marnou. Dozvíme se, jak probíhal vývoj naší planety, umožní nám lépe porozumět procesu zrodu planet a sluneční soustavy, poodhalí nám zdroj magnetického pole Země, mohli bychom zís-kat nové poznatky o vulkanické činnosti a zemětřesení a nebo nalézt alternativní zdroje energie.

■ *Tomáš Hála*

Stirlingův motor - *motor vynalezený v roce 1816 skotským knězem Robertem Stirlingem (1790-1878). Motor byl využíván v letech 1818-1822 k pumpování vody na farmách a výrobě elektrické energie. Zahřívání a ochlazování pracovního média probíhá vně motoru, nikoli uvnitř, jako u klasických spalovacích motorů.*

Projekt Manhattan - *americký tajný projekt vývoje atomové bomby za druhé světové války. Tým vědců, mezi nimiž byla desítka současných či budoucích nositelů Nobelovy ceny, pracoval pod vedením J. R. Oppenheimera v městečku Los Alamos v Novém Mexiku.*

Platí druhá věta termodynamická?

První věta termodynamická - *dodané teplo může zvýšit vnitřní energii systému nebo se spotřebovat na práci systému. První věta termodynamická není ničím jiným než zákonem zachování energie.*

Druhá věta termodynamická - *Přírůstek tepla není úplným diferenciálem, existuje však integrační faktor (1/T), který z diferenciálu tepla úplný diferenciál učiní. Novou veličinu nazýváme entropie: dS = dQ / T. Na rozdíl od tepla je integrál z en-tropie pro rovnovážný cyklický tepelný děj přes jeden cyklus nulový.*

Perpetuum mobile prvního druhu - *Neexis-tuje tepelný stroj, který by porušoval zákon zachování energie (první větu termodynamickou) a vykonával trvale a cyklicky mechanickou práci bez přísunu energie.*

Termodynamické zákony platí pro soustavy mnoha částic, které spolu zpravidla existují po dosti dlouhou dobu a proto jsou v tzv. termodynamické rovnováze, kdy se makroskopické parametry systému s časem nemění. Pro systémy existující po krátkou dobu lze vybudovat nerovnovážnou termodynamiku. Pro systémy, ve kterých je jen malé množství částic, termodynamické zákony nemusí platit vůbec. Závažným důsledkem druhé věty je nevratnost fyzikálních procesů na makroskopické úrovni (rozbitý hrnek se již nikdy sám nesloží dohromady).

Fluktuační teorém

Druhá věta termodynamická se svým tvrzením o produkci entropie platí samozřejmě pro velké statistické soubory, kde je možné provádět rozumné středování. Systém musí obsahovat velké množství částic po dosti dlouhou dobu. Pro malé systémy složené z několika částic dochází na krátkých časových úsecích k fluktuačním odchylkám od druhé věty termodynamické (odchylky by se vystředovaly, pokud bychom systém pozorovali po dosti dlouhou dobu). Analytický výraz popisující odchylky od druhé věty termodynamické je znám jako fluktuační teorém a byl odvozen před deseti lety prof. D. Evansem a jeho kolegy z ANU (Australian National University).

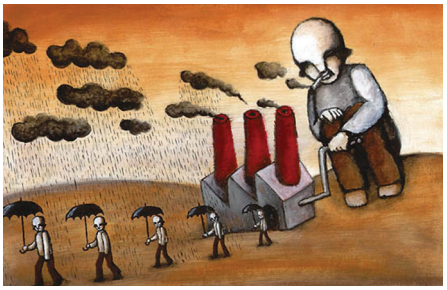
Nanostroje

Obrovský rozvoj nanotechnologií vede u mnoha lidí k představě, že různá zařízení lze zmenšovat až do nanometrových rozměrů a že budou vykonávat svoji činnost obdobně jako zařízení větších rozměrů. Právě fluktuační teorém a narušení druhé věty termodynamické způsobuje, že existuje základní omezení pro zmenšování velikosti zařízení (tzv. nanostrojů). Díky krátkodobým fluktuacím bude docházet pro malé zařízení namísto produkce entropie k jejímu poklesu a zařízení bude v těchto okamžicích fungovat obráceně (stroj poběží na opačnou stranu).

Experimenty

Poprvé byl experimentálně prokázán nesoulad s druhou větou termodynamickou profesorem Denisem Evansem a jeho kolegy z ANU v polovině roku 2002. K ověření fluktuačního teorému vědci použili asi

Fruwak: Perpetuum mobile



100 latexových kuliček (každá o průměru 6,3 μm), které byly umístěny do komůrky naplněné vodou a ta pak na podložní sklíčko mikroskopu. Vědci zamířili laserový paprsek na jednu z latexových kuliček a vyvolali v ní dipólový moment, který ji potom táhnul směrem k místu s největší intenzitou elektrického pole v laserovém paprsku. Kulička je zachycena laserovým paprskem (tzv. optická past) a je možné s ní pomocí paprsku manipulovat. Síla působící na částici v ohnisku laserového paprsku je přibližně harmonická.

Vědci pohybovali podložním sklíčkem mikroskopu tak, aby byla každá latexová kulička chvilku pod přímým účinkem laserového paprsku a chvíli ne. To prováděli 540 krát za deset sekund a během jedné sekundy provedli celkem 1 000 měření polohy jednotlivých latexových kuliček. Zkombinováním těchto pokusů byl Evansův tým schopen spočítat síly působící na latexové kuličky a změny entropie systému.

D. Evans a jeho spolupracovníci zjistili, že při některých trajektoriích je entropie spíše pohlcována než vytvářena. Tento jev byl pozorován, když vědci sledovali latexový preparát po dobu asi jedné desetiny sekundy. S rostoucí dobou pozorování počet těchto trajektorií klesal a pro pozorování delší jak dvě sekundy nebyly pozorovány žádné trajektorie se zápornou produkcí entropie. Výsledky přesně souhlasily s počítačovými simulacemi fluktuačního teorému.

Perpetuum mobile druhého druhu - *Neexistuje tepelný stroj, který by trvale a cyklicky pracoval tak, že by odčerpával energii z jediné lázně. Tento tepelný stroj neporušuje zákon zachování energie, v princi-pu ho lze zkonstruovat, ale bude fungovat jen po omezenou dobu. Pokud by takový stroj existoval, porušoval by druhou větu termodynamickou.*

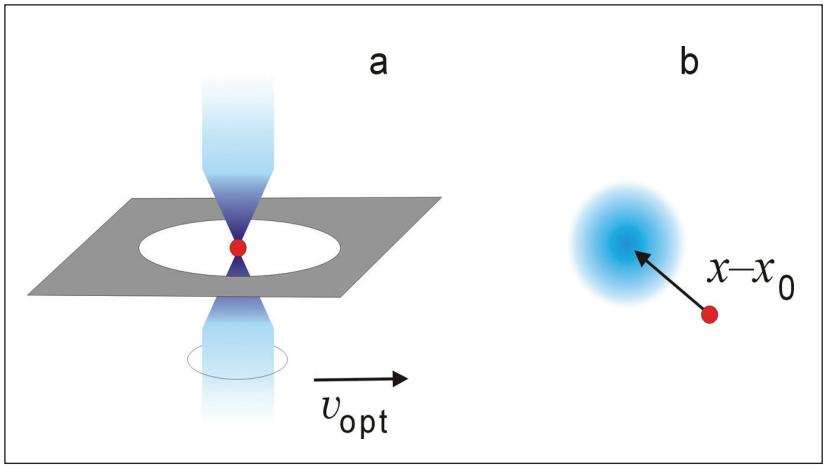
Entropie - *Lze ji definovat jako přírůstek tepla vydělený absolutní teplotou. Pro cyklický děj (na rozdíl od tepla samotného) je nulová. Lze ji také definovat jako míru neuspořádanosti systému. Pro izolované nerovnovážné systémy se entropie buď nemění nebo narůstá. Izolované systémy samovolně směřují k většímu chaosu. Pro neizolované systémy tvrzení neplatí.*

Závěr

Důsledky experimentů mohou být značné. Sledování malých systémů může napomoci pochopení vztahu mezi vratností procesů na úrovni elementárních interakcí a nevratností v makroskopických systémech. S fluktuačním teorémem je třeba počítat při návrhu malých strojů. Pokud se stává termodynamický systém menším, pravděpodobnost, že poběží „obráceně“ roste. To může vysvětlit mnohé procesy v malých biologických systémech (např. proteinových motorech).

■ *Pavel Břichnáč*

Síla působící na kuličku ji táhne do středu laserového paprsku.



Z-pinč fúze: konec světa oddálen?

Tokamak - *plazma v toroidální geometrii, které tvoří jeden jediný sekundární závit transformátoru. Procházející proud plazma zahřívá na fúzní parametry. Plazma je drženo kombinací magnetických polí.*

Z-pinč - *plazmové vlákno protékané proudem, které je drženo vlastním magnetickým polem. Další možný kandidát na uskutečnění řízené jaderné fúze.*

Inerciální fúze - *hustý terčík v pevné fázi je zahřátý například soustavou laserů (nebo jinak), stane se plazmatem, a po dobu fúze je udržován na místě setrvačností.*

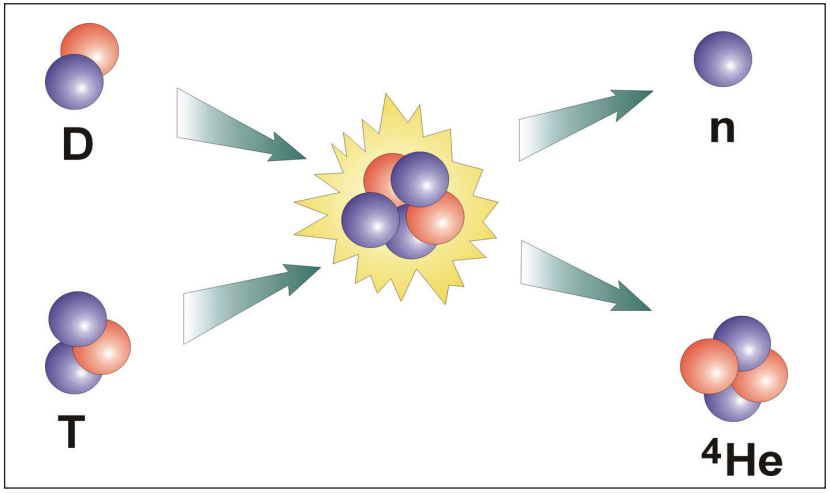
Poslední dobou ve vědě došlo k zásadním objevům, které nás spíše utvrzovaly o jisté apokalypse než o světlých zítřcích. Avšak je tu jeden, který by mohl pomoci lidstvu v jisté nepříjemnosti. Tím myslíme energetickou krizi. Následuje otázka: Dovedete si život představit bez elektrické energie? Odhad energetických zásob je následující: ropa 50 let, zemní plyn 60 let, uhlí 300 let atd. Obnovitelné zdroje pokryjí pouze nepatrné procento spotřeby energie a jejich masivní zavedení naráží na principiální problémy. Dalším způsobem získání elektřiny jsou jaderné elektrárny. Pomineme-li debaty o bezpečnosti či ekologické zátěži pro životní prostředí, jde o jediný plně funkční dlouhodobější zdroj elektrické energie, který lidstvo dokázalo zkonstruovat. Je tu však ještě jedna šance pro lidstvo: termojaderná fúze.

Fúze kontra štěpení

Jaderná fúze je jaderná reakce, při které se spojením jader lehkých prvků vytvoří nové těžší jádro za současného uvolnění energie. K tomu je třeba, aby se dvě lehká jádra k sobě přiblížila na dosah jaderných sil, kdy se pravděpodobnost průniku bariérou odpudivých coulombovských sil tunelovým jevem značně zvětší a může dojít k jejich sloučení.

Štěpení je naopak jaderná reakce, při které dojde k rozdělení jádra uranu. Existuje několik druhů jaderných reaktorů, pracujících již více než 50 let. Z mnoha různých hledisek je termojaderná fúze pro získávání energie výhodnější než štěpení. „Odpad“ je neškodný, účinnost reakce vyšší, zásoby paliva jsou téměř neomezené, atd. Zdá se, že jediným, ale podstatným problémem je udržení látky s parametry vhodnými pro fúzi po dostatečně dlouhou dobu.

Princip termojaderné fúze.



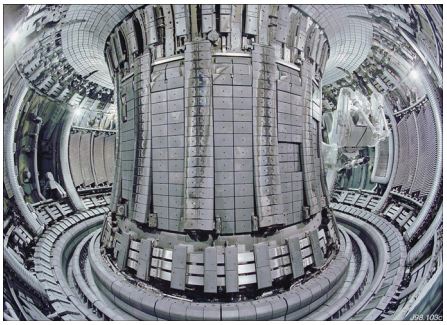
Termojaderná fúze

Termojaderná fúze je pokus o zatím „nejlepší“ zisk energie z hmoty. Tak jako ve většině případů si lidstvo bere vzor v přírodě. Termojaderná fúze probíhá ve všech hvězdách a jak se každý může přesvědčit, funguje skutečně úspěšně. Existují dva způsoby, jak se vědci snaží připravit jadernou fúzi na Zemi. Jedním z nich je magnetické udržení a druhým je tzv. inerciální udržení. Parametry pro zažehnutí termojaderné fúze jsou:

magnetické udržení: teplota 10^8 K, hustota 10^{20} m^{-3}

inerciální udržení: teplota 10^8 K, hustota 10^{28} m^{-3}

Oba tyto způsoby potřebují ještě dostatečný čas k zažehnutí, což je bohužel velice obtížně splnitelné, neboť se projevují nestability, které brání spuštění reakce.



Vnitřní část tokamaku JET (Joint European Torus). JET je největší výzkumné zařízení pro jadernou fúzi na světě. Projekt na výstavbu tokamaku pochází z roku 1978, do provozu byl uveden v roce 1983 v Culhamu ve Velké Británii.

Magnetické udržení

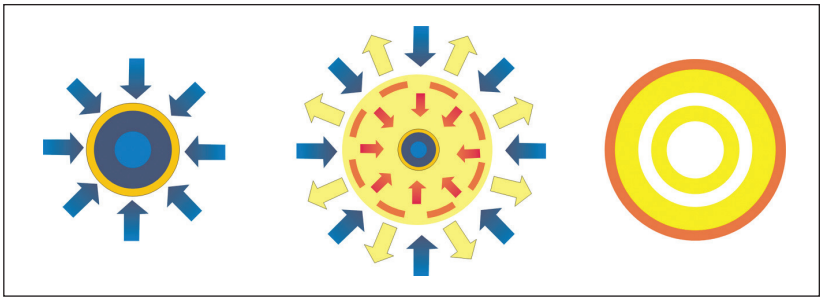
Nejznámějším představitelem magnetického udržení plazmatu je TOKAMAK. Je to zařízení prstencového tvaru s toroidálním magnetickým polem, v němž je plazma stabilizováno poloidálním polem vytvářeným proudovým impulsem v samotném plazmatu. Prstenec plazmatu tvoří sekundární závit obrovského transformátoru. Toroidální proud tekoucí plazmatem má tři funkce: stabilizuje plazma, v důsledku pinčového jevu ho izoluje od stěn a zároveň ohmicky zahřívá.

Dalšími představiteli tohoto principu udržení plazmatu jsou stellarátory, theta a Z-pinče, kompresní linery, zrcadlové nádoby, torzatrony...

Inerciální udržení

Z obrázku je patrné, na jakém principu pracuje inerciální udržení. V první fázi dochází k ohřevu terče, pulzy záření (světla, rentgenové záření, proud iontů) velice rychle ohřejí kapsli o velikosti hrášku. V další fázi nastává komprese paliva. Jestliže dojde k zhuštění na úroveň dvacetinásobku hustoty olova a je dosaženo teploty okolo 100 milionů stupňů, dojde k očekávané reakci. Celková energie získaná na jeden cyklus se rovná energii uvolněné při spálení 15 kilogramů uhlí.

Postup zažehnutí termojaderné fúze při inerciálním udržení plazmatu.



Plastiková kapsle s deuteriem na pozadí jednocentové mince. Skutečný průměr kapsle je 2 mm. Uvnitř kapsle jsou jasně patrné bílé tečky, které produkují rentgenové záření. Še-divý obrázek vpravo dole na minci je ta samá kapsle, ale nyní 7× zmenšená, vidět je zářící jádro. Tým tamějších vědců odhaduje počet vyprodukovaných neutronů na 10 miliard, což odpovídá energii okolo 4 mJ.

Existují celkem tři způsoby inicializace paliva: přímé, nepřímé a těžkými ionty. Terčík s palivem (deuterium, tritium) je uložený v plastikové kapsli o průměru cca 3 mm. Přímý ohřev je realizován tak, že kapsle je je umístěna ve středu laserových paprsků. U nepřímého ohřevu je kapsle ohřívána až následným rentgenový zářením, které vznikne při bombardování kovového válečku, obdobný způsob je i u ohřevu těžkými ionty.

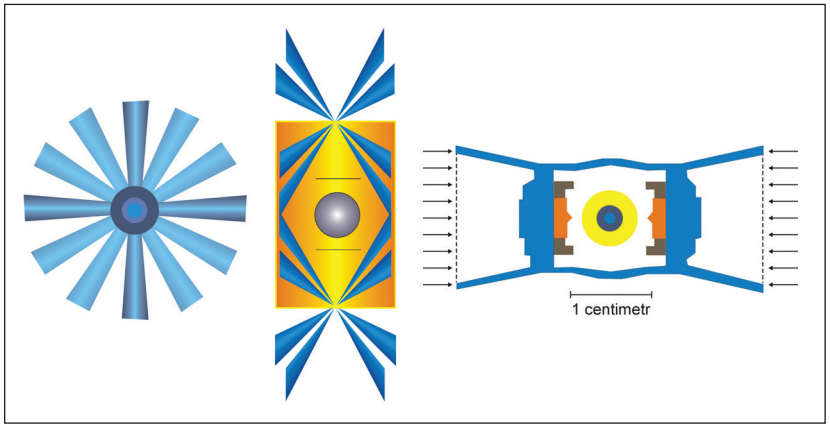
Současnost

Začátkem dubna 2003 na konferenci American Physical Society ve Philadelphia (USA), bylo oznámeno, že v Sandia National Laboratories se podařilo na Z-aparatuře vyrobit tak horké plazma, že produkovalo termonukleární neutrony. Produkce těchto neutronů je důkazem termojaderné fúze. Funkce Z-aparatury je následující. Jedná se o „Z-pinč“, ve kterém se elektrickým proudem ohřívá sada wolframových drátků do doby než explodují a vytvoří plasma s válcovou konfigurací, které kolabuje vlivem vlastního magnetického pole. Pinčující plazma produkuje rentgenové záření vysoké intenzity, které dopadá na povrch kapsle obsahující deuterium. Rentgenové záření způsobí rázovou vlnu a ta zahřeje a stlačí deuterium až do okamžiku fúze.

V Z-aparatuře je válcovitá nádoba, která má v průměru 36 metrů. Potvrzení realizace fúze se provádí měřením neutronů. Jak ale můžeme vědět, že jsou to skutečně neutrony uvolněné při fúzi? To byl důvod, proč s ohlášením objevu čekali vědci až do dubna 2003. Při ověřování experimentu byl do kapsle ještě přidán xenon. Plyn zabezpečil kapsli před zahřátím během komprese. To způsobilo pokles výtěžku neuronů přesně podle předpovědi.

Fúzní program, který se provádí v Sandia Labs, je řízený společností Sandia Corporation, Lockheed Martin Company pracující pro United States Department of Energy's National Nuclear Security Administration s hlavním sídlem v Albuquerque, N. M., a v Livermoru ve státě California.

Principy ohřevu kapsle. Vlevo je přímý ohřev, uprostřed nepřímý ohřev, napravo iniciace těžkými ionty.

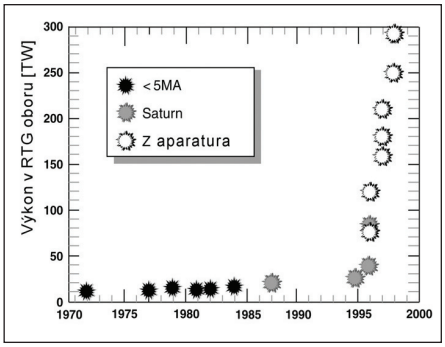


Budoucnost

Několik vět závěrem. Podle mínění fyziků ze Sandia Laboratories je výše uvedená fúze předzvěst řešení problému energetické krize a komerčního využití fúze. Na obrázku je znázorněn vývoj v uplynulých letech. Již v roce 2005 by se ve Spojených státech měl uskutečnit stejný experiment s obdobným, ale daleko větším zařízením. Jeho zkonstruování si vyžádá náklady 60 milionů dolarů.

„Kdyby se podařilo zkonstruovat zařízení na využití termonukleární fúze, mohl by se z tekoucí vody o průtoku 12 litrů za sekundu získávat stejný výkon jako mají všechny elektrárny v USA“, napsal svého času Richard Philips Feynman.

■ *Václav Kaizr*



Vývoj výkonu fúzních zařízení v uplynulých třiceti letech.

ITER: TOKAMAK nové generace

ITER - *International Thermonuclear Experimental Reactor. Zkratka znamená v latině slovo „cesta".*

TOKAMAK - *TOroidnaja KAmera a MAgnitnyje Katuški.*

Toroidální pole - *pole mířící v ose toroidu, a tím v ose plazmového provazce.*

Poloidální pole - *pole mířící kolem plazmového provazce.*

Deureium - *vodík, který má v jádře jeden proton a jeden neutron.*

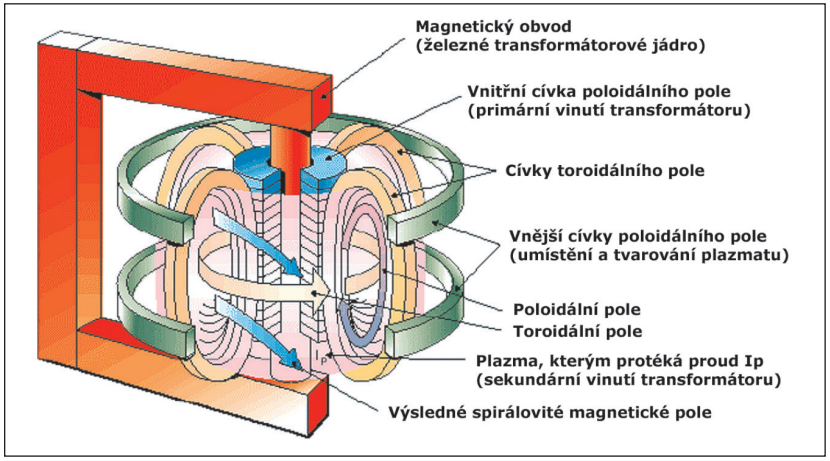
Tritium - *vodík, který má v jádře jeden proton a dva neutrony.*

Projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) je (a zároveň také bude, protože ještě není realizován), výsledkem spolupráce zejména EU, Japonska, Ruska, Kanady a USA. Spojené Státy sice v roce 1999 od projektu odstoupily, ale 5. 2. 2003 se k němu opět připojily, což dává projektu celkem slibné vyhlídky do budoucna.
Tento TOKAMAK (TOroidnaja KAmera a MAgnitnyje Katuški) by měl být první svého druhu, který vyprodukuje více energie než spotřebuje na rozpoutání termonukleární reakce. Jedná se vlastně o prototyp termonukleárního (fúzního) reaktoru, který by měl odpovědět na rozmanité otázky kolem termonukleární fúze a umožnit tak stavbu skutečné termonukleární elektrárny.

Princip TOKAMAKu

Jedná se v podstatě o obrovský transformátor, jehož sekundární cívka s pouze jedním závitem má tvar toroidní trubice. Plazma tvořené deuteriem a tritiem (izotopy vodíku) se nachází právě uvnitř této trubice, ve které je jinak vakuum. Elektrický proud procházející primárním vinutím transformátoru indukuje elektromotorické napětí v sekundárním obvodu (toroidu). V plynu D+T vznikne výboj, plyn se ionizuje a indukovaný proud jej zahřívá na velmi vysokou teplotu (přibližně 100 milionů stupňů Celsia). Magnetické pole tohoto proudu udrží vzniklé plazma v ose toroidu, takže se stěn toroidu nedotýká. Díky magnetickému poli, které udržuje plazma v bezpečné vzdálenosti od stěn, se sníží tepelné zatížení stěn komory na technologicky zvládnutelnou hodnotu (předpokládá se teplotní zatížení stěn kolem 1000 °C).

Principiální schéma TOKAMAKu.



TOKAMAK pracuje v pulzním režimu. Do vyčerpané prstencové vakuové nádoby se napustí plyn s hustotou částic $10^{18} \div 10^{21}$ m^{-3}. Proudem tisíců až miliónů ampérů

se plyn zahřeje na teplotu kolem 1÷2 keV. K dosažení potřebné teploty okolo 10 keV se používá ještě doplňkový ohřev: například ohřev absorpcí elektromagnetické iontově-cyklotronové vlny ionty, ohřev cyklotronní elektronovou rezonancí, vstřikováním neutrálních částic (také pro dodání paliva), ohřev parametrickými vlnami (s využitím intenzivních mikrovlnných nebo infračervených laserových svazků).

Projekt ITER

Jak již bylo řečeno, jedná se v podstatě o TOKAMAK s opravdu úctyhodnými rozměry - prstenec (toroid) má vnější celkový průměr přibližně 20 m a výšku 15 m. Na následujícím obrázku je řez celým reaktorem ITERu. Pro hrubou představu o skutečné velikosti tohoto reaktoru je v pravé dolní části obrázku postavička člověka.

ITER obsahuje soustavu obřích supravodivých elektromagnetů chlazených tekutým heliem. Celá soustava obsahuje celkem 18 cívek toroidálního pole (TF) o rozměrech 14×9 m, z nichž každá váží 290 tun. Dále je použito 6 cívek poloidálního pole (PF) a jeden centrální solenoid (CS), který váží 840 t, má 4 m v průměru a je 12 m vysoký. Materiál použitý pro hlavní supravodivé cívky (TF, CS) je Nb_3Sn (magnetické pole maximálně 12 T) a pro pomocné cívky (PF a další) je z finančních důvodů použit NbTi (magnetické pole maximálně 6 T).

Další podstatnou součástí prstence, ve kterém probíhá termonukleární reakce, je tzv. divertor, což je zařízení na dně prstence, které slouží k odčerpávání nabitých částic vznikajících při reakci. Jedná se zejména o helium a nečistoty způsobené interakcí částic plazmatu se stěnami reaktoru.

Proces termonukleární fúze

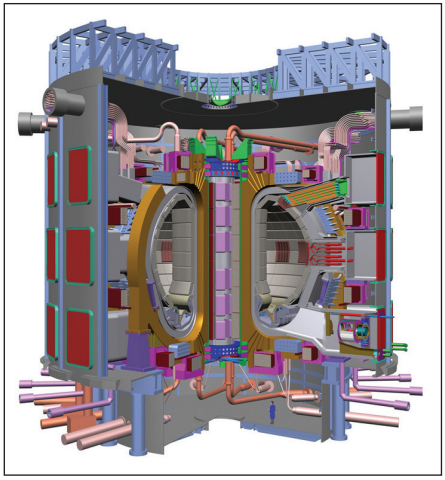
Tento proces je možné rozdělit do celkem čtyř kroků. Nejprve do prstence umístíme několik gramů paliva (D+T). Toto palivo následně zahřejeme na teplotu kolem 100 miliónů °C. Díky vysoké teplotě se dostanou atomy vodíku k sobě na dostatečně malou vzdálenost a sloučí se na helium se čtyřmi nukleony. Hlavní část energie, která vznikne touto reakcí, je odnášena přebytečnými neutrony, které nejsou zachycovány magnetickou pastí. Vysokoenergetické neutrony jsou zachycovány až obálkou reaktoru. Tato obálka je tvořena vodou chlazenými štíty s velkým obsahem berylia. Jako součást obálky reaktoru by bylo možné použít také lithium 6. Na rozdíl od beryliových štítů s vodním

Alfvénova vlna - *nejčastější vlna, která se rozvine v plazmatu tokamaku. Typickou součástí jsou příčné vlny nízkých frekvencí, šířící se podél magnetických silokřivek v plazmatu.*

Elektron-cyklotronová vlna (ECW) - *vlna postupující podél magnetických silokři-vek, vyvolaná proudy mimo plazma na frekvencích nižších, než je cyklotronní elektronová rezonance (frekvence odpovídající oběhu elektronů kolem silokřivek). Vlna je kruhově polarizovaná s orientací ve stejném směru jako je oběh elektronů v plazmatu.*

Smyčková (kink) nestabilita - *magnetohydrodynamická nestabilita způsobující charakteristický průhyb plazmového provazce ve tvaru kolene.*

Řez TOKAMAKem ITER



Korálková nestabilita - *magnetohydrodynamická nestabilita způsobující charakteristické zúžení a následný rozpad plazmového provazce.*

Balónové nestability - *magnetohydrodynamické nestability způsobené velkým gradientem tlaku plazmatu.*

Kolektivní nestability (TAE, Fishbone) - *způsobují únik alfa částic z plazmatu dříve, než plazmatu předají svou energii.*

Landauův útlum - *útlum plazmových vln způsobený interakcí vlny s nabitými částicemi, které přebírají energii vlny.*

Banánový orbit - *typická trajektorie nabité částice v tokamaku, která svým tvarem připomíná banán.*

Bohmova difúze - *rychlý únik plazmatu napříč magnetickými silokřivkami způsobený mikronestabilitami. Difúze je pojmenována podle Davida Bohma, významného teoretika ve fyzice plazmatu.*

Bremsstrahlung - *brzdné záření, je způsobené změnou směru dráhy nabitých částic při těsných srážkách nebo urychlováním či brzděním nabitých částic.*

Synchrotronní záření - *záření způsobené velmi rychlými částicemi rotujícími kolem magnetickýchb silokřivek na cyklotronní frekvenci.*

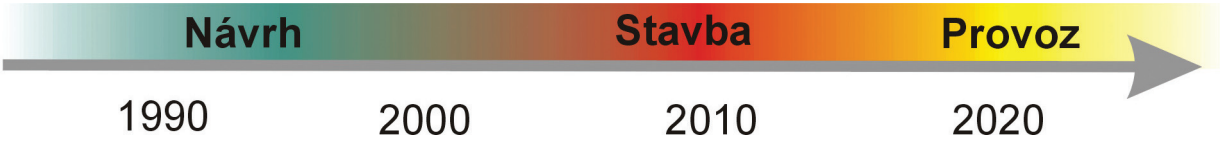
chlazením, které slouží „pouze“ jako ochrana okolí před deštěm životu nebezpečných neutronů a k odvodu tepla, by měla lithiová obálka ještě jednu velmi důležitou funkci. Lithium se totiž pod dopadem neutronů mění na tritium a díky tomu by bylo možné přímo získat tu část paliva, která se v přírodě volně téměř nevyskytuje.

Kde bude ITER postaven?
Zatím není o místě výstavby ITERu ještě rozhodnuto. Uvažuje se celkem o čtyřech možnostech – Cadarache (Francie), Clarington (Kanada), Rokkasho-mura (Japonsko) a Vandellos (Španělsko).

Jaký je časový plán ITERu?
Fáze návrhu byla dokončena v červenci 2001 vydáním detailní zprávy o projektu a konstrukci ITERu. Vyjednávání o výběru místa pro stavbu by mělo být uzavřeno na přelomu roku 2003/2004. Předpokládaná doba výstavby je 8 až 10 let, přičemž začít stavět by se podle původního plánu mělo v roce 2005. Plný provoz ITERu by měl být zahájen zhruba 20 let od začátku stavby tj. v roce 2020.

Máme na Zemi dostatek paliva?
Pokud budeme uvažovat energeticky nejvýhodnější reakci D-T, jsme omezeni zejména dostatkem lithia ze kterého je možné relativně snadno vyrábět tritium. Zásoby lithia v zemské kůře stačí na výrobu tritia minimálně na několik tisíc let. Pokud bychom v budoucnu zvládli obtížnější reakci D-D, tak v mořské vodě nalezneme zásoby deuteria i na miliardu let.

Proč vůbec termonukleární fúze?
Slučování jader lehkých prvků na těžší je v podstatě jediným, dlouhodobě využitelným zdrojem energie s dostatečným výkonem pro uspokojení současných i budoucích energetických potřeb lidstva. Vzhledem k tomu, že zásoby paliv používaných v současné době vystačí



pouze na několik málo stovek let, je nejvyšší čas začít se intenzivně věnovat výzkumu v oblasti termojaderné fúze. Finanční prostředky na výzkum nejsou malé, ale pokud by přišla energetická krize, byly by ztráty mnohanásobně vyšší.

■ *Martin Smetana*

Lawsonovo kritérium - *požadavek na teplotu, koncentraci částic a dobu udržení plazmatu. Při splnění kritéria je při fúzi produkováno více energie, než bylo dodáno.*

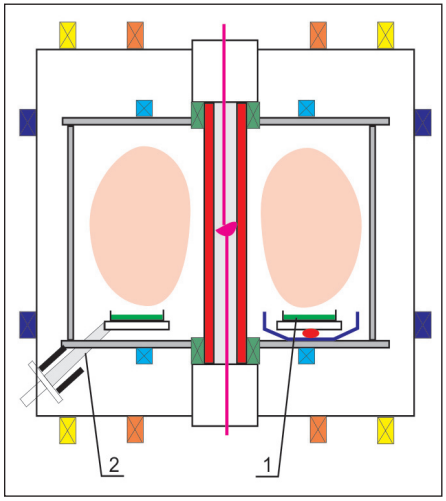
Dodatečný ohřev - *ohřev plazmatu externími zdroji, zpravidla svazky neutrálních částic nebo mikrovlnným zářením.*

Kapalná lithiová stěna výrazně ovlivní fúzi

Termojaderná fúze - *Slučování lehčích prvků na prvky těžší, při kterém se uvolňuje energie. K praktickému využití přicházejí v úvahu dvě reakce: slučování deuteria na helium nebo tritium a slučování tritia a deuteria na helium.*

CDX-U - *zkratka pro Current Drive eXperiment Upgrade. Malý toroidální reaktor pro ověřování teorií pro větší zařízení, umístěn v PPPL od roku 1993. Parametry: hlavní poloměr 34 cm, vedlejší poloměr 22 cm, toroidální pole 2 kG, maximální proud plazmatem 100 kA, teplota elektronů 100 eV, koncentrace elektronů dosahuje 5×10^{19} m^{-3}.*

Umístění lithia:
1 - tácek s lithiem (zelené), 2 - sonda.



Jak se zdá, další způsob jak dovést termojadernou fúzi ku zdárnému cíli je modifikovat prostor, kde má dojít k zapálení reakcí. Jednou takovou možností, jejíž vlastnosti se zkoumají, je vytvoření kapalné „stěny“ z lithia uvnitř reaktoru. Zařízení, na kterém byl testován vliv lithia na vlastnosti uvnitř reaktoru, se nazývá CDX-U a nachází se v Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL) na oddělení Department of Energy (DOE).

Tokamak

Na konci padesátých let se v Sovětském svazu zrodila koncepce TOKAMAKu. Jejím zakladatelem byl L. A. Arcimovič. Jde v podstatě o transformátor, jehož sekundární cívka má jeden závit ve tvaru toroidální trubice. Uvnitř toroidálního prstence se nachází náplň v podobě deuteria a tritia. Elektrický proud primárního obvodu transformátoru indukuje elektromotorické napětí v sekundárním obvodu. Tím vznikne výboj, plyn se ionizuje a indukovaný proud ho následně zahřívá na vysokou teplotu.

Magnetické pole tohoto proudu v kombinaci s dalšími pomocnými poli udrží vzniklé plazma v ose toroidu, takže se nedotýká stěn komory. Plazma je drženo magnetickým polem uvnitř reaktoru, proto je teplota stěn pouhých 1 000 °C až 1 300 °C. Rozměry reaktoru a jeho výkon závisí obyčejně na vlastnostech materiálů, které tvoří plášť reakto-ru, nikoli na vlastnostech plazmatu. Předpokládaný elektrický výkon těchto reaktorů by mohl dosáhnout 2÷3 GW. Do vyčerpané prstencové vakuové nádoby se napustí pracovní plyn s hustotou částic $10^{18}\div10^{21}$ m^{-3}. Proudem několika kA až MA se plazma zahřeje na teplotu 1÷2 keV. K dosažení potřebné teploty okolo 10 keV je potřeba použít jiné metody ohřevu: například ohřev absorpcí elektromagnetické iontově cyklotronové vlny ionty, ohřev cyklotronní elektronovou rezonancí, vstřikováním neutrálního svazku (také pro dodání paliva), ohřev parametrickými vlnami – využitím intenzivních mikrovlnných nebo infračervených laserových svazků.

Neutrony vznikající při reakci deuteria a tritia vyvolají určitou sekundární radioaktivitu konstrukčních materiálů. To by z dlouhodobějšího hlediska mohlo vést k degradaci materiálu reaktoru. Radioaktivita

vzniká při pohlcování energetických neutronů vznikajících při fúzi, poločas rozpadu vznikých izotopů je maximálně v desítkách let.

Popis zařízení v PPPL

Značným problémem je udržet plazma horké po dostatečnou dobu tak, aby došlo k fúzi. Existuje řada jevů, které buď plazma ochlazují nebo vytvářejí nestability a následný únik plazmatu. Proto se vyvíjí značné úsilí na výzkum nových modifikací stávající koncepce tokamaku. Popišme nyní jednu z možností, jak docílit lepších podmínek pro termojadernou fúzi uvnitř reaktoru.

Testovací zařízení CDX-U má tvar torusu, tak jako všechny tokamaky. Vnější průměr je 68 cm a vnitřní 44 cm. Na spodu je umístěn mělký kruhový (0,5 m) tác z kovu. Ten je naplněn tekutým lithiem. Jeho povrch činí 2 000 cm^2.

Tác je vybaven odporovým ohřívačem, který je zabudován do spodní části. Je vyroben ze dvou kusů, kde každá část je připojena zvlášť. Jeho úkolem je ohřát lithium na teplotu 400 °C. Lithium se taví při 180 °C. Tác je naplněn pevným lithiem o objemu 200 cm^3. Plnění probíhá ve vakuu nebo při argonové náplni, aby se zamezilo oxidaci lithia.

Vlastnosti lithiové stěny

Hlavním přínosem tohoto experimentu je fakt, že po přidání lithia se značně zlepšila účinnost ohřevu. Dalším velice povzbudivým výsledkem je, že lithiová stěna pohlcuje atomy uhlíku a kyslíku, které ochlazují plazma. Při vysokých hodnotách proudů (50÷80 kA), které odpovídají provozním proudům zařízení, evidentně dochází k podstatnému snížení O II nečistot v blízkosti tácku pro pevné lithium a ještě výrazněji pro kapalné lithium. Nezanedbatelný fakt je ochrana vnitřního pláště reaktoru. Tekutá „stěna“ může být neustále doplňována a chránit tak materiál reaktoru. Těchto vlastností je dosaženo již při naplnění pevným lithiem, ale nejlepších vlastností zatím bylo dosaženo s lithiem v kapalném stavu. Provozních proudů je dosaženo bez nejmenších problémů. Bez tácku s kapalným lithiem bylo provozního proudu dosaženo po mnoha hodinách experimentů, fitování zařízení a po mnoha desítkách výbojů. S lithiovou stěnou probíhá fúze nejen bezproblémověji, ale také účinněji.

■ *Václav Kaizr*

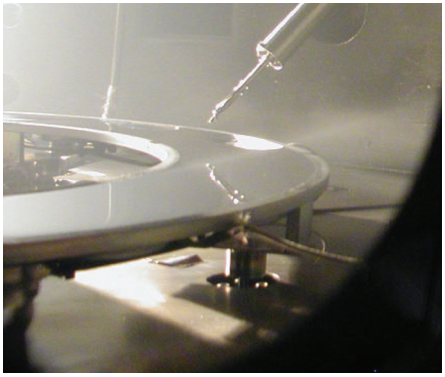
TFTR - *Tokamak Fusion Test Reactor, tokamak v PPPL fungující od roku 1982 do roku 1997. V tomto reaktoru byla dosažena rekordní teplota plazmatu - 510 milionů stupňů celsia.*

JET - *Joint European Torus, zařízení v anglickém Culhamu. Stavba započala roku 1978 a byla dokončena v roce 1983. První řízená termojaderná syntéza ve „větším množství“ byla uskutečněna v roce 1991 (1 MW), v roce 1997 byl dosažen fúzní výkon 16 MW. Činnost reaktoru byla ukončena v roce 1999.*

CASTOR - *Czech Academy of Sciences TORus, nejstarší fungující tokamak v ČR, dostavěn v roce 1983, poloměr 40 cm.*

TORE SUPRA - *tokamak postavený v městečku Cadarache ve Francii. Stavba byla započata v roce 1982 a první plazma bylo v tokamaku vytvořeno v roce 1988. V roce 1996 se zde dosáhlo rekordního udržení plazmatu 2 minuty a v roce 2002 dokonce 3,5 minuty.*

Detail „tácku“ s nalitým lithiem. Na hladině se odráží vstřikovací sonda.



Sonofúze?

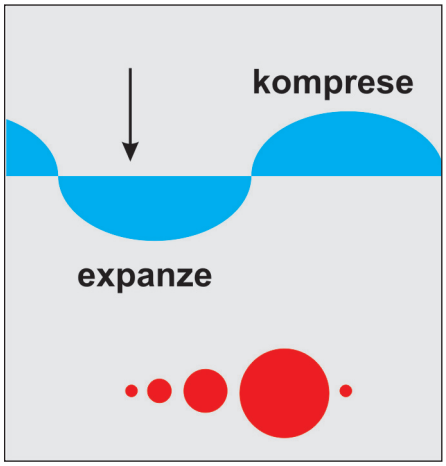
Kavitace - *fyzikální jev v kapalině, při němž vznikají, vyvíjejí se a zanikají kavitační bubliny (dutiny), které jsou vyplněny parami, případně plyny. Kavitační bubliny mohou vznikat například působením intenzivních ultrazvukových vln při poklesu tlaku pod tlak sytých par (při dané teplotě).*

Sonoluminiscence - *při prudkém adiabatickém kolapsu kavitační bubliny dochází k velmi výraznému lokálnímu zvýšení teploty plynu, atomy v něm obsažené mohou být ionizovány a emitovat krátké záblesky světla. Tento jev se nazývá sonoluminiscence.*

Jaderná fúze, zdroj energie hvězd, je i pro lidstvo velice lákavým zdrojem energie. Avšak pouze za nesmírně vysokých teplot a tlaků, jaké panují například v nitrech hvězd, mohou lehká atomová jádra překonat odpudivé elektrostatické síly, spojit se a uvolnit tak energii. U vodíkové bomby se těchto podmínek dosahuje krátkodobě, odpálením malé atomové bomby, zatímco s využitím urychlovačů může být dosaženo fúze malého množství jader.

Podle zprávy uvedené 8. března 2002 v časopise Science, skupina vědců z Oak Ridge National Laboratory dosáhla jaderné fúze za pomoci zvukových vln. Za tímto účelem byl použit svazek neutronů s energií 14 MeV, který vytvářel bublinky par o poloměrech řádově 10÷100 nm v deuterovaném acetonu CD_3COCD_3 (aceton, u něhož jsou atomy vodíku nahrazeny atomy deuteria). Zvukovými vlnami o kmitočtu 19,3 Hz byla vybuzena kavitace, projevující se vznikem světelných záblesků a přitom se podařilo detekovat tritium a další neutrony, což se interpretuje jako důkaz fúze jader deuteria.

Neutronový pulz (šipka) spolu se zvukovým signálem (modře) vytvoří podmínky pro vznik bublin (červeně). Bubliny nejprve rostou a poté s velkou silou implodují. Podle Oak Ridge Natioanal Laboratory.



Uspořádání experimentu

Kapalina vystavená intenzivním zvukovým vlnám může být zdrojem světelných záblesků. Tento jev se nazývá sonoluminiscence a objevuje se v kapalině při prudkém kolapsu (rázové kondenzaci) mikroskopických bublinek, které mohou vzniknout například při poklesu tlaku v kapalině pod tlak sytých par. Tyto bublinky s dalším poklesem tlaku zvětšují svůj poloměr (až 10^5 krát) a následně prudce kolabují, což má za následek velké lokální zvýšení teploty. Otázkou je, zda tato teplota může být natolik vysoká, aby umožnila jadernou fúzi. Za normálních okolností nikoliv, ale někteří vědci se domnívají, že v případě velmi malých bublinek vytvořených neutronovým svazkem toto možné je a teploty dosahují v maximu hodnot až $10^6 \div 10^7$ K.

Fúze jader deuteria může probíhat dvojím způsobem. V prvním případě vzniká tritium a proton s energií 3,02 MeV, který je v acetonu rychle absorbován. V druhém případě fúzí dvou jader deuteria vzniká jádro helia He-3 a neutron o energii 2,45 MeV.

Vědci z Oak Ridge National Laboratory tvrdí, že se jim tyto neutrony podařilo detekovat spolu se vznikajícím tritiem. Oba tyto jevy zmizely, když byl deuterovaný aceton nahrazen acetonem obyčejným

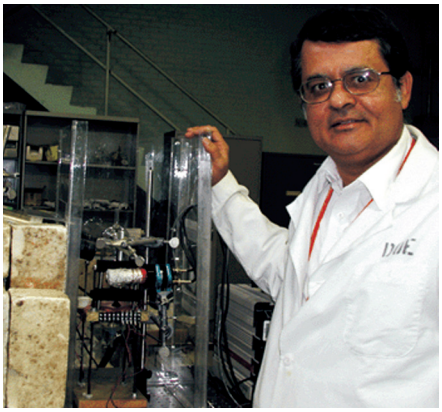
a když byla teplota lázně změněna tak, aby nemohlo ke kavitaci docházet.

Je to příliš jednoduché, než aby to byla pravda? Zveřejnění této výzkumné zprávy vzbudilo ve vědeckém světě vášnivou vlnu diskusí. Vedení Oak Ridge National Laboratory vyzvalo další vědecké týmy k provedení nezávislých měření za použití jiného typu detektoru neutronů. Tito vědci sice neutrony detekovali, ale zhruba v desetkrát menším množství, než by se při fúzi deuteria dalo předpokládat.

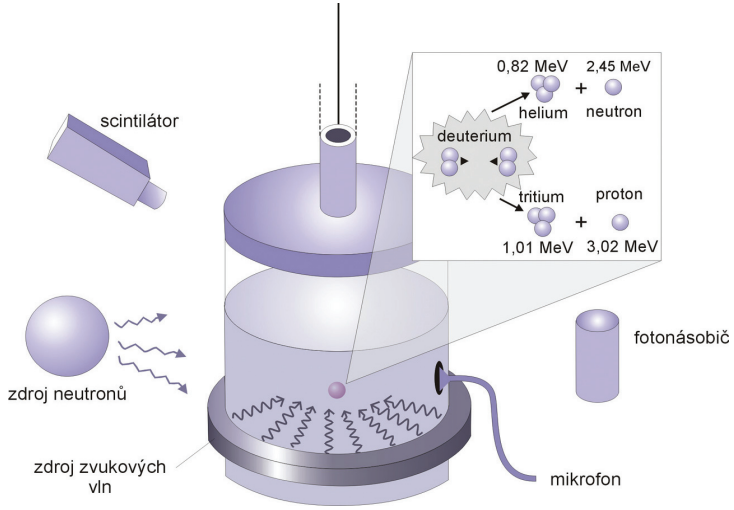
Kritici experimentu netvrdí, že k jaderné fúzi takto nemůže dojít, pouze, že zatím nebyla uspokojivě prokázána. Již v roce 1994 však bylo poukázáno a numerickými simulacemi potvrzeno, že při kolapsu bublinky a vzniku rázové vlny může dojít k dostatečnému zvýšení teploty a tlaku, potřebnému pro fúzi jader deuteria.

Podobné experimenty budou v budoucnosti opakovány, uvažuje se zejména o využití laserového paprsku pro generaci bublinek, aby nemohlo dojít k chybné detekci neutronů z budícího svazku. Výsledky těchto experimentů by měly být známy v nejbližší budoucnosti.

■ *Milan Červenka*



Rusi Taleyarkhan u své aparatury. Je možné provést fúzi na laboratorním stole? Foto Oak Ridge Natioanal Laboratory.



Expedice PARACHI 2003: Paraguay očima fyzika

V září 2003 jsme podnikli astronomickou expedici do Paraguaje, Argentiny a Chile. První týden jsme pobývali v Paraguaji na Národní universitě v Asuncionu (Universidad Nacional de Asuncion), která vlastní menší hvězdárnu. Náš program byl zaplněn mnoha recepcemi, přednáškami a vědeckými diskuzemi. V Asuncionu je také malé soukromé planetárium a z astronomického hlediska nepodstatný prezidentský palác a sídlo vlády a přístav. Naše cesta dále vedla k největší přehradě světa Itaipu a poté k vodopádům Iguaçu. Týden jsme pobývali v nehostinné planině Grand Chaco, poté přejeli do argentinské Salty a poznávali Andy z argentinské strany. Na chilské straně And jsou tři velmi významné přístroje, CBI, právě stavěná ALMA a samozřejmě VLT, který byl jedním z hlavních cílů expedice a o kterém jste se dočetli v předešlé kapitole. Jižněji je pak ještě observatoř La Silla. Naše expedice po souši urazila 6 500 km, natočili jsme několik hodin videí a pořídili přes 1 400 fotografií. O některé zážitky z první části expedice, která probíhala v Paraguaji, bychom se chtěli, s vámi čtenáři, nyní podělit.

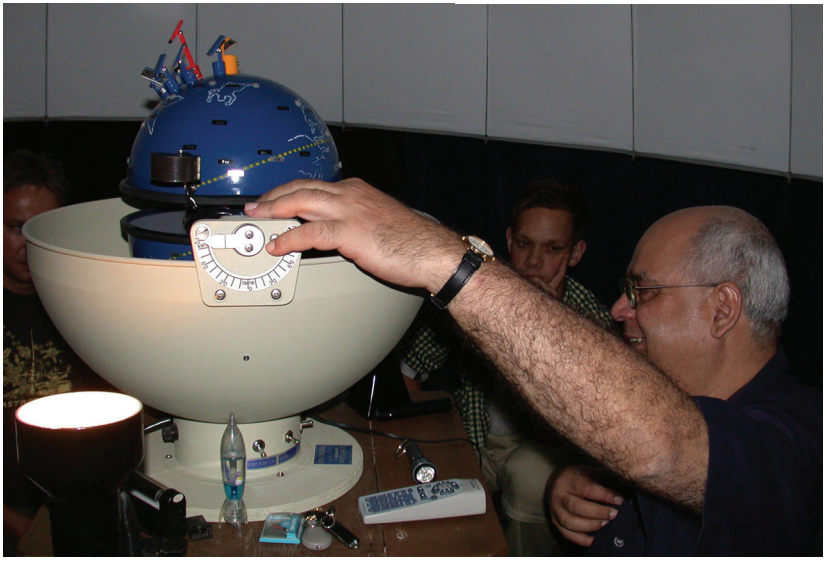
Universita v Asuncionu, univerzitní hvězdárna

Přestože má Asuncion, hlavní město Paraguaje, pouze 700 000 obyvatel (bez aglomerací), je velmi rozlehlý – místa je tu dost a půda je levná. Klasické byty jako v Praze tu prakticky nenajdete – bohatší obyvatelé žijí ve velkých domech se zahradami, chudší pak v menších baráčcích nebo ve slumech u řeky a na periferii. Areál univerzity se nachází asi půl hodiny cesty z centra Asuncionu. Na celé univerzitě studuje přibližně 25 000 studentů. Cílem naší návštěvy byla Polytechnická fakulta, kde nás nejprve čekalo přijetí u děkana fakulty a také u rektora university, kteří

nám podali základní informace o celé universitě i o Polytechnické fakultě. Pak následovala prohlídka některých učeben, kterými nás provázel šéf katedry informatiky. Měli jsme možnost seznámit se s obsahem výuky základního kursu, který je zaměřen spíše na obsluhu jednotlivých aplikací, než na vlastní programování. Z počítačových jazyků se vyučuje hlavně Pascal a SQL. Ze světových jazyků zřejmě pouze španělština, neboť nás dosti překvapilo, jak velká část studentů neumí anglicky.

Podstatně zajímavější byla návštěva místní hvězdárny se 40 cm automatizovaným dalekohledem. Hned u vchodu nás přivítala důvěrně známá dvojice map severní a jižní oblohy (Hlad a kol.) s ekvinokciem 1950,0! Na druhé straně zeměkoule, v zemi která stojí spíše stranou zájmu světové veřejnosti, bychom takové přivítání opravdu nečekali. V kopuli nás pak čekalo druhé překvapení – visela zde Rüklova mapa Měsíce. Dlužno podotknout, že pracovníci hvězdárny neměli příliš mnoho ponětí o tom, odkud ony mapy pocházejí.

Přestože průměrná hustota osídlení Paraguaje je velmi nízká, obloha nad Asuncionem je stejně přesvětlená jako v Praze. První objekt, který nám tu dalekohledem ukázali, byl Mars. Ne že by to byl nějaký skvělý obraz, ale dívat se na tuto



planetu směrem k zenitu – to je opravdu zážitek. To druhý pozorovaný objekt nás nadchl podstatně více – Klenotnici, otevřenou hvězdokupu v souhvězdí Jižního kříže, nemáme z Evropy šanci spatřit. Hvězdokupa má průměr přibližně 10´ a obsahuje kolem 50 hvězd od 6. do 10. magnitudy. I na přesvětlené obloze byla krásně rozpoznatelná barevnost jednotlivých hvězd. Hlavním programem hvězdárny je fotometrie proměnných hvězd, neboť s dalekohledem typu Schmidt-Cassegrain o průměru zrcadla 16 palců se toho za daných podmínek zřejmě více dělat nedá.

Po návštěvě hvězdárny následovala přednáška (Petr Kulhánek: Plasma Universe and Polar Lights). Největší posluchárna fakulty byla zcela zaplněna a přednášku dokonce natáčela místní televize. Za přednášku, na které byly mimo jiné zúročeny i výsledky naší loňské expedice Aurora 2002 jsme si kromě bouřlivých ovací a oficiální nabídky spolupráce vysloužili i večeři u děkana fakulty. Druhá přednáška (Jakub Rozehnal: Infinitely Many Worlds) o extrasolárních planetách se konala v sídle místní vědecké společnosti, která je jakýmsi ekvivalentem Akademie věd. Hospodaří však výhradně s prostředky získaných od nejrůznějších nadací a fondů a stát jí nepřispívá ani korunu, resp. ani guaraní.

Planetárium v Asuncionu

Další astronomickou institucí, kterou jsme v Asuncionu navštívili, bylo malé planetárium, jediné v Paraguaji. Na jeho návštěvu nás pozval jeho vedoucí, prof. Blas Servín, přední paraguayský archeoastronom, který nám v rámci recepce ve svém sídle udělal i zajímavou přednášku o astronomii starých jihoamerických civilizací z dob předkolumbovské éry.

Planetárium se nachází v obyčejném domě bez kopule – proč není kopule zapotřebí, to jsme se dozvěděli za chvíli. Jedná se totiž o opravdu malinkaté planetárium pro 20 osob - kopule, která je tvořena plátnem nataženým na duralové konstrukci, by se vešla i k vám domů. Oč je toto planetárium menší, o to větší má ale význam - systém vzdělání v Paraguayské Republice do značné míry postrádá koncepci, a kvalitní vzdělání je dostupné pouze na soukromých školách. Školné tu však dosahuje až dvojnásobku průměrného příjmu a tak je pro většinu mladých lidí nedostupné. Profesor Servín do planetária vodí mnoho studentů i žáků základních škol, a velkou měrou tak přispívá nejen k popularizaci astronomie, ale i vědy jako takové.

Paraguay - *vnitrozemský stát na jihoamerickém kontinentě. Na severu a severozápadě sousedí s Bolívií, na severovýchodě a východě s Brazílií, a na jihovýchodě, jihu a západě s Argentinou. Rozloha země je 406 752 km². Na východním břehu řeky Paraguay leží hlavní město Asuncion.*

V životě země hrají klíčovou úlohu řeky, které umožňují spojení s oceánem a jsou základním zdrojem elektrické energie. Ne nadarmo znamená slovo „Paraguay" v indiánském jazyce Guaraní „řeka, která dává život moři".

Itaipu-Iguaçu

Itaipu je největší vodní elektrárna na světě. Nachází se na řece Paraná na hranici Paraguaje a Brazílie a poskytuje energii oběma zemím. Celkový výkon je 12,6 GW, roční produkce energie 90 000 GWh. Přehradní jezero se táhne do vzdálenosti 170 km, samotná přehrada je vysoká 220 m a dlouhá 872 metrů. Hloubka v jezeře je kolem 100 m. Pro turisty se zde každý večer pořádá světelné show (Light Show), které spočívá v tom, že se za zvuků hudby přehrada postupně osvětlí nepohyblivou soustavou halogenových svítidel. Ještě, že tu v okolí není žádná hvězdárna! O 40 kilometrů dál jsou na argentinsko-

brazilské hranici vodopády Iguaçu na řece Iguaçu, která je přítokem řeky Paraná. Jde o vodopády s největší délkou podkovy na světě. Voda se valí v délce přibližně čtyř kilometrů do hloubky 60 až 80 metrů. Přístup k vodopádům je možný z národních parků na obou stranách hranice. Z městečka Foz de Iguaçu, na jehož periferii jsme bydleli, jezdí k vodopádům turistické autobusy. U vodopádů jsou na turisty zvyklí nosálové bělohubí, kteří zde žebrají potraviny. Když je nedostanou, prostě si jídlo ukradnou, třeba i z tašky. My jsme měli šanci vodopády vidět jen z brazilské strany, ale i to stálo určitě za to.

Chaco

Grand Chaco je rozlehlá nehostinná oblast severně od Asuncionu, na druhou stranu od řeky Rio Paraguay. Jde o území třikrát větší než Česká republika, velmi řídce osídlené. Chaco tvoří 60 % území Paraguaje a žijí na něm jen 3 % obyvatelstva. Chaco zasahuje i na území Argentiny a Bolívie. Na jednoho obyvatele v Chaco připadá na 20 krav. K jídlu zde můžete dostat steaky, steaky a steaky. Většinou krvavé. Ti bohatší si k nim mohou dopřát brambory nebo chleba. V Chaco je postaveno několik moderních továren, je zde několik indiánských kolonií, pár osad a jinak pusto. Hektar půdy zde lze pořídit za pouhé tři dolary. Místní indiáni prý mívali zajímavý zvyk: uloveného bělocha nezabili, ale nabídli mu své ženy a řádně si ho vykrmili. V okamžiku, kdy se narodilo první dítě a genetický proces byl dokonán, ho upekli a snědli. Také zajímavý a účinný způsob vývoje civilizace, že ano?

Je neuvěřitelné, že o toto území se v letech 1932 až 1935 dokonce vedla válka mezi Paraguají a Bolívií. Válku roznítili ropné společnosti,

které předpokládaly v Chaco výskyt ropy. Navštívili jsme pevnost Bouqueron, místo, kde byla svedena rozhodující bitva Války o Chaco. Bitvy se zúčastnilo 8 000 vojáků a zemřelo jich přibližně 5 000. Paraguay po těžkých ztrátách vyhrála a získala tři čtvrtiny území, o které se bojovalo. I přes drsné podmínky je zde osobitá příroda a Chaco stojí za to shlédnout.

Paraguay je krásná země, určitě stojí za to ji navštívit. Setkáte se s příjemnými a přátelskými lidmi, poznáte krásnou přírodu a budete vnímat jiný rytmus života než je ten náš.

■ *Jakub Rozehnal, Petr Kulhánek*

Asuncion - *hlavní město Paraguaje, sídlo vlády a prezidenta země. Počátky slávy města sahají do doby po roce 1541, kdy po útocích indiánů na Buenos Aires odešlo do Asuncionu mnoho obyvatel a Asuncion se stal na půl století centrem východní části Jižní Ameriky. Dnes má Asuncion mezinárodní letiště, zpracovává se zde bavlna, cukrová třtina, tabák a obilí. Asuncion je centrem vzdělanosti v Paraguaji, sídlí zde největší paraguayská universita UNA (Universidad Nacional de Asuncion).*

Kapitola V.
KVANTOVÁ TEORIE

Jako lidé jsme si přirozeně zvykli na svět, který nás obklopuje. Náš mozek umí zpracovávat informace, které jsou pro nás podstatné. Adaptoval se na tuto činnost miliony let. Každé malé dítě ví, že tři krát pět je to samé jako pět krát tři. Intuitivně vnímáme komutativnost světa kolem nás. Ale pozor, ve světě malých rozměrů toto základní pravidlo neplatí, AB není to samé jako BA. Změření rychlosti a poté polohy elektronu dopadne jinak, než mají-li akty měření opačné pořadí. Poprvé se s touto skutečností lidé setkali na počátku 20. století, kdy řada experimentů odporovala našim běžným představám. Stalo se tak proto, že lidé se svou technikou poprvé byli schopni měřit na úrovni atomů a elementárních částic. Začal se odkrývat překrásný svět, zcela nový, nezvyklý, podivný a ta-juplný. Svět malých rozměrů, svět kvantové teorie. Za celé století, které uplynulo od počátků kvantové teorie došlo k jejímu obrovskému rozmachu a hlubokému poznání mikrosvěta. Kvantová teorie se stala jedním z nejvýznamnějších pilířů současné fyziky. Od kvantové mechaniky přes kvantovou elektrodynamiku a kvantovou teorii pole až po sjednocovací teorie. Byla završena teorie elektroslabého sjednocení, máme rámcovou představu, jak funguje silná interakce. Zejména v posledních letech probíhají pokusy o jednotný teoretický popis všech čtyř interakcí, které vyústily v teorii strun.

V následující kapitole nenaleznete žádný přehled současné kvantové teorie. To by bylo téma na mnohasvazkovou knihu. Naleznete zde ale pár velmi zajímavých témat, o kterých určitě uslyšíme v budoucnosti. Zastavení světla v prostředí s mimořádně vysokou disperzí zní jako science fiction. Vždyť celé století žijeme v představě, že rychlost světla je cosi nepřekonatelného až mystického. A najednou se světlo může pohybovat rychlostí chodce nebo dokonce na malý okamžik zastavit. A co chování bosonů při teplotách blízkých absolutní nule? Všechny atomy vytvoří jeden superatom makroskopických rozměrů, jeden organický

celek v jediném kvantovém stavu. Experimentální technika zejména v posledních letech umožňuje vytvořit tento Boseho-Einsteinův kondenzát pro atomy i celé molekuly. Lidstvo zažívá první nesmělé krůčky s kvantovými počítači budovanými na kvantové logice. Ve světě elementárních částic byly nalezeny částice složené ze čtyř a pěti kvarků. Žijeme ve fantastické době, buďme rádi, že můžeme sledovat neuvěřitelný triumf lidského umu a jeho schopností.

Petr Kulhánek

Jaký tvar má proton?

Proton - *stabilní subatomární částice, s kladným nábojem $1{,}6726231\times10^{-19}$ C a s hmotností $1{,}6726231\times10^{-27}$ kg, což je 1 836 násobek hmotnosti elektronu. Proton je složen ze tří kvarků uud a má spin 1.*

Neutron - *subatomární částice s nulovým nábojem a hmotností $1{,}6749543\times10^{-27}$ kg. Neutron je složen ze tří kvarků ddu a má spin 1.*

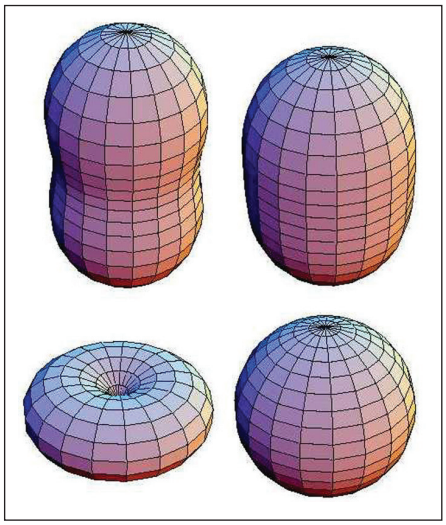
LS vazba - *vazba mezi orbitálními (L) a spinovými (S) stupni volnosti částice. Právě hodnoty čísel L a S a jejich kombinace do výsledného momentu jsou zodpovědné za tvar protonu.*

Proton je částice s kladným jednotkovým nábojem. Hmotnost protonu $m_p = 1{,}6726231\times10^{-27}$ kg. Pro poloměr protonu se udávají dvě hodnoty, které se ovšem liší: 0,805±0,011 fm a 0,862±0,012 fm (1995). Proton je hadron (podléhá působení silné interakce), jedná se o baryon (je složen ze tří kvarků – uud), a zároveň o fermion (spin 1/2). Proton s neutronem mohou být považovány za dva stavy téže jaderné částice – nu-kleonu. Britský matematik G. H. Hardy odhadl, že ve vesmíru se na-chází kolem 10^{80} protonů. Proton je nejlehčí známý baryon, a proto ze zákona zachování baryonového čísla vyplývá, že se jedná o stabilní částici, takže nemůže docházet k rozpadům, jako například

$$p \rightarrow e^+ + \gamma,$$
$$p \rightarrow e^+ + \pi^0,$$

které jinak neodporují ostatním fyzikálním zákonům zachování. Některé sjednocující teorie sice předpovídají možnost rozpadu protonu s poločasem 10^{30} roků (přičemž vesmír je podle posledních měření sondy WMAP starý 13,7 miliard roků), ale experimentálně tento jev dosud pozorován nebyl.

Možné tvary protonu. Laboratoř TJL (Thomas Jefferson Laboratory).



Trocha historie

Protony byly poprvé detekovány Wilhelmem Wienem (1898) a Josephem Johnem Thomsonem (1910, J. J. Thomson objevil roku 1897 elektron) jakožto kladně nabité částice o hmotnosti atomu vodíku. Ernest Rutherford roku 1919 objevil vznik jader atomu vodíku při ostřelování atomů dusíku částicemi alfa. Roku 1920 přijal hypotézu, že jádro atomu vodíku je elementární částice a dal jí jméno proton.

Tvar protonu

Pracovníci z Thomas Jefferson National Accelerator Facility v USA nedávno zveřejnili výsledky rozptylových experimentů, z nichž vyplývá, že protony nemusí mít vždy sféricky symetrický tvar, jak se až dosud předpokládalo. Ke stejným výsledkům dospěl roku 1995 i Gerald A. Miller, profesor fyziky na Washingtonské univerzitě, když se spolu se svými spolupracovníky snažil vysvětlit úhly, pod kterými se rozptylují elektrony při srážkách s protony v jaderném urychlovači.

Profesor Miller použil svůj teoretický model k predikci chování kvarků a objevil, že mohou výrazně ovlivnit tvar protonu. Z tohoto modelu vyplývá, že pohybují-li se kvarky uvnitř protonu rychlostmi srovnatelnými s rychlostí světla, způsobují, že proton má tvar „burského oříšku" (na obrázku na předchozí straně). Pokud se kvarky pohybují pomaleji, zmizí zúžená část a proton má tvar „míče na ragby" (na obrázku vpravo nahoře). Pakliže se kvarky pohybují velmi pomalu, má proton kulově symetrický tvar – jak se do této doby obecně předpokládalo. Tvar zobrazený na obrázku vlevo dole způsobují rovněž velmi rychle se pohybující kvarky. Zatímco v případě „burského oříšku" kvarky „rotují" ve stejném smyslu jako proton, v tomto případě je smysl jejich rotace opačný. Tvary protonů tedy mohou být velice rozmanité a závisí na rychlosti a směru pohybu jejich kvarků.

Další zajímavé experimenty v Thomas Jefferson Laboratory

M. K. Jones (2000) a O. Gayou (2002) ukázali, že elektromagnetická struktura protonu není zcela triviální. Rozdělení náboje uvnitř protonu není přímo úměrné rozdělení magnetického momentu, jak se dosud předpokládalo.

K. A. Aniol se spolupracovníky ukázal (1999), že v protonu neustále vznikají a zanikají páry složené z podivného kvarku a antikvarku. To znamená, že se proton (*uud*) o vysoké energii může rozpadnout například na Λ hyperon (*uds*) a K mezon (*us'*).

D. Abott se spolupracovníky (2000) zkoumali chování protonu vázaného s neutronem (jádro deuteria). Zjistili nesférické rozložení náboje v deuteronu.

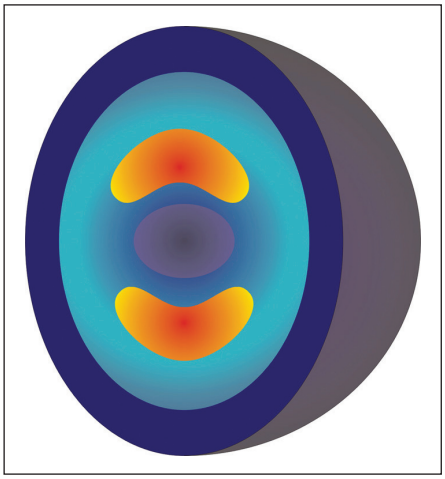
Polovinu hmotnosti protonu tvoří gluony, částice, které dohromady spojují kvarky v protonu. Jeden z programů v Thomas Jefferson Laboratory je orientován na sledování spektra gluonových excitací a umožňuje hlubší studium silné interakce.

■ *Milan Červenka*

Objev protonu - *roku 1898 Wilhelm Wien a později Joseph J. Thomson (1910) identifikovali částici s kladným nábojem, jejíž hmotnost se rovnala hmotnosti vodíkového atomu. Ernest Rutherford ukázal roku 1919, že dusík bombardovaný částicemi alfa odmrští objekt, který se jeví jako vodíkové jádro. V roce 1920 pojmenoval tato vodíková jádra protony.*

Objev neutronu - *neutron objevil v roce 1932 anglický fyzik James Chadwick. Volný neutron, který není součástí jádra, podléhá radioaktivnímu rozpadu známému jako beta rozpad. Neutron se rozpadá na proton, elektron, a antineutrino (částici s nulovým nábojem a malou nebo žádnou hmotností). Neutron neexistuje v přírodě ve volném stavu, musí být vyprodukován uměle. Elektricky neutrální neutrony prochází skrz elektrická pole uvnitř atomů a představují tak pronikavou formu záření.*

Rozložení elektrického náboje v deuteronu. Thomas Jefferson Laboratory.



Pentakvark

Kvarky - *základní stavební kameny hadronů, částice podléhající silné interakci.*

Hadrony - *částice složené z kvarků, dělí se na mezony a baryony.*

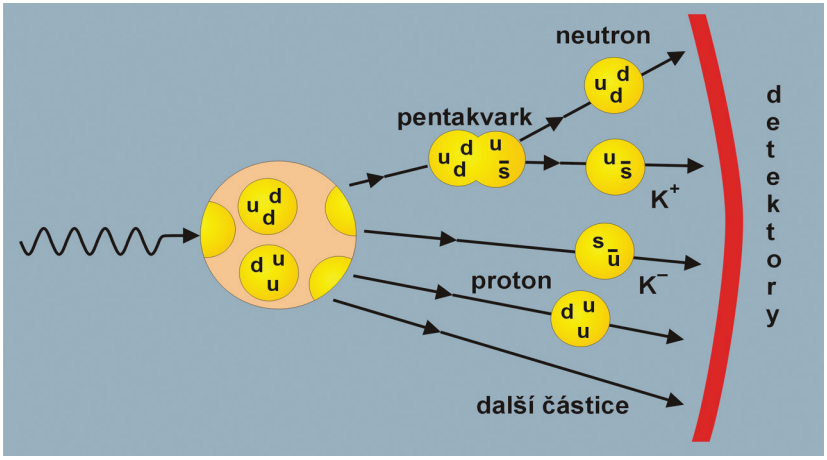
Mezony - *částice složené ze dvou kvarků (kombinace kvark – antikvark).*

Piony - *mezony s nulovým spinem složené z kvarků u a d.*

Baryon - *částice složená ze tří kvarků.*

Kvarky jsou částice, ze kterých se skládají hadrony. Kvarků známe celkem šest: *up, down, strange, charm, beauty, truth* (seřazeno podle rostoucí hmotnosti) a ke každému kvarku existuje jeho antikvark. Současná fyzika rozděluje hadrony, tj. částice skládající se z kvarků, na mezony a baryony. Mezony se skládají z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Baryony se skládají ze tří kvarků, mezi nejznámější patří proton (*uud*) a neutron (*udd*).

Teorie, která popisuje silnou interakci, tj. interakci kvarků, se nazývá kvantová chromodynamika (QCD). Každý kvark se v této teorii vyskytuje ve třech barevných variantách. Nejedná se však o skutečnou barvu, ale o kvantové číslo, kterým se liší jednotlivé varianty téhož kvarku. V přírodě se kvarky mohou skládat jen do nebarevné (bílé) kombinace. Nejjednodušší je složení mezonů, jde o kombinaci kvark-antikvark (barva-antibarva). Další možností je trojice různě barevných kvarků, která dá ve výsledku bílou (například červená, modrá, zelená). Takto jsou tvořeny baryony. Kvantová chromodynamika nezakazuje ani kombinaci pěti kvarků, nicméně dosud byly známy jenom částice ze dvou a tří kvarků. Nedávno ohlásily čtyři skupiny experimentátorů pozorování baryonu s antikvarkem s' (podivnost $S = +1$, náboj $Q = +1$). Antikvark s' má ale záporné baryonové číslo $B = -1/3$. Aby daná částice byla baryonem (baryonové číslo $B = 1$), musela by obsahovat pět kvarků. Předpokládané složení této částice je tedy: *uudds'*, tato částice byla pojmenovaná Θ^+ a její hmotnost byla stanovena na přibližně 1 540 MeV, tedy asi o 60 % více než má proton. To, že se daný baryon neskládá ze tří kvarků, plyne také ze způsobu jeho rozpadu silnou interakcí na neutron a K^+ mezon.



Vznik pentakvarku a jeho následný rozpad. Ohio University.

Roku 1962 vytvořil Tony Skyrm z Birminghamské univerzity teorii efektivního pole, ve které ukázal, že semiklasická teorie pionového pole vede na osamocenou (solitonovou) vlnu, napodobující s vel-

kou věrností nukleon a jiné málo hmotné baryony. O dva roky později, s příchodem QCD, tato teorie upadla do zapomnění až do roku 1983, kdy Edward Witten ukázal, že její úspěchy pro silnou interakci nízkých energií mohou být vysvětleny za pomoci QCD.

V roce 1997 skupina teoretiků z Petrohradského Institutu jaderné fyziky (Dimitrij Diakonov, Viktor Petrov, Maxim Poljakov) upravila Skyrmeho teorii pro symetrii tří vůní nejlehčích kvarků *u*, *d* a *s*. Petrohradští fyzici ukázali, že se kombinace těchto kvarků dají zobrazit do diagramu, který nazvali „antidekuplet" (viz obrázek). Toto jméno pochází ze jména staršího diagramu „dekuplet" fyzika Gell-Manna pro tříkvarkové baryony se spinem 3/2, předpona anti- vyjadřuje skutečnost, že je diagram obrácený, a v jeho vrcholu není nejtěžší, ale nejlehčí částice. Tuto částici ve vrcholu petrohradští fyzici nazvali Θ^+ a určili pro ni řadu vlastností včetně hmotnosti, která jim vyšla 1 530 MeV. Jejich výpočty rovněž ukázaly, že by její životnost měla být dostatečně dlouhá, aby v hmotnostním spektru byla rezonanční čára dostatečně úzká pro identifikaci (toto je přímý důsledek Heisenbergovy relace neurčitosti). Od té chvíle začali experimentátoři částici hledat a jak bylo uvedeno výše, její nalezení ohlásily již čtyři experimentální skupiny.

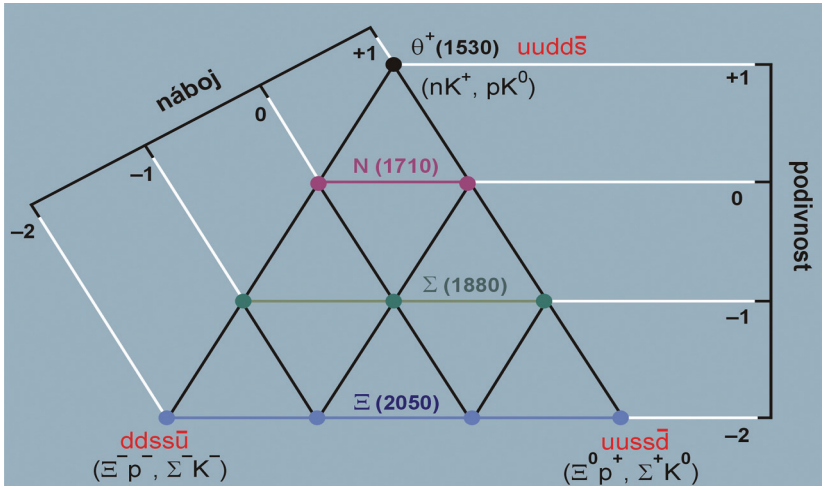
Experimentální pozorování rozpoutala řadu teoretických debat, dalších modelů a analýz dat ze starších experimentů. Jedna skupina z MIT navrhla model, podle kterého by tato částice byla tvořena ze dvou velmi korelovaných dvoukvarků *ud* a z jednoho antikvarku *s*'. I tato teorie, i když se snažila vyhnout některým nedostatkům teorie inspirované Skyrmem, má v sobě nedostatky. V každém případě tyto události vnášejí nové světlo do částicové fyziky, i když není v tuto chvíli jasné, co je správně.

■ *Michal Stránský*

Nukleon - *částice jádra, baryon složený z kvarků u a d. Jde o protony a neutrony.*

QCD - *Quantum Chromodynamics, kvantová chromodynamika, teorie silné interakce. Kvarky interagují prostřednictvím polních částic silné interakce – gluonů.*

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



Antidekuplet: Diagram kombinace kvarku u, d a s ve Skyrmeho modelu.

Ultrachladný molekulární kvantový plyn

Feshbachova rezonance - *rezonance, která nastává, je-li pohybová energie srážejících se atomů rovna energii vázaného stavu (molekuly). Při rezonanci prudce roste účinný průřez srážky atomů v s stavu (stavu s nulovým momentem hybnosti) a roste pravděpodobnost vzniku molekuly.*

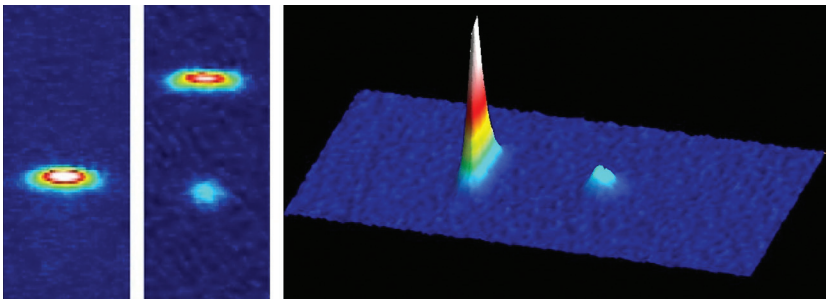
Zeemanův jev - *má-li částice magnetický moment, může vnější magnetické pole měnit polohu jejích energetických stavů a způsobit, že několik energetických hladin splývajících v jedinou (tzv. jev degenerace) se přítomností magnetického pole rozštěpí na samostatné hladiny.*

De Broglieho vlnová délka - *každý objekt mikrosvěta se chová někdy jako částice, někdy jako vlna. Louis de Broglie jako první nalezl vztah $\lambda = h/mv$ pro vlnovou délku příslušející částici o hmotnosti m a rychlosti v.*

Částice látky mají při nízkých teplotách snahu obsazovat energeticky nejnižší kvantové stavy. Existují dva typy částic: fermiony s poločíselným spinem, které mohou obsazovat stavy jen po jedné částici (každá další se musí usadit o energetický stupínek výše) a bosony s celočíselným spinem, které mohou obsadit jeden jediný, základní stav a vytvořit takzvaný Bose Einsteinův kondenzát (BEC). Jde o zvláštní stav hmoty, ve kterém se všechny částice chovají jako jeden jediný celek (tzv. koherentní chování), mají velmi zajímavé makroskopické vlastnosti a jsou popsány jednou jedinou vlnovou funkcí.

Na atomární úrovni byla fáze BEC poprvé vytvořena na Coloradské univerzitě v roce 1995 (atomární rubidium) a vytvořený stav se choval jako jeden jediný obří superatom. Autoři experimentu Eric Cornell, Carl Wieman získali za tuto práci Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2001. Tuto cenu také získal Wolfgang Ketterle z MIT za přípravu BEC z více jak půl milionu atomů sodíku. Na molekulární úrovni byl připraven Bose Einsteinův kondenzát poprvé v roce 2000 na Texaské univerzitě v Austinu (molekulární rubidium). V roce 2002 a 2003 zaznamenala příprava BEC fáze neuvěřitelný rozmach. Fáze BEC byla připravena pro 8 různých prvků a v roce 2003 se podařilo připravit BEC kondenzát tří tisíc molekul cesia (Innsbrucká univerzita, Rakousko) a obří molekuly hélia (Laboratoire Kastler, Francie).

Absorpční obraz atomární fáze BEC (nahoře uprostřed) a molekulární fáze BEC (dole uprostřed). Napravo je 3D obrázek. Vzdálenost mezi molekulami a atomy je 240 μm. Innsbrucká univerzita, 2003.



Ultrachladné atomy

Klíčem k vytváření ultrachladných atomů, které by mohly kondenzovat do BEC fáze, bylo najít účinný způsob ochlazování na teploty kolem absolutní nuly. Průlom nastal po roce 1988, kdy byl objeven princip laserového ochlazování, založený na jednoduchém jevu (Chu, Phillips, Cohen), kdy oblakem atomů prochází laserový paprsek o nepatrně nižší energii než odpovídá záchytu fotonů atomy. Díky Dopplerovu jevu budou fotony zachycovány jen atomy pohybujícími se

proti laserovému svazku (budou vnímat „správnou“ frekvenci). Při záchytu „protifotonů“ dojde samozřejmě ke snížení hybnosti atomů. Tím dochází k ochlazení části atomů, které se srážkami přerozdělí na celý oblak.

Laserové ochlazování je velmi účinné a lze s ním dosáhnout teplot v oblasti mikrokelvinů. Má však své hranice, po jejichž dosažení se používá principu ochlazování odpařováním, při kterém je postupně snižována hladina energetické pasti, ve které jsou drženy atomy. Nejenergičtější atomy unikají z pasti ven a uvnitř zůstávají jen ty chladnější. Tímto způsobem lze dosáhnout teplot jen několik nanokelvinů.

Objev laserového ochlazování umožnil přípravu prvního atomárního Bose-Einsteinova kondenzátu atomů rubidia v roce 1995 (Cornell, Wieman, Ketterle). Šlo o průkopnickou práci, na kterou navázalo mnoho dalších skupin a která vedla k přípravě fáze BEC i pro další prvky.

Ultrachladné molekuly – Feshbachova rezonance

Laserové ochlazování nefunguje dostatečně účinně pro molekuly. Proto je nejprve vytvořen Bose-Einsteinův kondenzát z atomů a teprve poté je možné část atomů spojit na molekuly, které za velmi nízké teploty také vytvoří fázi BEC. Jak ale spojit atomy v BEC stavu na molekuly? Jednou z možností je využití tzv. Feshbachovy rezonance. Pokud je pohybová energie srážejících se atomů rovna energii vázaného stavu (vznikající molekuly), dojde k rezonanci, při které prudce roste účinný průřez srážky atomů v *s* stavu (stav s nulovým momentem hybnosti) a roste pravděpodobnost vzniku molekuly. Atomy se dostanou na vzdálenost bližší než je de Broglieho vlnová délka a alespoň část z nich vytvoří vázaný stav, molekulu. Teplota molekul je velmi nízká a všechny vznikající molekuly obsazují základní stav, vzniká molekulární BEC kondenzát. Pokud mají molekuly magnetický moment, lze energii vznikající molekuly ovlivnit magnetickým polem. Volbou intenzity magnetického pole je potom možné docílit kýžené rezonance.

Poprvé byl touto metodou připraven BEC molekulární kondenzát rubidia v roce 2000 na Texaské universitě (Wynar, Heinzen). Pro Rb 85 nastává Feschbachova rezonance pro magnetické pole 155 G (0,0155 T). Molekulární kondenzát ve větším množství byl poprvé připraven letos v Rakousku na Innsbrucké universitě (Grimm, 2003). Týmu vědců se podařilo připravit molekulární kondenzát asi tří tisíc molekul cesia.

Eric A. Cornell (nahoře) a Carl E. Wieman, kteří jako první objevili atomární BEC kondenzát v roce 1995 na Coloradské univerzitě. Za svůj objev získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2001.

Daniel J. Hensen (nahoře) a Roahn Wynar, kteří jako první připravili v roce 2000 na Texaské univerzitě molekulární kondenzát BEC.

Oddělení atomární a molekulární fáze

Při přípravě molekulárního kondenzátu vznikne oblak, který je směsí atomárního a molekulárního BEC. Pokud jsou magnetické momenty atomů a molekul různé, lze k oddělení obou složek použít gradientní magnetické pole působící proti gravitaci. Tuto technologii zvolili při přípravě molekulárního BEC na Innsbrucké univerzitě. Magnetické pole bylo voleno tak, aby molekulární složka zůstala na místě (levitovala proti gravitaci) a druhá, atomární byla urychlena pryč. V experimentu bylo počáteční množství atomů cesia zhruba 50 000. Feshbachovou rezonancí vzniklo přibližně 3 000 molekul v BEC fázi. Atomární kondenzát byl urychlen magnetickým polem směrem vzhůru (zrychlení 0,61 g, za 3 ms se obláček atomů separoval od obláčku molekul) a oblak molekulárního BEC levitoval v zařízení.

Závěr

Pozorování BEC fáze v ultrachladných zředěných plynech je asi největším objevem v atomové fyzice, molekulové fyzice a optice od objevu laseru. Nabízí se zde možnost zkoumat hmotu v koherentním stavu, kdy jsou párové interakce částic velmi slabé. Existuje mnoho otevřených otázek týkajících se termodynamických a optických vlastností kondenzátu, vzniku kolektivních a vírových excitací, jejich útlumu a nelineárních vazeb mezi excitacemi. Otevírají se možnosti konstrukce atomárního laseru a využití atomární holografie. Nejvíce fascinující je ovšem samotný fakt vytvoření koherentního stavu hmoty, ve kterém se obrovské množství částic chová jako jeden jediný celek, jako jeden jediný superatom či supermolekula.

■ *Petr Kulhánek*

Fermiho atomární plyn

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, v přírodě rozeznáváme dva druhy částic, které se svým chováním zásadně odlišují. Jsou to fermiony a bosony. Navenek se liší zejména statistickým chováním, fermiony se chovají nesnášenlivě, dva nemohou být ve stejném kvantovém stavu. Naopak bosony mohou obsazovat stejné kvantové stavy a při nízkých teplotách se hromadí v základním stavu.

Kvantové chování atomárního plynu se objevuje přibližně při Fermiho teplotě $T_F = E_F / k_B$. Tato teplota odpovídá stavu, kdy de Broglieho vlnová délka λ je srovnatelná s rozměry atomů. Při $T_F / 2$ je λ rovna meziatomové rozteči d. Řádově tato teplota bývá v mikrokelvinech.

Současný stav výzkumu řídkých degenerovaných atomárních plynů

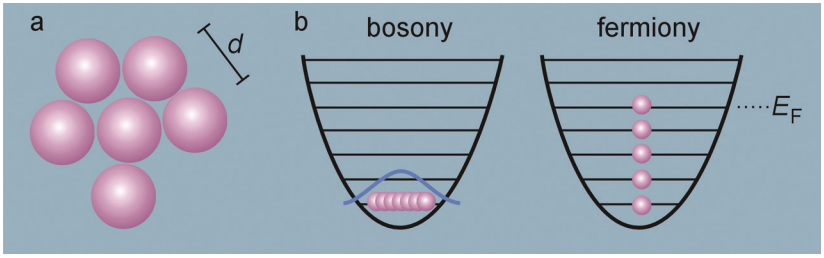
První bosonové atomární plyny při mikrokelvinových teplotách byly připravovány od roku 1995 a zdálo se, že zanedlouho budou připraveny Fermiho plyny. Ochlazování Fermiho plynů ale naráží na jejich zvláštní srážkové vlastnosti. Obecně srážky hrají rozhodující roli ve fyzice kvantových plynů. Pružné srážky udržují při ochlazování plyny v tepelné rovnováze. Tyto srážky ovlivní i mnoho vlastností jak Boseho-Einsteinova kondenzátu, tak Fermiho plynu. Rozdíly mezi srážkovým chováním bosonových a fermionových atomů vyvstávají již při teplotách mnohem vyšších než těch, které jsou požadovány, aby se plyn choval kvantově mechanicky jako celek. Zde ale vyvstává zásadní problém: atomy v ultrachladných plynech se ochlazují pouze tehdy, pokud se sráží. Pauliho vylučovací princip zakazuje srážky částic ve stejném kvantovém stavu a tato překážka tedy znemožňuje efektivní ochlazování fermionových atomárních plynů.

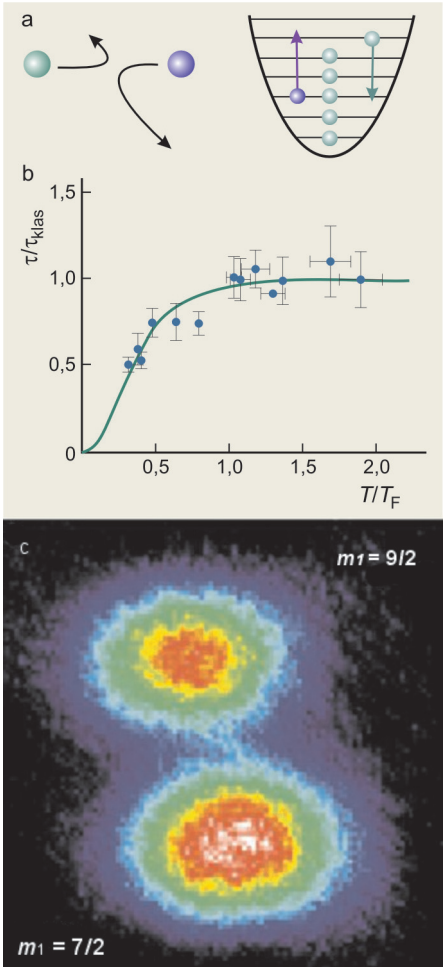
K vytvoření Fermiho plynu byla upravena technika vyvinutá již dříve k tvorbě Boseho-Einsteinova kondenzátu. Do magnetooptické pasti bylo nejprve zachyceno okolo 500 milionů atomů draslíku a ochlazeno na teplotu přibližně 150 μK. Jako druhý krok byly v magnetické pasti promíchány atomy s opačnými spinovými stavy, což umožnilo další ochlazování. Nicméně použití

Bosony - *jsou částice které mají celočíselný spin. Jejich chování je určeno Boseho-Einsteinovou statistikou. Při velmi nízké teplotě se bosonové částice mohou nahromadit do stejného stavu, při absolutní nule do energeticky nejnižšího (základního) stavu. Vlnová funkce bosonů je symetric-ká, při záměně dvou identických částic nemění znaménko.*

Fermiony - *jsou částice s poločíselným spinem. Jejich chování určuje Fermiho-Diracova statistika. Pauliho vylučovací princip vyžaduje, aby ve stejném stavu nebyly dva identické fermiony. Při teplotě 0 K fermiony obsazují energetické hladiny od nejnižší tak, aby v žádném stavu nebyl víc než jeden. Na jedné energetické hladině se může vyskytovat více částic, pokud se liší dalším kvantovým číslem, například magnetickým. Poslední obsazené energetické hladině se říká Fermiho energie E_F. Vlnová funkce fermionů je antisymetrická, při záměně dvou identických částic změní znaménko.*

Základní stav - *kvantový stav s nejnižší možnou hodnotou energie.*





Pauliho blokování:

a) *zelená částice nemůže odevzdat energii protože pro ni neexistuje nižší volný stav*

b) *doba relaxace kolektivních excitací se zkracuje díky nemožnosti srážek blokováním*

c) *magneticky oddělené částice K 40.*

magnetooptické pasti pro udržení atomů s odlišnými spinovými stavy je poněkud ošidné. Magnetooptické pasti vyžadují, aby částice měly spin v určitém směru, částice s opačně orientovaným spinem nemohou být pastí zachyceny. Problém se podařilo vyřešit dvěma způsoby: První je založen na volbě směsi atomů se dvěmi různými projekcemi spinu například draslíku K-40 s $m = 7/2$ a $m = 9/2$. Druhá varianta je technologicky výhodnější, jde o ochlazování směsi fermionů a bosonů jako směsi dvou izotopů jednoho prvku, například Li-6 (fermion) a Li-7 (boson). Tato varianta je výhodnější proto, že k ochlazování Fermiho plynu dochází „obyčejným" tepelným kontaktem s bosonovým plynem. Užitím této technologie je skutečně možné dosáhnout ochlazení Fermiho plynu do kvantově degenerovaného stavu pod Fermiho teplotou.

Výsledky výzkumu

Experimenty byly prováděny především s ochlazováním směsi K-40. Když je plyn ochlazen pod Fermiho teplotu, je průměrná energie a tím i hybnost částic větší, než se očekává z klasické fyziky. Je to známka kvantového chování. Pouze jeden fermion smí zaujmout každý kvantový stav. Teprve po zaplnění stavu s nejnižší energií se zaplňují stavy s vyššími a vyššími.

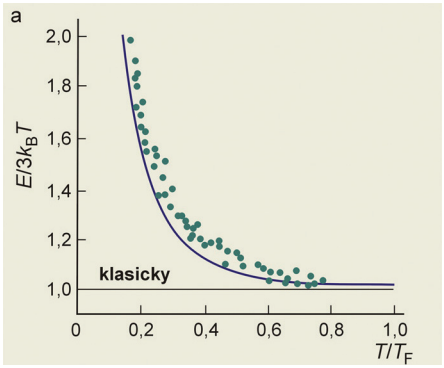
Na obrázku na následující straně (Randy Hulet, Rice University) jsou znázorněny výsledky podobného experimentu s lithiem. Patrné jsou rozdíly mezi Fermiho plynem Li-6 a bosonovým Li-7. V kvantovém režimu roste střední energie na jeden fermion nad hodnotu očekávanou z klasické fyziky. Fermionové atomy mají víc energie kinetické, což znamená, že Fermiho plyn se rozprostírá ve větším objemu než Boseho plyn. Tento kvantový jev, nazvaný Fermiho tlak, je pozorovatelný v astrofyzice a je odpovědný za stabilitu bílých trpaslíků a neutronových hvězd. Gradient Fermiho tlaku působí proti gravitační síle a drží hvězdu v konečném nenulovém objemu.

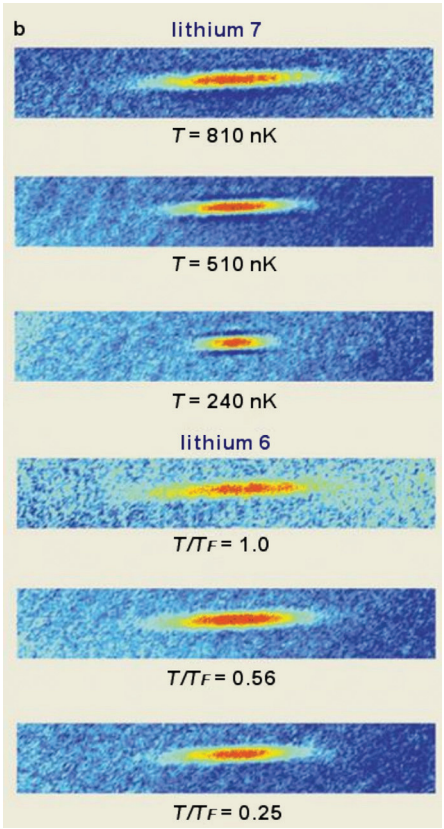
Při těchto experimentech bylo možné přímo pozorovat jev, který se nazývá „Pauliho blokování". Dvě Fermiho částice si mohou vyměnit energii jen tehdy, když cílové stavy jsou volné. Při nízkých teplotách je ale většina nízkoenergetických stavů obsazena a energetické výměny jsou výrazně potlačeny. To se projeví výrazně na době relaxace jevu zvaného kolektivní excitace. Při nízkých teplotách se u fermionů doba relaxace výrazně zkracuje.

Epilog

Výzkum těchto systémů je stále ještě v počátcích, ale již dnes můžeme říci, že Fermiho plyny nám mohou nabídnout ohromné možnosti. Například bosonové plyny vykazují supratekuté chování. To je známé již z pokusů se zkondenzovaným heliem He-4. V tomto případě se tak ale děje již při podstatně nižších koncentracích. Podobně u Fermiho plynů se očekává podobné chování známé u kondenzátu He-3 a to přechod do supratekutého stavu tvorbou analogie Cooperových párů mezi částicemi plynu. Stejně tak můžeme očekávat i nové technologické možnosti využívající supratekutost, která je dalším důsledkem těchto fázových přechodů. Zkoumání nízkoteplotních kvantových systémů se jeví jako důležité také pro kvantové počítače, výrobu nových typů laserů, atd. Je jasné, že výzkum Fermiho plynů nás ještě mnohým překvapí.

■ *Michal Stránský*





Narušení C symetrie

V roce 2003 bylo objeveno narušení poslední ze základních symetrií. Po objevu narušení levopravé symetrie v roce 1956 a narušení časové symetrie v roce 1999, bylo v roce 2003 objeveno dlouho očekávané narušení symetrie částice-antičástice.

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

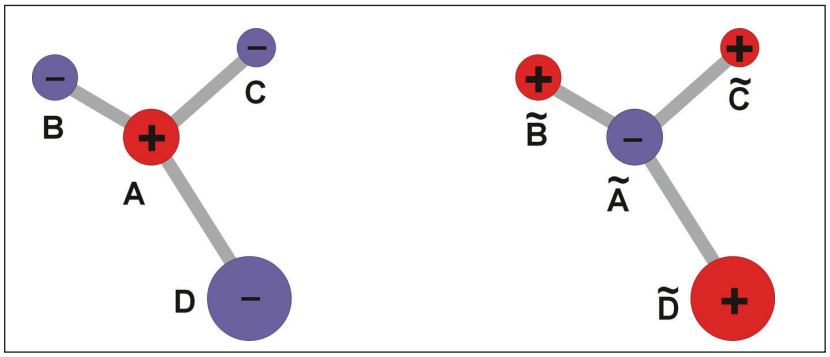
P invariance - *Symetrie vzhledem k záměně levého a pravého směru (P = Parity). O symetrii hovoříme, pokud by se přístroj vytvořený podle zrcadlového obrazu choval shodně s původním přístrojem.*

CPT symetrie

Dlouho si lidé neochvějně mysleli, že pokud v přírodě existuje nějaký proces, vždy bude existovat také proces zrcadlově převrácený. Tato myšlenka byla povýšena na zákon. Velké překvapení přinesl rok 1956, kdy byly pozorovány slabé rozpady K mezonů, které tuto symetrii nezachovávaly. Protože šlo o zcela zásadní zjištění, byl navržen Leem a Yangem experiment k ověření narušení levopravé symetrie. Experiment realizovala C. S. Wu z Kolumbijské university a definitivně tak potvrdila v roce 1957 narušení P symetrie. Později se ukázalo, že v některých případech je narušení symetrie dokonce stoprocentní: všechna neutrina jsou jen levotočivá a neexistuje pravotočivá varianta neutrina.

Na krátkou dobu se zdálo, že by mohla existovat CP symetrie – svět, ve kterém by byly zaměněny částice za antičástice a levý směr za pravý, by se choval stejně jako původní. Tomu nasvědčoval fakt, že antineutrina existují na rozdíl od neutrin jen v pravotočivé variantě. V roce 1964 bylo však experimentálně zjištěno i narušení CP symetrie. Roku 1999 bylo v komplexu laboratoří FERMILAB v USA objeveno narušení T symetrie. Poslední ze základních symetrií, jejíž narušení nebylo dosud experimentálně prokázáno, zůstala C invariance.

C symetrie.



Experimenty

Proton a neutron jsou částice, které se skládají ze tří kvarků (*uud* a *ddu*). Při sloučení dvou jader deuteria za vzniku jádra hélia se za normálních okolností uvolní energie v podobě fotonů, případně při vysoce energetické srážce dvou deuteronů v urychlovači se objeví dvojice nabitých pionů π^+ a π^-. Pokud dochází k narušení C symetrie, předpovídá kvan-

tová teorie existenci velmi vzácného kanálu reakce, při kterém se objeví neutrální pion, který se následně rozpadá na dva charakteristické fotony.

Dne 5. 4. 2003 oznámil tým Edwarda Stephensona z Indiana University (Bloomington, USA) na kongresu Americké společnosti pro fyziku, že se jim podařilo jako vůbec prvním zpozorovat tuto vzácnou reakci, při které dochází k narušení C symetrie.

Pokus Stephensonova týmu spočíval v nasměrování svazku jader deuteronů (složených z protonu a neutronu) na terčík složený z deuteronového plynu. Po fúzi dvou deuteronových jader vzniklo jedno jádro hélia a krátce žijící elektricky neutrální pion měnící se na pár fotonů, který byl detekován dostatečně citlivým detektorem.

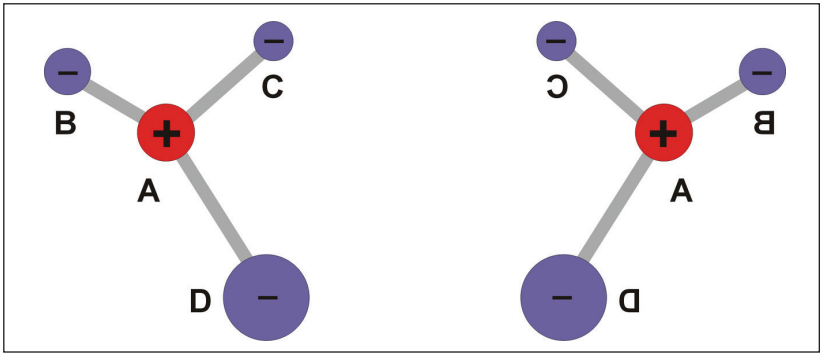
Důsledkem narušení C symetrie je fakt, že neutron je nepatrně těžší než proton, a zatímco neutron je nestabilní (podléhá beta rozpadu), proton je stabilní (v raném vesmíru zůstal a stal se základním stavebním kamenem hmoty, která tvoří hvězdy, mlhoviny planety, člověka...).

Kdyby byla C symetrie narušena opačným směrem, byl by proton nepatrně těžší než neutron, neutron by byl stabilní, proton by byl nestabilní a nevznikl by vůbec vesmír tak, jak ho známe. Poznamenejme, že podle SUSY teorií je proton pravděpodobně opravdu nestabilní, ale poločas jeho rozpadu je větší než 10^{33} let, což nemohlo ovlivnit dosavadní stavbu vesmíru. Může to však mít hlubokoké důsledky ve velmi vzdálené budoucnosti vesmíru. Proton by se měl rozpadat na leptony (elektrony a neutrina) a za nějakých 10^{100} let by zde mohlo zůstat jen záření a zředěný leptonový plyn. Pak už ale nebude nikdo, kdo by tento článek četl.

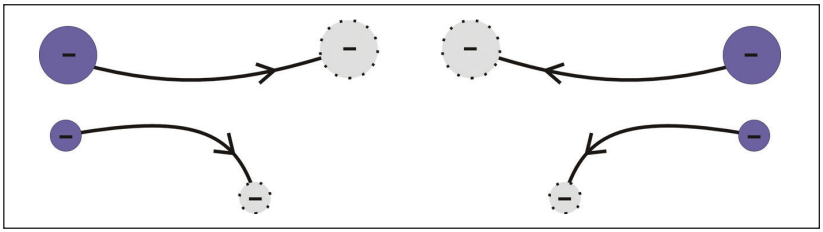
■ *Pavel Břichnáč*

T invariance - *Symetrie vzhledem k obrácení chodu času (T = Time). O symetrii hovoříme, pokud děj půjde „pustit pozpátku", podobně jako lze pustit pozpátku film. V praxi to znamená obrácení směrů rychlostí všech částic. Dlouho se zdálo, že fyzikální zákony na částicové úrovni splují T syme-trii. (Pozor nejde ale o ma-kroskopické, statistické chování, zde jsou děje vždy nevratné, rozbitý talíř se sám nikdy nespojí).*

P symetrie.



T symetrie.



Antiprotonový zpomalovač

AA - *Antiproton Accumulator, Antiprotonový zásobník.*

LEAR - *Low Energy Accelerator Ring, Nízkoenergetický prstenec antiprotonů.*

PS - *Proton Synchrotron, Protonový synchrotron.*

AC - *Antiproton Collector, Antiprotonový sběrač.*

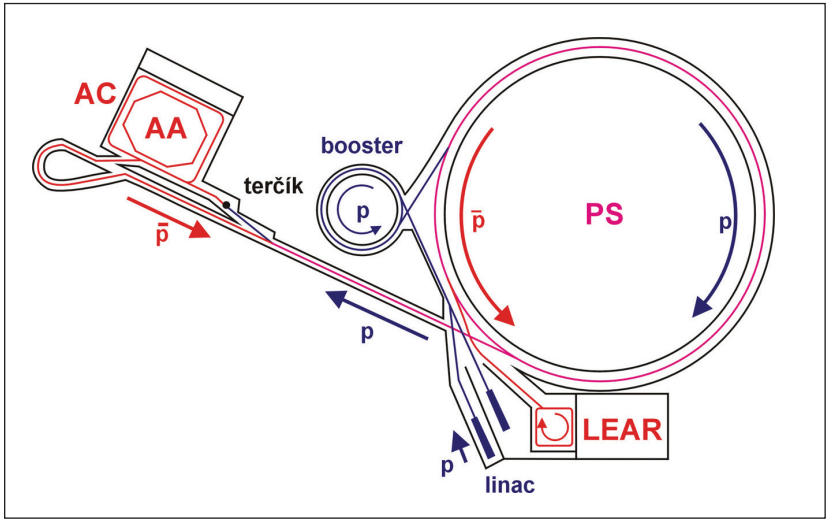
AD - *Antiproton Decelerator, Antiprotonový zpomalovač.*

Abychom mohli provádět některé experimenty, potřebujeme získat velké množství pomalých antiprotonů. Tyto částice antihmoty dnes získáváme v komplexu nazvaném Antiprotonový zpomalovač, který je vybudován v laboratořích CERN.

Historie výstavby

Koncem 70. let byl v laboratořích CERN postaven zdroj antiprotonů nazvaný Antiprotonový akumulátor (AA – Antiptroton Accumulator). Jeho úkolem bylo produkovat a nahromadit vysokoenergetické antiprotony. Z důvodu potřeby pomalejších antiprotonů se v laboratořích CERN rozhodli vybudovat nový stroj – Nízkoenergetický antiprotonový prstenec (LEAR – Low Energy Antiproton Ring). Antiprotony nahromaděné v akumulátoru AA byly zpožděny v Protonovém synchrotonu (PS – Proton Synchrotron) a pak vstříknuty do zařízení LEAR, kde byla dále snížena rychlost. V roce 1986 byl postaven druhý prstenec AC (Antiproton Collector), který byl vybudován kolem existujícího akumulátoru AA za účelem zvýšit desetinásobně produkci antiprotonů. Z kolektoru AC je nyní budován Antiprotonový zpomalovač (AD – Antiproton Decelerator), který vykonává úkoly všech zařízení AC, AA, PS a LEAR, to jest produkovat, sbírat, zpomalit a posléze využít antiprotony k experimentům.

Antiprotonový kolektor (AC) a antiptotonový akumulátor (AA). Fotoarchiv CERN.



Antiprotonový zpomalovač

Jedná se o prstenec s přibližně kruhovým obvodem délky 188 metrů. Skládá se z vakuové trubice obklopené dlouhou sekvencí vývěv, magnetů, vysokofrekvenčních dutin, vysokonapěťovými přístroji a elektronickými okruhy. Vakuum musí být optimální, proto jsou vývěvy umístěny kolem trubice. Magnety jsou také umístěny všude kolem. Jsou zde dva typy magnetů. Dipóly mění směr pohybu a zajišťují kruhovou

dráhu částic. Nazývají se ohýbací magnety. Kvadrupóly jsou užívané jako čočka. Tyto zaostřovací magnety zajišťují, aby rozměr paprsku byl menší než velikost vakuové trubice. Magnetická pole mohou měnit směr a velikost paprsku, ale ne jeho energii. K tomu potřebujeme elektrické pole, které poskytuje vysokofrekvenční dutina. Dalšími přístroji jsou dva chladicí systémy, jeden injekční a jeden vypouštěcí systém.

Jak vše funguje

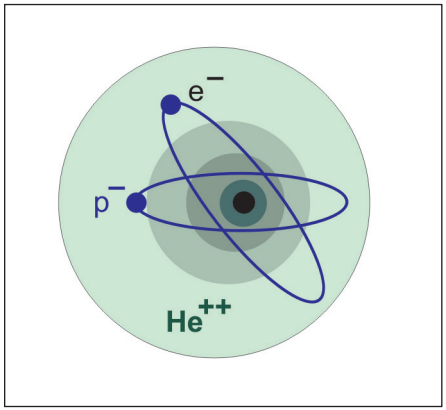
Nejdříve musíme antičástice vytvořit. K tomu potřebujeme uvolnit velmi velké množství energie do malého objemu látky. Energie je získána z protonů, které byly předtím urychleny v synchrotronu PS a následně nastřeleny do kovového terčíku. Používá se měď nebo iridium, hlavně proto, že se snadno chladí. Po nastřelení dojde k velkému ohřevu terčíku, při kterém se částice hmoty a antihmoty samovolně vytvoří. Asi na jednu srážku z milionu je vytvořen jeden proton-antiprotonový pár. Ve skutečnosti asi 10 trilionů protonů zasáhne cíl jednou za minutu a tak se vytvoří 10 milionů antiprotonů.

Protože nově vytvořené antiprotony se chovají dosti chaoticky (jejich rychlost je rovna téměř rychlosti světla, ale jejich energie je případ od případu různá – toto se nazývá energetický rozptyl, a nadto letí náhodně křížem krážem), musíme zajistit, aby zůstaly na správné dráze uprostřed prstence a zároveň je zpomalit. Ohýbání a zaostřování se provádí pomocí magnetů. Zpomalení zajišťují silná elektrická pole. Bohužel, snížením rychlosti se zvyšuje jejich příčné kmitání. Pokud neuděláme nic pro to, aby se antiprotony vrátily zpět do středu prstence, jsou ztracené při následné kolizi s vakuovou trubicí. Pro snížení chaotického pohybu se používá dvou metod: stochastické a elektronové chlazení. Stochastické (neboli náhodné) chlazení pracuje nejlépe při velkých rychlostech (kolem rychlosti světla), a elektronové chlazení

ASACUSA - *Atomic Spectroscopy And Collisions Using Antiprotons, experiment orientovaný atomární spektroskopii a srážky za přítomnosti antiprotonů.*

ATHENA - *AnTiHydrogEN Apparatus, experiment, který bude sloužit výrobě většího množství antivodíku.*

ATRAP - *AD TRAP, experiment sloužící k zachycení a studiu chladných atomů antivodíku.*



Jádro He s jedním elektronem a jedním anti-protonem v obalu. Eperiment ASACUSA.

pracuje lépe při menších rychlostech, cca 10÷30 % *c*. Nakonec, když rychlost antičástic je asi 10 % rychlosti světla, se antiprotony zformují do skupin nazývaných chomáče. Chomáče jsou připraveny k opuštění zařízení. Jeden „brzdící cyklus" skončil – to vše v jedné minutě.

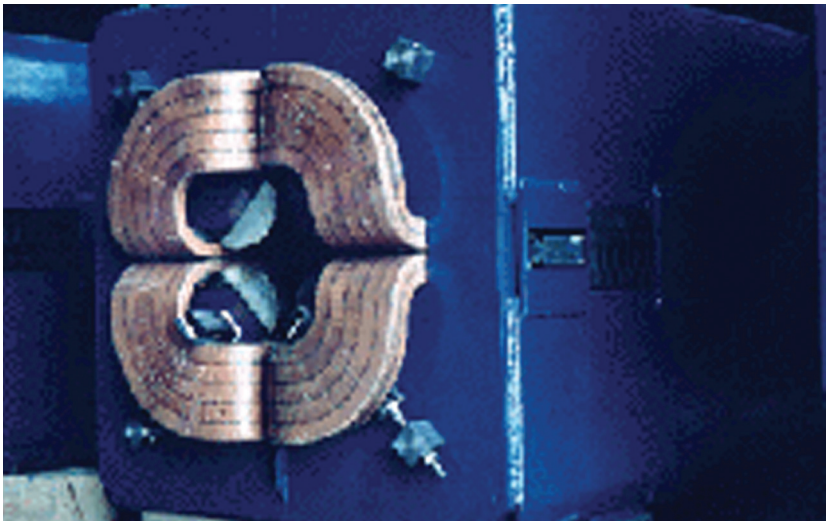
Pak už jen stačí chomáč antiprotonů ze zařízení přivést k experimentům. To zajišťuje silný „pulzní" magnet, který v čase kratším než miliontina sekundy odkloní antiprotony do paprskových trubic výtažní linky. Tam přivádějí další dipólové a kvadrupólové magnety paprsek do jednoho ze tří experimentů.

Experimenty

V antiprotonové zpomalovací experimentální hale jsou instalované tři experimenty, ve kterých se využívají chomáče vzniklých antiprotonů:
ASACUSA – spektroskopie a srážky využívající pomalé antiprotony.
ATHENA – výroba antivodíku a přesné experimenty.
ATRAP – využití chladného antivodíku pro laserovou spektroskopii.

Cílem experimentů ATHENA a ATRAP je vyrábět antivodík kombinováním antiprotonů vytvořených ve zpomalovači AD s pozitrony emitovanými radioaktivním zdrojem. Připravené atomy antivodíku jsou udržovány v magnetických pastích (stovky tisíc na jeden cyklus zpomalovače AD). První atomy antivodíku byly vytvořeny v laboratořích CERN (1995) a později v laboratoři FERMILAB (1997). V obou případech byly vytvořeny za letu, to znamená, že se pohybovaly téměř rychlostí světla, to jest příliš rychle na provedení precizních měření vlastností antivodíku. Nynější idea je produkovat pomalé antivodíkové atomy a skladovat je do „pastí", dovolujících extrémně přesné srovnání vlastností vodíku a antivodíku.

Kvadrupólový magnet. Fotoarchiv CERN.



Experiment ASACUSA bude na druhé straně slučovat „exotické" atomy, ve kterých je elektron v atomárním obalu (například hélia) nahrazený antiprotonem (který má záporný náboj stejně jako elektron).

Precizní laserová spektroskopie těchto exotických atomů očekává, že odhalí mnoho informací o chování atomárních systémů.

■ *Karel Řezáč*

Výroba antivodíku ve velkém

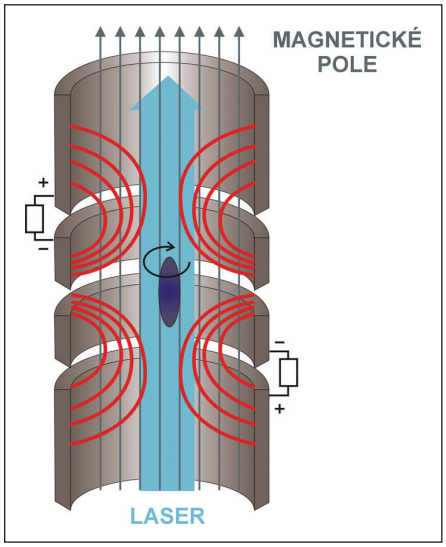
Antivodík - *atomy, které mají v jádře antiproton a v obalu pozitron.*

ATHENA - *experiment, který je připravovaný v komplexu laboratoří CERN, zkratka z „AnTiHydrogEN Apparatus". Experiment bude sloužit k výrobě většího množství antivodíku.*

AD - *Antiproton Decelerator, antiprotonový zpomalovač*

CERN - *komplex evropských laboratoří pro jaderný výzkum založený v roce 1954. Zkratka CERN znamená „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire".*

Penningova past pro antiprotony.



V komplexu laboratoří CERN se připravuje experiment ATHENA, ve kterém by se mělo vytvořit větší množství antivodíku (až 50 000 atomů v jednom cyklu) a zkoumat jeho vlastnosti. Zjišťovat se budou například rozdíly ve frekvenci při přechodu elektronu (pozitronu) ze základního stavu do prvního excitačního. Tuto frekvenci jsme schopni měřit s mimořádnou přesností pomocí laserové spektroskopie.

První problém, který nastává, je výroba a udržení většího množství antivodíku. K výrobě antivodíku se nejprve vyprodukuje větší množství pomalých antiprotonů pomocí antiprotonového zpomalovače. Vytvořené protony se zachytí v modifikaci známé Penningovy pasti. Jedná se o elektromagnetickou past s osovým magnetickým polem (šedé čáry) a nehomogenním elektrickým polem (červené čáry). V této konfiguraci je možné zachytit rotující chomáč antiprotonů. Rotace je způsobena azimutálním driftem antiprotonů.

Zachycené antiprotony jsou zpomaleny tak, že jejich teplota odpovídá 15 K. Zařízení vyprodukuje kolem 20 milionů antiprotonů v krátkých pulsech ve stosekundových intervalech a přibližně 3 000 z nich je po zachycení a ochlazení možné použít pro výrobu antivodíku. Potřebné pozitrony do atomárních obalů se získávají rozpadem radioaktivního izotopu Na 22. K výrobě antivodíku bude použito zhruba 70 milionů pozitronů. Do nich nastřelíme 10 000 antiprotonů. Antivodíkové atomy vznikají jen tehdy, když přebytek energie a momentu hybnosti odnese třetí částice (tříčásticová rekombinace) nebo foton (zářivá rekombinace). Celý pokus se odehrává při teplotě kolem 15 K.

Tým experimentu ATHENA odhaduje, že se mu již během jednoho experimentu podařilo vyrobit kolem 50 000 atomů antivodíku, ale nejsou si jisti, v jakém stavu atomy antivodíku jsou. To je velice důležité pro další experimenty, protože antivodík lze zachytit jenom v základním stavu (tzv. *s* stav, pozitron na nejnižší energetické hladině). V dalším kroku chce tým Mike Charltona z university Wales Swansea prozkoumat detailně reakci antiprotonu s pozitronem. Zabudování laserové spektroskopie se předpokládá v průběhu několika let. Zkoumání vlastností antivodíku může přispět zásadním způsobem k našim znalostem hmoty a antihmoty a ověřit, zda v přírodě platí či neplatí CPT symetrie.

■ *Jan Pašek*

ALICE

Pro potřeby urychlovače Large Hadron Collider, který se buduje v laboratořích CERN, se zároveň vyvíjí několik obřích detektorů. Jeden z nich dostal název ALICE. Jedná se o velmi složité zařízení, které se skládá z několika detektorů pracujících na různých fyzikálních principech. Přesněji řečeno, v rámci projektu ALICE se staví detektor těžkých iontů pro odhalení unikátních fyzikálních vlastností interakcí atomových jader při energiích, které bude moci Large Hadron Collider částicím dodat. Cílem projektu je studovat fyziku silně interagující hmoty při extrémních hustotách energie, kdy se předpokládá vytváření nového skupenství hmoty – kvark-gluonového plazmatu.

Kvark-gluonové plazma

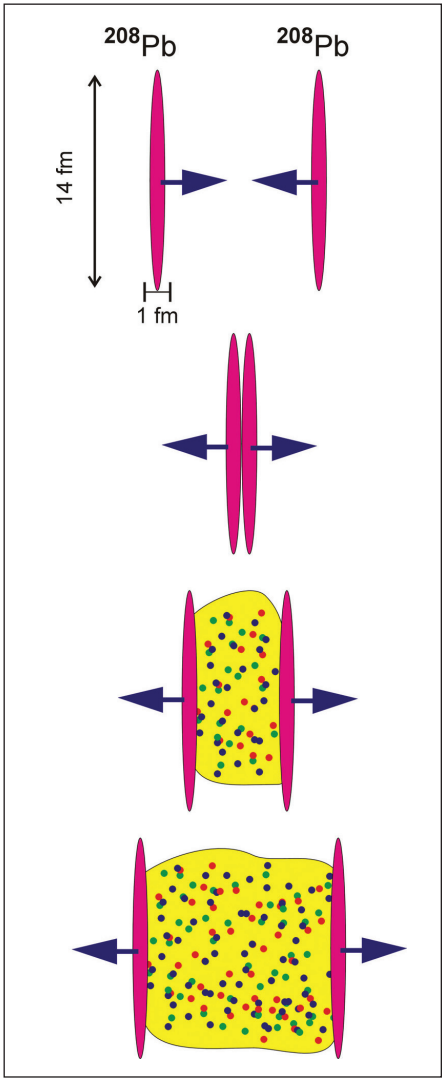
Fyzikové v posledních desetiletích objevili, že hadrony, ze kterých jsou například složena atomová jádra, nejsou dále nedělitelné. Částice, které tvoří tyto hadrony, nazvali kvarky. Tyto kvarky drží v hadronech pohromadě díky silné interakci, kterou zprostředkovávají gluony. Proton je tedy jakási směs kvarků a gluonů.

Za normálních okolností je tato směs velmi svázaný systém. Situace se ale změní, zahřejeme-li hadron na velmi vysokou teplotu a zajistíme-li, aby průměrné vzdálenosti mezi kvarky byly menší než 10^{-15} m. Toho můžeme dosáhnout tak, že necháme ve vysoké rychlosti srazit dvě velmi těžká jadra, například olova. Kvarky a gluony se v tom případě začnou na krátkou dobu chovat jako volné částice. Tomuto stavu říkáme kvark-gluonové plazma (QGP).

Krátce po velkém třesku byl vesmír tak malý, že hmota nemohla existovat v takovém stavu jako dnes, uzavřená v protonech a neutronech. Byla ve stavu kvark-gluonového plazmatu. Porozuměním fyzice tohoto nového skupenství odhalíme i počátky našeho vesmíru, které skrývají mnoho otázek, jejichž odpovědi ovlivnily celý jeho pozdější vývoj.

Sledování-kvark gluonového plazmatu

Nikdo si není zcela jist, co se přesně odehrává při přechodu z normálního stavu hmoty do stavu kvark-gluonového plazmatu. Předpokládají se různé fyzikální děje, jejichž projevy se usilovně po léta v CERNu hledaly. Výsledky byly slibné, nicméně teploty dosahované při dopadu iontu olova na olověný terčík stačily právě na uvolnění vazeb uvnitř



Vznik kvark-gluonového plazmatu.

ALICE - *A Large Ion Collider Experiment, experiment, jehož součástí je vybudování specializovaného detektoru těžkých iontů pro odhalení unikátních fyzikálních vlastností interakcí jádro-jádro při energiích, které dokáže iontům dodat urychlovač Large Hadron Collider.*

Large Hadron Collider - *urychlovač umístěný v CERNu, který umožní sledovat srážky těžkých iontů (například Pb) při energiích nad 1 200 TeV. Zprovozněn má být v roce 2007.*

Kvark-gluonové plazma - *další skupenství hmoty, kdy se kvarky a gluony začnou chovat jako volné částice. Tohoto stavu se dosahuje velmi vysokou teplotou, při které jsou průměrné vzdálenosti mezi kvarky menší než 10^{-15} m. Poprvé bylo pozorováno v 90. létech minulého století, jeho objev byl oznámen 10. února 2000.*

Prahová teplota - *teplota nutná k fázovému přechodu látky do stavu kvark-gluonového plazmatu. Hodnota prahové teploty je neuvěřitelných 10^{12} K, stotisíckrát vyšší teplota než je v nitru Slunce.*

nukleonů. Pokusy se tedy přesunuly do USA a v CERNu se začalo přestavovat. Výsledkem přestavby bude Large Hadron Collider, ve kterém se budou ionty olova srážet s energiemi 300 krát vyššími, než při současných experimentech.

Uvolnění silných vazeb je prvním krokem pro vytvoření kvark-gluonového plazmatu. Směs kvarků a gluonů musí navíc ještě existovat tak dlouho, aby se teplota všech kvarků a gluonů vyrovnala. Proto je potřeba provést srážku s energií vyšší než odpovídá prahové teplotě.

ALICE je soustava detektorů

Samotná ALICE je soustava detektorů, ktera se bude pokoušet zachytit projevy vzniku a existence kvark-gluonového plazmatu po srážce iontů olova. Při srážce vznikne během 10^{-23} až 10^{-8} s až 50 000 částic, z nichž zhruba 2 000 bude nabitých. Celkem se z této soustavy detektorů získá při jediné srážce obdivuhodné množství dat – 12 MB.

Je možno detekovat nabité a neutrální částice, které se na nabité rozpadají (π, Λ, κ, ϕ). Další velmi důležitá částice je J/Ψ, která je tvořena z kvarku c a antikvarku c'. Tyto částice by měly při vzniku kvark-gluonového plazmatu vznikat podstatně méně než při běžných srážkách, kdy se kvark gluonové plazma nevytvoří. Samořejmě vznikají také další těžké částice. Předpokládá se, že se podaří udržet kvark-gluonové plazma po delší dobu, než je potřeba pro rozpad těchto částic.

Jednotlivé systémy:

Inner Tracking System – šest válcovitých vrstev silikonových desek v okolí místa srážky. Detekují se částice s c nebo s kvarky. Měří se pozice částic na zlomky milimetrů.

Time Projection Chamber – nádoba s plynem a elektrickým polem za ITS. Po nárazu elektricky nabité částice do elektronu v atomu plynu začne uvolněný elektron driftovat v elektrickém poli. Měří se množství oddriftovaných elektronů, z čehož se dá odvodit trajektorie původní nabité částice.

Photon Spectrometer – zařízení z olovo-wolframových krystalů pro měření teploty srážky pomocí detekce fotonů z ní uvolněných. Dopadu vysokoenergetických fotonů způsobí žhnutí a jiskření, které se měří.

Particle Identification Detector – detektor hmotností vyzářených částic. Částice s nižší energií mohou být detekovány podle ztráty energie, s vyšší podle času, za který částice doletí od místa srážky k detektoru,

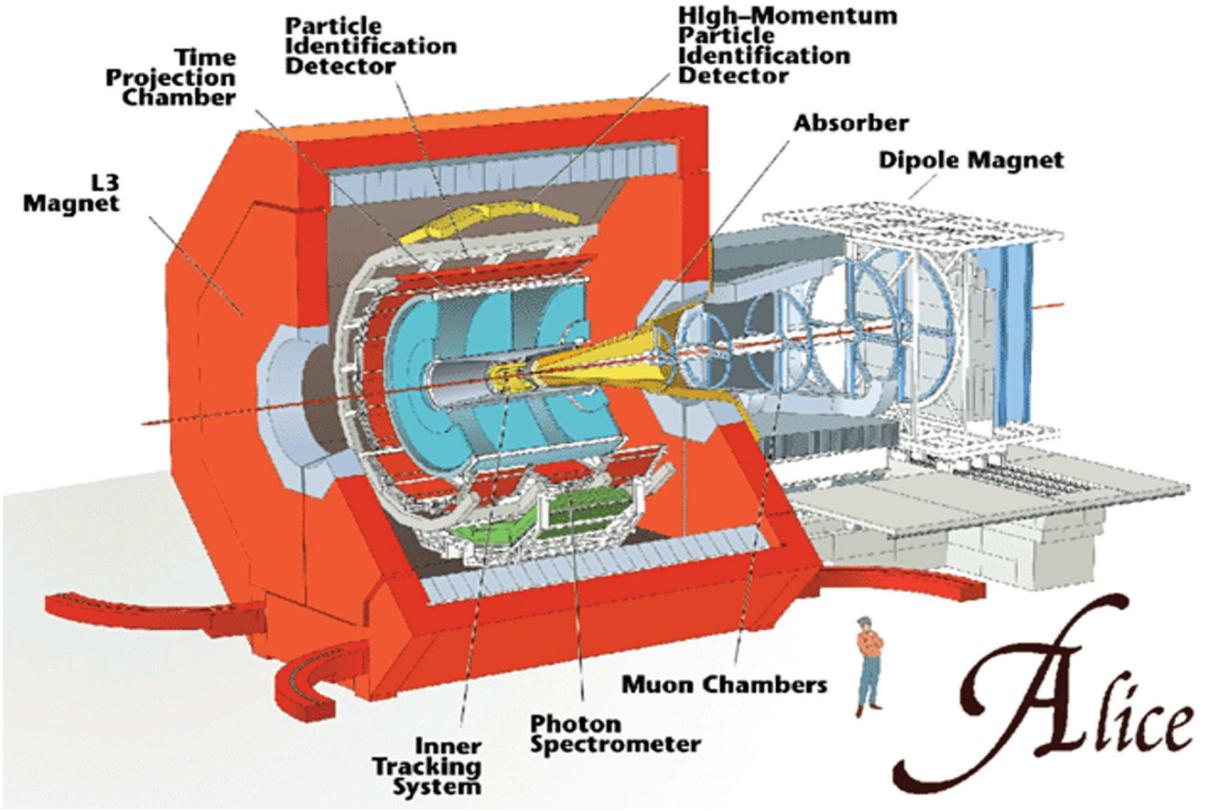
který je 3,5 m daleko. Senzor příletu částic se jmenuje Parrallel Plate Counters. Je to 160 000 čítačů umístěných na 150 m^2. S použitím údajů od dalších detektorů je možno nalézt dráhu každé částice, která dopadne na senzor.

High-Momentum Particle Identification Detector – detekce hmotností částic s velmi vysokou energií pracující na principu zachytávání tzv. Čerenkovových fotonů vyzářených částicemi v dielektriku.

Muon Arm – tato část ALICE dokáže měřit J/Ψ částice, které se rozpadají na pár mionů, takže dva miony přicházející ze stejného místa ukazují na možný rozpad částice J/Ψ.

■ *Jiří Hofman*

CERN - *Counseil Européene pour la Recherche Nucléaire, mezinárodní vědecká organizace založená k výzkumu fyziky vysokých energií v roce 1954. CERN má nejsilnější a nejvšestrannější zařízení své-ho druhu na světě. Místo pokrývá víc než 100 hektarů ve Švýcarsku a od roku 1965 více než 450 hektarů ve Francii. První ex-periment se uskutečnil v roce 1957 a umožnil s pomocí 600 MV synchrocyklotronu sledovat (asi 22 let po předpovědi) rozpad mezonu na elektron a neutrina.*



Honba za Higgsovými částicemi

Higgsovy částice - *částice, které se objevují ve sjednocené teorii elektromagnetické a slabé interakce (tzv. elektroslabé interakce). Částice zajišťují nenulovou hmotnost intermediálních (polních) částic slabé interakce a způsobují narušení symetrie elektroslabé interakce při energiích nižších než 100 GeV. Částice jsou pojmenovány podle skotského fyzika Petera Higgse.*

Pole duchů - *části Higgsova komplexního pole, které lze odstranit vhodnou kalibrační podmínkou. Zbyde jediné skalární pole, po kterém se pátrá, tzv. Higgsova částice. Předpovídaná hmotnost je jedno až dvojnásobek hmotnosti částic W či Z.*

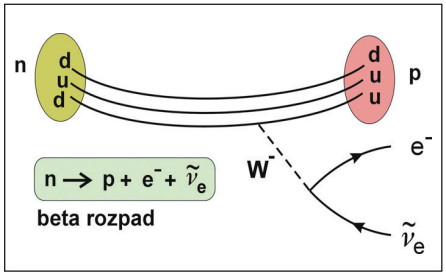
Když se v 60. letech objevily první varianty teorií, které jednotným způsobem popisovaly elektromagnetickou a slabou interakci, měly jednu podstatnou vadu. Klidové hmotnosti všech částic tvořících interakci (tzv. intermediálních či polních částic) vycházely nulové. To je v pořádku pro foton, který je polní částicí elektromagnetické interakce, ale není to v pořádku pro částice slabé interakce. Slabá interakce má totiž konečný dosah a podle kvantové teorie by jí odpovídající částice měly mít klidovou hmotnost nenulovou.

Řešení tenkrát navrhl skotský fyzik Peter Higgs. Pokud do teorie zavedeme další částice s nulovým spinem, získají polní částice slabé interakce požadovanou nenulovou hmotnost. Celý mechanismus se dnes nazývá Higgsův mechanismus a hypotetické částice Higgsovy částice.

Elektromagnetická interakce

Společná podstata jevů elektrických a magnetických byla pochopena ve druhé polovině 19. století a vyústila v sadu rovnic klasické elektrodynamiky, u jejichž zrodu stáli J. C. Maxwell, O. Heaviside a H. Hertz (1873). Dnes tyto rovnice nazýváme Maxwellovy rovnice. Ve dvacátém století se objevila kvantová podoba elektrodynamiky a kvantová teorie elektromagnetického pole (P. A. M. Dirac, R. P. Feynman, J. Schwinger, I. Tomonaga), která byla završena elegantními grafickými zkratkami – Feynmanovými diagramy. Přenásobíme-li vlnovou funkci komplexní jednotkou, nic se v měřitelných předpovědích teorie nezmění. Tuto symetrii nazýváme $U(1)_{loc}$ symetrií a je základní symetrií elektromagnetické interakce. Elektromagnetická interakce má nekonečný dosah, její částice nazýváme fotony. Fotony mají nulovou klidovou hmotnost a pohybují se rychlostí světla.

Feynmanův diagram rozpadu beta, který je způsoben slabou interakcí.



Slabá interakce

Slabá interakce byla poprvé poznána u beta rozpadu neutronu. Od té doby bylo pozorováno mnoho rozpadů částic ovládaných slabou interakcí. Jde o rozpady s relativně velmi dlouhými poločasy (odtud název slabá interakce) od 10^{-15} s do dlouhých hodin a týdnů. Interakce působí na značné množství částic (na všechny leptony a kvarky a samozřejmě na částice z kvarků složené. Nepůsobí na intermediální částice. Při slabé interakci se nezachovává levopravá symetrie. Interakce má konečný

dosah a její polní částice (W^+, W^- a Z^0) mají nenulovou klidovou hmotnost a podsvětelnou rychlost šíření. Při slabé interakci se elektron a jeho neutrino chovají jako jediná částice. Tuto základní symetrii nazýváme SU(2) symetrie. K poznání slabé interakce v padesátých a šedesátých letech 20. století přispěli například C. S. Wu, V. L. Fitch a J. W. Cronin.

Elektroslabé sjednocení

V šedesátých letech se ukázalo, že je možné vytvořit teorii, která by jednotně popisovala elektromagnetickou i slabou interakci. Problém jednotného popisu elektromagnetické a slabé interakce (tzv. elektroslabé interakce) je otázkou nalezení symetrie, která obsahuje jak $U(1)_{loc}$ tak SU(2) symetrii, tj. symetrii elektromagnetické a slabé interakce. To se podařilo Stevenovi Weinbergovi, Abdusovi Salamovi a Shaldonu Lee Glashowovi, kteří za teorii elektroslabé interakce obdrželi Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1979. Teorie elektroslabé interakce předpověděla, že kromě fotonu existují ještě další tři výměnné částice: intermediální bosony W^+, W^- a Z^0, které odpovídají za slabou interakci. Intemediální bosony W^+, W^- a Z^0 byly objeveny v laboratořích CERN v roce 1983 ve vstřícných proton-antiprotonových svazcích o energii 270 GeV. Roku 1984 obdrželi Carlo Rubbia a Simon van der Meer za tento objev Nobelovu cenu za fyziku.

Spontánní narušení symetrie a Higgsovy částice

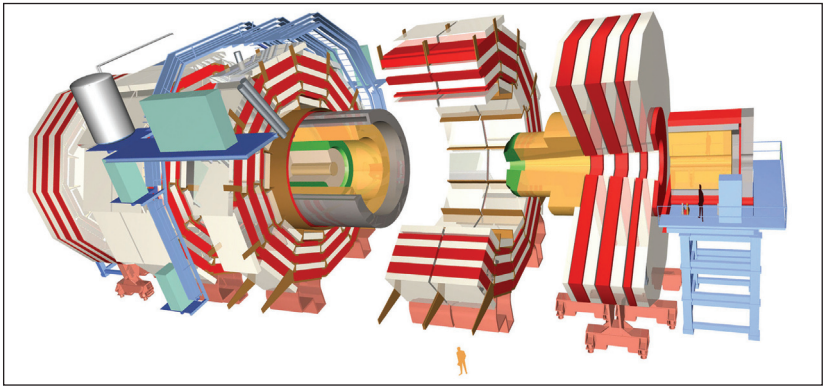
V teorii elektroslabé interakce je jeden zásadní problém. Platí-li symetrie $U(1)_{loc}$ a SU(2) beze zbytku, vyjdou klidové hmotnosti všech čtyř intermediálních částic nulové. Ve skutečnosti je nulová jen klidová hmotnost fotonu (s tím souvisí nekonečný dosah elektromagnetické interakce) a částice $W^\pm$ a Z^0 mají klidové hmotnosti 80 GeV a 91 GeV (s tím souvisí krátký dosah slabé interakce). V teorii to znamená, že symetrie musí být narušena. Tento jev nazýváme spontánní narušení symetrie. Za narušení symetrie by měly být odpovědné další částice, které nazýváme Higgsovy bosony nebo

Elektromagnetická interakce - *interakce s nekonečným dosahem, která působí na elektricky nabité částice. Intermediální částicí je foton se spinem rovným jedné a s nulovou klidovou hmotností.*

Slabá interakce - *interakce s konečným dosahem, působí na kvarky a leptony. Intermediálními částicemi jsou vektorové bosony W^+, W^- a Z^0 se spinem rovným jedné. Hmotnosti částic jsou v rozmezí 80÷90 GeV. Typickým slabým procesem je beta rozpad neutronu.*

LEP - *Large Electron-Positron collider. Bývalý urychlovač elektronů a pozitronů se vstřícnými svazky. Dnes se v tunelu po urychlovači LEP staví urychlovač LHC.*

Schématický řez detektorem CMS. Obrazový archiv částicového střediska CERN



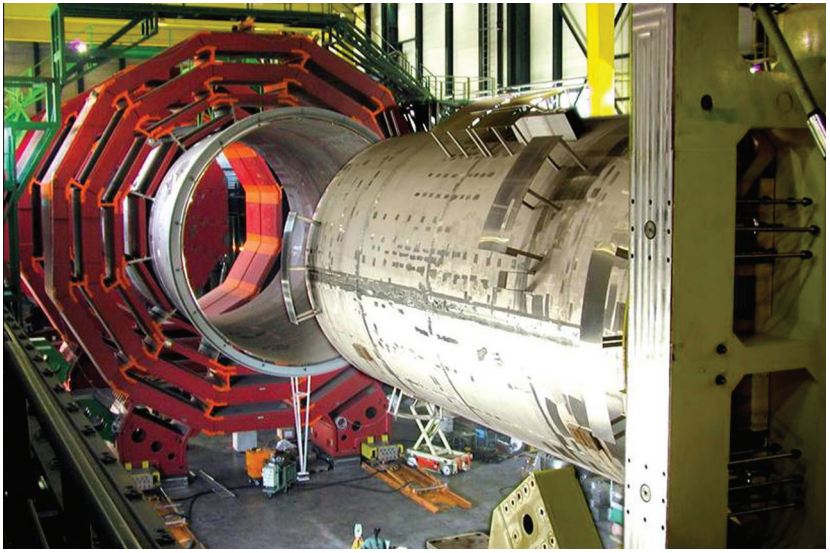
LHC - *Large Hadron Collider. Urychlovač protonů na energie 14 TeV, který se buduje v komplexu laboratoří CERN v tunelu po urychlovači LEP II.*

CMS - *Compact Muon Solenoid, víceúčelový detektor pro urychlovač LHC, budovaný v laboratořích CERN. Detektor vážící 12 500 tun by měl být schopen detekovat Higgsovy částice, pokud je jejich hmotnost v rozmezí 100÷1 000 GeV, jak předpokládá stávající teorie elektroslabé interakce. Dosavadní hledání na urychlovači LEP s detekcí do 100 GeV nepřineslo kýžený výsledek.*

Higgsovo pole. Tyto částice jsou v posledních letech usilovně hledány a je naděje, že bude možné je detekovat na v současné době stavěném urychlovači LHC. Právě energie Higgsova pole mohla být jakousi roznětkou inflační fáze raného Vesmíru. Jev analogický spontánnímu narušení symetrie známe i z běžného života. Postavíme-li jehlu na povrchu stolu na špičku, měla by podle klasické teorie spadnout tím později, čím lépe je jehla na začátku postavena svisle. Při přesné symetrii (jehla přesně na špičce) by neměla spadnou vůbec, protože nelze vybrat žádný preferovaný směr. Přesto dojde k narušení symetrie, takže jehla v konečném čase dopadne na povrch stolu.

Mechanismus narušení symetrie, který vede k nenulové hmotnosti polních částic slabé interakce, navrhl skotský fyzik Peter Higgs. Byl to velice odvážný teoretický počin. Zavedením dalších neznámých částic do experimentálně neověřené teorie zajistil hmotnost zatím nepoznaných částic slabé interakce. A navíc se v teorii objevuje poprvé koncept narušení symetrie základních přírodních sil. To, zda byly tyto myšlenky správné, bychom se mohli dozvědět již v nejbližší době.

Vsouvání vakuové části do detektoru CMS. Obrazový archiv CERN.



CMS - vhodný detektor H částic

První pokusy o hledání Higgsových částic byly prováděny v laboratořích CERN na urychlovači LEP (Large Electron-Positron Collider). Dosažitelné energie zde byly do 100 GeV a to k objevu Higgsových částic nestačilo. Pokud tyto částice existují, je jejich hmotnost zcela jistě vyšší než 80 GeV.

V roce 2000 byla činnost urychlovače ukončena a ve zbylém podzemním tunelu se buduje urychlovač zcela nový – Large Hadron Collider. Půjde o největší urychlovač protonů a iontů na světě. Podzemní tunel je dlouhý 27 km a nachází se v hloubce 100 m pod zemí. Protony ve vstřícných svazcích by měly dosáhnout energie 14 TeV a urychlovač se tak stane největším urychlo-

vačem světa (obdobný americký projekt byl zastaven z finančních důvodů). Přestavba by měla být dokončena v roce 2007. Urychlovač bude vybaven pěti obřími detektory (ATLAS, ALICE, CMS, LHC a TOTEM).

Detektor CMS (Compact Muon Solenoid) je mnohoúčelový obří detektor produktů srážek urychlených protonů. Hmotnost detektoru je okolo 12 500 tun a skládá se z mnoha vrstev, které jsou schopné detekce různých typů částic. Celý detektor tak vypadá jako cibule s válcovitou strukturou kolem místa srážky. Srdcem detektoru je obří supravodivá cívka budící magnetické pole (6 m průměr, 13 m délka, 4 T vytvořené pole, 2,5 GJ uchovávaná energie). Jde o největší magnet na světě. V CMS je 15 000 000 detekčních kanálů řízených vysoce výkonnými počítači. V CMS jsou pixlové detektory, křemíkové detektory, plynné páskové komory, kalorimetry k měření energie částic atd. Nabité částice se budou pohybovat po spirálách v magnetickém poli detektoru a jejich parametry budou určovány při průchodu různými částmi detektoru.

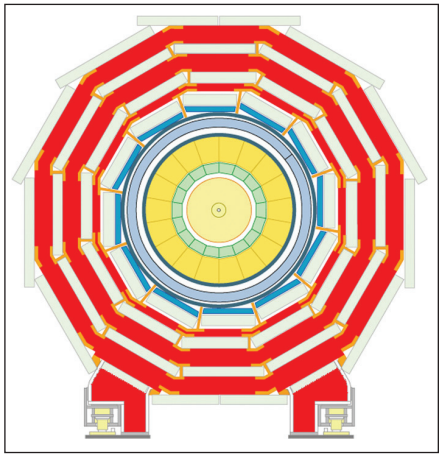
Nově připravovaný detektor by měl být schopen spolehlivě detekovat produkty rozpadu Higgsových částic, které vzniknou při srážce dvou protonů, pokud je jejich hmotnost od 100 GeV do cca 1 000 GeV. Pokud je hmotnost Higgsových částic mezi 100÷140 GeV, budou se rozpadat na dva fotony a v hmotnostním spektru fotonů se objeví ne-velký, ale přesto charakteristický pík.

Pokud bude hmotnost hledaných částic v rozmezí 140÷500 GeV, budou se vzniklé Higgsovy částice rozpadat většinou na částice Z a ty posléze na čtyři leptony (elektrony a miony). Zde je detekce mimořádně jednoduchá a v hmotnostním spektru leptonů by měl být velmi ostrý a snadno detekovatelný pík.

Bude-li hmotnost hledaných Higgsových částic přes 500 GeV, budou se většinou rozpadat na dva leptony a dva kvarky. Příslušný pík v hmotnostním spektru již není tak ostrý, přesto je ale snadno detekovatelný.

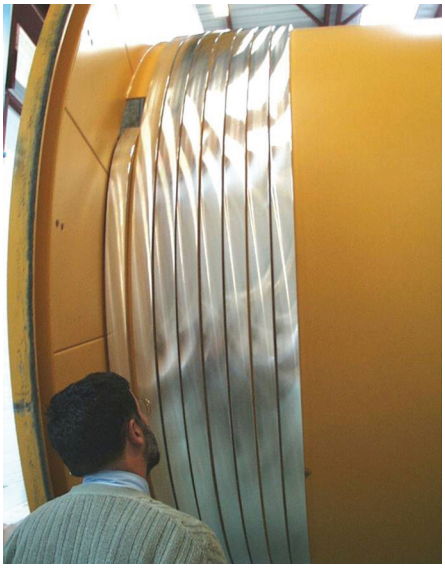
Předpokládaná klidová hmotnost Higgsových částic je jedno až dvojnásobek hmotnosti částic W a Z, což je plně v možnostech stavěného detektoru. Za nejpravděpodobnější se uvádí hmotnostní údaj 150 GeV. Pokud nebudou po uvedení urychlovače LHC do provozu Higgsovy částice nalezeny, bude to znamenat zásadní přelom v našich znalostech základních přírodních sil a kompletní revizi našeho chápání vesmíru.

■ *Petr Kulhánek*



Příčný řez detektorem CMS. Obrazový archiv CERN.

Vinutí cívky magnetu v detektoru CMS. Obrazový archiv CERN.



Kvantové počítače

Faktorizace - *rozklad čísla na součin prvočísel.*

Interference - *skládání vln z několika zdrojů. V daném místě se sčítají amplitudy vln. Jsou-li v protifázi, může dojít k vyrušení výsledné vlny. V detekčním přístroji se detekuje intezita vlny, která je kvadrátem amplitudy.*

Jaderná magnetická rezonance - *spiny atomových jader mohou konat precesní pohyb kolem silokřivek silného magnetického pole. Tento pohyb může být vyvolán rezonančním průchodem elektromagnetické vlny vhodné frekvence.*

Od zkonstruování prvního počítače uplynulo již více než 60 let. V roce 1941 sestrojil německý inženýr Konrad Zuse prapředka dnešních počítačů. Zažili jsme bouřlivý rozvoj výpočetní techniky. Měnila se forma zápisu dat od děrných pásek a děrných štítků přes magnetická média a kompaktní disky. Měnila se i velikost počítačů od obřích sálových monster po dnešní malé a výkonné počítače.

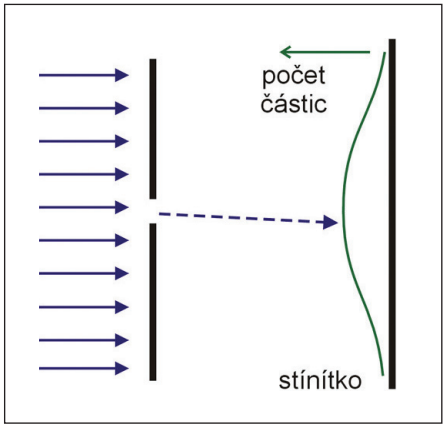
Právě miniaturizace elektroniky nabírá obrovského tempa a zdá se, že ji nic nezastaví. Zdání ale klame. Svět malých rozměrů má své zákony odlišné od světa, na který jsme si zvykli my lidé. Jde o nekomutující kvantový svět, ve kterém AB není BA, ve kterém samo měření ovlivňuje stav systému, a ve kterém neplatí booleovská logika.

Svět počítačů, ve kterém je zápis založen na posloupnosti nul a jedniček, nelze miniaturizovat donekonečna. Již brzy narazíme na principiální bariéru a při další miniaturizaci přestanou platit zákony, na jejichž principu fungují dnešní počítače. Je to konec? Finální stanice, za kterou již není možné jít? Ne, je to teprve začátek! Začátek počítačů nové generace založených na kvantových principech, kdy přirozená paralelizace algoritmů je vlastností hardwaru samotného. Pojďme nyní nahlédnout do kuchyně budoucích počítačů.

Kvantová interference

Začněme velmi jednoduchým experimentem popsaným v každé učebnici kvantové mechaniky. Představme si částice dopadající na otvor v desce (štěrbinu). Za štěrbinou je stínítko, na kterém budeme registrovat dopadající částice. Může jít například o fotony a fotografickou desku. Počet dopadlých částic bude mít maximum proti štěrbině a bude zhruba sledovat křivku na obrázku vlevo. Co když budou štěrbiny dvě? Obraz se výrazně změní. Na stínítku budou místa, na které nedopadne žádná částice. Proč? Matematické vysvětlení je snadné. Sčítají se totiž amplitudy pravděpodobností a tím dojde ke kvantové interferenci. Zkrátka, podobně jako u vln se některé možnosti vyruší. Je to pro nás nezvyklé, ale takový mikrosvět je. Když zakryjeme jednu ze dvou štěrbin, dojde k paradoxnímu jevu. Nedochází k destruktivní interferenci a do místa, kam nedopadaly žádné částice, nyní některé dopadnou. Méně je více! Do místa, kam při dvou otevřených štěrbinách nedopadla žádná částice, při jedné otevřené štěrbině částice dopadnou.

Jednoštěrbinový experiment.



Superpozice stavů a kvantový výpočet

V kvantové teorii se u dvouštěrbinového experimentu mohla částice na stínítko dostat libovolnou z obou štěrbin. Vzhledem ke kvantové interferenci amplitud pravděpodobnosti si můžeme představit, že procházela oběma štěrbinami současně. Skutečný stav částice je směsicí obou možných stavů. Který z nich má částice, zjistíme až pomocí registračního přístroje. Tím ale narušíme interferenční obrazec. Zakryjeme-li například jednu štěrbinu, dozvíme se sice, kterým otvorem částice prolétla, ale nebudeme již pozorovat interferenční obrazec, zásadně ovlivníme měřením samotný systém. Na stejném principu je založeno kvantové počítání. Představme si systém, který se může vyskytovat ve dvou různých stavech (označme je například 0 a 1 podle analogie s klasickým zápisem informace). U makroskopických zapisovacích médií lze rozlišit od sebe zápisy nul a jedniček. Kdybychom to nedokázali, nebudeme umět zápis přečíst. Postupnou miniaturizací ale jednou dojdeme do situace, kdy začnou dominovat kvantové vlastnosti. Systém bude v superpozici obou stavů (0 i 1) a teprve akt měření rozhodne, zda jde o stav 0 či o stav 1. Systém tak nese paralelně informace o obou stavech. Výsledkem aktu měření bude hodnota 0 nebo 1, ale tuto hodnotu poznáme až měřením, které zcela naruší daný stav systému. Takovýto dvoustavový kvantový systém je základní jednotkou informace kvantového počítání, která se nazývá *kvantový bit* neboli *qubit*. Nepodléhá Booleově logice, ale elementárním zákonům kvantové teorie, tzv. kvantové logice.

Kvantová interference - *skládání amplitud pravděpodobnosti několika možností. Amplitudy se mohou vyrušit, potom hovoříme o destruktivní interferenci. Pravděpodobnosti dějů jsou kvadrátem amplitud pravděpodobností.*

Kvantový počítač - *počítač využívající „hardwarově" kvantově mechanické vlastnosti částic, například elektronů nebo atomových jader. Kvantový počítač provádí operace s qubity, tedy s více stavy současně. Tím je výpočet mnohonásobně efektivnější než u klasického počítače.*

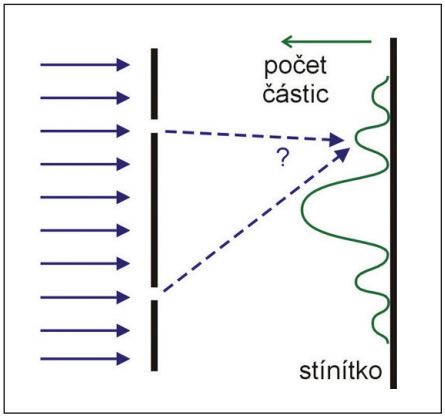
Qubit (kvantový bit) - *základní jednotka informace podléhající kvantové logice. Základní informace 0 nebo 1 je nesena částicí v obou stavech až do provedení měření.*

Path Integrals – integrály po drahách

V polovině dvacátého století přišel Richard Feynman se zajímavou myšlenkou. Pokud se částice může mezi dvěma místy šířit po několika možných drahách, šíří se současně po každé z nich. Každé možné trajektorii můžeme přiřadit kvantovou amplitudu pravděpodobnosti. Skutečná pravděpodobnost je potom kvadrátem součtu amplitud pravděpodobností všech trajektorií.

Feynman dokonce vyvinul k sečtení amplitud všech trajektorií speciální matematický nástroj – spojitě nekonečně rozměrné integrály, tzv. integrály po drahách. Kvantová částice se jakoby paralelně šíří po všech možných dráhách. Pravděpodobnost většiny z nich se destruktivní interferencí vyruší. Zůstanou jen některé trajektorie, které jsou možné také v klasické mechanice. Kvantovým systémům je proto vlastní vnitřně

Dvouštěrbinový experiment.



Peter W. Shor, autor slavného faktorizačního algoritmu z roku 1994.

zabudovaný paralelismus. Logika postavená na zákonech kvantové teorie je přirozenou cestou paralelní.

Shorův algoritmus

Za jednu z nejobtížnějších úloh ve výpočetní technice je považováno nalezení účinného algoritmu pro faktorizaci velkých čísel. Například číslo 1 295 952 můžeme napsat jako součin prvočísel $2^3 \times 3 \times 7^2 \times 19 \times 29$. Jestliže ve dvojkové soustavě číslo zapíšeme pomocí posloupnosti n jedniček a nul, má nejlepší dosud nalezený algoritmus exponenciální obtížnost (rozumějte závislost potřebného výpočetního času na n).

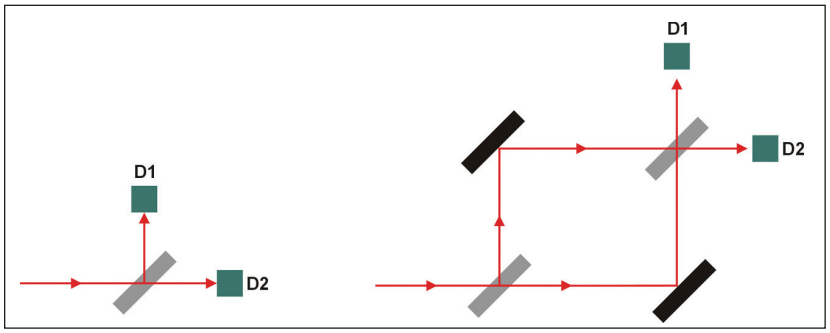
V roce 1994 bylo pomocí tohoto algoritmu faktorizováno číslo zapsané z posloupnosti 129 nul a jedniček. Výpočet provádělo celkem 1600 paralelně zapojených pracovních stanic po dobu osmi měsíců. Se stejnou výpočetní technikou by faktorizace čísla složeného z tisíce jedniček a nul trvala 10^{25} let. Je zřejmé, že tato úloha není stávající technikou řešitelná a právě toho využívají kódovací systémy v bankách i armádní organizace.

Právě ve stejném roce, v roce 1994, navrhl P. W. Shor algoritmus faktorizace postavený na kvantové logice. Jeho obtížnost je zhruba kvadratická! To je dáno právě přirozeným paralelizmem v kvantové logice. Pokud bychom sestrojili počítač postavený na kvantové logice, bylo by dešifrování tajných zpráv a stávajících bankovních kódů jednoduchou záležitostí.

Simulace kvantových počítačů na stávajícím hardware

Kvantovou logiku můžeme samozřejmě simulovat i na obyčejném PC. Simulace je jen poněkud nevýhodná a mimořádně obtížná, protože vzájemná korelace mezi kvantovými bity (qubity) a klasickými bity je zcela odlišná. Veškeré paralelní procesy probíhající naráz při kvantovém výpočtu musíme řešit v Booleově logice separátně. Výsledek je proto velmi žalostný – mimořádně pomalý kód. Nicméně už dnes si můžeme hrát s kvantovou logikou a zkoušet si její vlastnosti na běžných počítačích. Dokonce byl vyvi-

Analogie dvouštěrbinového experimentu s polopropustnými zrcadly.



nut speciální programovací jazyk QCL (Quantum Computing Language). Poslední stabilní verze je 0.4.3 a poslední dostupná beta verze 0.5.0. Syntaxe jazyka je podobná jazyku C.

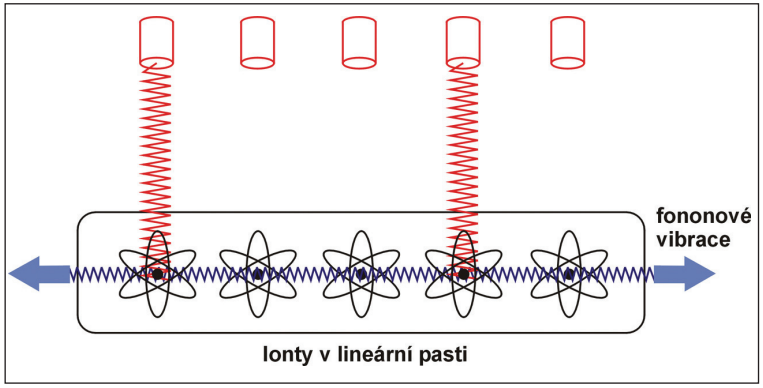
Skutečný kvantový počítač

Skutečný kvantový počítač musí být samozřejmě realizován na skutečném kvantovém systému. Od roku 1999 probíhají intenzívní pokusy na mnoha předních vědeckých pracovištích. Především jde o QUIC (QUantum Information Center) bohatě podporovaný armádní organizací DARPA, dále LANL (Los Alamos National Laboratory), MIT (Massachussettss Institute of Techology) a CALTECH (California Technology). Jaké jsou publikované výsledky? Velice nadějné. Podařilo se uskutečnit přenosy qubitů pomocí chladných iontů zlata zachycených v lineární iontové pasti, kterou se šíří vibrace v podobě fononů indukovaných soustavou laserů. Jiný systém je založen i na zcela odlišném principu, ve kterém se qubity pohybují v jaderných spinech kapalného roztoku alaninu nebo trichlóretylénu. Roztok je vnořen do silného magnetického pole. Procházející elektromagnetická vlna potom budí precesní pohyb spinů známý jako jaderná magnetická rezonance.

Objevují se i další systémy. Před konstrukcí prvního skutečného kvantového počítače bude třeba zvládnout řadu technologických problémů. První krok již ale byl učiněn.

■ *Petr Kulhánek*

Přenos qubitů pomocí chladných iontů zlata.



Booleova logika - *abstraktní formální systém, který obsahuje množinu prvků, nad kterými jsou definované binární operace "OR" (nebo) a "AND" (a zárove) a unární operace "NOT" (negace). Boolova algebra je pojmenována podle irského mate-matika George Boolea (1815-1864).*

Kvantová logika - *založena na základních principech kvantové teorie, ve které se u nezávislých dějů nesčítají pravděpodobnosti, ale amplitudy pravděpodobností. Stav systému je směsicí základních stavů a může být určen až při aktu měření. Paralelně je tak do jisté míry nesena informace o všech kvantových stavech zároveň.*

Komutativnost - *v makrosvětě nezáleží na pořadí dvou jevů, svět se nám jeví jako komutativní. Matematický zápis tohoto výroku je AB = BA. V mikrosvětě tomu tak není, měření jedné veličiny ovlivní měření jiných veličin.*

Paralelismus - *umožňuje synchronizaci procesů a vytváření komunikačních ka-nálů z logických proměnných. Složité vý-počty mohou být rozděleny mezi několik procesorů, na kterých probíhají současně. Efektivnost výpočtu je tak mnohem vyš-ší. Mnoho technik sekvenčního logického programování je přímo použitelných i v paralelním programování. Mezi základní soft-warové realizace paralelního přenosu patří MPI (Message Passing Interface) a PVM (Parallel Virtual Machine).*

Zpomalení a zastavení světla

Fázová rychlost - *rychlost šíření fáze vlnění. Body stejné fáze spolu nemusí být nijak fyzicky spojeny, fázová rychlost může být vyšší než je rychlost světla.*

Grupová rychlost - *rychlost šíření informace, musí být vždy podsvětelná.*

Index lomu - *podíl rychlosti světla ve vakuu a v daném prostředí.*

Disperze - *závislost rychlosti šíření světla na vlnové délce. Různé vlnové délky se šíří různou rychlostí, tvar pulsu je při průchodu prostředím deformován.*

EIT - *Electromagnetically Induced Transparency, elektromagneticky navozená průhlednost.*

Třem nezávislým skupinám vědců se podařilo v prostředí se silnou disperzí výrazně zpomalit světlo. Nejprve na rychlost jedoucího cyklisty, poté chodce a nakonec na krátký okamžik světlo úplně zastavit. Tyto neuvěřitelné experimenty určitě vejdou do historie a budou mít hluboký filosofický i aplikační dopad.

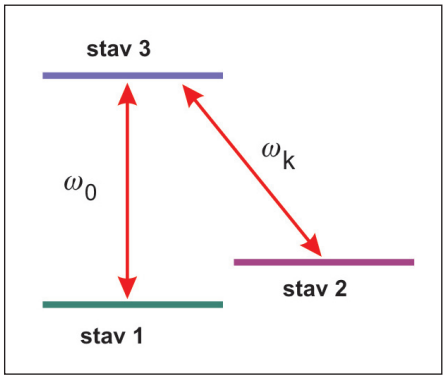
Rychlost světelného pulsu v prostředí

Světelný puls si můžeme představit jako balík složený z vln mnoha blízkých frekvencí, který se šíří prostředím tzv. grupovou rychlostí. Ta musí být vždy menší než je rychlost světla ve vakuu. Je-li index lomu závislý na frekvenci, šíří se různé vlnové délky (frekvence) zastoupené v pulsu různou rychlostí a puls mění svůj tvar. Tento jev se nazývá disperze. Sama grupová rychlost má v prostředí s disperzí hodnotu

$$v_g = c/(n + \omega\, \mathrm{d}n/\mathrm{d}\omega)$$

a lze ji snížit pomocí obou dvou členů ve jmenovateli: buď v prostředí s velkým indexem lomu nebo s indexem lomu silně závislém na frekvenci.

V běžných látkách index lomu nepřesahuje hodnotu 3 (například v diamantu je 2,5) a rychlost světla se pomocí vysokého indexu lomu výrazně nesníží. Lze však připravit prostředí s vysokou disperzí, ve kterém dojde k značnému zpomalení pohybu světelného pulsu. Vynikajícím prostředím pro tento účel je například silně ochlazený tříhladinový atomární systém.



Jev EIT - elektromagneticky indukovaná průhlednost

Představme si oblak atomů, jejichž obaly mají dvě blízké energetické hladiny 1 a 2 (vzniklé například rozštěpením základního stavu) a jednu hladinu vzdálenější 3 (například první excitovaný stav). Vyšleme-li tímto prostředím laserový puls o nosné frekvenci ω_0 dané přechodem ze základního stavu 1 do excitovaného stavu 3, neměl by puls prostředím vůbec procházet. Puls bude pohlcován elektrony atomárních obalů, ty budou excitovány do vyššího energetického stavu a později vyzáří fotony náhodným směrem. Prostředí tedy bude pro laserový puls neprůhledné.

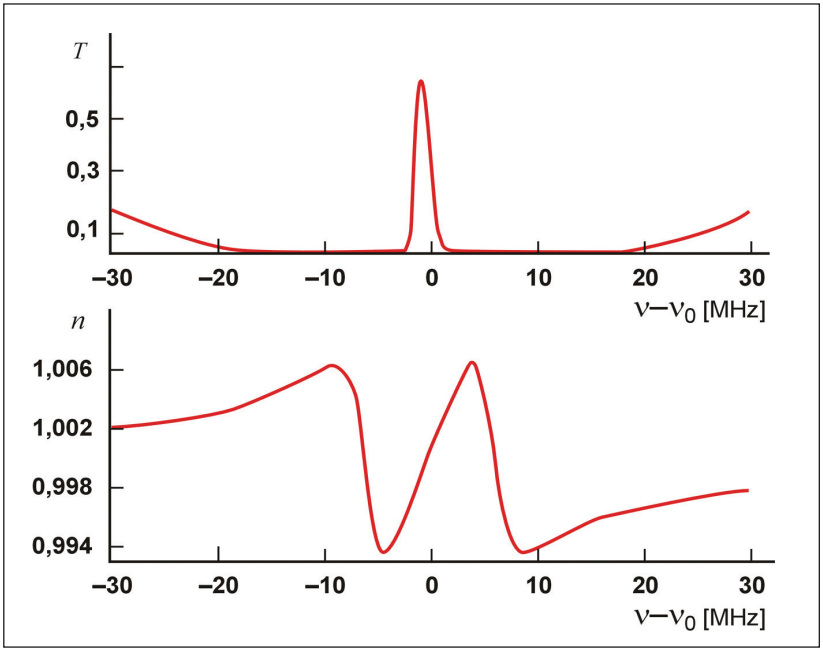
Situace se změní, jestliže prostředím ve stejnou dobu bude procházet ještě jeden pomocný, tzv. řídící puls s frekvencí ω_k danou přechodem mezi stavy 2 a 3. Oba dva pulsy budou mít snahu převádět elektrony do stavu 3. V důsledku kvantových interferenčních jevů dojde k vyrušení kvantových pravděpodobností přechodu do stavu 3 a prostředí bude pro světlo průhledné. Jev se nazývá elektromagneticky indukovaná průhlednost (EIT – Electromagnetically Induced Transparency). Nastane-li jev EIT, je koeficient propustnosti velmi vysoký jen v těsném okolí základní frekvence. V okolí této frekvence se prudce mění index lomu, prostředí je silně disperzní.

R. L. Walsworth. Experimenty se zastavováním světla provádí na Harvardské univerzitě.

Zpomalení světla

Pohybuje-li se světelný puls spolu s řídícím pulsem při jevu EIT tříhladinovým prostředím, které je v temném stavu (elektrony jsou v dolních dvou hladinách), je interferencí znemožněna absorpce světelných kvant na třetí energetickou hladinu v atomárním obalu. Prostředí je průhledné a jeví mimořádně silnou disperzi, grupová rychlost šíření laserového pulsu je velmi malá. U pulsu, který vstupuje do prostředí, se nejprve zpomaluje jeho čelo. Puls je tak prostorově stlačován v poměru v_g/c. Z pulsu, který by ve vakuu měl rozměry kilometrové se tak stane puls o rozměrech několik setin milimetru. V roce 1999 se podařilo touto technologií zpomalit světlo na pouhých 17 m/s.

Na horním obrázku vidíme propustnost prostředí pro laserový puls při jevu EIT, na dolním obrázku odpovídající index lomu. Na vodorovné ose je odchylka od základní frekvence $5{,}1\times10^8$ MHz sledovaného pulsu.



Zastavení světla

Průchod světelného pulsu prostředím je umožňován existencí řídícího pulsu. Pokud řídící puls vypneme, sledovaný puls se přestane prostředím pohybovat, grupová rychlost klesá k nule. Informace o tvaru sledovaného pulsu však není ztracena! Je zakódována do spinové struktury prostředí, ve kterém bylo světlo

L. V. Hau, žena, která jako první zastavila světlo.

zastaveno. Jakmile obnovíme řídící puls, sledovaný puls se znovu objeví a v nezměněném tvaru pokračuje ve své cestě. Řídícím pulsem může-me ovlivnit rychlost chodu sledovaného pulsu prostředím.

Světlo bylo poprvé zastaveno v roce 2001, informace o světle byla uložena do prostředí, ve kterém se světlo pohybovalo a po zhruba jedné milisekundě byl obnoven řídící puls a s ním i sledovaný puls.

Základní experiment

První experimenty byly provedeny Dr. Lene Vestergaard Hauovou z Harvardské university a Rowlandova ústavu v Cambridgi (Massachussetts). Sodíkové atomy byly ochlazeny na teplotu několika desítek mikrokelvinů a poté drženy magnetickým polem ve speciální vakuové komoře. Samotný oblak sodíkových atomů byl sledován zobrazovacím laserem, stín obláčku dopadal na CCD kameru. Tvar sledovaného pulsu byl monitorován fotonásobičem a CCD kamerou. Pomocný řídící pulz umožňující průchod sledovaného pulzu byl orientován kolmo.

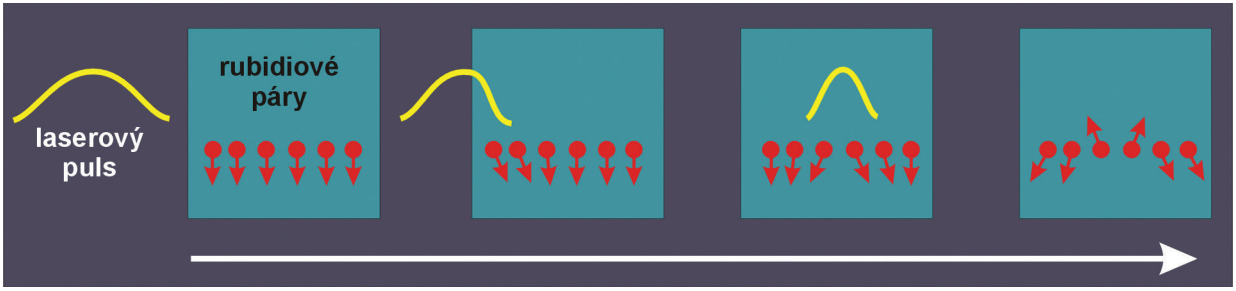
Tři potřebné energetické stavy odpovídaly základnímu stavu sodíku (rozštěpenému interakcí magnetického momentu valenčního elektronu s jádrem na dva stavy) a prvnímu excitovanému stavu.

Další experimenty

Obdobný experiment na parách atomů rubidia provedl ve stejné době nezávisle Dr. Ronald L. Walsworth z Harvardské university při relativně vysoké teplotě 70÷90 °C. Po zastavení pulsu byl jeho otisk přítomen jen v spinové struktuře par rubidia. Řídící puls byl obnoven po 0,5 milisekundy a s ním se objevil i sledovaný puls. Jako energetické hladiny 1 a 2 byla použita hladina $5S_{1/2}$ rozštěpená vnějším magnetickým polem na dvě a jako třetí hladina posloužil stav $5P_{1/2}$.

Experiment s rubidiovými parami:

a) *laserový puls vstupuje do prostředí s EIT.*
b) *čelo pulsu se zpomaluje a současně formuje spinovou strukturu par.*
c) *pomalu se pohybující puls ovlivňovaný řídicím pulsem.*
d) *řídicí puls je vypnut, pohyb světla se zastavuje, v látce zůstává spinový otisk světla.*



Třetí obdobný experiment byl proveden A. V. Turukhinem v roce 2002 v pevné látce. Šlo o krystaly křemičitanu yttritého (Y_2SiO_5) dopova-ného praseodynem za teploty 5 K. Poprvé se tak podařilo zastavit světlo i v pevné látce.

Aplikace

Současný bouřlivý rozmach optických komunikací trpí nutností optické signály převádět před dalším zpracováním na elektrické. Možnost na chvíli světlo zaznamenat do spinové struktury látky a poté ho řízeně opět uvolnit může přinést fantastický rozmach optických komunikací. Využití zejména ve výpočetní technice může být obrovské. Zpomalení světla v silně disperzním prostředí na rychlost chůze člověka povede jistě v brzké době k mnoha aplikacím. Zajímavé budou také reakce filosofů a pseudofilosofů, pro něž bylo světlo po staletí mytickým a těžko uchopitelným fenoménem. Nyní ho lidstvo dokáže nejen zpomalit, ale i zastavit.

■ *Petr Kulhánek*

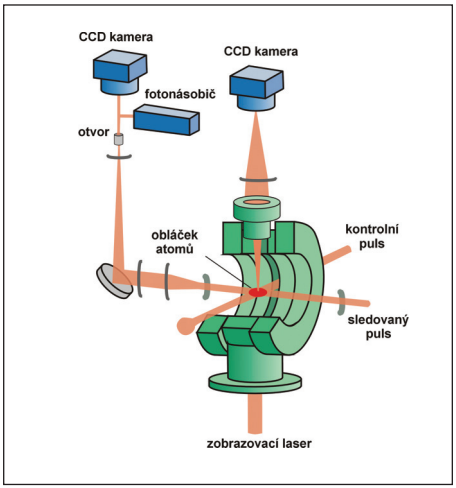


Schéma experimentu se sodíkovými atomy uskutečněného L. V. Hauovou.

Zpomalení světla v rubínu

MASER - *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení mikrovln pomocí stimulované emise záření. Princip navrhl C. Townes v roce 1951, první funkční zařízení zkonstruoval spolu se dvěma studenty v roce 1953. Nezávisle navrhl princip maseru v roce 1952 N. Basov a A. M. Prochorov. Všichni tři obdrželi Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1964.*

LASER - *Light 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 MASER, které bude pracovat se světlem.*

Rubínový laser - *první laser zkonstruovaný v optickém oboru Theodorem Haroldem Maimanem roku 1960. Jako aktivní prostředí posloužily ionty chrómu v syntetickém rubínovém krystalu.*

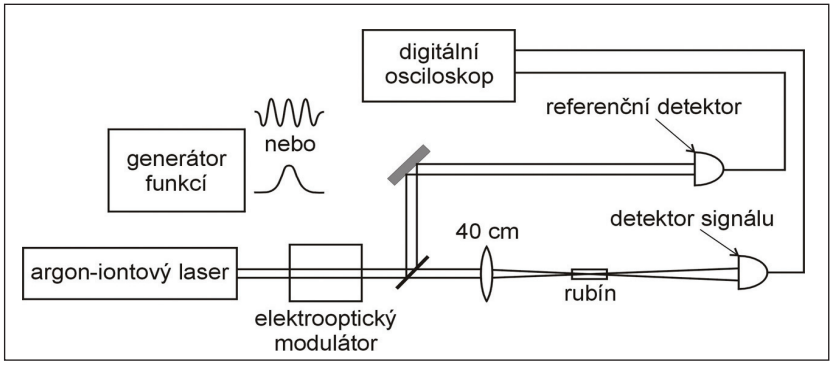
Modulace - *způsob zakódování informace do nosného (zpravidla vysokofrekvenčního) signálu. Je mnoho způsobů sloučení signálu s nosnou vlnou, například amplitudová, frekvenční a fázová modulace.*

Skupině vědců na univerzitě v Rochesteru se nedávno podařilo zpomalit světlo v krystalu rubínu při pokojové teplotě na rychlost 57,5 m/s.

I v tomto případě se jedná o využití strmé části disperzní křivky, která má za následek malou grupovou rychlost. Vědci použili „spektrální díru" způsobenou oscilacemi populační inverze tříhladinového kvantového systému, kde oscilace inverzní populace je způsobena rázy z pumpujícího a vedlejšího pole budicího laseru. Dá se ukázat, že šířka propustnosti „spektrální díry" je úměrná frekvenci těchto rázů. Díky tomu, že šířka pásma propustnosti je značně malá, je i disperzní křivka v oné oblasti velmi strmá a grupová rychlost může klesnout na nízkou hodnotu. Tato rychlost závisí na spektrální šířce pulzu a nelze ji nastavit.

Obrázek ukazuje uspořádání experimentu. Argon-iontový laser s vlnovou délkou 514,5 nm má funkci jak nosiče signálu, tak pumpy s rázy, signál je namodulován na laserový paprsek v elektrooptickém modulátoru. Optikou je paprsek zaostřen blízko k přední stěně krystalu rubínu, v 7,5 cm dlouhém krystalu se paprsky rozeběhnou jen minimálně. Paprsek je zaostřen, protože v periferních oblastech krystal nesaturuje a nedochází ke značnému a nežádoucímu pohlcování.

Výhodou tohoto systému je, že budicí laser nemusí být přesně naladěn, střed propustného pásma se nastavuje sám na frekvenci pumpujícího laseru a sleduje drift jeho frekvence. Výhody pevné fáze a pokojové teploty jsou zřejmé. Další výhodou je, že spektrální díra může být vytvořena přímo laserovým pulsem, který má krystal zpomalit, nejsou nutné pomocné zdroje vytvářející strmou disperzi jako v případě EIT. Nutno je však podotknout, že při odpojení řídicího pulsu u EIT systémů je možné světlo úplně zastavit, ale v tomto případě, při neřízené aplikaci, světlo úplně zastavit nelze. Možná se v budoucnosti podaří postavit řiditelnou variantu, kde řídící puls s rázy bude zastávat funkci vytváření disperze a světlo bude možné také zastavit.



■ *Michal Stránský*

Attosekundový laser a zrod attofyziky

Procesy, kterými může procházet elektron v elektronovém obalu – například ionizace – probíhají tisíckrát rychleji než chemické reakce. Pro studium těchto ultrarychlých dějů je nutno použít nástroj, který pracuje v časové škále attosekund, tedy 10^{-18} s. V roce 2002 byl realizován experiment, při kterém se podařilo impulsem o délce 650 attosekund vyrazit elektron z atomárního obalu. Z časové prodlevy mezi laserovým impulsem a následným impulsem RTG záření vyslaným znovuzachyceným elektronem byla změřena doba, kterou elektronu zabralo zachycení do atomárního obalu. Touto technologií je možno přímo měřit kvantové přechody v elektronovém obalu. Pro takový experiment je však nutno použít laseru pracujícího v RTG oblasti, kde je možno jít teoreticky na limitně nejkratší délku impulsu až 40 attosekund. Tím se otevřela poprvé brána do nové fyzikální oblasti – tzv. attofyziky.

Impulsní laser pracuje v režimu činnosti spínání ziskem, při kterém dochází v důsledku intenzivního buzení k prudkému nárůstu zisku nebo součinitele zesílení. Když zisk zesilujícího aktivního prostředí laseru přesáhne prahovou hodnotu, dochází k prudkému nárůstu energie soustředěné v rezonátoru. Detailní tvar impulsu závisí zejména na rychlosti buzení. Při impulsech limitně trvajících okolo femtosekund a kratších jsou již vlastnosti optického prostředí funkcí intenzity impulsu. Projevují se zde velmi výrazně nelineární charakteristiky druhého a třetího řádu, které lze s výhodou využít k autofokusaci svazku (optický Kerrův jev), prostředí působí jako gradientní vlnovod, difrakce je kompenzována nelinearitou, svazek je veden vlnovodem, který sám vytvořil a vzniká prostorový soliton.

Celý výše popsaný experiment je chápán jako začátek nové éry zkoumání kvantových jevů. Podařilo se zprovoznit technologii, která umožňuje přímá měření v atomárních měřítcích.

■ *Vavřinec Havlíček*

Sekunda - *doba rovnající se 9 192 631 770 periodám záření, které odpovídá přecho-du mezi dvěma hladinami velmi jemné struk-tury základního stavu atomu cesia 133.*

Milisekunda - *tisícina sekundy, 10^{-3} s.*

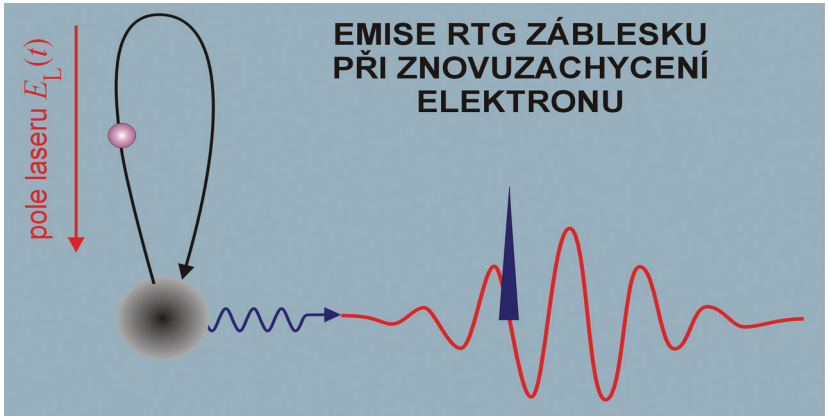
Mikrosekunda - *miliontina sekundy, 10^{-6} s.*

Nanosekunda - *miliardtina sekundy, 10^{-9} s.*

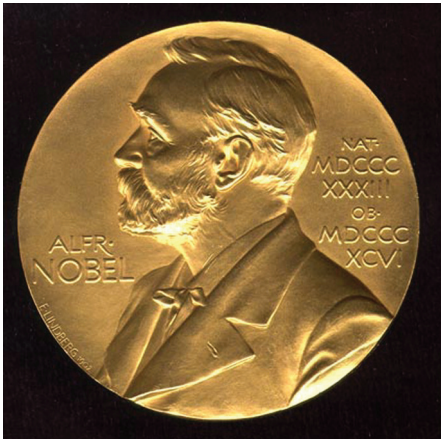
Pikosekunda - *biliontina sekundy, 10^{-12} s.*

Femtosekunda - *tisícina pikosekundy, 10^{-15} s.*

Attosekunda - *triliontina sekundy, 10^{-18} s.*



Nobelovy ceny za fyziku 2003



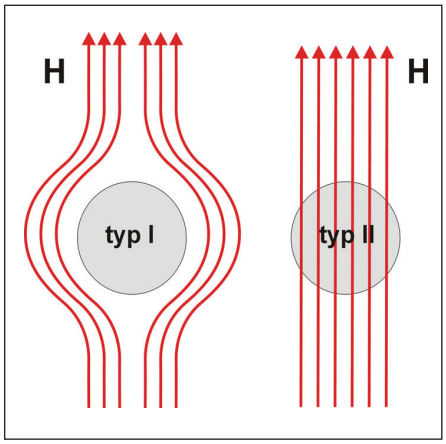
Některé jevy v mikrosvětě se nám na první pohled mohou zdát velmi zvláštní a nepochopitelné, protože pro ně nemáme analogii v běžném makrosvětě kolem nás. Tyto jevy popisuje kvantová teorie, ale existují také jevy, kdy můžeme kvantové chování pozorovat i vlastníma očima. A právě dva z nich si roku 2003 zasloužily zvláštní pozornost Švédské královské akademie věd - supravodivost a supratekutost. Oba jevy se projevují při velmi nízkých teplotách a teoreticky jsou popisovány kvantovou teorií. Dne 7. října 2003 ocenila Královská švédská akademie věd tyto laureáty Nobelovy ceny za fyziku: Alexeje Alexejeviče Abrikosova a Vitalije Lazareviče Ginzburga za objasnění supravodivosti a Anthony J. Leggetta za vysvětlení jednoho z typů supratekutosti. Slavnostní předávání Nobelových cen se uskutečnilo 10. prosince 2003, v den stosedmého výročí Nobelova úmrtí. O finanční odměnu 10 milionů švédských korun se laureáti podělili rovným dílem.

Supravodivost

Tento jev poprvé pozoroval a pojmenoval holandský fyzik Heike Kamerlingh Onnes a to již v roce 1911. Onnes zkoumal měrnou elektrickou vodivost rtuti při teplotě několika kelvinů a zjistil, že elektrický odpor rtuti při této teplotě klesá, až vymizí k nule. Nízké teploty rtuti dosáhl pomocí kapalného helia, které se mu podařilo zkapalnit o tři roky dříve. Ačkoli v té době nebylo známo jakékoli teoretické vysvětlení jevu, bylo evidentní, že v moderní společnosti bude mít supravodivost dalekosáhlý význam. Onnes byl oceněn za tuto práci Nobelovou cenou za fyziku v roce 1913. Později byl pozorován experiment, kdy v supravodivých prstencích protékal elektrický proud po dobu delší než jeden rok bez jakéhokoli odporu (experiment pak musel být přerušen) a zjistilo se, že unikátní jsou také magnetické vlastnosti supravodičů.

Uběhlo téměř 50 let, než fyzikové John Bardeen, Leon Cooper a Robert Schrieffer prezentovali teorii, která vysvětlovala supravodivost, a také za to byli oceněni Nobelovou cenou za fyziku v roce 1972. BCS teorie (název vznikl podle prvních písmen příjmení) vysvětluje supravodivost pomocí dvojic vázaných elektronů, které se nazývají Cooperovy páry. Tyto páry se chovají jako bosony, mohou být ve stejném kvantovém stavu a volně se pohybovat v kovu krystalovou strukturou z kladně nabitých iontů. Výsledkem je volně tekoucí proud neboli supravo-

Supravodiče I. a II. typu v silném magnetickém poli. Vlevo je znázorněn Meissnerův jev.

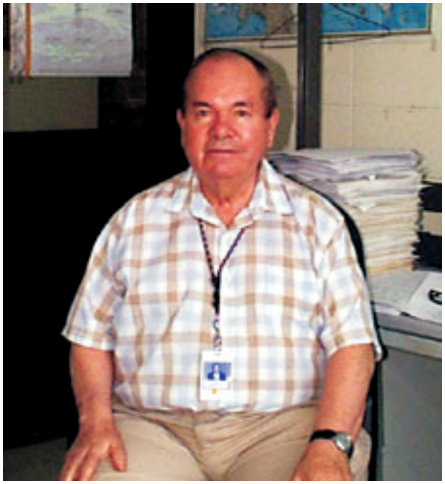


divost. Jenže tato teorie vysvětluje pouze supravodiče, které ztrácí supravodivé vlastnosti v silných magnetických polích (jde výhradně o kovy). Tyto supravodiče se nazývají supravodiče I. typu a je pro ně typický Meissnerův jev, kdy je magnetické pole ze supravodiče vytlačeno do okolí a supravodič se chová jako ideální diamagnetikum. Pokud magnetické pole přesáhne určitou hodnotu, supravodivost zmizí. Toto se ale neděje u supravodičů II. typu, což jsou zejména slitiny různých kovů a kompozitní materiály obsahující měď i nekovové složky. Tyto látky vykazují supravodivost i ve velmi silných magnetických polích a ke ztrátě supravodivosti dochází až při více než stokrát silnějších magnetických polích než u I. typu.

Experimenty ukázaly, že supravodiče II. typu nemohou být popsány pomocí BCS teorie. Až Alexej Abrikosov teoreticky popsal tyto supravodiče. Ve své práci navázal na výzkumy Vitalije Ginzburga a Lva Landaua, kteří se supravodivostí zabývali v 50. letech dvacátého století a popsali chování tehdy známých supravodičů. Abrikosov byl schopen pomocí parametru uspořádání (vlnové funkce) matematicky popsat, jak může externí magnetické pole proniknout materiálem a jak se materiál chová při zvyšování intenzity magnetického pole. Magnetické pole prochází skrz elektronové víry, které jsou uspořádány do mříže. Tento popis byl průlomem ve studiu nových supravodivých materiálů a je stále častěji užíván ve vývoji a analýze nových supravodičů a magnetů.

Naše znalosti a výhodné vlastnosti supravodivosti vedou k různým aplikacím. Stále jsou objevovány nové látky, které mají supravodivé vlastnosti již při vyšších teplotách, dnes už jsou známy supravodivé látky i při 200 K. Všechny tyto supravodiče jsou II. typu. První vysokoteplotní supravodič byl připraven dvojicí fyziků Johannesem Bednorzem a Karlem Müllerem, kteří za to obdrželi Nobelovu cenu za fyziku v roce 1987. Nejvíce omezujícím faktorem pro použití supravodičů je chlazení. Důležitou hranicí je teplota 77 K (–196 °C), což je teplota varu kapalného dusíku, který je levnější a lépe se s ním pracuje než s kapalným heliem.

Praktickými aplikacemi supravodivosti jsou například lékařské přístroje pro snímkování živých tkání na principu nukleární magnetické rezonance (NMR), magnetické vlaky (superexpresy typu MagLev) a ochlazování některých komponent sítí mobilních operátorů. Pro zajímavost uveďme, že Nobelovou cenou za lékařství v roce 2003 byly oceněny objevy v oblasti magnetické rezonance (Peter Mansfield a Paul

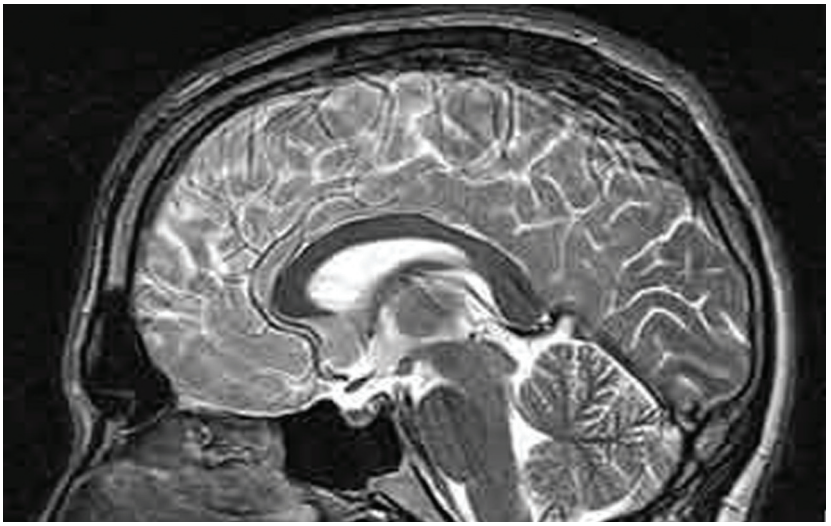


Alexej A. Abrikosov (1928), ruský fyzik, nositel Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2003 za teoretické objasnění supravodivosti.

Vitalij L. Ginzburg (1916), ruský fyzik a astrofyzik, nositel Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2003 za teoretické objasnění supravodivosti.

Antony J. Leggett (1932), americký fyzik, nositel Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2003 za teoretické objasnění supratekutosti.

Magnetorezonanční obraz lidského mozku. Rozlišení kamery je částečně závislé na síle magnetického pole, k vytváření tohoto pole se dnes používají supravodivé magnety II. typu.



C. Lauterbur). Tato metoda využívá právě poznatků o supravodivosti. Generální tajemník akademie věd Gunnar Öquist však příbuznost vyznamenaných oborů označil za shodu okolností.

Supratekutost

Hélium, lehký vzácný plyn, existuje v přírodě ve dvou izotopech. Obvyklá forma je He-4, což znamená, že v atomovém jádře jsou dva protony a dva neutrony. Druhá, méně obvyklá forma je He-3. Tento lehčí izotop (obsahuje jenom jeden neutron) se v přírodě vyskytuje asi deset milionkrát méně než těžší izotop. Proto větší množství izotopu He-3 bylo možné produkovat jen v posledních padesáti letech, například v atomových elektrárnách. Při normálních teplotách se plyny z těchto dvou izotopů liší jen v jejich atomových hmotnostech. Jestliže hélium chladíme na nízké teploty, přibližně na 4 K (–269,15 °C), tak kondenzací přejde do kapalné fáze. Kapalné hélium je široce užívané ke chlazení, například u supravodivých magnetů. V tomto případě se samozřejmě používá hélium vyskytující se v přírodě. Pokud hélium chladíme ještě na nižší teploty, tak se zvýrazní rozdíly mezi kapalinami z obou dvou izotopů. Kapalné hélium ztrácí vnitřní tření (má nulovou viskozitu) a stává se supratekutinou. Pro dva izotopy helia nastává tento jev při rozdílných teplotách a vysvětlit se dá jen pomocí kvantové fyziky.

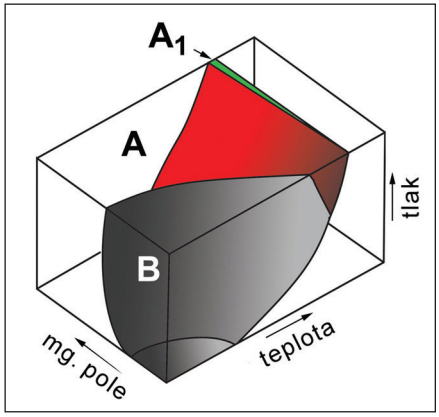
Skutečnost, že He-4 se stává supratekutým, objevil Petr Kapica již koncem třicátých let 20. století. Teoreticky vysvětlil tento jev mladý Lev Landau a oba byli oceněni Nobelovou cenou za fyziku. Přeměna z normální na supratekutou kapalinu, což se pro He-4 děje při teplotě kolem 2 K, je příkladem Bosehо-Einsteinovy kondenzace. Tento proces byl v poslední době pozorovaný i v plynech alkalických kovů a v roce 2001 za něj Erik Cornell, Wolfgang Ketterle a Carl Wieman obdrželi Nobelovu cenu za fyziku. Supratekutý izotop He-3 byl objeven až počátkem sedmdesátých let

20. století a postarali se o to fyzikové David Lee, Douglas Osheroff a Robert Richardson (Nobelova cena za fyziku pro rok 1996). Bylo to později než objev supratekutého He-4, protože supratekutost v případě izotopu He-3 nastává při teplotě tisíckrát nižší než u izotopu He-4. Tento objev byl očekáván, He-3 nemůže jako fermion podstoupit Bose-Einsteinovu kondenzaci, ale díky mikroskopické BCS teorii supravodivosti byl mechanismus supratekutosti již znám.

Anthony J. Leggett byl první, kdo uspěl v teoretickém vysvětlení vlastností supratekutin. Protože supratekutina He 3 obsahuje páry atomů, tak objasnění jejich vlastností je mnohem komplikovanější než u typu He 4. Zvláště páry atomů mají jiné magnetické vlastnosti, než atomy He 4. Kapalina je anizotropní a bylo zjištěno, že se může vyskytovat ve třech fázích, nazvaných A, A1 a B. Tyto tři fáze mají rozdílné vlastnosti a jsou závislé na teplotě, tlaku a magnetickém poli. Leggett jako první zformuloval teorii, která vysvětluje, jak probíhá fázový přechod z fáze A do fáze B s nižší teplotou. Jeho teorie pomohly experimentátorům interpretovat výsledky a byly také prospěšné i v jiných oblastech fyziky, například v jaderné fyzice a kosmologii.

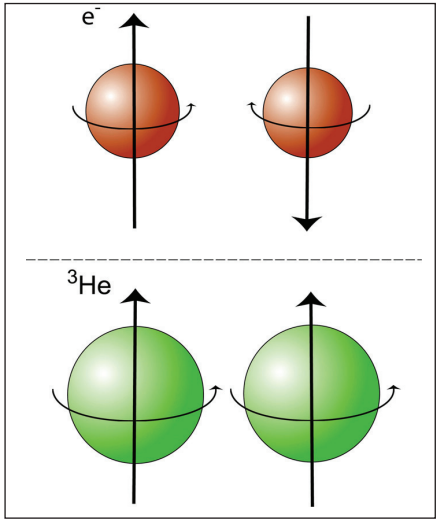
A na závěr popišme, jak supravodivost a supratekutost vypadá z pohledu kvantové fyziky. Elektrony i atomy He-3 jsou fermiony, tedy částice, které sdílejí stejný kvantový stav velmi neochotně. Pro tyto částice platí Pauliho vylučovací princip: dvě částice se nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu. Avšak při velmi nízkých teplotách mohou elektrony i atomy He-3 vytvářet páry. Tyto páry se chovají jako bosony, tedy částice, které mohou přecházet do jediného společného kvantového stavu. V případě supravodivosti se elektronové páry při velmi nízkých teplotách kolem 4 K chovají jako supravodivé. Supravodivé proudy protékají bez disipace energie. Supravodivými materiály navíc mohou procházet mnohem vyšší proudy, než běžnými kovovými vodiči. U supratekutosti chladíme vzorek atomů He-3 na velmi nízkou teplotu, atomy tvoří páry a ty mohou kondenzovat do společného kvantového stavu. V tomto stavu kapalné hélium teče bez ztráty energie způsobené vnitřním třením.

■ *Lukáš Kupka*

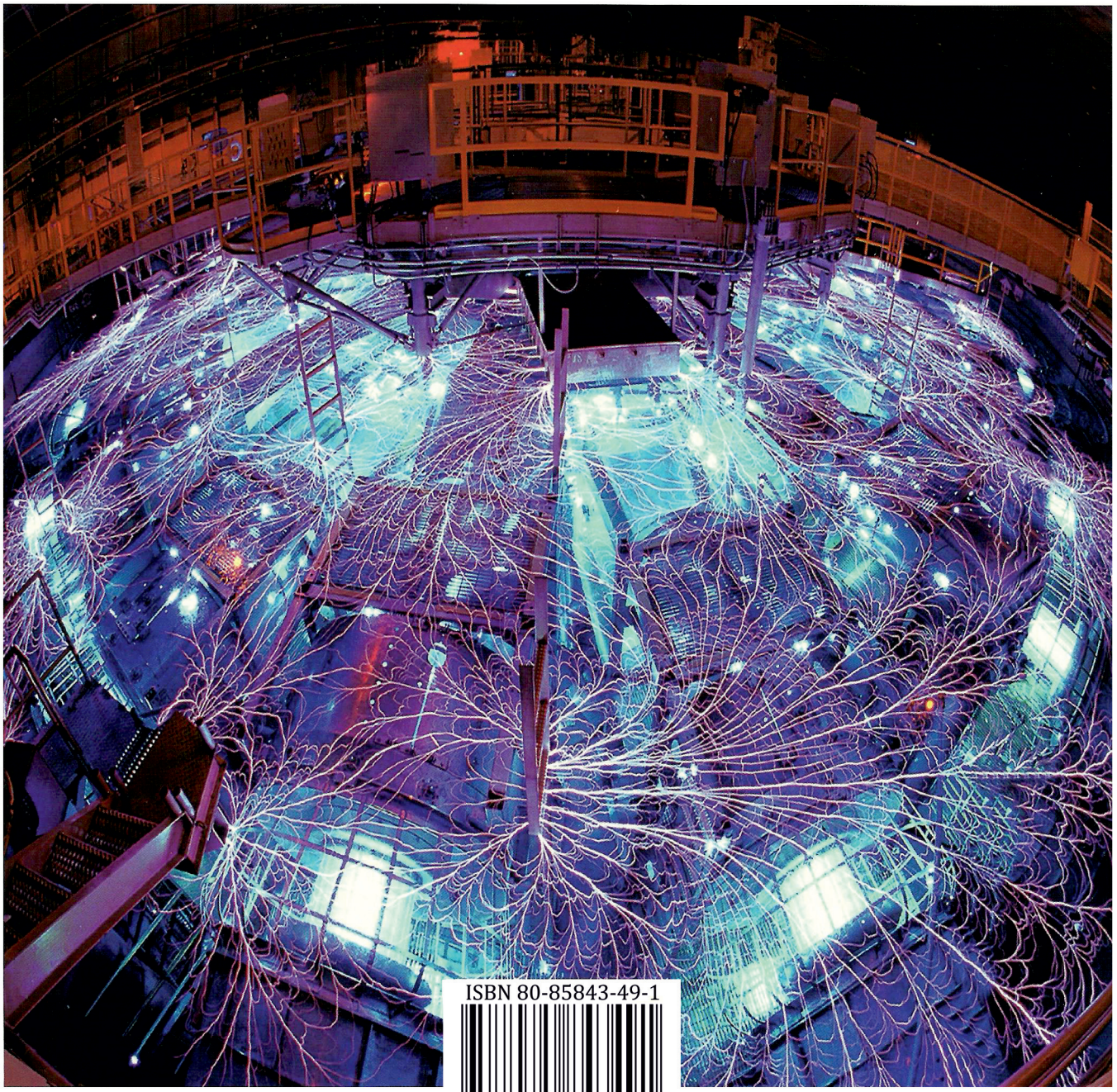


Supratekutina He-3 může existovat ve třech fázích pojmenovaných A, A1a B. Typ fáze je určen tlakem, teplotou a magnetickým polem.

Rozdíl magnetických vlastností páru elektronů a atomů He-3.



A nyní Vám, milí čtenáři, přejeme bezbolestný návrat do tvrdé české reality.



ISBN 80-85843-49-1

9 788085 843491