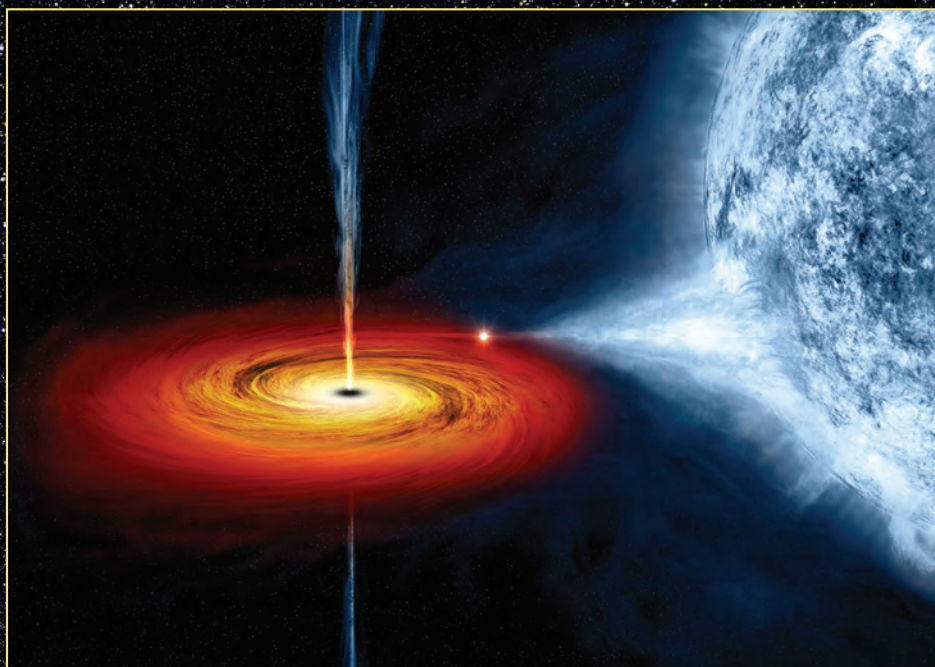


Sborník ze závěrečného semináře projektu Brána do vesmíru

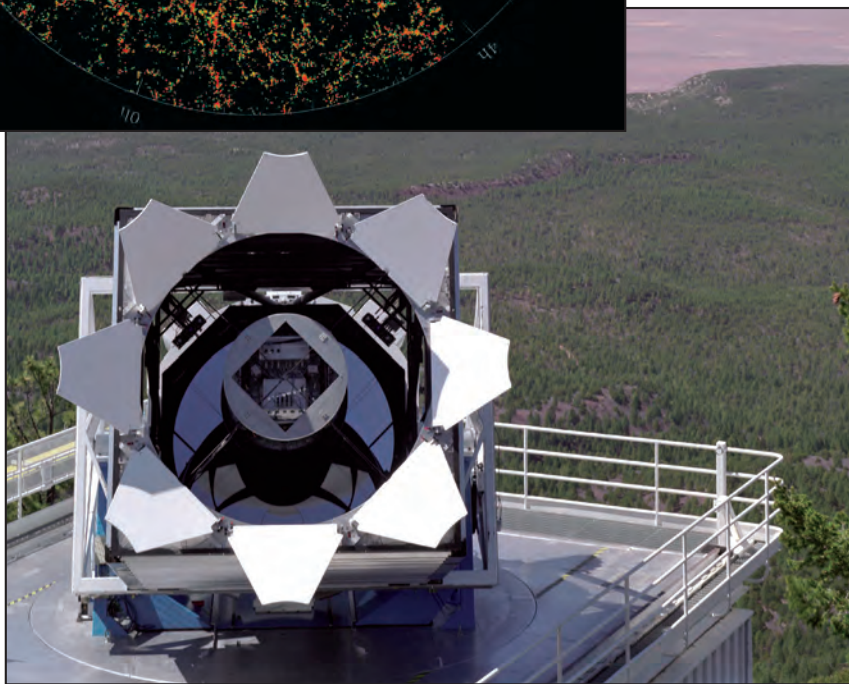
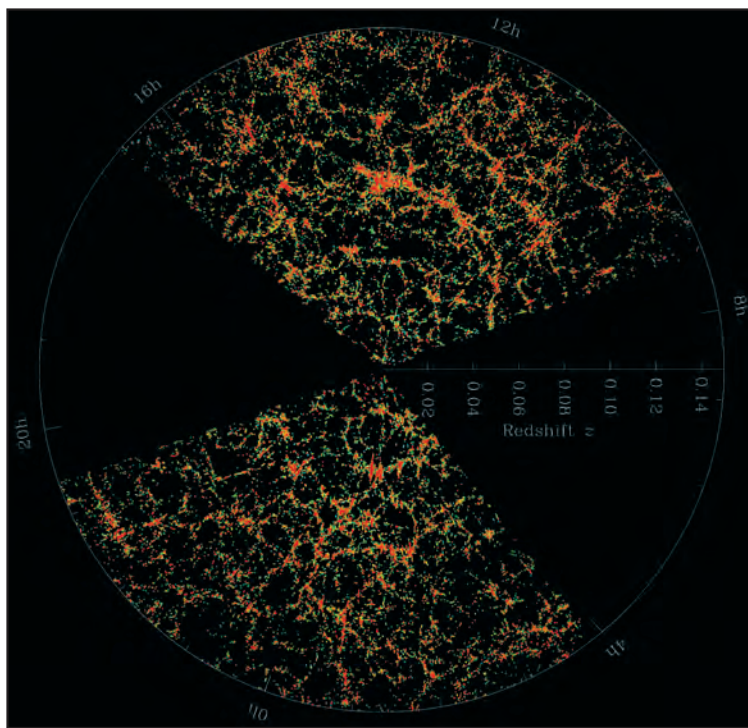
Astronomie a fyzika společně ke vzdělání



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC



PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



Nahoře: 3D mapa rozložení galaxií z projektu SDSS. Země je v centru a každý zobrazený bod představuje galaxii obsahující typicky 100 miliard hvězd. Barva bodů odpovídá stáří hvězd v galaxií. Čím červenější, tím starší hvězdy. Poděkování: M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey.

Dole: Přehledový teleskop projektu SDSS stojí na vrcholu v Sacramento Mountains. Poděkování: Fermilab Visual Media Services. (oba snímky k příspěvku Petabytová astronomie)

Milníky kosmologie

Petr Kulhánek

Jaké byly největší objevy, které přispěly k našemu chápání vzniku a vývoje vesmíru? Nepochybně šlo v první řadě o Hubbleův objev expanze vesmíru, dále o objev reliktního záření, temné hmoty a energie, přípravu zárodečné polévky, ze které vznikal vesmír a naději na nepřímou detekci reliktních gravitačních vln z inflační fáze. Pojďme alespoň na chvíli společně vstoupit do fascinujícího světa na hranici lidského poznání.

Samotné slovo kosmos je řeckého původu a znamená ozdobu, šperk nebo řád. S největší pravděpodobností použil toto slovo pro vesmír jako celek poprvé Filoláos z Krotónu (asi 470–385 př. n. l.), který byl Sókratovým vrstevníkem a žil na Sicílii. Dnes *pod kosmologií chápeme souhrn vědeckých poznatků, které vedou k pochopení vesmíru jako celku, zejména s ohledem na jeho původ a budoucnost*. Kosmologie se z dřívějších filosofických úvah přeměnila v průběhu 20. století v exaktní vědeckou disciplínu, která má široké experimentální zázemí. S vysokou přesností dnes víme, že vesmír vznikl před 13,8 miliardami let z extrémně horké a husté plazmatické koule.

Rozpínání vesmíru

Objev rozpínání vesmíru je neoddělitelně spjat s observatoří na Mt. Wilsonu, kde byl v roce 1919 zprovozněn Hookerův dalekohled o průměru 2,5 metru. Prvním ředitelem se stal Edwin Hubble, který v roce 1924 zjistil, že tzv. Velká mlhovina v Andromedě není ve skutečnosti žádnou mlhovinou, ale galaxií složenou z mnoha hvězd. Do té doby si většina astronomů myslela, že vesmír je tvořen jedinou galaxií – naší Mléčnou dráhou. Od roku 1924 Hubble sledoval různé mlhoviny a u mnoha z nich zjistil, že ve skutečnosti jde o cizí galaxie. Vzdálenosti určoval pomocí cefeid, proměnných hvězd se známou závislostí mezi svítivostí a periodou. U objevených galaxií pořizoval spektra a z posuvu spektrálních čar zjišťoval pohyb těchto galaxií vzhledem k nám. V roce

1929 učinil svůj druhý významný objev. Na základě měření vzdálenosti a pohybu galaxií dospěl k závěru, že všechny vzdálené galaxie od nás letí pryč, dokonce tím rychleji čím jsou dále.

Z prostorového hlediska dnes předpokládáme, že **vesmír expanduje** ze všech svých bodů. Žádný střed expanze neexistuje, v libovolném místě vesmíru vnímáme expanzi stejně. Vždy se nám bude zdát, že jsme právě ve středu expanze. Tomuto tvrzení říkáme **kosmologický princip**. Hubblovo pozorování je jedním z nejdůležitějších experimentálních důkazů rozpínání vesmíru. Obdobná měření konal již dříve Vesto Slipher, ale nedokázal je správně interpretovat. Expanzi vystihuje Hubblův vztah $V = H \times d$, kde V je rychlost vzdalování dvou galaxií ve vzdálenosti d a koeficient úměrnosti H mezi rychlostí vzdalování galaxie a její vzdáleností se nazývá **Hubbleova konstanta**.

Velký třesk

Pokud vesmír expanduje, byl v minulosti teplejší a hustší. George Gamow vytvořil spolu se svým asistentem Ralphem Alpherem první scénář horkého vzniku vesmíru. Na slavném článku se podepsal na nálehání Gamowa i jaderný fyzik Hans Bethe. Tím se autory stali Alpher, Bethe a Gamow, což připomíná řecká písmena alfa, beta a gama a naznačuje principiální důležitost modelu...

Gamow se zabýval tvorbou prvků v průběhu Velkého třesku. Za teplot miliard stupňů došlo k vytvoření vodíku, helia a dalších lehkých prvků. Gamow určil procentuální zastoupení jednotlivých lehkých prvků ve vesmíru (podle tehdejších modelů silné interakce), které ne zcela odpovídalo skutečnosti, ale podle dnešních modelů silné interakce je v dobré shodě se skutečností. (Těžké prvky vznikaly až v nitru hvězd). Byl-li vesmír ve svých raných fázích horký, nacházel se v plazmatickém skupenství a záření bylo vázáno na hmotu. Tím se rozumí, že kvanta záření – fotony – silně interagovala s volnými elektrony přítomnými v plazmatu. Záření mělo charakter rovnovážného záření černého tělesa. Spolu s rozpínáním vesmíru docházelo k chladnutí hmoty se zářením. Asi 400 000 let po vzniku vesmíru končí jeho plazmatická éra (a tím i Velký třesk). Volné elektrony se stávají součástí atomárních obalů

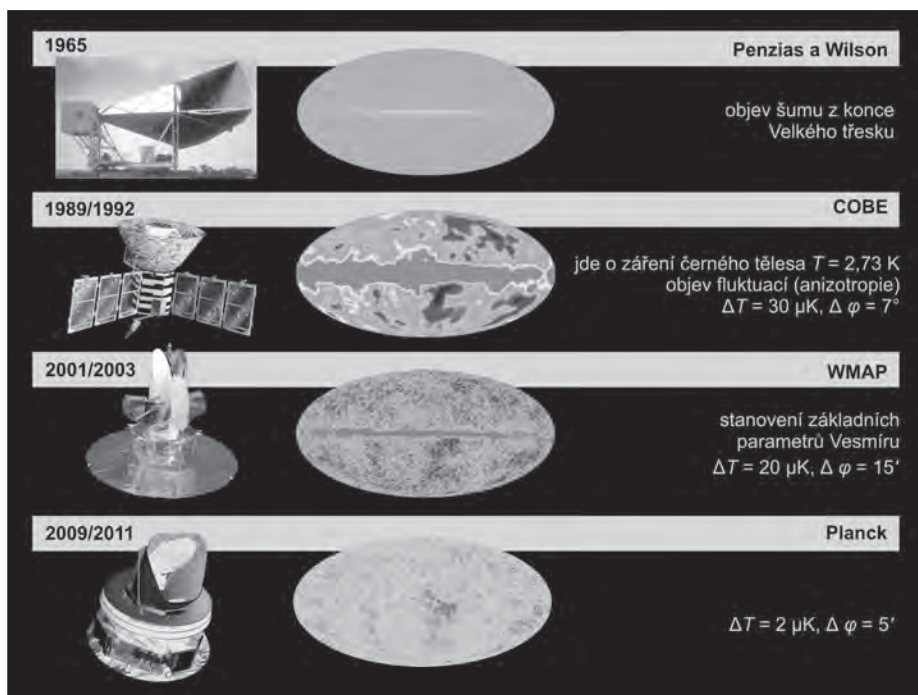
a látka je od této chvíle elektricky neutrální. Právě volné elektrony doposud udržovaly kontakt záření s látkou. Vesmír se stal pro záření průhledným a interakce záření s hmotou minimální. Záření se oddělilo od látky a započalo svou samostatnou pouť vesmírem.

Teorie horkého vzniku světa z horké a husté pralátky měla zpočátku mnoho odpůrců. Jedním z nich byl Fred Hoyle, který posměšně nazval obdobné teorie „velkým třeskem“. Chtěl tím naznačit, že jde o jakési třesknutí nebo plácnutí do vody, které je nesmyslné. Název se ale překvapivě ujal a budoucnost dala zapravdu zastáncům Velkého třesku.

Reliktní záření

Reliktní záření z konce Velkého třesku bylo objeveno náhodně až v roce 1965. Arno Penzias (1933) a Robert Wilson (1936) prováděli testy trychtýřovité antény, pomocí které chtěli udělat radiovou přehlídku oblohy. Anténa patřila Bellovým telefonním laboratořím, dříve byla využívána pro komunikaci s družicí Echo. Po rekonstrukci antény pro astronomické účely zaznamenali Penzias a Wilson neobvyklý šum. Postupně vyloučili jako možný zdroj šumu párek v anténě hnízdících holubů, blízka města, Slunce i střed Galaxie. Šum přicházel rovnoměrně z celého vesmíru. Americký teoretik Peebles navrhl, že by mohlo jít o reliktní záření. Za objev reliktního záření získali Penzias a Wilson Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1978. V současnosti zkoumaly reliktní záření sondy Planck a WMAP, v minulosti to byla slavná družice COBE. Objev reliktního záření ukončil debaty o existenci či neexistenci Velkého třesku. V reliktním záření se totiž díváme na samotný závěr Velkého třesku. Anténa Penziase a Wilsona měla maximální citlivost pro vlnovou délku 7,3 cm a nebyla proto pro pozorování reliktního záření o vlnové délce 1 mm příliš vhodná. Další přístroje už mu byly „šité na míru“.

Reliktní záření je dnes pravděpodobně nejdůležitějším zdrojem informací z minulosti našeho vesmíru. Mnoho kosmologických parametrů se dá zjistit rozbořením fluktuací reliktního záření a polarizace reliktního

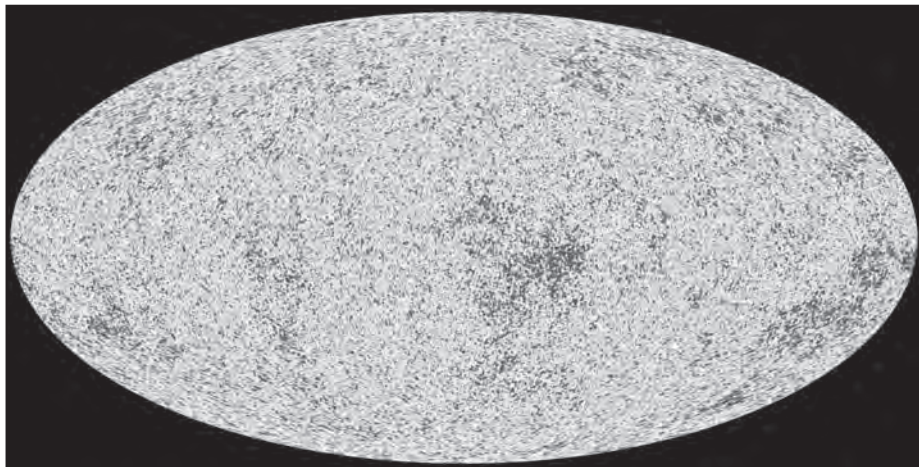


Obrázek 1: Jednotlivé etapy výzkumu reliktního záření.

ního záření (COBE 1998, WMAP 2001, Planck 2009, 2013). V raném vesmíru se vyskytovaly zárodečné fluktuace hmoty, které se v budoucnu vyvinuly v dnes známé vesmírné struktury – galaxie a kupy galaxií. Pokud látka interagovala intenzivně se zářením, přenesl se obraz těchto struktur i do elektromagnetického záření vesmíru. Po oddělení záření od hmoty (400 000 let po Velkém třesku) zůstaly fluktuace hmoty vtištěny do reliktního záření podobně jako paleolitický otisk trilobita v prvohorní usazenině. Odchytky těchto fluktuací od průměrné hodnoty jsou asi 1/100 000. Informace nesená fluktuacemi reliktního záření je nesmírně cenná.

Fluktuace reliktního záření jsou otiskem fluktuací hmoty v raných fázích vývoje vesmíru, které jsou v podstatě zvukovými vlnami šířícími se vesmírem. A tak jako u zvukových vln můžeme rozkladem do jednotlivých harmonických určit charakteristiky nástroje, ze kterého zvuk přichází, můžeme ze zastoupení různě velikých (úhlově) fluktuací

usuzovat na vlastnosti vesmíru. Matematicky se tato analýza provádí pomocí spektra fluktuací – jejich rozkladu do kulových funkcí neboli do jednotlivých frekvencí. Výsledkem analýzy jsou základní kosmologické parametry našeho vesmíru, poslední údaje získané ze sondy Planck jsou v následující tabulce.

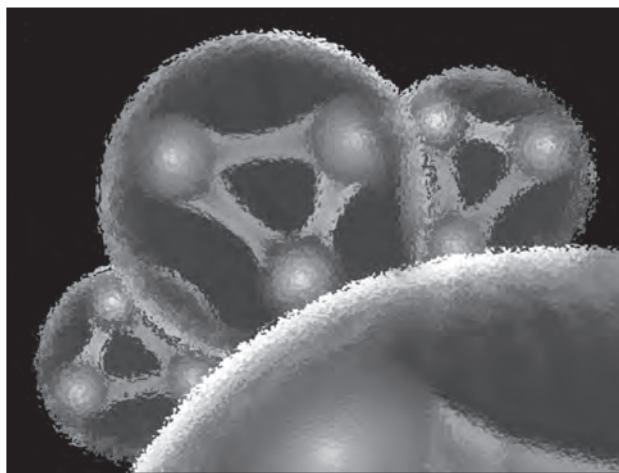


Obrázek 2: Mapa fluktuací reliktního záření pořízená sondou Planck.

Parametr	Planck
stáří vesmíru	$13,8 \times 10^9$ let
konec Velkého třesku	380 000 let
první hvězdy	400 000 000 let
Hubbleova konstanta	67 km/s/Mpc
množství atomární látky	5 %
množství temné hmoty	27 %
množství temné energie	68 %

Kvarkové-gluonové plazma

V roce 2000 se ve středisku částicového výzkumu CERN po šesti letech pečlivých experimentů podařilo připravit **kvarkové-gluonové plazma** – formu látky, která se ve vesmíru nacházela 10 mikrosekund po jeho vzniku. Experimenty poté deset let pokračovaly ve Spojených státech, ve známé Brookhavenské národní laboratoři, na urychlovači RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*). Nyní pokračují opět v Evropě na největším urychlovači světa LHC (*Large Hadron Collider*) a zároveňná pralátka se zde připravuje na detektoru ALICE.

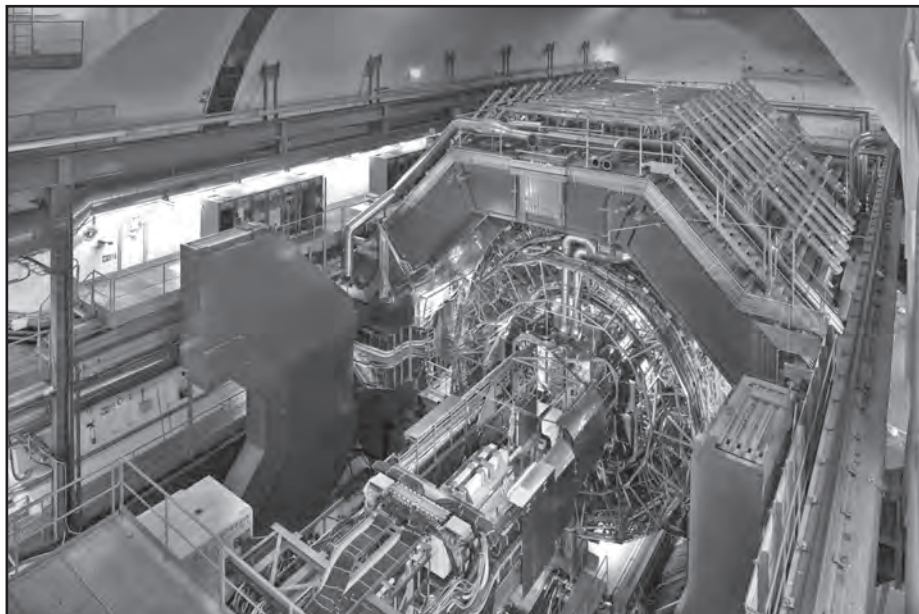


Obrázek 3: Uvnitř neutronů a protonů se skrývají kvarky spolu s gluony, které je udržují pohromadě. Neutrony a protony vznikly z kvarkového-gluonového plazmatu v období 10 mikrosekund po vzniku vesmíru.

Urychlené jádro olova bylo nastřeleno na statický terčik. Uvolněná energie látku zahřála na teplotu 10^{12} K, tedy stotisíckrát vyšší než v nitru Slunce. Jádra byla stlačena natolik, že jejich hustota vzrostla na dvacetinásobek jaderné hustoty. Za těchto „pekelných“ podmínek došlo k uvolnění kvarků a gluonů z protonů a neutronů a vzniklo na kratičký okamžik kvarkové-gluonové plazma. To je pralátka, ze které ve vesmíru kdysi neutrony a protony vznikaly. Ukázala se zcela nová cesta výzkumu vesmíru a současně zcela nové odvětví kosmologie – přímé experi-

menty na největších urychlovačích světa. Experimentům tohoto typu se přezdíval Malý třesk.

V současnosti se hledá stavová rovnice oné pralátky a v době psaní textu se ví, že kvarkové-gluonové plazma se chová jako jakási atypická kapalina, má tedy svými vlastnostmi blíže ke kapalinám než k plynům.



Obrázek 4: Detektor ALICE je jedním z detektorů na největším urychlovači světa LHC. Právě na něm se připravuje zárodečná pralátka – kvarkové-gluonové plazma.

Temná hmota

Již v roce 1933 upozornil Fritz Zwicky, že ve vnějších oblastech galaxií jsou rotační rychlosti vyšší než teoretické, což odpovídá většímu množství hmoty v galaxiích, než se pozoruje. Kdyby byla v galaxiích jen pozorovaná hmota, hvězdy v periferních částech by díky odstředivé síle odlétly do mezigalaktického prostoru. Proto by galaxie měly obsahovat skrytou hmotu, kterou nevidíme. Nejpresnější měření byla od té doby provedena pro velké spirální galaxie na vlnové délce 21 cm odpovídající přechodu mezi ortovodíkem a paravodíkem. Tato čára je dobře

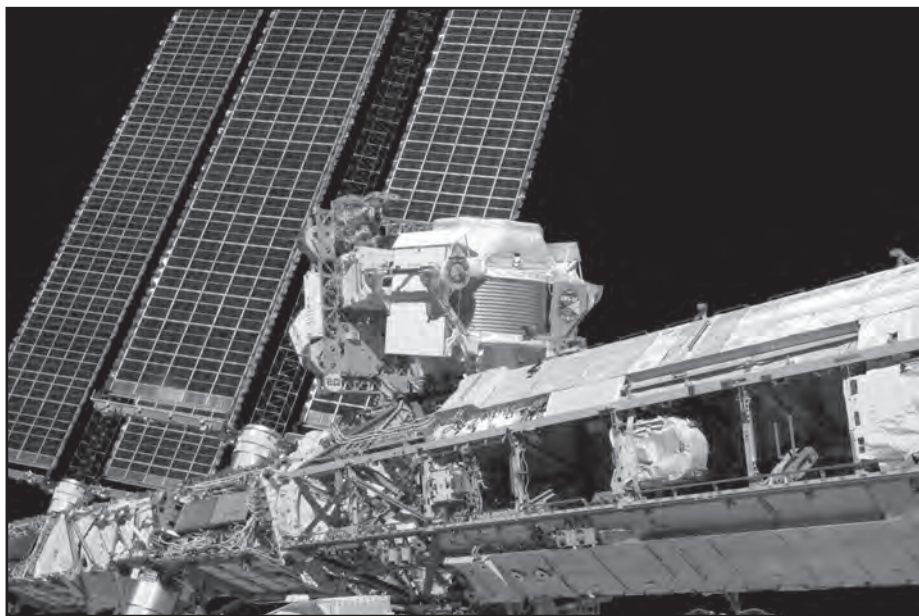
pozorovatelná právě v periferních částech galaxií. Měření potvrdila přítomnost neznámé temné hmoty v galaxiích.

Svítící (registrované) hmoty v galaxiích je jen asi 1 %. Malá část hmoty atomární (baryonové) povahy může být soustředěna ve velmi starých a málo svítících bílých trpaslicích, kteří doposud nebyli pozorováni. Jde pravděpodobně o staré vyhasínající hvězdy, které vyplňují celé haló Galaxie. Obdobně tomu bude asi i u ostatních galaxií. K řešení problému temné hmoty však jen bílí trpaslíci nestačí. Podle současných znalostí tvoří temná hmota nebaryonové povahy zhruba 50 % hmoty galaxií a 27 % hmotnosti celého vesmíru. Temná hmota ve vesmíru je z drtivé většiny tvořena chladnou temnou hmotou (*CDM, Cold Dark Matter*). Kdyby byla temná hmota horká (*HDM, Hot Dark Matter*), velká kinetická energie jejích částic by vedla k difúzi těchto částic a k vyhlazení zárodečných fluktuací hustoty ve vesmíru. Přetrvání těchto fluktuací je ale zárukou pozdějšího vzniku pozorovaných struktur ve vesmíru – galaxií a kup galaxií. Pokud existuje horká temná hmota, může jí být jen malá část.

Nejčastěji se uvažuje o tom, že temnou hmotu tvoří exotické částice nebaryonové povahy, například wimpy (*Weakly Interacting Massive Particles*, slabě interagující hmotné částice). Vhodnými kandidáty na tyto částice (*wimpy*) jsou nejlehčí superpartneři, tzv. neutralina, jejichž existenci předpokládají supersymetrické teorie.

Temnou hmotu hledá několik desítek experimentů. Detektory nejnadějnějších kandidátů – wimpů – je možné rozdělit na pět skupin: scintilační, ionizační, polovodičové, tepelné a nepřímé. K neznámějším patří scintilační detektory – částice temné hmoty při přímé srážce s atomovým jádrem ve scintilátoru (například NaI) vytvoří elektromagnetický záblesk detekovaný fotonásobičem. Na obdobném principu pracují ionizační detektory, při srážce dojde k ionizaci. Jako médium může posloužit kapalný vzácný plyn, zpravidla xenon nebo argon. Jiným typem jsou polovodičové detektory, ve kterých namísto záblesku či ionizace dojde ke vzniku elektronu a díry, jež se následně detekují elektronicky. Existují i detektory, které fungují jako kalorimetry měřící energii předanou částicí temné hmoty atomovému jádru. Všechny tyto detektory jsou

založeny na sledování výsledku srážky wimpu s jádrem, některé jsou i kombinacemi výše uvedených typů. Detektory jsou vždy umístovány hluboko pod zemí, aby byla potlačena detekce částic jiného původu. Wimpy mohou slabě interagovat s běžnou látkou, elastickými procesy ztrácejí postupně energii a nakonec mohou být gravitačně zachyceny Zemí, Sluncem nebo Galaxií. Zachycené wimpy by měly anihilovat za vzniku rentgenových fotonů (v galaktickém haló) nebo se při srážkách měnit na částice X a neutrina (v Zemi, ve Slunci nebo v kulových hvězdokupách). Nepřímá detekce je založena na hledání produktů těchto procesů: rentgenových fotonů, neutrín a elektron-pozitronových párů.



Obrázek 5: Detektor AMS je umístěný na rameni Mezinárodní kosmické stanice. Zachytává částice hmoty a antihmoty přicházející z hlubin vesmíru.

K nejznámějším detektorům patří italský scintilační detektor DAMA (*Dark Matter*) umístěný pod horou Grand Sasso. Je provozován ve dvou konfiguracích. První je DAMA/NaI. V tomto detektoru je celkem 9 krystalů NaI o hmotnosti 9,7 kg. Okolí detektoru vypadá jako hranatá cibule. Prvním obalem je měď, pak následuje olovo, další vrstva je

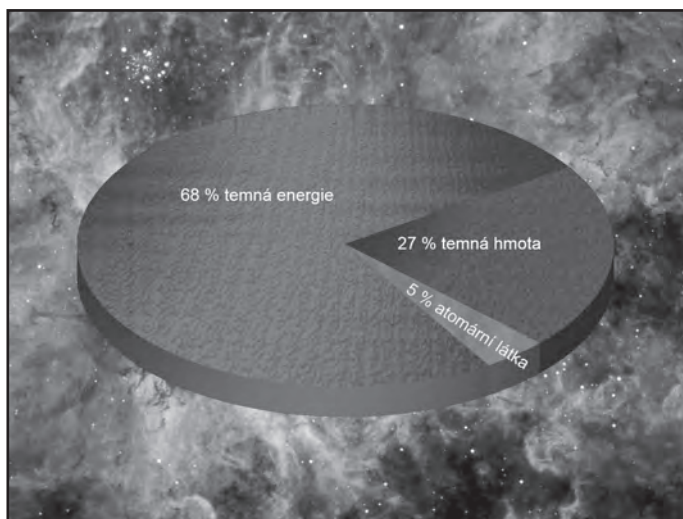
z polyetylénu a vosku, následuje atmosféra z velní čistého dusíku, která zamezuje kontaminaci radonem, poslední vrstvu tvoří metr tlustý betonový kontejner. To vše je umístěno hluboko pod zemí. Experimentem druhé generace je konfigurace DAMA/LIBRA, kde je obdobných detektorů 25 (celková hmotnost krystalů je 250 kilogramů). DAMA/LIBRA sbírá data od roku 2003. Oba experimenty nacházejí signál s roční variací, která by mohla odpovídat tomu, že se Země při oběhu Slunce pohybuje jednou ve směru galaktického haló wimpů a o půl roku později proti. Výsledek ale nebyl potvrzen žádným jiným experimentem. Obdobný kladný signál našly i experimenty CRESST a CoGeNT. V roce 2013 objevil detektor AMS, který se nachází na rameni Mezinárodní kosmické stanice, nadbytek pozitronů v kosmickém záření. Ten může pocházet buď z okolí pulzarů, nebo z anihilace částic temné hmoty. Vidíme tedy, že hledání částic temné hmoty je v posledních letech velmi nadějně.

Temná energie

Odhad velikosti základních kosmologických parametrů, jako je například Hubblova konstanta, se vždy potýkal s přesným určením velkých vzdáleností ve vesmíru. Čím vzdálenější objekty, tím hrubší byl odhad vzdálenosti. U nejbližších objektů lze využít trigonometrie, například měřením paralaxy blízkých hvězd. Na středních vzdálenostech pomohou cefeidy – proměnné hvězdy u nichž je známa závislost svítivosti na periodě. Ze změřené periody se spočte skutečný zářivý výkon cefeidy a z její relativní magnitudy na obloze potom určíme, jak je ve skutečnosti daleko. Metoda cefeid pomáhá i v blízkých galaxiích. V kosmologických vzdálenostech ale do konce 20. století byly prováděny jen hrubé odhady. Chyběla „standardní svíčka“, pomocí které by se určovaly vzdálenosti ve vesmíru.

Na konci dvacátého století se k určování vzdálenosti začaly používat, jako zdaleka viditelné standardní svíčky, supernovy typu Ia. Supernova typu Ia je závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy, ve které dochází k přenosu látky z obra na bílého trpaslíka, který tak zvětšuje svoji hmotnost. Po překročení Chandrasekharovy meze ($1,4 M_{\odot}$) se bílý trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy, dojde k explozivnímu termonu-

kleárnímu hoření C, O na Ni 56 v celém objemu trpaslíka a uvolněná potenciální energie se explozivně projeví jako supernova typu Ia. Množství energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze jednoznačně identifikovat podle tvaru jejího spektra. Navíc jsou tyto objekty ve vesmíru relativně časté, v průměrné galaxii dojde ke dvěma explozím za století.

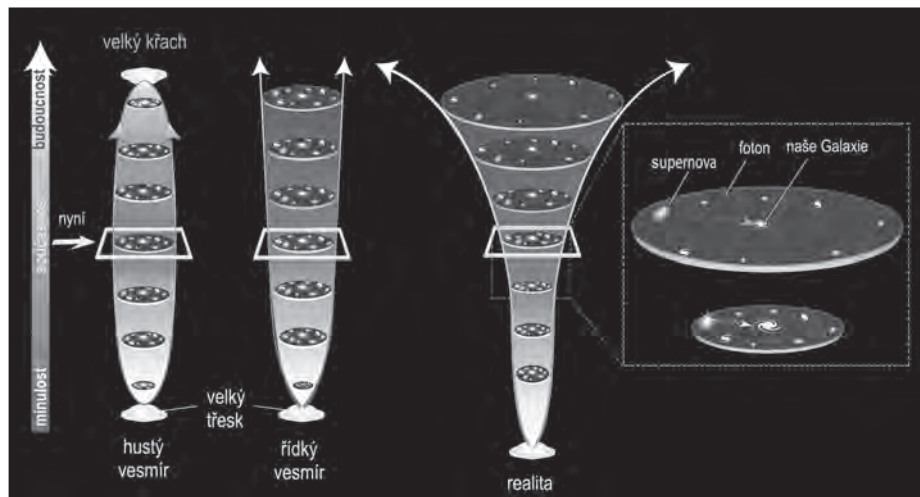


Obrázek 6: Z pečlivého rozboru fluktuací reliktního záření se ukázalo, že ve vesmíru je nejméně ze všeho atomární látka.

V letech 1998 a 1999 prováděly měření vzdálenosti a červeného posuvu (a tím expanzní funkce) supernov Ia dvě nezávislé vědecké skupiny. Jedna byla vedená Saulem Perlmutterem (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999) a druhá Adamem Riessellem (Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1998). Obě skupiny na vybraném souboru supernov určovaly dvě veličiny: vzdálenost z jejich skutečné jasnosti (průběhu světelné křivky) a rychlost expanze vesmíru z červeného kosmologického posuvu spektrálních čar. To umožnilo určit, jak se vesmír rozpínal v různých časových údobích. Výsledek byl překvapivý. Spíše než zpomalování rozpínání vesmíru bylo naměřeno jeho urychlování. To zna-

mená ve svém důsledku přítomnost temné energie ve vesmíru, která se projevuje záporným tlakem a způsobuje urychlování expanze vesmíru. Tato temná energie se projeví nenulovou hodnotou kosmologické konstanty, která z Perlmutterových i Riessových měření vycházela kolem 70 % celkové hustoty vesmíru. Nejvzdálenější použitá supernova byl objekt 1977ff.

Vakuum v kvantové teorii je netriviální dynamický systém, ve kterém se neustále kreují a anihilují páry virtuálních částic a antičástic. Tyto páry způsobují známé jevy, jako je polarizace vakua, Lambův posuv spektrálních čar i další. Energie vakua je nenulová a mohla souviset například s inflačními fázemi vesmíru v jeho počátcích. Vakuová energie se s expanzí nezmenšuje, zůstává konstantní (je dána hustotou virtuálních párů v objemové jednotce). Právě nenulová hodnota vakuové energie je zodpovědná za nenulovost kosmologické konstanty v relativistické teorii gravitace. Část této energie by mohla způsobovat zrychlenou expanzi vesmíru a být onou hledanou temnou energií.



Obrázek 7: Zrychlená expanze vesmíru byla objevena v roce 1998 a jednalo se o jednu z největších překvapení současné kosmologie.

Pokud temná energie není vakuové povahy, je její původ zcela nejasný. Většinou se hovoří o skalárním poli, které by mělo být zodpovědné za temnou energii. Toto pole se nazývá kvintesence a mohlo by být do-

sud neznámou pátou interakcí. Také je ale možné, že projevům gravitace na velkých vzdálenostech prostě nerozumíme a naše teorie gravitace není pro kosmologické vzdálenosti správná..

Reliktní gravitační vlny

Když Albert Einstein publikoval v roce 1916 obecnou relativitu, novou a revoluční teorii gravitace, nemohl tušit, jaké důsledky jeho teorie bude mít. Experimentální důkazy o správnosti koncepce pokřiveného času a prostoru v blízkosti hmotných těles přicházely jeden za druhým. Museli jsme se smířit s existencí natolik extravagantních objektů, jako jsou gravitační čoky nebo černé díry a s jevy, které jsou na hranici naší představivosti – strháváním časoprostoru rotujícím tělesem či gravitačními vlnami, eluzivními záhyby v předivu času a prostoru, šířícími se hlubinami vesmíru rychlostí světla.

Pokud v prvopočátečním období existence vesmíru proběhla tzv. inflační fáze, tj. velmi prudká expanze, měly by při ní vzniknout gravitační vlny, kterým říkáme reliktní gravitační vlny. Samotné vlny by mohly být detekovány interferometry postavenými ve vesmíru. Jejich ramena by musela být dlouhá miliony kilometrů. Ale existuje možnost nepřímé detekce. Reliktní gravitační vlny by se mohly otisknout do reliktního záření v podobě charakteristické polarizace. Na počátku roku 2014 se zdálo, že byl tento otisk nalezen s pomocí zařízení BICEP 2 instalovaném na Scottově-Amundsenově základně na jižním pólu. Další rozbor měření záznamů ze sondy Planck ale objev nepotvrdil, podstatná část signálu souvisí s prachem v Mléčné dráze, který má magnetické vlastnosti a také ovlivní reliktní záření. Nejde tedy o hledaný signál z pozadí, ale o nechtěný signál z popředí.

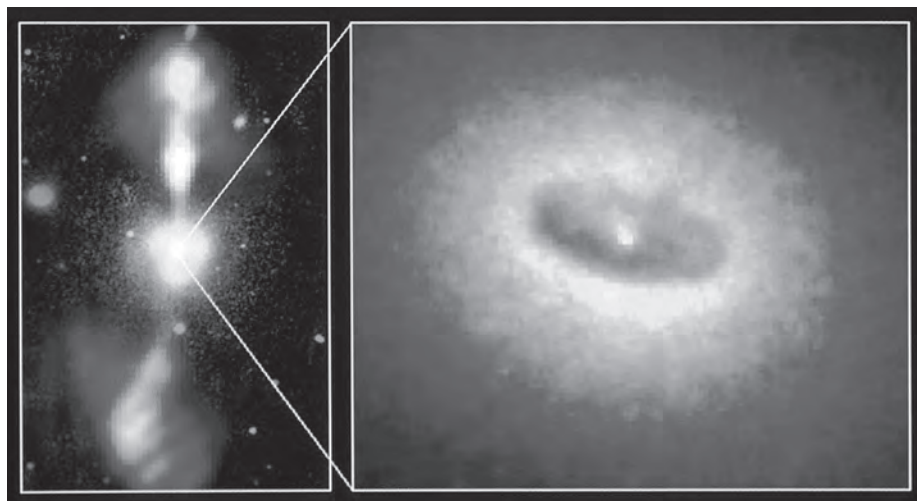
V případě detekce reliktních gravitačních vln, ať už přímé či nepřímé, by šlo o velmi významný objev umožňující zkoumat samotný vznik vesmíru.



Tajemství černých děr

Petr Kulhánek

Černé díry byly po mnoho desetiletí tajemnými objekty. Staly se vděčným námětem sci-fi literatury. Pocit tajemna a podivných jevů, které jsou nad naše chápání, je doprovázel na každém kroku. A dnes? Černé díry si za poslední desetiletí razantně vybudovaly své postavení mezi běžnými astronomickými objekty. Poznali jsme černé díry hvězdných rozměrů stejně tak jako černé díry o hmotnosti celé galaxie.



Obrázek 1: Obří černá galaktická díra v centru galaxie NGC 4261 na snímku z HST (1995).

Často se zdá, že myšlenka existence černých děr je velmi nová. Opak je ale pravdou. Historicky první úvahy o možné existenci objektů, ze kterých nemůže uniknout ani světlo, pravděpodobně pochází od Johna Michella již z roku 1783. Pierre Simon Laplace v roce 1798 odvodil na základě představ Newtonovy mechaniky rozměry tohoto hypotetického tělesa ze vztahu pro únikovou rychlost, do kterého dosadil místo únikové rychlosti rychlost šíření světla. V roce 1916 odvodil stejný vztah, ale na základě Einsteinovy obecné relativity, Karl Schwarzschild. Od té

doby hovoříme o tzv. Schwarzschildově poloměru. Pojmenování „černá díra“ pochází od Johna A. Wheelera a je až z roku 1967. Zaujme-li těleso menší rozměry než je Schwarzschildův poloměr, nemůže ho již opustit žádné jiné těleso, dokonce ani fotony – částice světla. V přírodě se tak stane vždy, když gravitační síly převládnu nad ostatními silami a přivodí nekontrolovatelné hroucení objektu. Jedna z „ukázkových“ černých děr se nachází například v jádru galaxie NGC 4261 v souhvězdí Panny. Velmi dobře odpovídá našim teoretickým představám a byla objevena Hubbleovým dalekohledem v roce 1992.

Schwarzschildův poloměr

Proveďme takovýto myšlenkový experiment. Blikněme baterkou v okolí nějaké hvězdy (například Slunce) a sledujme, kam se za jednu sekundu rozšíří světelná vlnoplocha. Výsledkem bude kulová vlnoplocha. Představme si nyní, že máme tu moc stlačit veškerou hmotu Slunce do koule o poloměru pouhé 3 km. Experiment s baterkou dopadne úplně jinak. Světlo je strháváno křivým časoprostorem směrem ke „Slunci“. Čím blíže blikneme, tím více. Přibližně ve vzdálenosti 3 km nastane zajímavý jev. Světlo je hvězdou natolik strháváno, že žádný foton již neletí směrem ven. Jedině do centra letí fotony jako dříve. Kdyby se naše Slunce stalo černou dírou, mělo by Schwarzschildův poloměr právě 3 km, pro naši Zemi vychází 9 mm. Kdyby bylo možné nějakými procesy vtěsnat Zeměkouli do kuličky o poloměru 9 mm, stala by se také černou dírou. Na počest Karla Schwarzschilda (1873-1925), který jako první spočetl rozměr černé díry z obecné relativity, byl pojmenován jeden z kráterů na Měsíci. Jeho souřadnice jsou: $70^{\circ}6'N$, $121^{\circ}12'E$.

V přírodě nacházíme **černé díry dvojího typu**.

1. **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 pozorují.
2. **Galaktické černé díry:** Černé díry s hmotností srovnatelnou s hmotností galaxií nebo jejich jader. Tvoří jádra většiny galaxií, včetně naší vlastní Galaxie. Pozorována je řada objektů tohoto

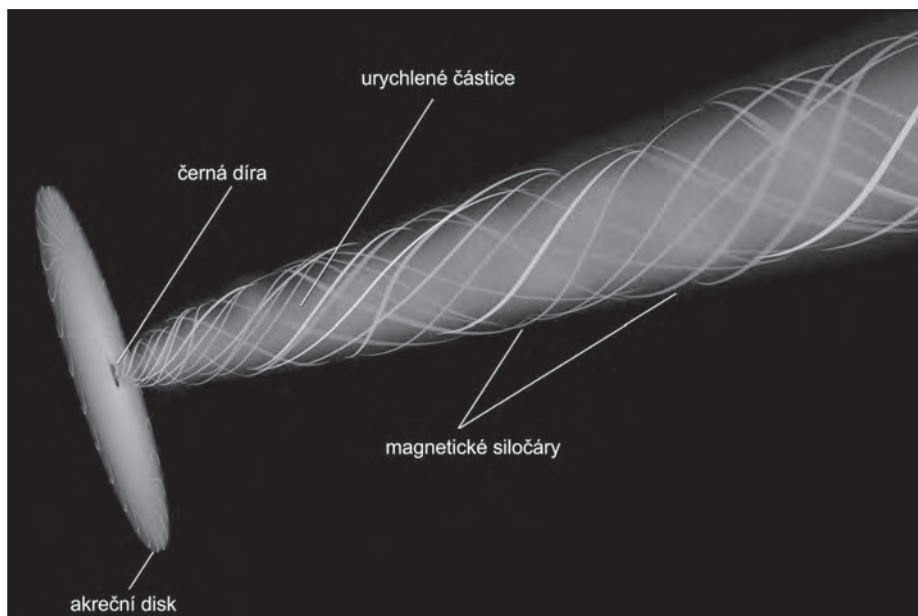
typu. Není ale dosud jasné, co bylo dříve, zda centrální obří černá díra či galaxie.

Často se diskutuje o možnosti existence tzv. prvotních (primordiálních) černých děr: tyto černé díry by měly mít nepatrné rozměry elementárních částic a mohly vznikat v raných fázích vývoje vesmíru. Jestliže existují, měly by díky Hawkingovu vypařování intenzivně zářit. Nikdy ovšem pozorovány nebyly.

Okolí černé díry

V okolí rotující černé díry se vyskytuje značné množství látky. Vně černé díry vytvoří tzv. prachoplynný torus, z něhož látka padá po spirále do černé díry. Ve vnitřní části se látka třením zahřívá a vytvoří tzv. **akreční disk** – oblast plazmatu, jež intenzivně září ve všech oborech spektra. V akrečním disku jsou silná magnetická pole.

Část částic padajících do černé díry je polem vymrštěna do dvou výtrysků relativistických částic. Tyto výtrysky opět intenzivně září.



Obrázek 2: Matematický model výtrysku z největší známé černé díry nacházející se v centru galaxie M 87.

V místech interakce výtrysků s okolním prostředím je generováno radiové záření. Výtrysky proto často končí intenzivními radiovými laloky. Mechanismus vzniku výtrysků detailně popisuje tzv. Blandfordův-Znajekův proces na základě interakce černé díry s okolním magnetickým polem.

Termodynamika černých děr

Černé díře lze v jistém smyslu přiřadit teplotu. Poprvé to udělal Beckenstein pomocí myšlenkového experimentu s kabinou výtahu plnou záření, která se spouští na černou díru. Záření z kabiny „vysypeme“ do černé díry a výtah vrátíme zpět. Systém tak koná práci, neboť kabinka výtahu jede nahoru bez záření a je tedy lehčí. Beckenstein celý experiment chápal jako tepelný stroj. Naplnění výtahu zářením odpovídá zahřátí pracovního média ohřívacem a vysypání záření do černé díry odpovídá ochlazení média chladičem. Celá černá díra tak představuje chladič tohoto zvláštního tepelného stroje. Beckenstein použil Carnotův vztah pro účinnost tepelného stroje a odvodil teplotu chladiče (černé díry). Celou úvahu později rozpracoval Hawking v rámci kvantové teorie.

Se zavedením teploty černé díry je možné zavést i pojem entropie. Ta je úměrná povrchu černé díry. Lze ukázat, že ať probíhají jakékoliv procesy, včetně spojování černých děr, celkový povrch všech děr se nezmenší. Povrch černé díry v jistém smyslu nahrazuje pojem entropie klasického souboru částic. Díky entropii přiřazené tímto způsobem černé díře se entropie těles spadlých do černé díry ve vesmíru neztrácí.

Tvrzení, že veškeré vlastnosti látky v černé díře jsou dány charakteristikami na povrchu (entropií), se nazývá holografický princip. Mnozí se dnes pokouší aplikovat holografický princip na celý vesmír. Tam ale není ani u uzavřeného ani u otevřeného vesmíru zřejmé, co je jeho povrch. Zpravidla se nahrazuje horizontem částic (pozorovatelným vesmírem). Při inflační fázi a následném ohřevu, kdy se produkuje velké množství entropie, nemůže holografický princip v této podobě platit. Zdá se, že neplatí ani v uzavřeném vesmíru.

V blízkosti horizontu černé díry probíhají kvantově mechanické pro-

cesy, které mají za následek únik energie z černé díry v podobě vznikajících částic. Tepelné spektrum záření odpovídá absolutně černému tělesu s Beckensteinovou-Hawkingovou teplotou, vlnová délka maxima vyzařování je přibližně rovna Schwarzschildovu poloměru. Čím menší je černá díra, tím intenzivnější je vypařování. Poprvé tento proces teoreticky zpracoval Steven Hawking. Nejčastěji se popisuje pomocí kreace a anihilace virtuálních párů. Ve vakuu neustále vznikají a zanikají páry částice-antičástice (střední kvadratické fluktuace polí musí být díky relacím neurčitosti pro pole nenulové). V blízkosti horizontu zůstane jeden člen páru pod horizontem a druhý se pro vnějšího pozorovatele vynoří jakoby z ničeho v blízkosti horizontu. Pár nezanikne, ale jeden člen se dostane pod horizont a druhý se objeví nad horizontem jako vyzařená částice. Jiným možným pohledem na jev Hawkingova vypařování je jistá analogie tunelového jevu. Částice z nitra černé díry jakoby tuneluje bariérou o velikosti Schwarzschildova poloměru. Čím menší je díra, tím menší bariéra, tím snadnější tunelování, tím více díra září. A do třetice ještě jeden pohled na stejný jev: Můžeme si představit, že pod horizontem se částice po krátkou dobu (tak, aby se nenarušily Heisenbergovy relace neurčitosti) pohybuje nadsvětelnou rychlostí. Nadsvětelná rychlost nevadí – nepřenáší se informace a není pozorovatelná zvnějšku. U malé černé díry postačí kratší doba pohybu nadsvětelnou rychlostí a proces je tak pravděpodobnější.

Hmota v černé díře tak není navěky ztracena, ale postupně se opět „vypařuje“ do okolního prostoru. Tento proces je velmi pomalý a hvězdné díry se tímto procesem vypaří za dobu, která mnohonásobně překračuje stáří našeho vesmíru.

Hvězdné černé díry

Nejstarším kandidátem na černou díru je rentgenový zdroj Cygnus X-1 v souhvězdí Labutě. Jde o zdroj záření z naší Galaxie, který byl objeven v roce 1964. Byl zkoumán rentgenovými družicemi Uhuru a Einstein. Zdroj je vyso-



Obrázek 3: Fotografie Cyg X1 v radiové oblasti na vlně 21 cm. Patrně jsou typické radiové laloky.

ce proměnný a nepravidelný. Rentgenové záblesky mají trvání kolem 10 milisekund. To ale znamená, že zdroj těchto záblesků musí být velmi malý (za dobu trvání záblesku musí mít světlo možnost prolétnout z jednoho okraje objektu na druhý). Rozměry zdroje vycházejí dokonce menší než rozměry naší Země. Objekt je gravitačně vázán s blízkým modrým veleobrem HDE 226868 deváté magnitudy. Vzájemná oběžná perioda obou těles je 5,6 dne, vzdálenost 0,27 AU, precesní pohyb má periodu 294 dnů. Z těchto údajů vychází hmotnost kompaktního objektu $8 M_S$ a Schwarzschildův poloměr 24 km. Objekt ztotožnil s černou dírou anglický astronom Paul Murdin v roce 1971. V teoretických modelech soustavy se počítá s přetokem hmoty z modrého veleobra na černou díru. Právě tento přetok hmoty na černou díru je zodpovědný za rentgenové záblesky soustavy.



Obrázek 4: Vypařování černých děr. Kresba Ivan Havlíček.

Dalším zajímavým objektem je GRS 1915+105 v Orlu. Jde o zdroj gama záření, který je opět binárním zdrojem hvězdné velikosti s typickým akrečním diskem a dvěma výtrysky. Na počátku roku 1998 vydalo NASA zprávu o pozorování periodičnosti výtrysků. Výtrysky za půl hodiny vyvrhnou látku o hmotnosti asi 10^{23} kg (hmotnost menší planety), a to rychlostí blízkou rychlosti světla a potom přibližně na 5 minut zmizí. Z družice RXTE bylo pozorováno, že v okamžiku vzniku výtrysku se výrazně snižuje produkce RTG záření z disku. Síť radioteleskopů VLA pozorovala, že samotné výtrysky na počátku fáze vyvrhování hmoty září intenzivně také v oborech IR a R. Hmoty disku se pravděpodobně nějak transformuje do výtrysku a je periodicky vyvrhována ven. Celý mechanismus je ale značně nejasný. V této binární soustavě byl také pozorován jeden zajímavý relativistický efekt – strhávání časoprostoru vlivem rotace.

Galaktické černé díry

V centru eliptické galaxie NGC 4261 byl v roce 1992 Hubbleovým teleskopem objeven zkolabovaný objekt, který je dnes nejtypičtější ukázkou černé díry. Galaxie je vzdálená 10 miliónů světelných let ve směru souhvězdí Panny. V centru galaxie je masivní černá díra krmená prachem z tlustého akrečního disku o průměru 800 světelných let. Měřením rychlosti rotace prachového disku byla stanovena hmotnost černé díry na $400 \times 10^6 M_{\odot}$. Tato ohromná hmotnost se nachází v oblasti jen o něco málo větší než je naše Sluneční soustava. Akreční disk obklopující černou díru má hmotnost $10^5 M_{\odot}$. Snímky z dalekohledu HST z roku 1995 zaznamenaly poprvé strukturu disku, která pravděpodobně souvisí s vlnami a nestabilitami šířícími se diskem. Také se ukázalo, že černá díra s diskem není přesně v centru galaxie NGC 4261. Pro tento fakt zatím chybí uspokojivé vysvětlení.

Nejhmotnější obří černou dírou je objekt v centru obří eliptické galaxie M 87 v souhvězdí Panny. Hmotnost této černé veledíry se odhaduje na 7 miliard Sluncí. Na fotografii z dalekohledu HST (1994) byl nalezen akreční disk horkých plynů rotující kolem centra této obří galaxie. Známá jsou spektra různých částí disku. Z rychlosti rotace disku

Lze určit hmotnost centrálního objektu a z rozměrů disku lze odhadnout maximální rozměr objektu. Tyto výpočty vedly k natolik vysoké hmotě centrálního objektu, že v úvahu připadala jediné černá díra. Z ní uniká výtrysk horkých plynů, který obsahuje rychle se pohybující nabitě částice a je dlouhý 6 500 ly. Ve výtrysku byla nalezena vlákna o průměru 10 světelných roků svědčící o přítomnosti magnetických polí. Charakter výtrysku odpovídá modelům černých děr s tlustým akrečním diskem.

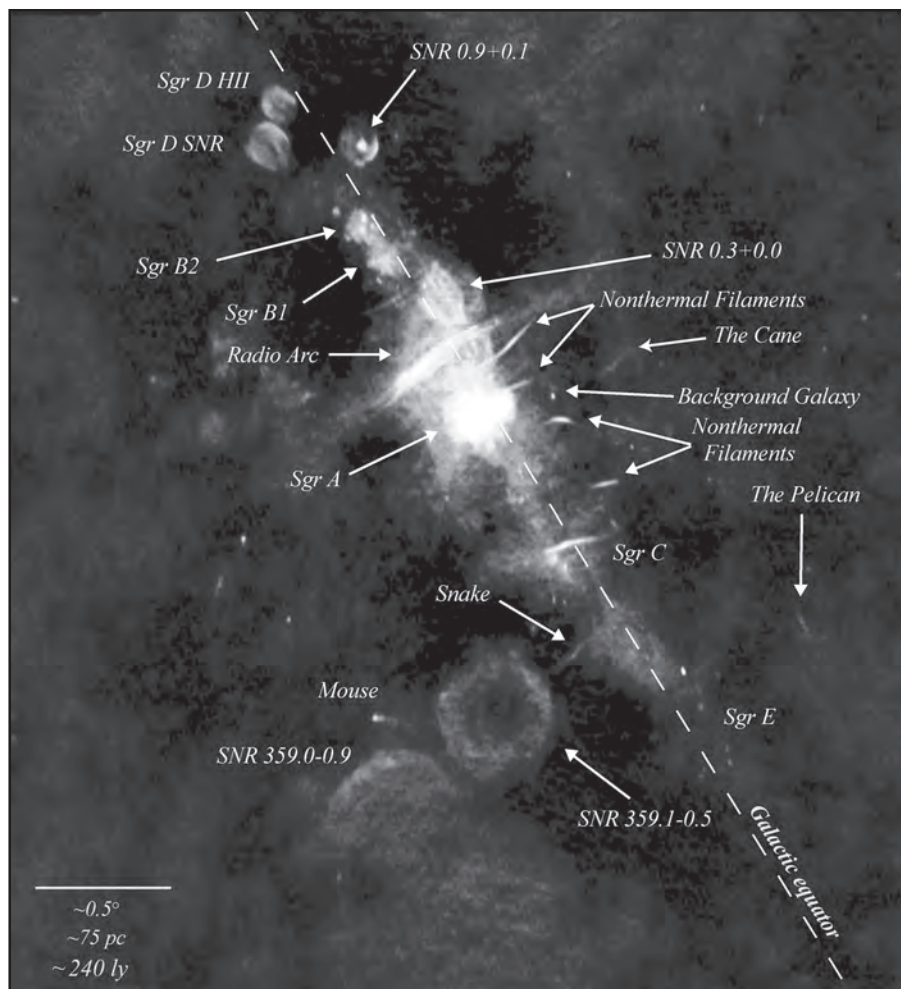
Černá díra v centru Mléčné dráhy

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

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

V roce 2005 byl proveden pokus o změření velikosti radiového zdroje Sgr A* za pomoci interferometrické metody VLBI. K měření byla použita síť radioteleskopů VLBA s úhlovým rozlišením 0,001" na nejkratší množné vlnové délce 3 mm. Toto úhlové rozlišení umožnilo v oblasti

zdroje sledovat detaily o rozměrech přibližně 1 AU (150×10^6 km), tj. jen čtrnáctkrát větší, než je Schwarzschildův poloměr předpokládané černé díry. Z měření bylo zřejmé, že zdroj radiového záření je menší než 1 AU. V roce 2008 byla provedena ještě přesnější měření (Andrea Ghezová, UCLA), která omezila velikost radiového zdroje Sgr A* na pouhých 50×10^6 km, tedy čtyřnásobek Schwarzschildova poloměru. Je zřejmé, že radiová emise přichází z těsné blízkosti horizontu černé díry.



Obrázek 5: Střed Galaxie na vlnové délce 90 cm fotografovaný radioteleskopickou sítí VLA.

Černá díra ve středu Galaxie je především zdrojem radiového záření, ale vysílá i v submilimetrové, infračervené a rentgenové oblasti spektra. Jak v infračerveném, tak v rentgenovém oboru vydává Sgr A* záblesky trvající přibližně hodinu a nepravidelně se opakující po několika hodinách. V infračerveném oboru jde o synchrotronné záření elektronů s teplotou 10^{11} K, malé procento elektronů je v průběhu záblesku ohřáto až na 10^{12} K. V rentgenovém oboru je záření generováno inverzním Comptonovým rozptylem. Ve všech pozorovaných záblescích byla na VLT objevena v oboru $1,4 \div 4 \mu\text{m}$ kvaziperiodická složka se základní periodou 17 až 22 minut. Tato složka pravděpodobně souvisí s oběhem elektronů z vnitřní části akrečního disku kolem černé díry. Poslední stabilní orbita pro Schwarzschildovu černou díru o hmotnosti $4 \times 10^6 M_{\odot}$ má periodu přibližně 30 minut. Z přibližně dvacetiminutové periody záblesků plyne, že musí jít o rotující (Kerrovu) černou díru, která kolem sebe svou rotací strhává časoprostor (Lenseův-Thirringův jev). Samotná geneze záblesků je nejasná, nejčastěji se uvažuje o přepojení magnetických siločar (vždy po několika hodinách), při kterém se uvolněná energie předává elektronům. Na světelné křivce záblesků tak lze najít jednotlivé píky odpovídající rekonexím a kvaziperiodickou složku odpovídající oběhu plazmatu kolem černé díry. Elektrony zahřáté při rekonexi poté předávají svou energii fotonům při inverzním Comptonově rozptylu, čímž vzniká rentgenová složka záblesků. Ze simultánního pozorování v infračerveném (VLT) i rentgenovém (XMM-Newton) oboru vyplynulo, že rozměry zdroje záblesků jsou cca 0,3 Schwarzschildova poloměru, což souhlasí s představou, že záblesky vznikají rekonexí magnetických siločar v malé oblasti akrečního disku. Všechny záblesky mají stejnou, velmi výraznou rovinu polarizace a jedná se o stabilní zdroj. Rovina polarizace záblesků bude pravděpodobně dána silnou toroidální složkou magnetického pole v akrečním disku. Popsaný model odpovídá měřeným datům, nicméně zatím není s jistotou potvrzen. Alternativou může být teorie rotující anomálie v akrečním disku.

V současnosti se v blízkosti centrální černé díry nachází oblak G2 a řada přístrojů má unikátní možnost sledovat v „přímém přenosu“ pád látky do obří černé díry.

Nobelova cena, hviezdy a kozmické žiarenie

Július Koza, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica

Alfred Nobel

Mladosť

Alfred Nobel bol švédsky chemik, inžinier, vynálezca, priemyselník, podnikateľ a zbrojár, ktorého najviac preslávil vynález priemyselnej trhavy dynamit. Narodil sa 21. októbra 1833. Jeho otec Immanuel bol stavebný inžinier a vynálezca, ktorý stavал mosty a budovy v Štokholme. V súvislosti so stavebnými prácami tiež experimentoval s rôznymi postupmi trhania hornín. V roku 1842 sa rodina presťahovala do Petrohradu. Immanuel Nobel získaval živobytie pre početnú rodinu okrem iného aj dodávkami pre ruskú armádu a vynálezom námorných mín, ktoré boli úspešne použité pri obrane Petrohradu počas Krymskej vojny (1853-1856). V Petrohrade získal mladý Nobel prvotriedne vzdelanie od súkromných učiteľov. Súčasťou jeho vzdelania boli prírodné vedy, jazyky a literatúra. Ako 17-ročný už plynule ovládal ústne aj písomne po švédsky, rusky, francúzsky, anglicky a nemecky. Najviac ho zaujímala anglická literatúra a poézia ako aj chémia a fyzika. Nobel mal uzavretú povahu, písal básne a už v mladosti veľa cestoval.



Obrázek 1: Alfred Nobel

Dynamit

Počas pobytu v Paríži sa Nobel oboznámil s nitroglycerínom, veľmi explozívnu tekutinou, ktorej sila vysoko prevyšovala dovtedy používaný pušný prach. Nitroglycerín bol však mimoriadne nebezpečný a ľahko kedykoľvek explodoval. Po návrat do Švédska v roku 1863 sa Nobel sústredil na spútanie nitroglycerínu a hľadanie jeho bezpečného využitia

v stavebníctve a baníctve. Pri pokusoch došlo k viacerým výbuchom. Pri jednom z nich v roku 1864 zahynul aj Nobelov brat a niekoľko ďalších osôb. V roku 1864 prišiel Nobel na myšlienku zmiešať nitroglycerín so špeciálnym pieskom a tak vytvoril ľahko a bezpečne použiteľnú pastu, ktorá sformovaná a zabalená do valčekov dostala meno dynamit. V rovnakom čase sa objavil v baníctve a stavebníctve vrták a pneumatické kladivo (tzv. zbíjačka). Valčeky dynamitu bolo možné ľahko vkladat' do navŕtaných otvorov v hornine a tak veľmi zlacniť a urýchliť ťažbu surovín a stavby mostov, kanálov a tunelov. Dynamit sa stal základom Nobelovho nesmierného bohatstva. Na jeho výrobu založil 90 tovární vo viac ako 20 krajinách na troch kontinentoch.

Hoci Nobel žil v Paríži, väčšinu času intenzívne cestoval po svete. Spisovateľ Victor Hugo ho preto nazval najbohatším európskym tulákom. Cestovanie Nobelovi nebránilo intenzívne pracovať a hľadať nové vynálezy. Mal svoje vlastné laboratóriá vo viacerých európskych mestách. Je známy jeho výrok o vzťahu domova, jeho neustáleho cestovania a práce: *„Môj domov je tam, kde pracujem, a ja pracujem všade.“* Nobel bol veľmi plodný vynálezca. Prvý patent získal ako 30-ročný a v čase jeho smrti vlastnil 355 patentov. Intenzívne pracovné nasadenie, cestovanie a introvertné povahové vlastnosti spôsobili, že si nezaložil vlastnú rodinu. Na sklonku života bol Nobel majiteľom aj švédskej oceľiarne a zbrojovky Bofors.

Nobelova cena

Ako pravý cestovateľ Nobel nezomrel v rodnom Švédsku, ale v Taliansku v meste San Rémo 10. decembra 1896. Zanechal po sebe majetok v prepočte 147 milión Eur. V závete Nobel ustanovil, že jeho majetok bude slúžiť ako odmena mužov a žien celého sveta za ich výnimočné výsledky v oblasti fyziky (Nobelova cena za fyziku), chémie (Nobelova cena za chémiu), medicíny alebo fyziológie (Nobelova cena za medicínu alebo fyziológiu), literatúry (Nobelova cena za literatúru) a mieru (Nobelova cena za mier). Dodatočne v roku 1968 Švédska kráľovská banka ustanovila Nobelovu cenu za ekonómiu. Kvôli prieťahom spôsobeným nesúhlasom Nobelových príbuzných (dedičov) so závetom boli

Nobelove ceny udelené po prvý krát až v roku 1901.

Nobelove ceny sú udeľované každoročne 10. decembra v deň výročia úmrtia Alfreda Nobela. Ceremonia prebieha v Štokholmskej koncertnej hale. Po príhovoroch odovzdáva švédsky kráľ laureátom diplom, medailu a šek finančnej odmeny. Napríklad v roku 2007 pripadlo na jednu Nobelovu cenu v prepočte 918 tisíc Eur. Medaila váži približne 200 g a je zhotovená z 18-karátového zeleného zlatá a je pokrytá 24-karátovým zlatom. Výnimkou je Nobelova cena mieru. Meno jej nositeľa oznamuje predseda Nórskeho Nobelovho výboru v Mestskej hale v Oslo za prítomnosti nórskeho kráľa a kráľovnej. Ďalšie podrobnosti o Nobelovom živote a cene sú na webovej stránke <http://www.nobelprize.org>.

Nobelove ceny za (astro)fyziku

V rokoch 1901 až 2014 bolo udelených celkovo 108 Nobelových cien za fyziku, z toho iba nominácie v deviatich ročníkoch bezprostredne súviseli s vesmírom a astrofyzikou. Ďalej je uvedený zoznam nositeľov takýchto Nobelových cien spolu s rokom a motiváciou udelenia ceny.

1936 - Victor Franz Hess „za objav kozmického žiarenia“

1967 - Hans Albrecht Bethe „za jeho prínos v teórii jadrových reakcií, hlavne za objavy týkajúce sa tvorby energie vo hviezdach“

1974 - Martin Ryle, Antony Hewish „za ich priekopnícky výskum v rádioastrofyzike: Ryle za jeho pozorovania a vynálezy, predovšetkým apertúrnej syntézy, a Hewish za jeho rozhodujúcu úlohu pri objave pulzarov“

1978 - Arno Penzias, Robert Wilson „za ich objav mikrovlnného reliktného žiarenia“

1983 - Subramanyan Chandrasekhar, William Fowler „Chandrasekhar: za jeho teoretické štúdie fyzikálnych procesov určujúcich štruktúru a vývoj hviezd, Fowler: za jeho teoretické a experimentálne štúdie jadrových reakcií dôležitých pre tvorbu chemických prvkov vo vesmíre“

1993 - Russell Hulse, Joseph Taylor „za objav nového typu pulzaru,

ktorý otvoril nové možnosti pre štúdium gravitácie“

- 2002 - Raymond Davis, Masatoshi Koshiha, Riccardo Giacconi
„Davis, Koshiha: za priekopnícke príspevky v astrofyzike, obzvlášť v oblasti detekcie kozmických neutrín. Giacconi: za priekopnícke príspevky v astrofyzike, ktoré viedli k objavu kozmických röntgenových zdrojov“
- 2006 - John Mather, George Smoot „za ich objav Planckovho rozdelenia energie a anizotropie kozmického reliktného žiarenia“
- 2011 - Saul Perlmutter, Brian Schmidt, Adam Riess „za objav zrýchľovania rozpínania vesmíru prostredníctvom pozorovania vzdialených supernov“

Kozmické žiarenie

Úvod

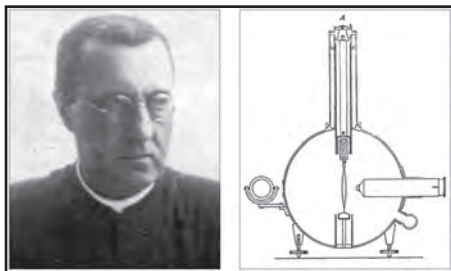
Vedecký svet si v roku 2012 pripomenul sté výročie objavu kozmického žiarenia, za ktorý bol rakúsky fyzik Victor Franz Hess v roku 1936 odmenený Nobelovou cenou. Tento objav stál pri zrode časticovej fyziky a extragalaktickej astrofyziky vysokých energií. Hess objavil kozmické žiarenie počas výškového letu balónom, ktorý štartoval z Ústí nad Labem a pristál v Pieskove, približne 50 km juhovýchodne od Berlína. Meraním počas letu do výšky 5300 m Hess ukázal, že intenzita prenikavého ionizujúceho žiarenia s výškou rastie. To naznačilo, že Zem je vystavená vysokoenergetickému žiareniu z kozmu. Prevratnosť tejto myšlienky bola v tom, že v tom čase bolo γ žiarenie (elektromagnetické žiarenie s energiou väčšou ako 100 keV) jediným známym ionizujúcim žiarením s dosahom väčším ako 30 cm. Preto sa predpokladalo, že neznáme žiarenie z kozmu je tiež γ žiarenie, a preto bolo pomenované ako „kozmicke žiarenie“. Názov sa zaužíval, hoci kozmické žiarenie študované dnes nie je v pravom slova zmysle žiarením, ale prúdom častíc. Hoci dnes vieme, že aj γ žiarenie z kozmu bombarduje Zem, kozmickým žiarením naďalej myslíme nabitú časticu a jadrá, ktoré tvoria rozhodujúcu časť dopadajúceho ionizujúceho žiarenia.

Mílníky na ceste k objevu

Charles Augustin de Coulomb si v roku 1785 všimol, že elektricky nabitá kovová guľa vo vzduchu, izolovaná od okolia, postupne stráca svoj náboj. William Crookes v roku 1879 pozoroval, že rýchlosť vybijania elektroskopu klesá s klesajúcim tlakom vzduchu. Krátko potom prišla éra prevratných objavov. Wilhelm Röntgen objavil röntgenové žiarenie a v roku 1896 Henry Becquerel rádioaktivitu. Röntgenové žiarenie a rádioaktivita uránových solí mali podobné prenikavé vlastnosti a obe mohli ionizovať vzduch. Krátko potom v roku 1898 Marie a Pierre Curie objavili rádioaktívne prvky rádium a polónium. Boli tak pripravené podmienky pre výskum elektrickej vodivosti vzduchu. Hlavným prístrojom bol elektroskop. Charles Wilson v roku 1901 ukázal, že ionizácia vzduchu sa neznižuje v tuneloch pod pevnými horninami a vyslovil myšlienku o mimozemskom pôvode neznámeho, mimoriadne prenikavého žiarenia. Hans Geitel a Julius Elster v roku 1908 zistili v solnej bani pokles ionizácie vzduchu o 28 %. V súlade s vtedy prevládajúcim názorom konštatovali, že zdrojom ionizujúceho žiarenia sú rádioaktívne prvky v zemskej kôre, pretože soľ v bani neobsahuje rádioaktívne prvky a má tieniace účinky na okolitú rádioaktivitu.

Theodor Wulf, nemecký jezuitský kňaz, zdokonalil elektroskop a zvýšil jeho citlivosť (Obr. 2). Namiesto dovtedy používaných zlatých lístkov použil pokované vlákna z kremenného skla. Elektroskop sa skladal zo zinkového valca priemeru 17 cm. Vlákna boli umiestnené pod valcovým otvorom označeným na Obr. 2

písmenom A. Vlákna sa vzájomne elektrostaticky odpudzovali a ich vzdialenosť bola meraná mikroskopom vpravo. Vlákna boli osvetľované zrkadlom vľavo. Vlhkosť z valca odstraňoval sodík v dutine pod mikroskopom. V roku 1909 Wulf vyniesol svoj elektroskop na vrchol Eiffelovej veže a zistil, že úroveň atmosférickej ionizácie na jej vrchole je



Obrázek 2: Theodor Wulf a jeho elektroskop.

iba o málo nižšia, ako na povrchu. Aj tak však bola podstatne vyššia, ako by vyplývalo z predpokladu, že jediným zdrojom ionizácie je rádioaktivita zeme. Wulf preto skonštatoval, že buď absorpčná dĺžka γ žiarenia je väčšia, ako bol vtedy prevládajúci odhad, alebo musí existovať ďalší zdroj atmosférickej rádioaktivity.

Taliansky fyzik Domenico Pacini v roku 1911 ponoril Wulfov elektroskop 3 m pod hladinu mora a zistil 20% pokles úrovne ionizácie. To ho viedlo k záveru, že v atmosfére je prenikavá radiácia, ktorá je nezávislá od rádioaktívnych prvkov v zemskej kôre.



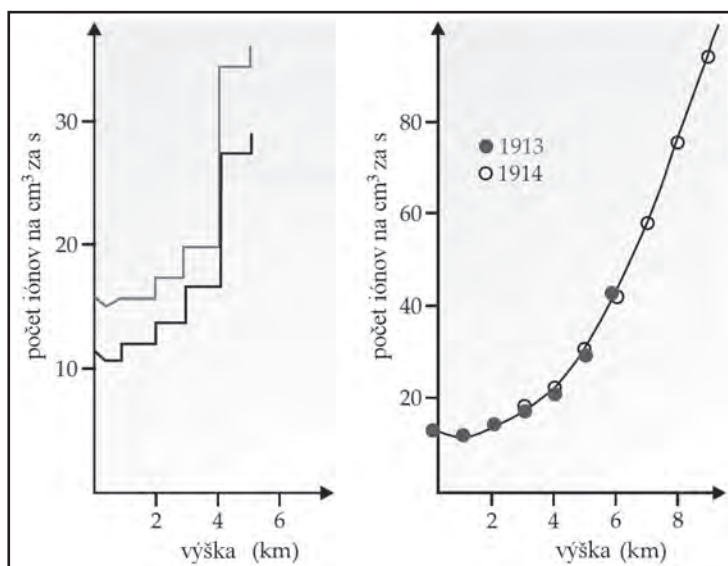
Obrázek 3: Victor Franz Hess v gondole balónu. Hess v tmavej čiapke je opretý o okraj gondoly.

Fyzici v balónoch

V rokoch 1909 až 1911 vykonal švajčiarsky fyzik Albert Gockel tri lety balónom, ktorý niesol elektroskop Wulfovho typu. Predpokladal, že ak je ionizácia atmosféry spôsobená rádioaktívnymi prvkami zeme, potom by mala ionizácia s rastúcou výškou balónu klesať. Počas jedného letu Gockel vystúpil do výšky 4500 m a podobne ako Wulf pozoroval pokles ionizácie s rastúcou výškou, avšak nie až taký veľký, ako oča-

kával. Gockelove meranie však bolo zaťažené systematickou chybou, pretože tlak v jeho prístroji sa menil. Na dvoch letoch do menšej výšky Gockel opravil svoje merania na zmenu tlaku a zaznamenal mierny nárast ionizácie s výškou. Gockel pripisoval značnú časť atmosférickej ionizácie γ žiareniu z rádioaktívnych prvkov v atmosfére.

Ďalší fyzik-vzduchoplavec Victor Franz Hess sa narodil v roku 1883 v rakúskej spolkovej krajine Štajersko a doktorát získal v roku 1906 na univerzite v Grazi. V rokoch 1911 až 1913 vykonal desať letov balónov nesúc v jeho gondole tri elektroskopy Wulfovho typu (Obr. 3). Prielom nastal 7. augusta 1912 počas siedmeho letu balónom „Böhmen“ o objeme 1680 m³ plneného vodíkom, ktorý štartoval z Ústí nad Labem a pristával v Pieskove, približne 50 km juhovýchodne od Berlína. Meraním počas letu do výšky 5300 m Hess ukázal, že intenzita prenikavého ionizujúceho žiarenia s výškou rastie (Obr. 4). Svoje merania zhrnul Hess takto: *„Výsledky týchto pozorovaní je možné najjednoduchšie vysvetliť predpokladom, že žiarenie veľmi vysokej prenikavosti vstupuje do atmosféry zhora, a môže vytvárať časť ionizácie pozorovanej v uzavretých komorách v malých výškach.“*



Obrázek 4: Úroveň atmosférickej ionizácie ako funkcia výšky meraná Victorom Hessom 7. augusta 1912 (vľavo) a Wernerom Kolhörsterom (vpravo).

Nové důležité objavy si vyžadujú nezávislé overenie. Werner Kolhörster vykonal päť výškových letov balónom v lete 1914. Počas posledného dosiahol výšku 9300 m a nameral ionizáciu šesťkrát väčšiu ako na povrchu, čím potvrdil Hessov výsledok (Obr. 4). Kolhörster ďalej určil, že absorpčná dĺžka žiarenia je 1300 m, čo je o rád viac ako má γ žiarenie rádioaktívnych zdrojov. Teda neznáme žiarenie s extrémnou prenikavosťou spôsobovalo ionizáciu atmosféry. Pozorovania, ktoré v roku 1927 urobil Jacob Clay na svojej plavbe z Holandska na Javu naznačili, že sa jedná o časticové žiarenie. Toto neskôr potvrdil svojimi pozorovaniami Arthur Holly Compton. Dnes vieme, že primárne kozmické žiarenia mimo atmosféry sa skladá hlavne z protónov s relatívnym zastúpením 87 %, jadier hélia (α častíc, 11 %) a ťažkých prvkov (2 %). Po zrážke primárnej častice s molekulami vzduchu dochádza k sérii jadrových reakcií. Výsledkom je priestorovo veľmi rozsiahla sprška v tvare kužeľa, ktorá obsahuje celé spektrum sekundárnych častíc. Zdrojmi takzvaného galaktického kozmického žiarenia sú pravdepodobne supernovy, aktívne galaktické jadrá a kvazary.

Neutrónový monitor kozmického žiarenia na Lomnickom štíte

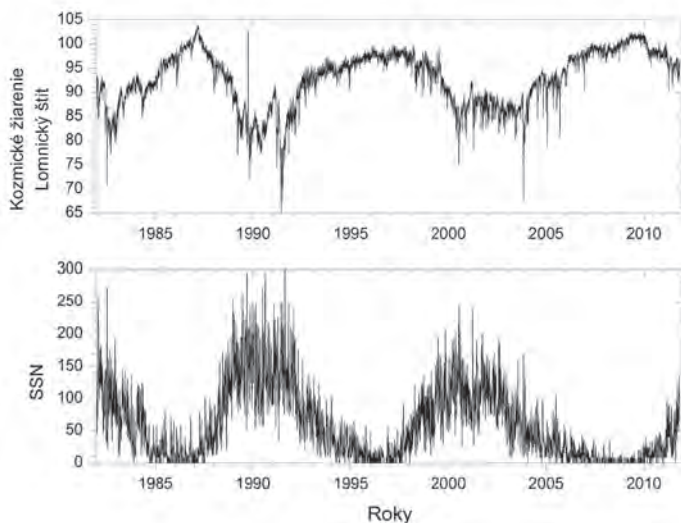
Jednou zo zložiek sekundárnej spršky sú vysokoenergetické veľmi rýchle neutróny, ktorých šírenie nie je ovplyvňované magnetickým poľom Zeme. Práve na ich detekciu je určený takzvaný neutrónový monitor. Jeho jadrom sú olovené bloky, v ktorých rýchle neutróny spršky cestou jadrových reakcií s jadrami olova produkujú pomalé neutróny. Jeden rýchly neutrón vyprodukuje v priemere desať pomalých. Tie v závislosti od typu monitora ďalej reagujú s izotopom bóru ^{10}B ($n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$) alebo hélia ^3He ($n + ^3\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + p$). Výsledkom takejto jadrovej reakcie je nabitá častica, jadro hélia v prvom prípade a protón v druhom, ktorá ionizuje plyn v trubici fotonásobiča. Takáto udalosť sa ďalej zaznamenáva ako



Obrázek 5: Observatórium na Lomnickom štíte (2634 m n.m.). Neutrónový monitor kozmického žiarenia je v kontajneri v popredí. Za ním je kupola korónálnej stanice. Foto: J. Rybák.

elektrický signál. Na tomto principu je založený aj neutráonový monitor galaktického kozmického žiarenia pracujúci na vysokohorskom observatóriu na Lomnickom štíte v nadmorskej výške 2634 m vo Vysokých Tatrách (Obr. 5). Monitor prevádzkuje Ústav experimentálnej fyziky Slovenskej akadémie vied v Košiciach a výsledky jeho meraní v reálnom čase je možné sledovať na webovej stránke <http://neutronmonitor.ta3.sk>.

Neutráonový monitor teda nepriamo meria úroveň toku kozmického žiarenia, ktorá sa s časom mení na rôznych časových škálach. Vo variáciách toku je možné rozlíšiť tri charakteristické modulácie:



Obrázek 6: Antikorelácia úrovně kozmického žiarenia meranej na Lomnickom štíte a relatívneho čísla slnečných škvŕn (sunspot number SSN).

Slnečná modulácia

Časová premenlivosť alebo variácia toku slnečného vetra ovplyvňujú jednak intenzitu a jednak aj energetické spektrum galaktického kozmického žiarenia. Primárnou príčinou tejto modulácie je magnetické pole vmrznuté do slnečného vetra a unášané do medziplanetárneho priestoru. Toto magnetické pole má tieniaci účinok. Keď je slnečná aktivita

vysoká, jeho tieniaci účinok je vyšší, a preto menej častíc galaktického kozmického žiarenia dopadá na Zem ako v čase, keď je Slnko pokojné. Z tohto dôvodu úroveň kozmického žiarenia antikoreluje s priebehom 11-ročného slnečného cyklu (Obr. 6). Vysoká slnečná aktivita zodpovedá nízkej úrovni toku kozmického žiarenia a naopak. Obrázok 6 dokumentuje slnečnú moduláciu kozmického žiarenia na základe meraní neutrónového monitora na Lomnickom štíte.

Forbushov pokles

Príležitostne Slnko vyvrhuje mohutné oblaky plazmy nazývané výrony koronálnej hmoty (skrátene CME z angl. *Coronal Mass Ejection*). CME šíriace sa medziplanetárnym priestorom má vďaka unášanému vmrznutému magnetickému poľu tiež tieniaci účinok na galaktické kozmické žiarenie, ktorý je pozorovateľný ako náhly pokles toku kozmického žiarenia. Tento jav po prvý krát pozoroval Scott Forbush, podľa ktorého je pomenovaný.

Povrchový nárast

Veľmi vzácnne, desať až pätnásťkrát za desaťročie, Slnko počas erupcií vyvrhne častice s energiou dostatočnou na to, aby prenikli magnetickým poľom Zeme a zvýšili úroveň radiácie aj na zemskom povrchu. Tým je ich možné zaznamenať aj neutrónovým monitorom. Na webovej stránke monitoru na Lomnickom štíte je zoznam týchto nárastov v odkaze GLE (z angl. *ground level enhancement*). Za pozornosť tam stojí najväčší GLE42 z 29. 9. 1989, kedy došlo k nárastu intenzity toku kozmického žiarenia až o 178 %.

Použité zdroje

1. <http://www.nobelprize.org>
2. Carlson, P. 2012: Pysics Today, 65 (február), 30.
3. <http://neutronmonitor.ta3.sk>



GREGOR mieri na Slnko

Július Koza, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica

Úvod

Pôvodným zámerom autora bolo napísať článok o veľkých pozemských optických slnečných ďalekohľadoch s názvom „Obry mieria na Slnko“. Rovnomennú prednášku prezentoval 7. 11. 2014 vo Hvezdárni Valašské Meziříčí v rámci workshopu „*Astronomie a fyzika - společně ke vzdělání*“, ktorý bol záverečným workshopom projektu „Brána do vesmíru“ (<http://www.branadovesmiru.eu>). Len nedávno Dr. Michal Sobotka z Astronomického ústavu AV ČR v.v.i. v Ondřejově publikoval prehľadový článok s úplne rovnakou tematikou. Podrobnosti o jeho článku a ďalších on-line dostupných prezentáciách sú uvedené v závere v zozname odporúčanej literatúry. Autor sa preto rozhodol zamerať tento článok na ďalekohľad GREGOR, ktorý je momentálne najnovším a najväčším európskym slnečným ďalekohľadom a tretím najväčším na svete.



Obrázek 1: GREGOR zakrytý kupolou a po jej odklopení (vpravo).

GREGOR sa nachádza na Observatorio del Teide na ostrove Tenerife v nadmorskej výške 2400 m (Obr. 1). Je to nemecký projekt, ktorý je vý-

sledkom spolupráce Kiepenheuerovho inštitútu pre fyziku Slnka vo Freiburgu, Max Planck inštitútu pre výskum Slna v Göttingene a Leibnitzovho inštitútu pre astrofyziku v Potsdame. Partnermi projektu sú Instituto de Astrofísica de Canarias v La Lagune na Kanárskych ostrovoch a Astronomický ústav AV ČR v.v.i. v Ondřejove.

Vedecké ciele

Hlavnou úlohou GREGORu je výskum magnetických polí fotosféry a chromosféry a ich variability na najmenších priestorových a časových škálach. Rozmenené na drobné to znamená výskum:

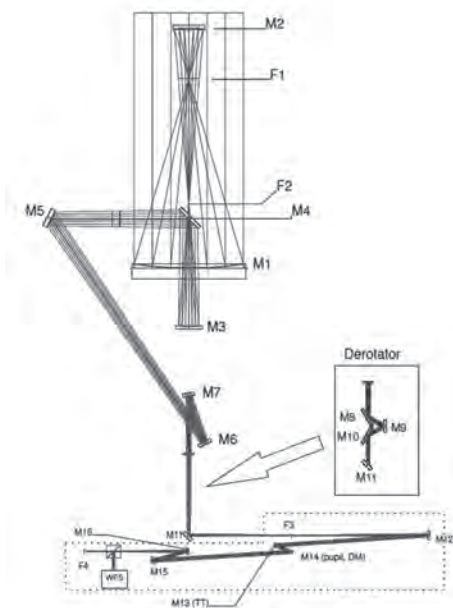
- interakcie granulácie s fotosférickým magnetickým poľom,
- jemnej štruktúry škvŕn,
- slnečného magnetizmu vo vzťahu k variabilite vyžarovania Slnka,
- mechanizmov ohrevu chromosféry,
- hviezdnych dvojníkov Slnka.

Posledná úloha súvisí s tým, že GREGOR by mal v budúcnosti robiť aj nočné spektroskopické pozorovania hviezd podobných Slnku. GREGOR má preveriť nové koncepcie, ktoré budú využité pri stavbe Národného 2-m veľkého slnečného ďalekohľadu NLST v Indii. Jeho výstavba už prebieha na brehu jazera Pangong v nadmorskej výške 4250 m v Himalájach na indicko-čínskej hranici. Skúsenosti získané pri stavbe a prevádzke GREGORu budú neskôr využité aj pri konštrukcii a stavbe Európskeho slnečného ďalekohľadu EST s priemerom 4 m na Kanárskych ostrovoch.

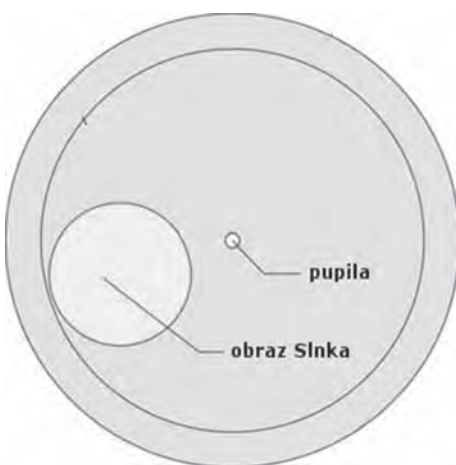
Ďalekohľad

GREGOR má otvorenú rámovú konštrukciu (Obr. na 4. strane obálky), ktorá umožňuje ventiláciu ďalekohľadu prúdiacim vzduchom. Vietor tak eliminuje interný seeing ďalekohľadu, teda turbulenciu vzduchu vznikajúcu ohrevom optiky a kovových častí. Meno ďalekohľadu súvisí s jeho optickou sústavou. Jedná sa o dvojitý Gregory systém (Obr. 2) s priemerom primárneho zrkadla M1 1,5 m s ohniskovou vzdialenosťou 2,5 m. V primárnom ohnisku F1 je vytvorený obraz Slnka s priemerom

22 mm (Obr. 4) a je v ňom sústredený výkon 2000 W s hustotou $5,3 \text{ MWm}^{-2}$. Pre názornosť, takáto hustota tepelného výkonu je bežná pri zváraní kovov. Väčšinu tohto výkonu odráža mimo ďalekohľad vodou chladená poľná clona s vysokoodrazivým postriebreným povrchom (Obr. na 4. strane obálky a obr. 3), ktorá je sklonená vzhľadom na optickú os ďalekohľadu o uhol 45° . Clonou absorbované teplo je odvádzané cirkulujúcou vodou s prietokom 1 liter za minútu. Sekundárne zrkadlo M2 vytvára v ohnisku F2 sekundárny obraz vybranej oblasti Slnka, ktorú vymedzuje malý kruhový otvor (pupila) v poľnej clone (Obr. 3). Priemer pupily 1,8 mm definuje priemer zorného poľa $150''$. Lúč ďalej pokračuje na druhé zrkadlo M3, ktoré vytvára finálny obraz v ohnisku F3. Rovinné zrkadlo M4 odkláňa lúč do výškovej osi ďalekohľadu a ďalšie rovinné zrkadlá ho smerujú do optického laboratória pod ďalekohľadom. Pretože použitá altazimutálna montáž (Obr. na 4. strane obálky) spôsobuje rotáciu obrazu, konštrukcia ďalekohľadu umožňuje zaradiť pred ohnisko F3 do optickej cesty de-rotátor obrazu (Obr. 2), ktorého inštalácia je plánovaná na rok 2015.



Obrázek 2: Optická schéma ďalekohľadu GREGOR.



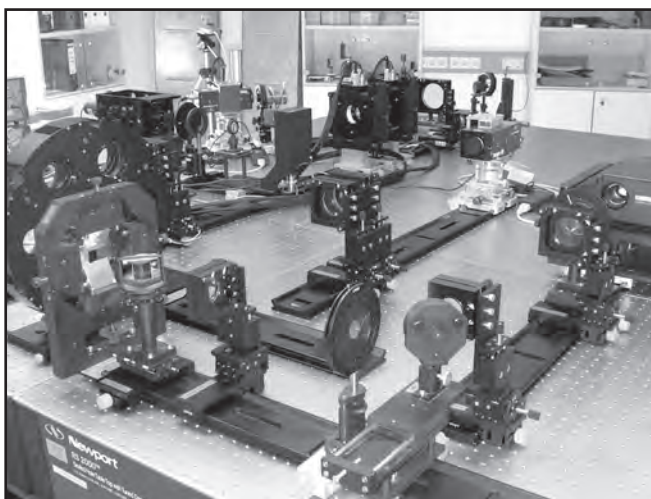
Obrázek 3: Poľná clona s pupilou, malým kruhovým otvorom uprostred, porovnaná s obrazom Slnka znázorneným v mierke.

Adaptivna optika (AO) je nevyhnutnou súčasťou veľkých pozemských optických ďalekohľadov. Atmosférický seeing limituje uhlové rozlíšenie denných pozorovaní približne na $1''$, čo je veľmi ďaleko od teoretickej rozlišovacej schopnosti 1,5-m zrkadla, ktorá je $0,08''$ (tzv. difrakčný limit). Optická sústava GREGORu obsahuje jednak štandardnú AO, s priemerom korigovaného zorného poľa iba $5''$, a jednak multikonjugovanú AO, ktorá sleduje deformáciu vlnoplochy v zornom poli s priemerom až $1'$. V optickej schéme na Obr. 2 je AO v dolnej časti označenej rámečkom (prerušovaná čiara). Skratky TT, DM a WFS označujú *tip-tilt korektor*, deformovateľné zrkadlo a Shack-Hartmannov senzor vlnoplochy.

Postfokálne prístroje

Adaptívnou optikou korigovaný obraz v ohnisku F4 je ďalej distribuovaný do troch postfokálnych prístrojov: širokopásmového snímkovača BBI (*Broad-Band Imager*), úzkopásmového laditeľného snímkovača GFPI (*GREGOR Fabry-Pérot Interferometer*) a štrbinového skenovacieho infračerveného spektrografu GRIS (*GREGOR Infrared Spectrograph*). Súčasne môžu pozorovať dva z nich.

BBI je určený na získavanie dlhých časových sérií filtergramov jemnej štruktúry granulácie a slnečných škvrn vo vizuálnej oblasti spektra v rozsahu vlnových dĺžok od 380 do 900 nm s vysokou kadenciou, t.j. s vysokým časovým rozlíšením. Použitie kamery PCO4000 s rozmerom čipu 4008×2672



Obrázek 4: Optické prvky GFPI na optickom stole.

pixlov poskytuje zorné pole $110'' \times 70''$.

GRIS je určený hlavne pre spektropolarimetriu magnetických štruktúr vo fotosfére v rozsahu vlnových dĺžok 1000 až 2200 nm. Štrbina môže preskenovať plochu s rozmerom až $67'' \times 60''$. Lesklý povrch štrbiny odráža obraz zorného poľa spolu s obrazom štrbiny do takzvaného „*slit jaw*“ (slitžó) obrazového systému. Snímky z neho umožňujú spätne zrekonštruovať, kde presne na povrchu Slnka bola nastavená štrbina a priradiť spektrum z daného riadku kamery ku konkrétnemu miestu na povrchu. Pred slit jaw kameru sa spravidla zaraďuje širokopásmový filter prepúšťajúci svetlo spektrálnych čiar H α , Ca II K a H alebo molekulárneho G pásu (430,5 nm).

GFPI (Obr. 4) sa skladá z dvoch Fabry-Pérot etalónov zaradených za sebou a je určený pre 2D spektrálne snímkovanie a spektropolarimetriu zorného poľa s rozmerom $50'' \times 38''$ v rozsahu vlnových dĺžok od 530 do 860 nm. Spektrálnym snímkaním sa tu myslí získavanie úzkopásmových filtergramov v mnohých (20-30) bodoch profilu vybranej spektrálnej čiary v rýchлом slede postupne za sebou preladovaním z jedného krídla čiary do druhého. Obrázok 6 bol získaný v júli 2014 v molekulárnom G páse pomocou takzvaného modrého snímkovacieho kanálu BIC (*Blue Imaging Channel*) prístroja BIC, ktorý umožňuje pozorovať aj vlnové dĺžky kratšie ako 530 nm.

Odporúčaná literatúra a on-line prezentácie

Sobotka, M.: Moderní sluneční dalekohledy, Zborník referátov z 22. celoštátneho seminára, Nižná nad Oravou, 26.-30. máj 2014, zostavil: I. Dorotovič, vydané na CD-ROM, dostupné on-line: Google → Zborník referátov z 22. CSS

Sobotka, M.: Pozorování Slunce s vysokým rozlišením <http://www.pozorovanislunce.eu/userfiles/files/dokumenty/workshop-III-mso-07-pozorovani-s-vysokym-rozlisenim.pdf>

Sobotka, M.: Velké sluneční dalekohled

<http://www.pozorovanislunce.eu/userfiles/files/dokumenty/workshop-III-mso-08-velke-slunecni-dalekohledy.pdf>

Čo (ne)našiel a čo (ne)nájde Pan-STARRS?

Peter Vereš

Ďalekohľad **Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System**, v skratke **Pan-STARRS**, je prototypom ďalekohľadu novej generácie. Tento prototyp sa často označuje ako PS1 alebo Pan-STARRS1. Nachádza sa na vrchole sopky Haleakala, na havajskom ostrove Maui, v nadmorskej výške približne 3000 metrov nad morom. Je výsledkom dlhoročnej práce a novou koncepciou na pozorovanie vesmíru, ktoré nás čaká v budúcnosti. Na rozdiel od klasických ďalekohľadov, ktoré sú zamerané počas pozorovania zvyčajne na jeden objekt a strávia na ňom veľa času, Pan-STARRS sa snaží za pozorovací čas zmapovať čo najviac nočnej oblohy do čo najhlbšej limitnej magnitúdy. Jeho zorné pole je 7 stupňov štvorcových a za 40 sekúnd dokáže pohodlne detegovať objekty do + 22 mag. Oblohu dokáže snímať v 6 rôznych filtroch – vo viditeľnej časti spektra (g, r, i) a v blízkej infračervenej oblasti (z, y). Pre objekty slnečnej sústavy má vyvinutý širokopásmový filter (w), ktorý je kombináciou g + r + i. Vývoj prarotypu sa musel popasovať s viacerými výzvami: na ďalekohľad s primárnym zrkadlom s 1,8m priemerom musel dosiahnuť veľmi veľké zorné pole, preto jeho konštrukcia (Ritchey-Chretien) vyžadovala pomerne krátke ohnisko (8 m) a korekciu tvaru poľa na detektore. Ambiciózne bolo aj zostrojenie najväčšej CCD kamery na svete, s 1,4 miliardami pixelmi. Kamera sa síce skladá z matice viacerých čipov (64×64 buniek a každá s 8×8 jednotlivými čipmi), no hlavný dôraz bol kladený na rýchlosť vyčítavania a spracovania dát. Výsledkom výskumu bolo vynájdenie spôsobu, ako v priebehu niekoľkých sekúnd vyčítať 1,4 miliardy pixelov. Celkové rozlíšenie kamery je 0,26 oblúkovej sekundy na pixel. Pan-STARRS tiež ťaží zo svojej polohy – na vrchole Haleakala je väčšina nocí v roku fotometrických a oblačnosť sa zvyčajne drží pod vrcholom. Priemerný seeing je 1 oblúčová sekunda.

Pan-STARRS mal okrem demonštrácie nových technológií zmapovať oblohu a priniesť čo najviac vedeckých dát. Jeho hlavná misia trvala

3 roky: od 2011 do 2014 zmapoval Pan-STARRS1 oblohu severnejšie od deklinácie -30 stupňov tri krát vo všetkých filtroch (okrem w) a vytvoril tak katalóg miliárd detekcií. Hlavná misia PS1 bola riadená a financovaná konzorciom mnohých inštitúcií, vrátane univerzít z USA, Európy a Tajwanu. Veda sa sústredila do niekoľkých hlavných oblastí výskumu: vnútorná slnečná sústava, vonkajšia slnečná sústava, málo hmotné hviezdy a hnedí trpaslíci, exoplanéty, Mliečna dráha a lokálna štruktúra, hĺbkový prieskum galaxie M31, masívne hviezdy – progenitory supernov, kozmológia – explozívne a premenné tranzienty, vlastnosti galaxií, aktívne galaktické jadrá a kvazary v kozmologických vzdialenostiach, kozmologické gravitačné šošovkovanie a veľké štruktúry vesmíru. Nazbierané dáta budú od roku 2015 voľne k dispozícii celej vedeckej komunite cez Space Science Institute. Terabajty dát budú sprístupnené cez systém virtuálneho observatória a budú sa dať priamo porovnávať s výsledkami z iných misií (SDSS, 2MASS, GAIA, ...). Aj napriek tomu, že vedecké výsledky sa budú z trojročnej misie publikovať roky, už dnes má na konte PS1 72 recenzovaných publikácií a množstvo objavov.



Obrázek 1: Kupola ďalekohľadu Pan-STARRS1 na Haleakala. Na horizonte vidieť Mauna Kea.

Ani po roku 2014 neprestal Pan-STARRS1 so svojou činnosťou a jeho financovanie prebrala NASA v rámci programu hľadania malých telies slnečnej sústavy, väčšinou iba v jednom filtri (w). Okrem toho sa v polovici roka 2014 postavil druhý – identický Pan-STARRS (PS2), ktorý stojí neďaleko toho prvého a pripojí sa k novej misii, ku hľadaniu asteroidov a komét. V tejto kombinácii a sústreďení sa iba na jednu úlohu sa obloha pokryje omnoho rýchlejšie a ďalekohľady budú hľadať v nižších deklináciách (do -50 stupňov). Celú dostupnú nočnú oblohu tak Pan-STARRS pokryje pár krát už za jeden mesiac.

V slnečnej sústave Pan-STARRS1 objavil dodnes viac ako 60 000 asteroidov, väčšinou v hlavnom páse medzi Marsom a Jupiterom. Okrem toho našiel 1298 blízkozemských asteroidov, vrátane 111 potenciálne nebezpečných (tj. väčších ako 130 metrov a s priesečníkom dráhy vzhľadom na dráhu Zeme bližšie, ako 0,05 AU). Pan-STARRS1 našiel 60 komét (všetky nesú pomenovanie po projekte, nie po objaviteľoch). Celkovo PS1 pozoroval dodnes až 80 % všetkých známych asteroidov (480 000 z 600 000). Najmenší objavený z nich má iba cca 5 metrov (2013 UU3), najväčší 100 km (2012 GX17). PS1 objavil prvého trójana Venuše (2013 ND15) – asteroid, ktorý sa pohybuje 60 stupňov pred Venušou a vzhľadom na ňu je na stabilnej dráhe a tiež aj trójana Neptúnu (2012 GX17). Posledné tri roky objavil zo všetkých observatórií najviac potenciálne nebezpečných asteroidov a za posledné 2 roky je aj lídrom v objavoch ostatných blízkozemských asteroidov. PS1 výborne monitoruje aj bezprostredné okolie Zeme. Okrem známych satelitov objavil aj objekty, o ktorých sme si najskôr mysleli, že ide o asteroidy. Až o pár dni po „objave“ sa prišlo na to, že išlo o nosné stupne rakiet – 6Q0B44E je tretí stupeň rakety Apolla 12 a 2013QW1 bol identifikovaný s posledným stupňom rakety čínskej sondy Čang-e 2.



Obrázek 2: Schematické znázornenie veľkosti zorného poľa Pan-STARRS1 oproti Mesiacu v splne.

V slnečnej sústave PS1 prispel k objavom takzvaných komét hlavného pásu asteroidov. Tieto objekty sú nezvyčajné, pretože sa od klasických komét líšia. Ich dráhy nie sú vôbec výrazne výstredné, či sklenné k dráham ekliptiky. Naopak, pripomínajú stabilné dráhy asteroidov. Napriek tomu sa u nich pozorovala aktivita – prachová koma a chvost. Je možné, že tieto asteroidy si vo vzdialenej časti hlavného pásu pod povrchom uchovali isté množstvo zamrznutého ľadu a plynov, ktoré ostali po miliardy rokov skryté pod povrchom. Avšak čerstvé zrážky odkryli ľad, ktorý rýchlo sublimoval a strhol so sebou prach z povrchu. Takto sa z asteroidu stala kométa.

Pan-STARRS1 zaznamenal aj dramatické udalosti v živote asteroidov. Telesá P/2013 R3 a P/2013 P5 boli objavené ako kométy. Mali totiž chvosty. Ich dráhy však opäť hovorili o asteroidoch. Až detailné zábery z Hubblovho teleskopu ukázali, že išlo o zvláštne udalosti. Objekt P/2013 R3 sa doslova rozpadol na malé úlomky a naopak, chvost P/2013 P5 vypúšťal prach 6 rôznymi smermi. Výsledky sa interpretovali tak, že išlo o rozpad asteroidov, pravdepodobne v dôsledku zrýchlenia rotácie, ktorá odstredivou silou roztrhala tieto asteroidy. Bezprecedentne sme tak mali možnosť sledovať rozpad asteroidu v priamom prenose.

Pan-STARRS1 objavil aj kométu, ktorá zaujala verejnosť. Kométa P/2011 L4 sa k Zemi a Slnku v roku 2013 priblížila natoľko, že bola pozorovateľná voľným okom. Pan-STARRS1 detegoval aj kométu C/2013 A1 Siding Spring, ktorá sa takmer zrazila s Marsom. Snímky z Pan-STARRS1 pomohli upresniť dráhu kométy a včas sa tak dokázala vyvrátiť možnosť jej zrážky s Marsom.

Z počtu objavených blízkozemských asteroidov sa podarilo odhadnúť, koľko malých telies sa vlastne nachádza v blízkom okolí Zeme. Práca Evy Schunovej, Petra Vereša a kolektívu bola objednaná agentúrou NASA, ktorá plánuje do vesmíru vyslať misiu, ktorá by zachytila veľmi malý asteroid, zmenila jeho dráhu, priviezla ho na dráhu okolo Mesiaca a vyslala k nemu astronautov. Takýchto asteroidov je objavených iba zopár a práve naša práca mala odhadnúť, koľko týchto objektov je schopný Pan-STARRS1 a ďalšie ďalekohľady vôbec nájsť v blízkej budúcnosti.

Často sa v astronómii stáva, že vedci neobjavia objekt, ktorý hľádali. Aj z negatívneho výsledku sa však dajú odvodiť závery. Dodnes napríklad nebolo objavené teleso, ktoré by do slnečnej sústavy prileteľo z medzihviezdneho priestoru. Dlhoperiodické kométy síce vykazujú hyperbolické dráhy, ich hyperbolicita je však daná drobnými gravitačnými kopancami, ktoré dostanú po príchode do vnútra slnečnej sústavy a vždy boli viazané na Slnko. Naopak, kométy či asteroidy prichádzajúce zvonku, by museli mať veľmi vysoké výstrednosti. Na základe toho, že sme veľmi dobre poznali charakteristiky polí, ktoré za 3 roky sledoval Pan-STARRS1 (vrátane limitnej magnitúdy a efektívnosti detekcií), sme dokázali určiť, aká je horná hranica hustoty výskytu interstelárnych objektov v okolí Slnka. Pre objekty väčšie ako 1 kilometer, ak nemajú žiadnu kometárnu aktivitu, by ich muselo byť najviac $5,4 \times 10^{-2}$ v kubickej astronomickej jednotke. Keby mali aktivitu podobnú dlhoperiodickým kométam, bolo by ich najviac $9,3 \times 10^{-4}$ v kubickej astronomickej jednotke.

Medzi výnimočné objavy patrí aj objav komét-nekomét C/2013 P2 a C/2014 S3. Obe tieto telesá boli objavené ako asteroidy. Keď sa však zistila ich dráha, ktorá bola podobná dlhoperiodickým kométam (veľmi vysoká hodnota veľkej polosi, vysoká výstrednosť a sklon dráhy), prvému z nich dokonca amatéri omylom určili aktivitu a tak asteroid dostal kometárne označenie. Žiadna aktivita sa však nepozorovala z omnoho väčšieho ďalekohľadu (Pan-STARRS1), dokonca ani z 3,6m CFHT alebo z 8m Gemini. Dodnes bolo objavených niekoľko podobných objektov (hovorí sa im Damokloidy) a spektrum naznačuje, že sú to tmavé objekty a momentálne zrejme neaktívne kométy. U mnohých z nich sa neskôr aktivita potvrdila, keď sa priblížili ku Slnku. Naše dva objekty sa ku Slnku dostali v perihéliu veľmi blízko – do 2,8 a 2,0 AU. Do vzdialeností, kde sú bežné dlhoperiodické kométy veľmi aktívne. Ľady sublimujú, okolo jadra je veľká koma a za kométou dlhý chvost. Naše objekty však nejavili absolútne žiadnu aktivitu, dokonca ani pri pohľade s najväčšími ďalekohľadmi na svete. V ich okolí sa nepozoroval ani prach. Aj ich spektrum bolo odlišné od ostatných Damokloidov, či komét. V infračervenej oblasti boli tieto objekty veľmi červené a pripomínali tak objekty

TNO, ktorých povrchy boli neaktívne po miliardy rokov. Obežná doba C/2013 P2 je 52 miliónov rokov a C/2014 S3 314 000 rokov. Jedno z vysvetlení hovorí, že naozaj nejde o kométy, ale o asteroidy Oortovho oblaku, ktoré sa tam dostali v období krátko po sformovaní slnečnej sústavy. Hoci o nich teoretizoval už Oort, Pan-STARRS ich objavil prvý krát. V Oortovom oblaku pritom môže byť až miliarda asteroidov a teoreticky predstavujú 7 % jeho hmotnosti.

Slnečná sústava je málo prebádaná za dráhou Neptúnu. TNO objektov je objavených vyše tisíc, sú však tak ďaleko, že aj na niekoľko-sto kilometrový objekt treba pozorovanie obriehto ďalekohľadu. Doteraz najvzdialenejším objektom je Sedna. V roku 2012 bol objavený druhý podobný objekt – 2012 VP113. Oba objekty sú zvláštne, pretože ich perihélia sú veľmi ďaleko od Neptúnu a teórie vzniku slnečnej sústavy nedokážu vysvetliť, ako sa tieto objekty dostali tak ďaleko. Okrem toho, hoci sú objavené



Obrázek 2: Najväčšia CCD kamera na svete – 1,4 miliárd pixelov a rozmer 40×40 cm, v rukách Johna Tonryho, jedného z tvorcov kamery. John Tonry bol v kolektíve, ktorý v roku 2011 získal Nobelovu cenu za fyziku za rozpínanie vesmíru.

iba dva, majú takmer totožné argumenty šírky perihélia. Existuje viacero možností, ako sa tieto dva objekty dostali tak ďaleko. Buď boli vyhodené smerom von v období formovania slnečnej sústavy, keď Slnko vzniklo v otvorenej hviezdokope a blízke hviezdy narušovali Kuiperov pás. Alebo ich vyrušila blízko letiaca hviezda. Najzaujímavejšia je teória, že ďaleko za dráhou Neptúnu sa nachádza ešte neobjavená planéta. Výskum infračerveného ďalekohľadu WISE ukázal, že ďaleko okolo

Slnka neobieha hnedý trpaslík, alebo plynný obor. WISE však nevidí ďaleké a chladné planéty. Kandidátom tak ostáva neznáma kamenná a chladná planéta (alebo dve planéty), ktorá môže mať niekoľkonásobok hmotnosti Zeme a Slnko obieha vo vzdialenosti niekoľko sto AU. Pan-STARRS1 takéto teleso dodnes neobjavil, no za 3 roky nazbieral dostatok dát, že jej hľadanie bude čoskoro možné. Dáta z Pan-STARRS1 tak môžu objaviť novú planétu, alebo aspoň stanoviť limit jej hmotnosti a vzdialenosti, ak sa neobjaví.

Zaujímavý objav sa podaril Pan-STARRS1 v spolupráci so sondou Chandra a projektom GALEX. Objavil silný UV záblesk a synchrotrónne žiarenie, ktoré smerovalo z jadra neaktívnej galaxie. Takúto energiu mohla vyprodukovať iba zanikajúca hviezda, ktorú slapovo roztrhala supermasívna čierna diera v jadre galaxie. Spektrum ukázalo, že išlo o héliovú hviezdu. Dáta tiež umožnili určiť hmotnosť čiernej diery na 2 milióny hmotnosti Slnka.

V našej Galaxii sa objavilo niekoľko hviezd, ktoré boli z Galaxie vymrštené a unikajú z nej veľkou rýchlosťou. Ide vždy o klasické hviezdy hlavnej postupnosti, ktoré smerujú od jadra Galaxie. Tam zrejme prešli blízko centrálnej masívnej čiernej diery, ktorá ich gravitačne urýchlila. Pan-STARRS1 našiel doteraz najrýchlejšiu hviezdu v Galaxii, ktorá oproti stredu Galaxie uniká rýchlosťou 1200 km/s. Hviezda US 708 je však odlišná od doterajších prípadov. Jej dráha hovorí, že nesmeruje od centra Galaxie. Čo iné ju mohlo tak urýchliť? Taktiež nejde o hviezdu hlavnej postupnosti, ale o héliového subtrpaslíka. Takéto hviezdy sa vždy nachádzajú v tesnom dvojhviezdnom systéme, kde dochádza k prenosu hmoty z jednej hviezdy na druhú. A práve toto môže vysvetliť, čo sa stalo. V tomto tesnom systéme hmotná hviezda vybuchla ako supernova a svojho súputníka gravitačne vykopla von z Galaxie.

Pan-STARRS1 potvrdil aj existenciu veľkej prázdnoty ďaleko vo vesmíre. Už nehomogenity v reliktnom žiarení hovoria, že hmota nebola vo vesmíre rozložená rovnomerne. Niekde je jej viac, niekde menej. V oblasti, kde je reliktné žiarenie chladnejšie, sa kombináciou pozorovaní z Pan-STARRS1, WISE a 2MASS zistilo rozloženie vzdialených galaxií. V smere chladnejšieho pozadia sa vo vzdialenosti 3 miliárd sve-

telných roků naozaj zistil znížený výskyt galaxií. Táto prázdnota má polomer až 600 miliónov svetelných roků.



Petabytová astronomie

*Jiří GRYGAR, oddělení astročásticové fyziky, Fyzikální ústav AV ČR, Praha
(stručný autorizovaný syllabus přednášky)*

Úvod

Astronomie je věda, která obsahuje mnoho dat.

Nejstarší katalogy hvězd:

130 BC: Hipparchos – první katalog 800 hvězd, dílo je dodneška k dispozici. Astronomové jej stále používají. I když přesnost určení polohy hvězd není velká, ale díky časovému odstupu 2000 roků se z něho stává velmi cenný materiál.

1602 AD: Tycho Brahe – 777 hvězd, přesnější katalog než Hipparchos. Jeho dílo později zpracoval Johannes Kepler.

1627: Johannes Kepler – 1 006 hvězd Tycho + 400 Ptolemaios (Almagest) střední chyby v poloze $\pm 2'$; zřídka $< 10'$ (překlepy, početní chyby). Katalog je do dneška dobře použitelný.

S nástupem dalekohledů brzy vláknové kříže v okulárech umožňující měření pozice hvězd. Velmi náročná ruční práce.

1852-1863: Friedrich Argelander+: Bonner Durchmusterung: 324 tisíc hvězd do 9,2 – 10 mag (1932: SD a CD jižní obloha) – užíván dosud velmi často.

1911-15: Henry Draper (HD) – 225 tisíc spekter hvězd; Henry Dra-

per „jen“ zaplatil práce na tomto katalogu. Annie Cannonová – klasifikace tempem 3 hvězdy/min, což je opravdu skvělý výkon. Při porovnání s moderním katalogem HIPPARCOS se zjistilo, že jen 2 % z původního HD katalogu je neznámých (zřejmě chyby apod.). HD katalog má relativně malou přesnost poloh hvězd $\pm 1,5'$, ale i přesto je dosud používán právě kvůli spektrální klasifikaci.

Pokroky ve XX. století

Generální katalog proměnných hvězd (GCVS), vyšel v mnoha vydáních – lístkový katalog dosáhl koncem století >37 tisíc hvězd. V současné době se pracuje na jeho digitalizaci, zpřesňují se polohy (se započtením vlastních pohybů) a jasnosti hvězd v katalogu.

Palomar Observatory Sky Survey, dvě vydání:

POSS I (1950-57) a **POSS II** (1991-97) (B - modrá, R - červená, NIR – blízká infračervená).

V obou případech se snímkovalo na klasické skleněné desky v několika barvách. Celkem 5×900 snímků/1,1 GB, úhrnem ~ 3 TB. Velké dílo, dnes velmi používané.

UKST a ESO: Schmidt (1,2 m) – dtto jižní polokoule (3 barvy)

Vrcholné dílo dnešních dnů.

Katalog HIPPARCOS (ESA)

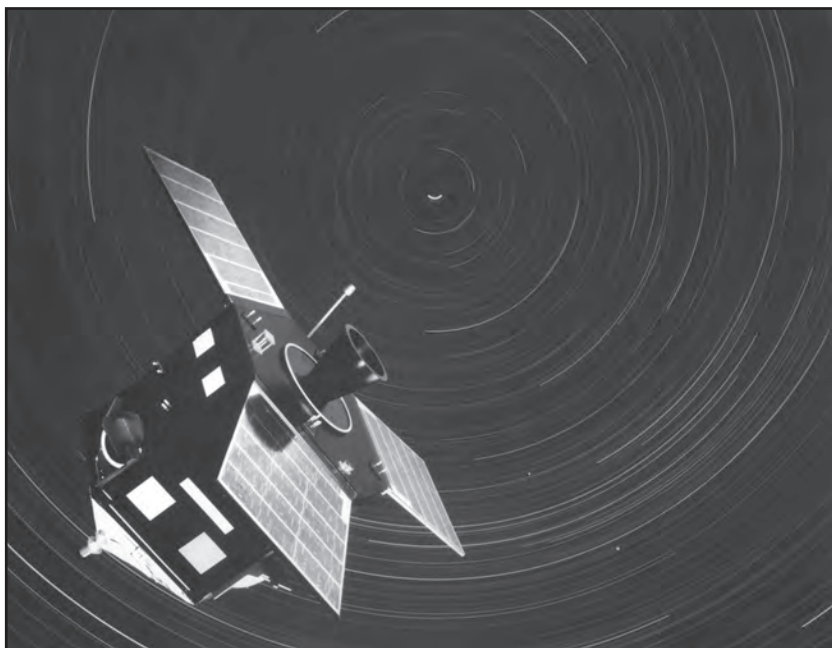
Měření trigonometrické vzdálenosti hvězd (1989-1993); 1997 katalogy (2 TB). Dva katalogy – jeden obsahuje méně hvězd s přesnějším určením poloh a vzdáleností, druhý méně přesný, ale s větším počtem hvězd.

Trigonometrické vzdálenosti a vlastní pohyby (120 tisíc hvězd; polohy $\pm 0,003''$);

Katalog TYCHO (+400 tis. hvězd s přesností $\pm 0,1''$): Přesnost poloh

hvězd se za 23 století zlepšila šestsettisíckrát! Náklady na katalog dosáhly ovšem 300 miliónů dolarů!

Dnes se pracuje na katalogu „**Atlas MILLENIUM (2000)**“: >1 mil. hvězd; mhv 11 mag.



Obrázek 1: Satelit ESA Hipparcos měřil přesné pozice hvězd.

V poslední třetině století **velmi výrazné změny, a to zejména díky nástupu Internetu.**

29./30. X. 1969: Vinton Cerf – první propojení dvou počítačů sítě ARPANET; 1972 „vynalezen“ @ - zavináč

1978 operační systém UNIX; 1991 T.

Rozhodující krok udělal Berners Lee – vytvořil **protokol WWW**;

V roce 1991 americký fyzik Paul Ginsparg: začal zveřejňovat **preprinty na adrese arXiv.org**; tam dávají autoři poslední schválené verze článků.

1994 prohlížeč Mozilla; 1998 Google – vyhledávač;

Zásadní změny:

- snadné elektronické vyhledávání a kopírování obsáhlých databází, audio a video záznamů;
- výměna informací;
- příprava vědeckých prací týmy z různých institucí;
- elektronické videokonference;
- podstatné urychlení zpráv o nových úkazech na obloze;
- ukládání dat do datových skladů, ale problém s jejich vytěžováním (správné filtry, vyhledávání dat, třídění, zpracování aj.);
- elektronické verze vědeckých časopisů aj.

Představa 1 PB zápisu = na 1,5 mil. CD-ROM (naplocho na sebe do výšky Lomnického štítu).

Jak se to vše projevilo v astronomii?

1. Digitalizace archivů astronomických fotografií

V archivech na 3 milióny snímků oblohy nejrůznějších kvalit, spektrálních oborů apod. Jsou to však vždy unikátní záznamy, které jsou v astronomii nenahraditelné (čas nemůžeme vrátit). Je rozumné a vhodné, aby byly všechny digitalizovány, dnes se to opravdu děje. Z těchto záznamů je asi 1 milión spekter.

Digitalizace naprosto klíčová: Harvard 525 tisíc; Sonneberg 275 tisíc; Ondřejov 110 tisíc snímků (bolidové kamery).

Zajímavá **služba Astrometry.net** – lze tam zasílat oskenované snímky a přibližné určení data expozice (± 3 roky) i lépe. Přesnost profesionálních mikrodensitometrů $\pm < 1\mu\text{m}$; komerčních skenerů $\pm 4\mu\text{m}$.

Jeden z **největších katalogů USNO B1.0**: 1 miliarda hvězd, mlhovin a galaxií do 21 mag v 5 filtrech za 50 let (na observatořích Flagstaff,

Palomar, ESO, UKST (Austrálie)). Polohy $\pm 0,2''$; fotometrie $\pm 0,3$ mag.

Průběžná digitalizace širokoúhlých snímků oblohy (komory Schmidt a Maksutov) přinesla databáze o kapacitě řádu **10 PB** již dnes k dispozici.

Digitální snímky CCD pořízené do r. 1990, uložené na magnetické pásky už nelze dnes ničím přečíst! Velká smůla – neuvěřitelná věc, data z amerického projektu Apollo – jsou také na magnetických páscích. Byly natírány velrybím tukem, aby se omezil proces stárnutí a stářím se nelámaly. Z důvodů ochrany velryb už nebyly zdroje tuku. Nebyl velrybí tuk a tak neměli na co data ukládat. Tak přepsali staré pásky s Apollem, které byly ošetřeny velrybím tukem novými daty. Tím došlo ke ztrátě dat z Apolla.

2. Rozsáhlé digitální přehlídky oblohy

Dnes to směřuje k tomu, že potřebujeme nové a lepší rozsáhlé přehlídky oblohy, kterými bychom byli schopni zaznamenat úkazy, které jsou buď velmi vzácné nebo slabé, že je nebyly dosavadní přehlídky schopné zaznamenat.

Největší projekt s velkým úspěchem

Sloan Digital Sky Survey - SDSS (zahájen v roce 2000, Alfred P. Sloan Foundation projekt z velké části platí): 2,5m zrcadlo, Apache Point Observatory, Sunspot, Nové Mexiko.; kamera 120 Mpix.

2000-2014: byly změřeny a publikovány polohy a spektra >900 tis. galaxií; >120 tis. kvasarů; téměř 500 miliónů hvězd a 2 milióny spekter.

Díky tomu se podařilo odhalit 3D kosmickou pavučinu rozložení galaxií na čtvrtině oblohy. Podařilo se odhalit velkoškálovou strukturu vesmíru, a tedy i jeho vzniku a vývoje. Výskyt velkých koncentrací hmoty (galaxií) a velké téměř prázdné proluky s minimem hmoty. (Obrazky k tématu na 2. straně obálky).

3. Aplikace metod sdíleného počítání

Univerzita v Berkeley – měli velké množství dat rádiového šumu z velkého radioteleskopu z Areciba. Možnost hledat signály umělého původu. Hledání v rádiovém šumu velký problém. Nevíme, co hledat a na jaké frekvenci.

Vznik slavného **projektu SETI at HOME**. Princip práce – náhrada spořiče obrazovky.

1999: projekt **SETI@home** - SSL UCB:

setiathome.ssl.berkeley.edu

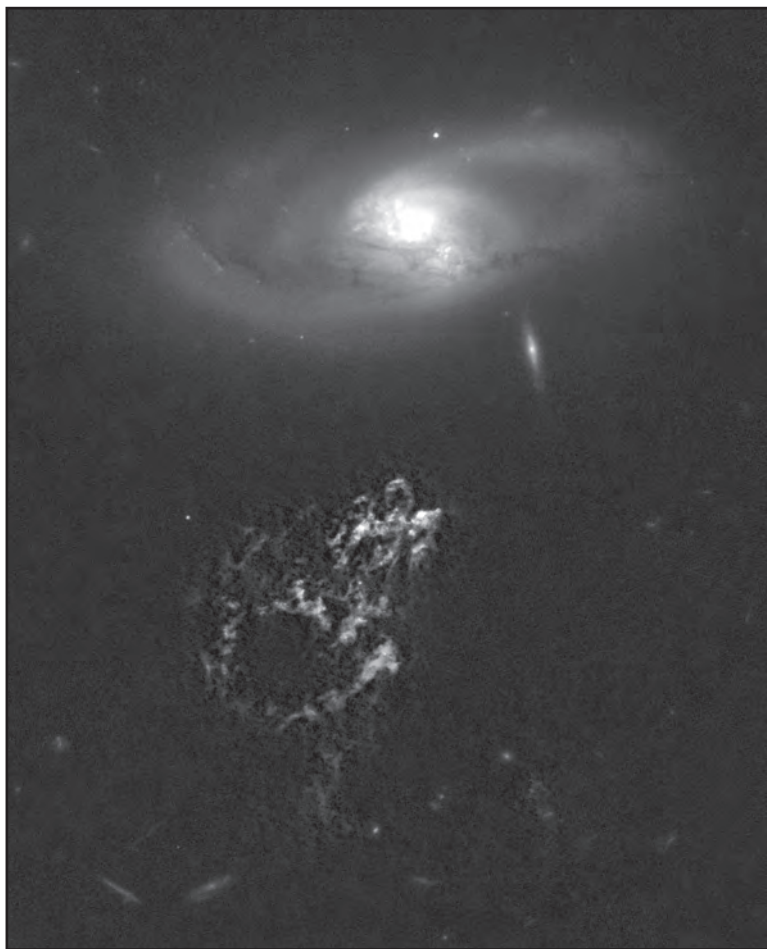
Projekt měl velký úspěch. Výkon 505 Tflops, 152 tisíc uživatelů. Díky tomuto projektu se podařilo záznamy šumu prohlédnout, ale bohužel se žádné signály umělého původu nepodařilo najít. Všechna data byla během několika let analyzována a princip se ukázal jako velmi vhodný.

V červenci 2007: **Galaxy Zoo** – dobrovolníci mají náročnější projekt; na snímcích z velkých teleskopů uživatelé zjišťují a určují morfologii galaxií z přehlídky SDSS (70 tisíc klasifikací/hodinu!). Opět velký úspěch, díky velkému zájmu jim zprvu dokonce zkolaboval jejich vlastní počítač.

Galaxy Zoo 2: >60 miliónů klasifikací pro 200 tisíc galaxií - za 14 měsíců hotovo! Místo několika století.

Nejzajímavější úlovek z přehlídky se podařil holandské učitelce hudby Hanny van Arkelové. Nazývá se **Hanny's Voorwerp** (objekt Hanny). O co šlo: Bývalý kvasar IC 2497, LMi; vzdálenost 730 miliónů světelných let. Ve skutečnosti se jedná o světelnou ozvěnu na intergalaktickém mračnu po 70 tisících letech od jeho vyhasnutí. Průměr mračna 100 tisíc světelných let.

Interakce a učení mezi uživateli – na unikátní objekty jsou SW programy krátké! V těchto programech a projektech má pořád lidský mozek a člověk navrch!



Obrázek 2: Hanny's Voorwerp (objekt Hanny - na snímku dole) - zdánlivě záhadný objekt nalezený při prohlídce Galaxy Zoo. Původ objektu je v bývalém kvasaru IC 2497 (LMi) vzdáleném 730 miliónů světelných let. Jedná o světelnou ozvěnu na intergalaktickém mračku po 70 tisících letech od jeho vyhasnutí.

4. Rozvoj virtuálních observatoří

Velké množství dat proudí z nejrůznějších projektů a přístrojů v různých vlnových délkách, které se neustále hromadí, ale je roztroušeno

v různých zdrojích, katalogích apod. Bylo by velmi žádoucí, aby měli odborníci k dispozici všechna pozorování, která se daného objektu týkají. Problémem zůstává, že data jsou v různých zdrojích v různých formátech, různým způsobem dostupná. Proto vznikl projekt virtuálních observatoří.

Soustředění a homogenizace veškerých pozemních i kosmických údajů o daném objektu do jednoho balíku v databázi VO. Veřejný přístup pro odborníky:

V roce 2002 založení: **International Virtual Observatory Alliance** (www.ivoa.net). I virtuálních observatoří je dnes zhruba 20, proto je snaha o jejich sjednocení a unifikaci. V současné době je členem aliance 19 států včetně ESO. Poslední porada se konala v Banffu v Kanadě (10. - 12. října 2014).

Je to ještě práce na mnoho let, ale je skvělým příslibem do budoucna.

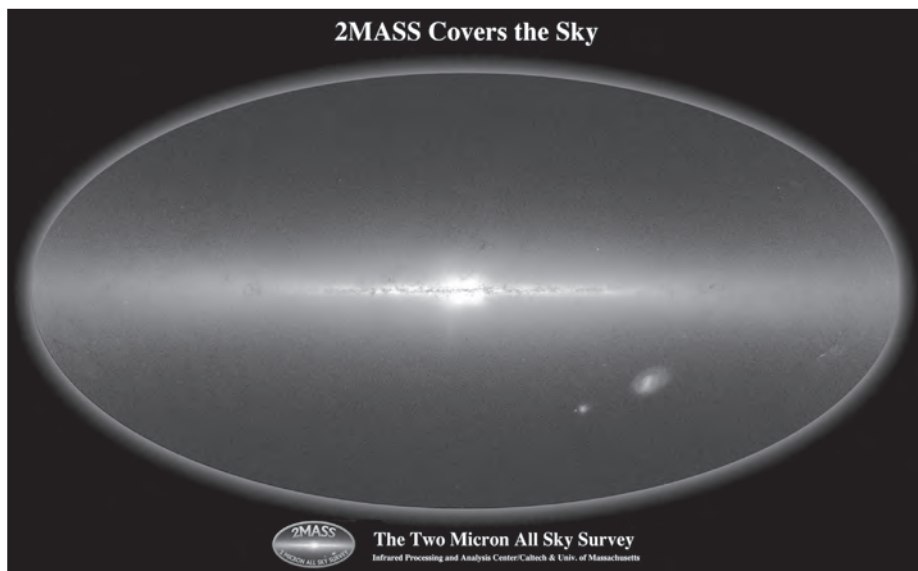
2MASS (Arizona a Chile)

Zpočátku nenápadná a skromně vyhlížející přehlídka oblohy pro obě polokoule. Jednalo se o infračervenou přehlídku ve 3 filtrech pomocí dvou 1,3m teleskopů za 3,5 roku.

Pořídilo se >4 miliónů snímků 471 miliónů bodových objektů (hvězd a planetek) a 1,6 miliónů plošných útvarů (většinou galaxií) ~25 TB dat. Katalog je veřejně přístupný. Polohy s přesností $\pm 0,1''$; jasnosti $\pm 0,03$ mag. MHV $16 \div 14$ mag ve filtrech J, H a K.

Jedná se o velmi užitečnou přehlídku celé oblohy. Je to také díky tomu, že v delších vlnových délkách (zejména infračervených) je vesmír podstatně lépe průhledný, a také se do červené oblasti spektra přeusouvá záření objektů díky Dopplerově posuvu (kosmologickému rozpínání prostoru).

Dá se říci, že tato přehlídka je rovnocenným protějškem HST i dalších obdobných projektů.



Obrázek 3: Celooblohový snímek z přehlídkového projektu 2MASS.

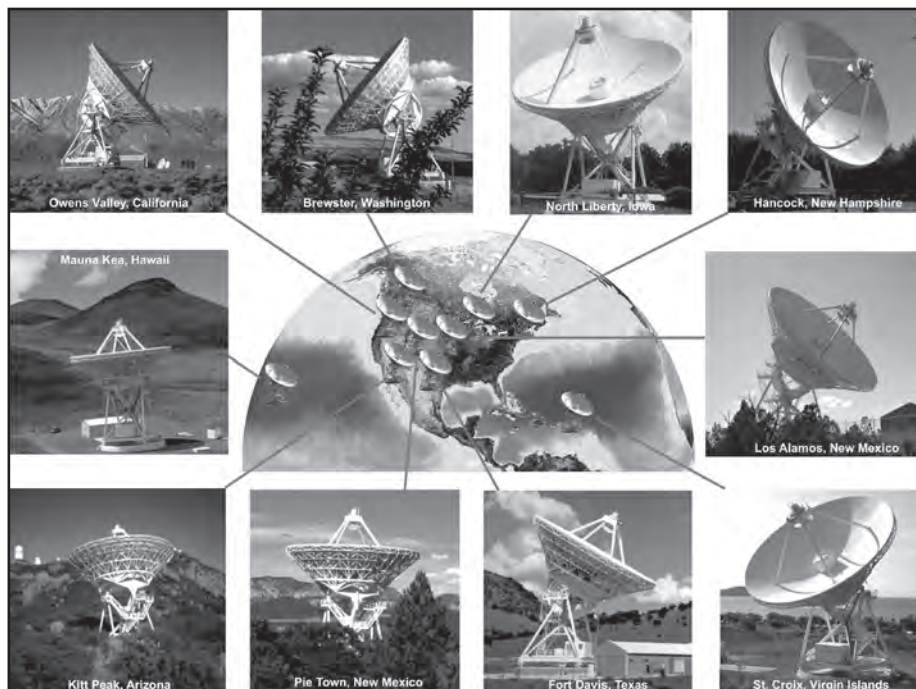
5. Optická a rádiová interferometrie

Interferometrie se stala velmi přínosnou metodou astronomie. Jako první se prosadila v oblasti rádiových pozorování. V případě rádiových pozorování jsou rozměry antén relativně malé v porovnání s vlnovou délkou rádiového záření. Proto se začala rozvíjet metoda interferometrie, tedy společné pozorování antén vzdálených od sebe stovky i tisíce kilometrů, což přineslo kýžený efekt ve zvýšení úhlového rozlišení. Sběrná plocha antén není sice velká, takže je omezena na jasnější objekty, pro něž interferometrie přináší výrazné zvýšení úhlového rozlišení.

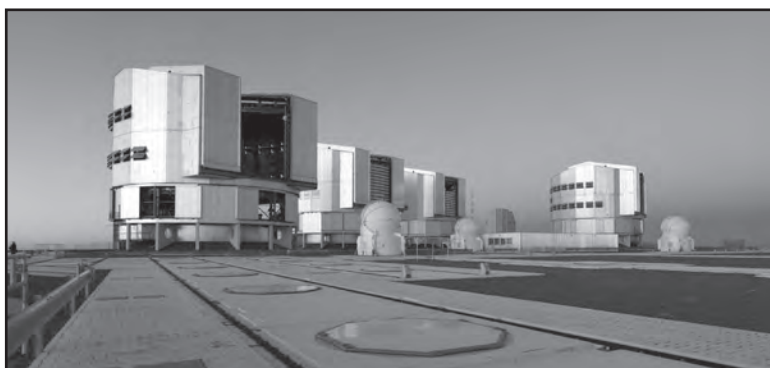
Interkontinentální rádiointerferometrie (VLBA): 1993 – 10 antén v USA na základnách dlouhých 52 km - 8,6 tisíc km. Rozsah vlnových délek $7 \div 900$ mm (frekvence $96 \div 0,3$ GHz). Úhlové rozlišení $0,17 \div 22$ obloukových milivteřin (HST má rozlišení 10 milivteřin).

Data na 1-terabytové disky se opatřují časovými značkami z ato-

mových hodin (metodu však lze použít pouze v případě využití velmi přesné časové základny). Centrální zpracování probíhá na výkonných superpočítačích. Datový přenos 10 Gbit/s.



Obrázek 4: Interkontinentální rádiorinterferometrie (VLBA): 1993 – 10 antén v USA na základnách dlouhých 52 km - 8 600 km.



Obrázek 5: Čtyři budovy čtyř dalekohledů VLT v Chile. Tyto dalekohledy se dají využít pro interferometrická měření v optické oblasti. Poděkování: ESO.

Stejná metoda byla použita a vyvinuta i pro optickou astronomii. Průkopníkem je ESO. **VLTI** (ESO, Cerro Paranal, Chile): 2002 - propojení 8,2m zrcadel čtyř teleskopů na základně až 130 m dlouhé. Aparatura PIONIER od konce roku 2010. Rozlišení 0,001". S touto hodnotou jsme už schopni rozlišit kotoučky hvězd. Využívá se to například i pro rozlišení exoplanet od mateřských hvězd.

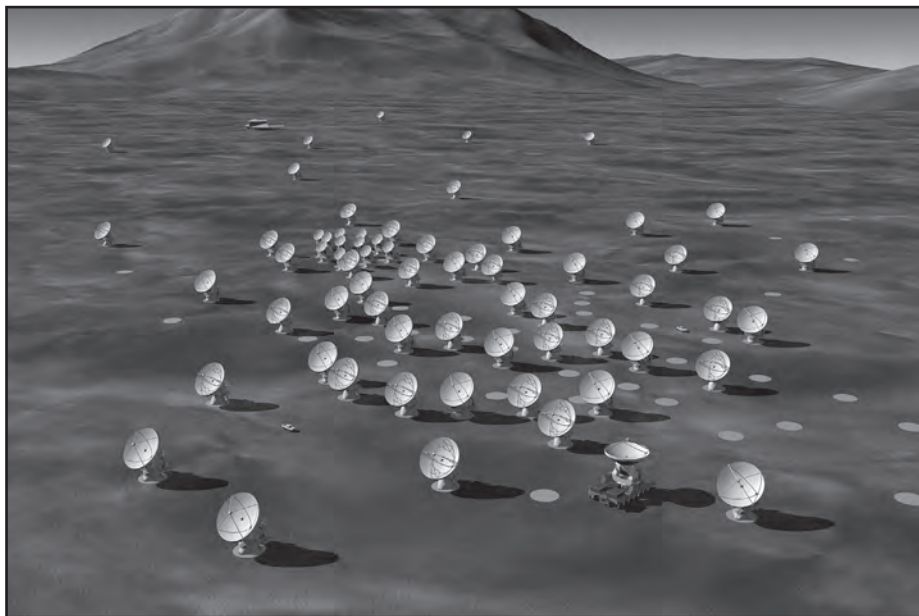


Obrázek 5: Antény systému ALMA v poušti Atacama na planině Chajnantor. Poděkování: ESO.

ALMA (ESO + Japonsko + USA: poušť Atacama, planina Chajnantor, 5 tisíc metrů n. m.).

Projekt slavnostně spuštěn v roce 2013. Systém se skládá z 66 parabol o průměrech 7 a 12 m, vlnové délky $0,3 \div 9,6$ mm (synchronizace na 1 pikosekundu). Ke zpracování dat je však potřeba opravdu mohutný výpočetní výkon, který zajišťuje 134 miliónů procesorů v centrálním počítači (tzv. korelátoru), který pracuje rychlostí 17 Pflops. Regionální centrum zaměřené na sluneční výzkum též v Ondřejově.

Výhodou je také to, že se antény mohou přemísťovat (až na vzdále-



Obrázek 6: Kresba celkového pohledu na systém antén ALMA v poušti Atacama dává lepší představu o velikosti přístroje. Vpravo v popředí je zobrazena anténa na jednom z tahačů. Poděkování: ESO.

nosti 16 km). Obří transportéry o hmotnosti kolem 200 tun. Jezdí rychlostí 4 km/h.

Rozsah pozorování systému ALMA je velmi široký (pozorování hvězd, galaxií, měření červeného posuvu, měření spekter apod.).

Projekt SKA – Square Kilometer Array

Na základě dobrých zkušeností s projektem ALMA se připravuje nový projekt s názvem SKA - *Square Kilometer Array* (soustava o ploše čtvereční kilometr).

Dokončení první fáze: 2020

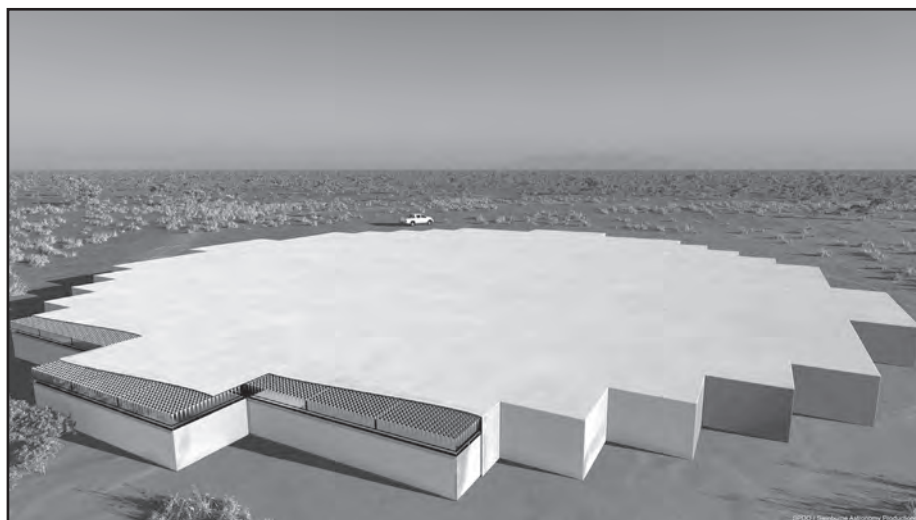
Druhá fáze: 2025

Třetí fáze: po r. 2025

Umístění: interferometr se bude nacházet na dvou kontinentech – první část v západní Austrálii a druhá v Jižní Africe.

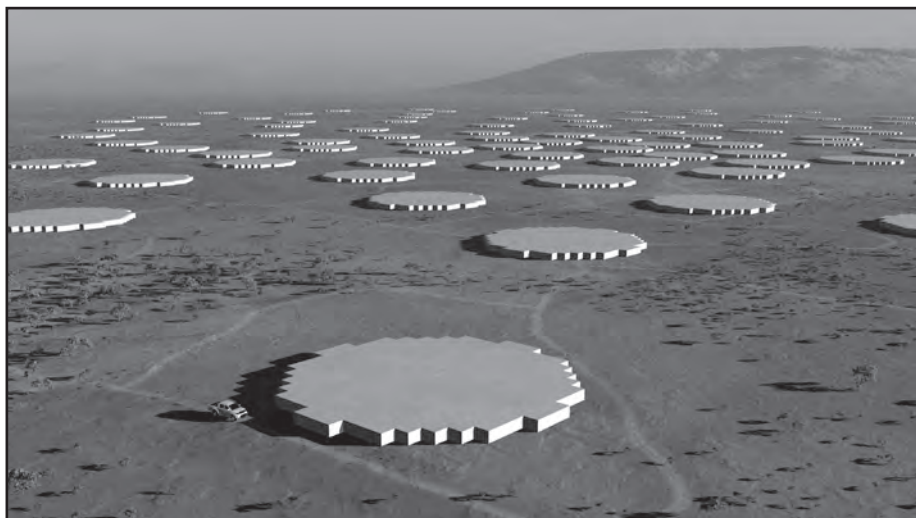


Obrázek 7: Umělecká představa systému antén o rozměrech 15 x 12 m v centru systému SKA. Poděkování: Swinburne Astronomy Productions for SKA Project Development Office.

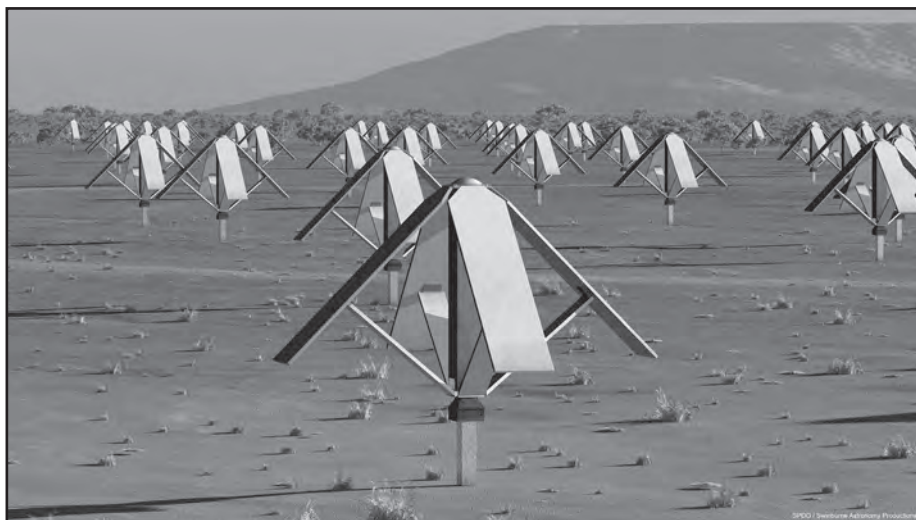


Obrázek 8: Umělecká představa antény pro příjem středních frekvencí systému SKA. Poděkování: Swinburne Astronomy Productions for SKA Project Development Office.

ULF antény. Sběrná plocha 1 km²; rozsah 50 MHz – 14 GHz. Větší sběr dat než celý současný internet! 50krát větší citlivost; cena 1,5 mi-



Obrázek 9: Umělecká představa celého systému antén pro příjem středních frekvencí systému SKA. Poděkování: Swinburne Astronomy Productions for SKA Project Development Office.



Obrázek 10: Umělecká představa systému ULF antén pro příjem nízkých frekvencí systému SKA. Poděkování: Swinburne Astronomy Productions for SKA Project Development Office.

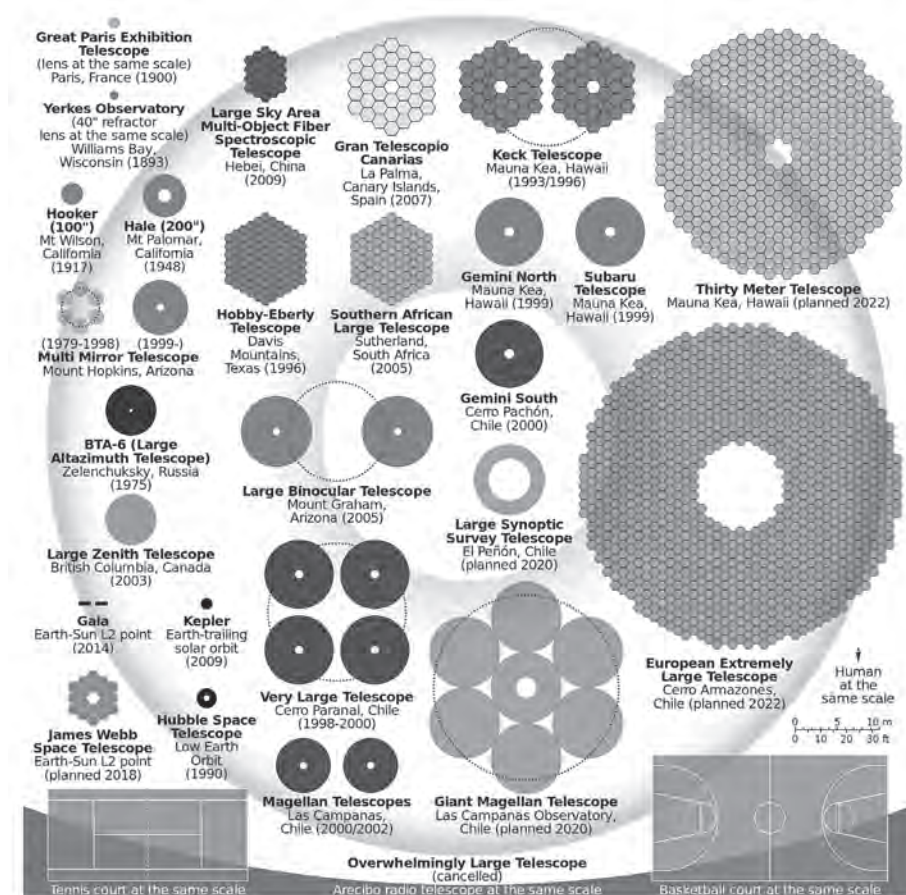
liard EUR. Start (pokusný) 2018, řídicí centrum Manchester, UK. Problém potřebného výpočetního výkonu, který dnes není k dispozici, ale

předpokládá se, že než se přístroj dostaví, budou potřebné výkony u výpočetní techniky k dispozici. Výkon superpočítače >100 Petaflops.

Přijímače středních frekvencí, vysokých frekvencí a radioteleskopy pro Jižní Afriku pro nízké frekvence.

6.1 Zvětšování sběrné plochy obřích teleskopů

Jak se změnila sběrná plocha astronomických dalekohledů. Od 1,5m dalekohledu na Mt. Wilsonu až po nejnovější plánované přístroje.



6. 2 Obří teleskopy s laserovou adaptivní optikou

Aktivní optika vyrovnává průhyby zrcadel případně konstrukce při naklápění. Mnohem náročnější je oprava chyb zanášených do obrazu atmosférou – **adaptivní optika**.

K vytvoření umělé hvězdy v sodíkové vrstvě atmosféry se používá sodíkový laser. Umělá hvězda se zdeformuje díky nehomogenitám v atmosféře a odražená se vrátí do vysílače. Tak lze rychle měřit tyto deformace a zajistit odstranění vlivu turbulence atmosféry za cenu bleskurychlého obrovského objemu výpočtů. Musíme opravovat atmosféru zhruba 1000krát za sekundu. Systém stojí pro velký dalekohled kolem miliónu dolarů... Je to však velmi efektivní proces.

U velmi velkého dalekohledu (E-ELT ESO) nestačí jediný laser, ale musí se použít až 4 lasery – umělé hvězdy a opravovat každou část obrazu samostatně.

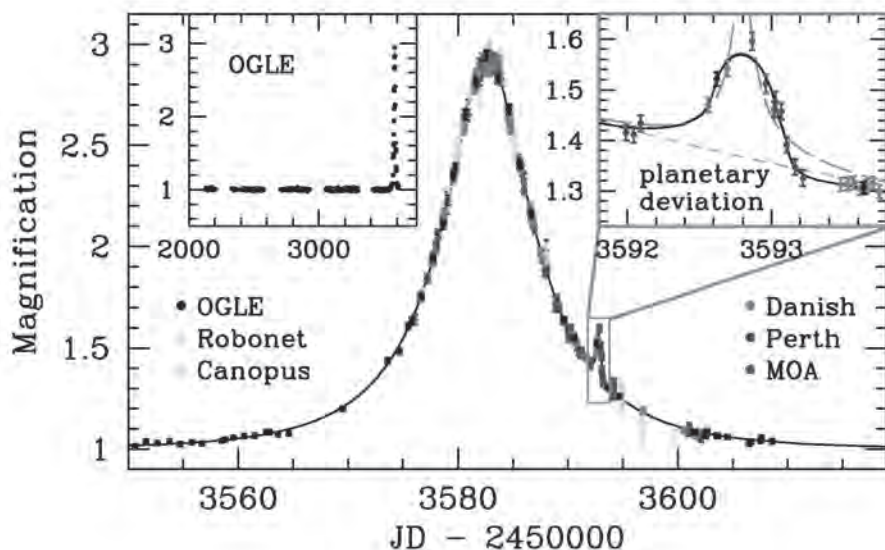


Obrázek 11: Umělecká představa použití systému čtyř laserů pro systém adaptivní optiky u plánovaného dalekohledu E-ELT ESO. Poděkování: ESO

7. Synoptické přehlídky oblohy

Bohdan Paczynski (1940-2007): navrhl roku 1986 projekt hledání gravitačních mikročochek (OGLE, 1992) a v roce 1997 synoptické automatické přehlídky oblohy (ASAS). I když A. Einstein pochyboval o možnosti, že se dvě hvězdy dostanou do zákrytu. Paczynski se však domníval, že to možné je, i když pravděpodobnost je nízká. Možnost pozorování tohoto efektu však zvýší skutečnost, že budu pozorovat velmi velký počet hvězd najednou. To dnes není díky širokoúhlým přehlídkám žádný problém.

Opakované širokoúhlé snímky téže části (resp. celé) oblohy - záznam vzácných krátkých jevů (trvání zlomky sekund až desítek hodin). Nové okno do vesmíru: bleskové zpracování údajů o jasnostech a polohách miliónů astronomických objektů. Robotické teleskopy se širokým zorným polem a důmyslný software, který porovnává snímky téže části oblohy s předlohou a automaticky ohlásí poplach.



Obrázek 12: Příklad registrace gravitační mikročochky v datech změn jasnosti hvězdy včetně registrace dalšího tělesa (planety) v systému kolem hvězdy v podobě zjasnění na sestupné větvi grafu.

Metoda je schopna odhalit i přítomnost exoplanet u hvězd. S ohledem na plánovanou přehlídku oblohy má tato metoda dobrou budoucnost.

Synoptické přehlídky jsou schopny zaznamenat velkou část oblohy v krátkém čase. Dnes většina přehlídkových projektů snímkuje stejnou část oblohy s velkým časovým odstupem.

Hlavní cíle synoptických přehlídek:

- a) Hledání planetek křižujících dráhu Země, objektů transneptunského pásu a komet
- b) Měření paralax a vlastních pohybů hvězd a 3D struktury Galaxie
- c) Objevy velkého počtu vzdálených supernov (testy rozpínání vesmíru; skryté látky/dark matter a energie/dark energy)
- d) Shlukování galaxií do hnízd (kup a nadkup) s cílem zjistit vzhled „kosmické pavučiny“
- e) Rozsah a velikost slabého gravitačního čočkování kvůli studiu rozložení skryté látky, multipólového spektra v rozložení hmoty a kosmologii
- f) Proměnné hvězdy (cefeidy, RR Lyrae) vhodné pro určování vzdáleností
- g) Krátkodobé (přechodné) jevy (GRB, čočky, nové jevy)

Výsledkem těchto plánovaných synoptických přehlídek oblohy... obrovské množství dat... co s nimi, jak je zpracovat, archivovat, zpřístupnit apod.

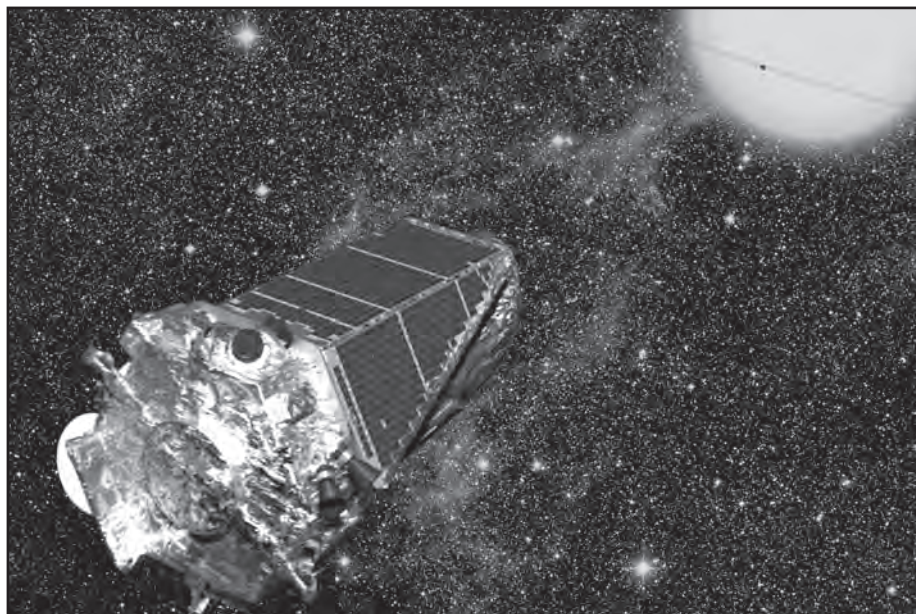
Družice Kepler (NASA)

Kepler (NASA, od května 2009 – do května 2013 (po poruše reakčního kola): měřila velmi přesně jasnosti hvězd. Tato kosmická sonda byla určena pro objevování tranzitujících exoplanet.

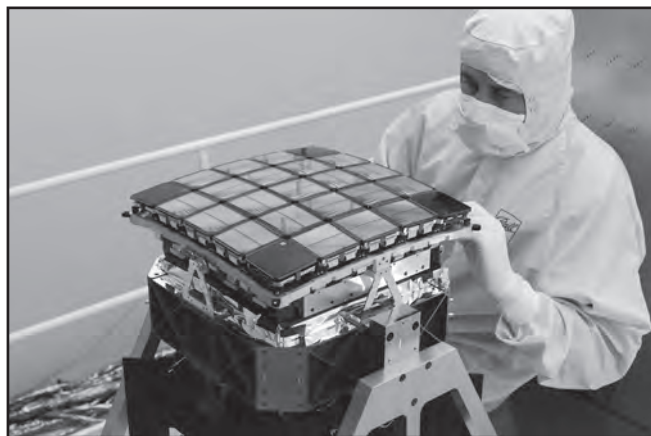
Objevy ~1 tisíc exoplanet a dalších tisíců kandidátů. Určení vnitřní

struktury mnoha hvězd pomocí asteroseismologie (umožňuje odhalovat vnitřní stavbu hvězd) aj.

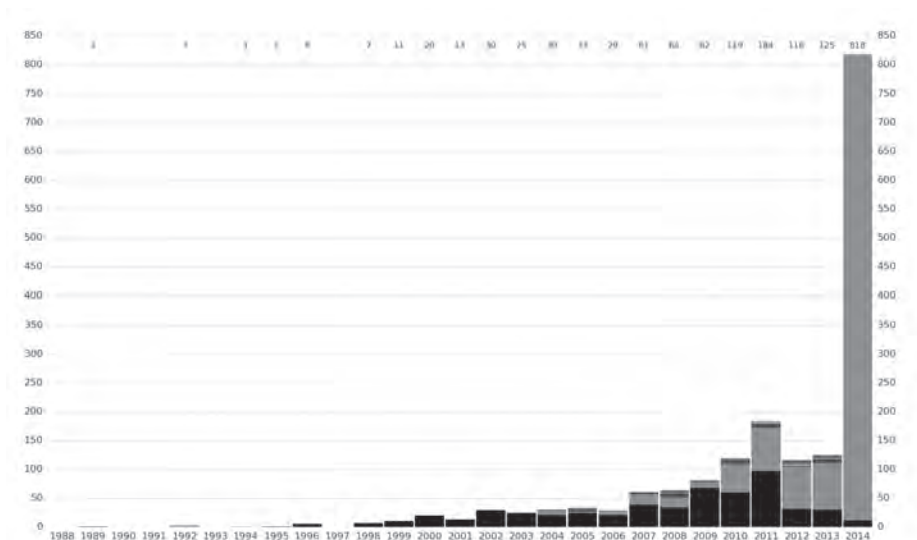
Družice pracuje dále v jiném režimu – postupně zorným polem drifuje podél ekliptiky. Projekt Kepler byl schválen v NASA na popáté.



Obrázek 13: Družice Kepler přinesla neocenitelná data o změnách jasnosti velkého množství hvězd z nichž lze mimo jiné odhalit případnou přítomnost tranzitujících exoplanet.



Obrázek 14: Detektor CCD družice Kepler.



Obrázek 15: Změny počtu objevených exoplanet podle způsobu objevu. Tmavě šedá až černá - změny radiálních rychlostí, světle šedá - tranzity exoplanet. Velký nárůst počtu objevených exoplanet v roce 2014 je dán zpracováním dat a publikováním výsledků z družice Kepler.

Astrometrická družice Gaia (ESA)

Evropský projekt – ESA. Start v XII 2013; plán životnosti 5 let; bod L2; dvě obdélníková zrcadla s rozměry 1,45 m x 0,5 m; plocha 0,725 m²). Měření poloh a vlastních pohybů 1 miliardy hvězd napříč celé naší Galaxie) do 20 magnitudy s cílem určit jejich trigonometrické paralaxy. 3D mapa rozložení hvězd v Galaxii. Kalibrace kosmologického žebříku vzdáleností. Objev tisíci exoplanet a desítek tisí-



Obrázek 16: Družice GAIA

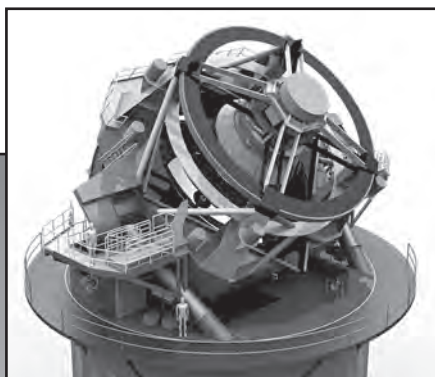
ců planetek Sluneční soustavy.

První výsledky mapování by měly být publikovány někdy kolem roku 2017.

LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*)

LSST (8,3m zrcadlo, sběrná plocha 35 m². Kamera 3,2 Gpix. Cerro Pachón, Chile). Ročně 200 tisíc snímků. tj. 1,3 PB. Procesory 100 Tflops. Celkem do archivu 15 PB; Opakované snímkování (sběrné video) přístupné části oblohy během několika nocí (30 TB/noc - veřejně přístupné).

Nové okno do vesmíru = krátkodobé úkazy; těžba z datových skladů.



Obrázek 17: Kresba dalekohledu LSST a budovy s kopulí budované na hoře Cerro Pachón v Chile.



8. Numerické simulace astrofyzikálních procesů a vývoje vesmíru

Rychlý vývoj výpočetní techniky díky:

- paralelní výpočty
- počítačové sítě GRID
- oblačná úložiště dat (cloud computing)

Sofistikované výpočetní programové balíky: numerická relativita (podle rovnic obecné relativity).

Výhled pro r. 2021: pevné disky s kapacitou 10 TB, paměti RAM 100 GB. Osobní paměti MEMEX – ukládání osobních dat tempem do 25 GB/rok, tj. za celý život asi 1 - 2 TB. Kdyby se ukládala i obrazová data, tak 80 TB/rok, pak každý člověk během života uloží 8 PB. MEMEXY by se pak asi daly cloudově propojit, tj. roční přírůstek dat přibližně 100 EB ($EB = 10^{21}B$)! Jejich rýžování z cloudů by bylo asi časově dost náročné, pokud nepřijdou do té doby kvantové počítače. V současné době v Kongresové knihovně USA uloženy 3 PB a kolektivní paměť obyvatel Země dosahuje asi 1,2 EB.

Některé simulace jsou opravdu výpočetně náročné. Vědecká data nahrávky audia a videa v současnosti již 1 zettaB (10^{21}). Hranice yottaB (10^{24}) bude asi dosažena kolem r. 20⁵⁰.

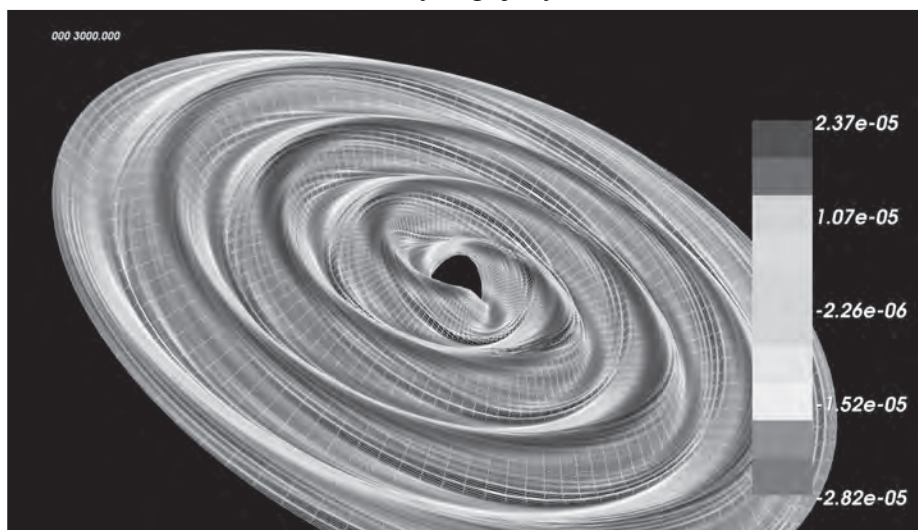
Nejnáročnější simulace (program ILLUSTRIS):

Vývoj vesmíru od 12 mil. let po VT do současnosti: USA + SRN + UK + F superpočítače. Komplexní fyzika – gravitace, chemické procesy v plynu, elektromagnetické záření, magnetické pole. 2,3 tis. let CPU; 12 miliard buněk o hraně 2,3 tisíc světelných let. Krychle o hraně 35 miliónů světelných let. Ilustrační snímek na 3 straně obálky.

Numerická relativita

Simulace srážek černé díry s černou dírou, popř. neutronovou hvězdou. Spirálový oběh párů černých veleděř, deformace prostoru poblíž obzoru událostí, extrakce energie z rotujících černých děr (požadavky CPU řádově 10 let na jednu konkrétní simulaci).

Akreční disk kolem černé díry napájený hvězdou:



Obrázek 18: Simulace procesů v akrečních discích kolem kompaktních objektů.

Výbuchy supernov

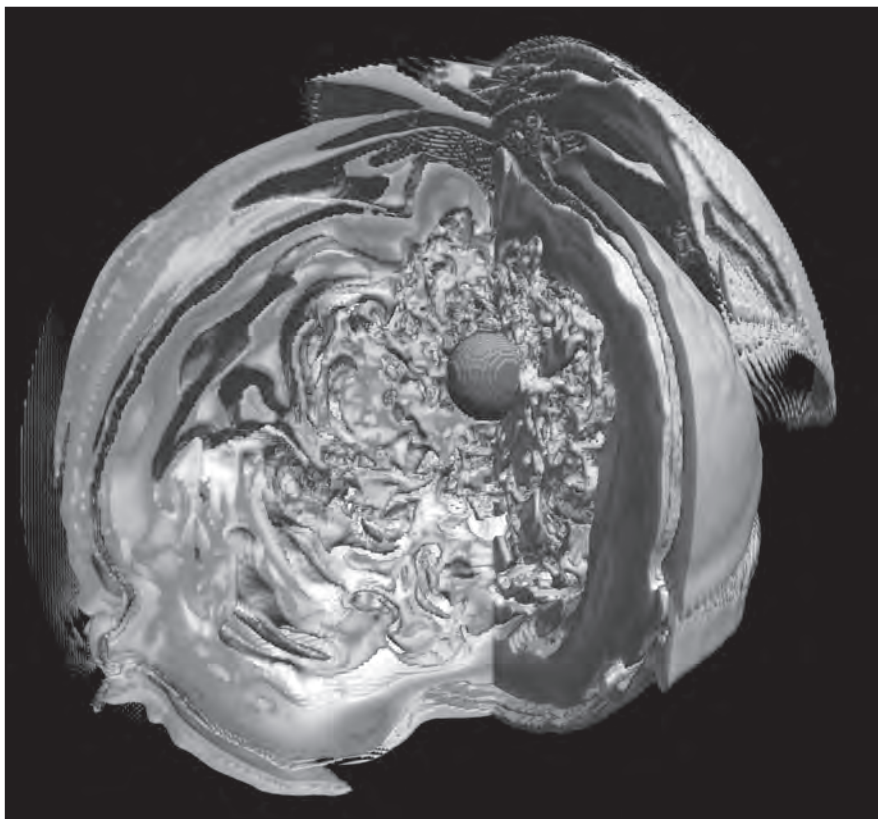
Nejtěžší simulace, které se provádí. S ohledem na nezbytnost zachycení a popisu reálných (a velmi složitých) fyzikálních jevů je pro simulace výbuchů hmotných hvězd (kolapsaru) nutné používat 3D simulace: úhlové rozlišení 1.5° (3×10^{20} Flops; 11,4 tisíc let CPU).

Supernova třídy II (velmi hmotné hvězdy): zánik termonukleárních reakcí vede ke gravitačnímu zhroucení. Vliv rotace a silného magnetického pole, pružný odraz od neutronové hvězdy. Celkově se jedná o velmi složité a náročné výpočty.

Příklad grafického výstupu z 3D simulací kolapsu hmotné hvězdy vidíme na obrázců č. 19.

Závěr

Nyní lze uložit na 1 cm^2 pevného disku až 15 Gbitů dat. Kvantové počítače by v objemu 1 dm^3 mohly uložit 10^{31} bitů a vykonat 10^{51} operací za sekundu (zatím teoreticky). Termodynamický problém: při



Obrázek 19: Simulace procesů při výbuších supernov patří k tomu nejnáročnějšímu, co dnes relativistické simulace dokáží.

tomto výkonu se kvantový procesor zahřeje na 1 GK a vybuchne jako supernova ve shodě se současnými 3D modely výbuchů supernov, na něž astrofyzikům stačí pouhé petabyty vstupních dat.

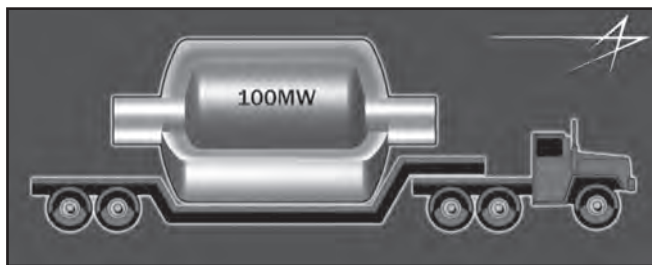
**PETABYTOVÁ ASTRONOMIE nás už teď umí spolehlivě
varovat před budoucí zkázou civilizace; má tedy i požadovaný
PRAKTICKÝ UŽITEK!**

● ● ● ● ● ● ● ●

Kompaktní fúzní reaktor – nastal průlom ve fúzi?

Petr Kulháněk, převzato ze serveru www.aldebaran.cz

O termojaderné fúzi jako zdroji levné a bezpečné energie sníme již mnoho desítek let. Často se zdálo, jako by řešení bylo na dosah, nicméně se pokaždé vynořily obtížně překonatelné překážky. V současnosti se naděje ubírají k velkému tokamaku ITER, který se staví ve Francii v blízkosti hradu Cadarache. Jde ale o horizont dlouhodobý, provoz by měl začít po roce 2020 a i v případě úspěchu bude cesta k první termojaderné elektrárně tohoto typu trvat ještě desítky let. Vědělo se, že společnost Lockheed Martin vyvíjí pro NASA nové raketové motory na nejrůznějších principech a vědělo se, že se v laboratořích této společnosti konají i experimenty s termojadernou fúzí. Nicméně zprávy byly kusé a konkrétní obrysy dostaly až v polovině října letošního roku, kdy společnost zveřejnila zprávu, že vyvíjí **termojaderný reaktor založený na jiném principu než tokamak či stelarátor**. Práce podle vyjádření týmu pokročily natolik, že kompletní řešení reaktoru bude hotové v horizontu pěti let a první elektrárna dodávající energii by měla být zkonstruována do deseti let. Rozměry zařízení jsou při daném výkonu desetkrát menší než u tokamaků a kompletní reaktor dodávající 100 MW energie by se měl vejít na korbu většího nákladního automobilu. Pokud se toto inženýrům z Lockheed Martin skutečně podaří, půjde o největší průlom v získávání energie za celou historii lidstva.



Obrázek 1: Představa reaktoru na korbě většího nákladního automobilu. Zdroj: Lockheed Martin.

Jaderná energie

Atomová jádra se skládají z neutronů a protonů vázaných silnou interakcí. Tato vazba je největší pro jádra přibližně veliká jako jádro železa. Energii lze proto získávat buď **štěpením jader** větších, než je železo, nebo slučováním jader lehčích. Na štěpení jsou založeny dnešní jaderné elektrárny, první štěpný reaktor zkonstruoval Enrico Fermi v roce 1942 v Chicagu, čímž odstartoval jadernou energetiku.

Druhý způsob, **slučování lehkých jader neboli fúze**, probíhá přirozeným způsobem ve hvězdách a tedy i v našem Slunci. Je zřejmé, že v přírodě je fúzní reakce zcela funkční, bez ní by hvězdy neexistovaly. Velkým snem je řízené uskutečnění této reakce v pozemských podmínkách. Pro překonání repulzivních elektrostatických sil je třeba vysoká teplota plazmatu, ve kterém má reakce proběhnout. K účinnému získávání energie musí být plazma po dostatečně dlouhou dobu dostatečně husté a horké. Ve hvězdách jsou tyto podmínky zaručeny přirozeným způsobem. Na Zemi musíme plazma držet v magnetických polích a zahřívat ho elektrickým proudem či dalšími mechanismy. Plazma je, na rozdíl od plazmatu v nitru hvězd, značně nestabilní a snaží se z oblasti, kde má fúze proběhnout, uniknout. A je tu ještě jeden rozdíl. Ve hvězdách začíná fúze sloučením dvou protonů, což je velmi pomalá reakce ovládaná slabou interakcí. V pozemských podmínkách musí být fúzní reakce podstatně rychlejší, a proto se začíná až slučováním deuteria. Často uváděný slogan „*Zapálíme Slunce na Zemi*“ je tak poněkud zavádějící.

Fúzní experimenty

První fúzní experimenty se dělaly na plazmových vláknech (tzv. pinčích), která jsou stlačována vlastním magnetickým polem. Myšlenka udržení plazmatu v magnetické pasti se později rozvinula a vedla k **tokamakům** v Sovětském svazu a **stelarátorům** ve Spojených státech. V tokamaku je plazma samotné sekundárním závitem obřího transformátoru a protékající elektrický proud nejenom že plazma zahřívá, ale vytváří i část pole nutného k jeho udržení. Plazma zaujímá prostor to-

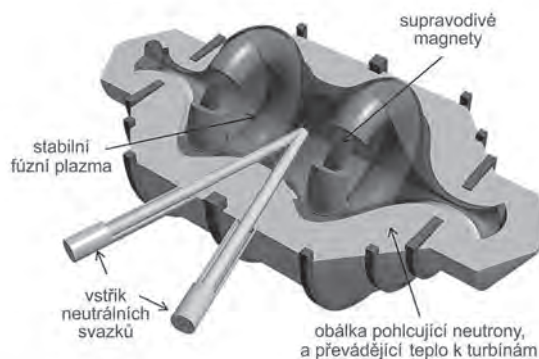
roidu, tato geometrie je výhodná, protože plazmový sloupec je stočený a nemá žádný konec, kterým by plazma unikalo. Protipólem tokamaků jsou stellarátory, opět je v nich plazma drženo v toroidální geometrii důmyslnou kombinací magnetických polí, ta ale nevznikají průtokem proudu plazmatem. Název stellarátor má připomínat slovo stella (hvězda), a symbolizovat tak uskutečnění hvězdné reakce na Zemi. Existuje ale i řada dalších systémů, k nejvýznamnějším patří inerciální fúze, kde se ozařuje malá peleta (terčik s palivem) z mnoha stran výkonným laserem, čímž vznikne na krátkou dobu fúzní plazma, které je drženo pohromadě pouhou setrvačností. Zkoumají se i různá hybridní řešení, tj. kombinace několika principů, včetně kombinace fúze i štěpení. Fúzní výzkum je během na dlouhou trať: malé, ale vytrvalé pokroky vedou ke vzdálenému cíli – zdroji energie budoucnosti.

Proč vlastně lidé touží po fúzi a nespokojí se s štěpením? Především jsou zásoby uranu vhodného pro štěpení omezené. Při štěpení vzniká radioaktivní odpad, který se musí dlouhodobě skladovat a který je aktivní i po tisících letech. Fúze využívá deuterium a tritium. Deuterium je obsaženo v oceánech ve velkém množství a jeho zásoby jsou v podstatě nevyčerpatelné. Tritium vzniká na periferii reaktoru při osvětlování jader lithia produkty fúzní reakce. Lithium je prvek hojně zastoupený v zemské kůře. Dva hlavní aktéři fúzní reakce – deuterium a lithium, jsou tedy v našem okolí v dostatečném množství. Ve fúzním reaktoru bude jen velmi malé množství paliva a při případné havárii bude ohroženo jen bezprostřední okolí reaktoru (maximálně desítky metrů). Navíc není finální produkt štěpení – ${}^4\text{He}$ radioaktivní, jde o velmi stabilní atomové jádro. Samotné stěny reaktoru budou po určité době provozu samozřejmě zářit, neboť v nich vzniknou radioaktivní prvky. Jejich poločas rozpadu bude ale krátký a materiál reaktoru bude po sto letech skladování prakticky neaktivní (na rozdíl od palivových článků štěpné reakce, jejichž doba skladování je za horizontem našeho vnímání).

Kompaktní fúzní reaktor

Tým vedený Thomasem McGuirem oznámil úspěšné završení první

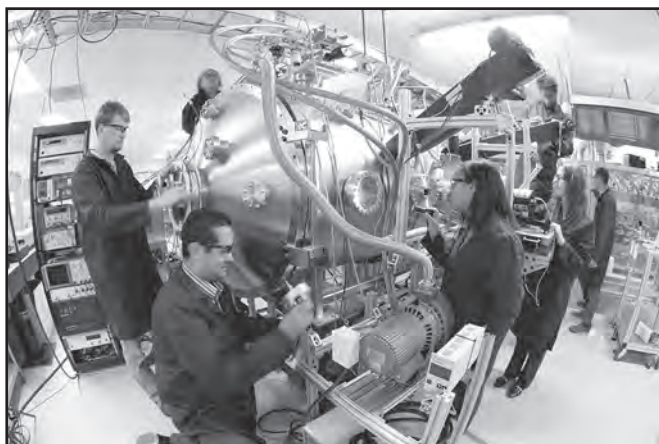
fáze prací na reaktoru nového typu v laboratoři společnosti Lockheed Martin. Reaktor nazvali **kompaktní fúzní reaktor** (CFR, *Compact Fusion Reactor*). Zařízení se výrazně odlišuje od klasických tokamaků, plazma nezaujímá ve vakuové komoře toroidální tvar, ale pouze sloupec držený magnetickými poli mezi dvěma magnetickými zrcadly. Jednoduchý koncept umožňuje podle aktuálního tvaru plazmatu měnit magnetické pole, které plazma odděluje od stěn komory. Magnetické pole je tvořeno supravodivými magnety v podobě několika prstenců. Na koncích komory je pole nejsilnější a většinu částic plazmatu odrazí zpět do reaktoru. Uvažuje se i o elektrickém poli, které by vracelo ionty z koncových oblastí do reaktoru (současně nelze navracet ionty i elektrony, elektrony mají opačný náboj a pole na ně působí v opačném směru). Ohřev plazmatu je uskutečňován metodami vyvinutými u tokamaků – jednak vysokofrekvenčním ohřevem (plazmatem prochází elektromagnetická vlna, která rezonančně zahřívá plazma) a jednak neutrálními svazky, které snadno proniknou magnetickým polem a v plazmatu jsou zachyceny a svou energii mu předají.



Obrázek 2: Základní schéma kompaktního fúzního reaktoru. Zdroj: Lockheed Martin.

Tvůrci nového reaktoru tvrdí, že plazma je relativně stabilní a podařilo se jim dosáhnout vysokého poměru mezi tlakem plazmatu a tlakem magnetického pole. Ten se popisuje tzv. *parametrem beta* (poměrem hustoty tlakové energie plazmatu a hustoty energie magnetického pole). Důležité je, aby podstatná část energie byla deponována v plazmatu

a nikoli v magnetickém poli, které plazma drží. Parametr beta by proto měl být co možná nejvyšší. V současných experimentech v Lockheed Martin se blíží jedné a v budoucnosti by měl být vyšší než jedna. Nová geometrie umožňuje při stejných rozměrech desetkrát vyšší fúzní výkon než v tokamacích, tj. při stejném výkonu může být kompaktní reaktor desetkrát menší a tedy i levnější a lépe ovladatelný. U stavěného tokamaku ITER se předpokládá výkon 500 MW při průměru komory 6 metrů. Samotná komora bude ovšem obklopena nejrůznějšími zařízeními a stane se pevnou součástí mnohonásobně větší budovy.



Obrázek 3: Stavba prototypu reaktoru. Zdroj: Lockheed Martin.

V Lockheed Martin chtějí postavit kompaktní reaktor, který se vejde na korbu nákladního automobilu a bude mít výkon 100 MW, což je výkon, který by postačil pro potřeby menšího města (100 000 obyvatel). Podle propočtů by 25 kg paliva mělo vystačit na provoz reaktoru po dobu jednoho roku. Konkrétní plán je mít do pěti let funkční a bezpečný reaktor a během dalších pěti let vyvinout zařízení k přeměně tepelné energie deponované ve stěnách nádoby na elektrickou energii (zde bude použito klasických výměníků a turbín). Sečteno a podtrženo – v Lockheed Martin tvrdí, že do deseti let budou mít kompletně hotovou funkční termojadernou elektrárnu, která bude navíc přenosná.

Podle vyjádření členů týmu nebudou u kompaktního reaktoru největ-

ší problémy se stabilitou plazmatu, ale s volbou vhodných materiálů pro reaktor, tedy největší kus práce se očekává v následujících pěti letech od materiálových inženýrů.

Závěr

Pokud půjde vše podle plánů odborníků z Lockheed Martin a NASA, dočkáme se do pěti let reaktoru (a do deseti let elektrárny), který bude schopen trvale pohánět nejenom kosmické lodě (a výrazně zkrátí například cestu na Mars), ale samozřejmě i lodě pozemské a letadla. Letadla by tak měla poprvé v historii neomezený dolet. Energii pro města by bylo možné vyrábět čistě, s minimálními náklady a nulovou zátěží životního prostředí. Vše to zní jako pohádka. Nyní velmi záleží na tom, zda je tento ambiciózní cíl reálný. Tedy nezbývá než vyčkat avizovaných pět let do konstrukce funkčního reaktoru. Pokud se skutečně podaří tento reaktor vyvinout, půjde o mimořádný počín do budoucnosti, počín, který odstartuje energetickou revoluci a kterému se budou bránit nejrůznější energetické závody, jejichž existence bude silně ohrožena. Nepředbíhejme ale a vyčkejme věcí příštích. Na cestě k uskutečnění fúze jsme se už mnohokrát zmýlili.

Odkazy

Lockheed Martin: Compact Fusion - <http://lockheedmartin.com/us/products/compact-fusion.html>

Guy Norris: High Hopes – Can Compact Fusion Unlock New Power For Space And Air Transport?; Aviation Week, 14 Oct 2014 - <http://aviationweek.com/blog/high-hopes-can-compact-fusion-unlock-new-power-space-and-air-transport>

Guy Norris: Skunk Works Reveals Compact Fusion Reactor Details; Aviation Week, 15 Oct 2014 - <http://aviationweek.com/technology/skunk-works-reveals-compact-fusion-reactor-details>

Reuters: Lockheed announces breakthrough on nuclear fusion energy; The Guardians, 15 Oct 2014 - <http://www.theguardian.com/environment/2014/oct/15/lockheed-breakthrough-nuclear-fusion-energy>

YouTube: Lockheed CFR; Lockheed Martin - <http://www.youtube.com/watch?v=UIYCLniDFkM>

Poznámky:

© listopad 2014, Hvězdárna Valašské Meziříčí, p. o.
Vsetínská 78, 757 01 Valašské Meziříčí

Telefon: + 420 571 611 928 IČ: 00098639
Web: www.branadovesmiru.eu, www.astrovm.cz

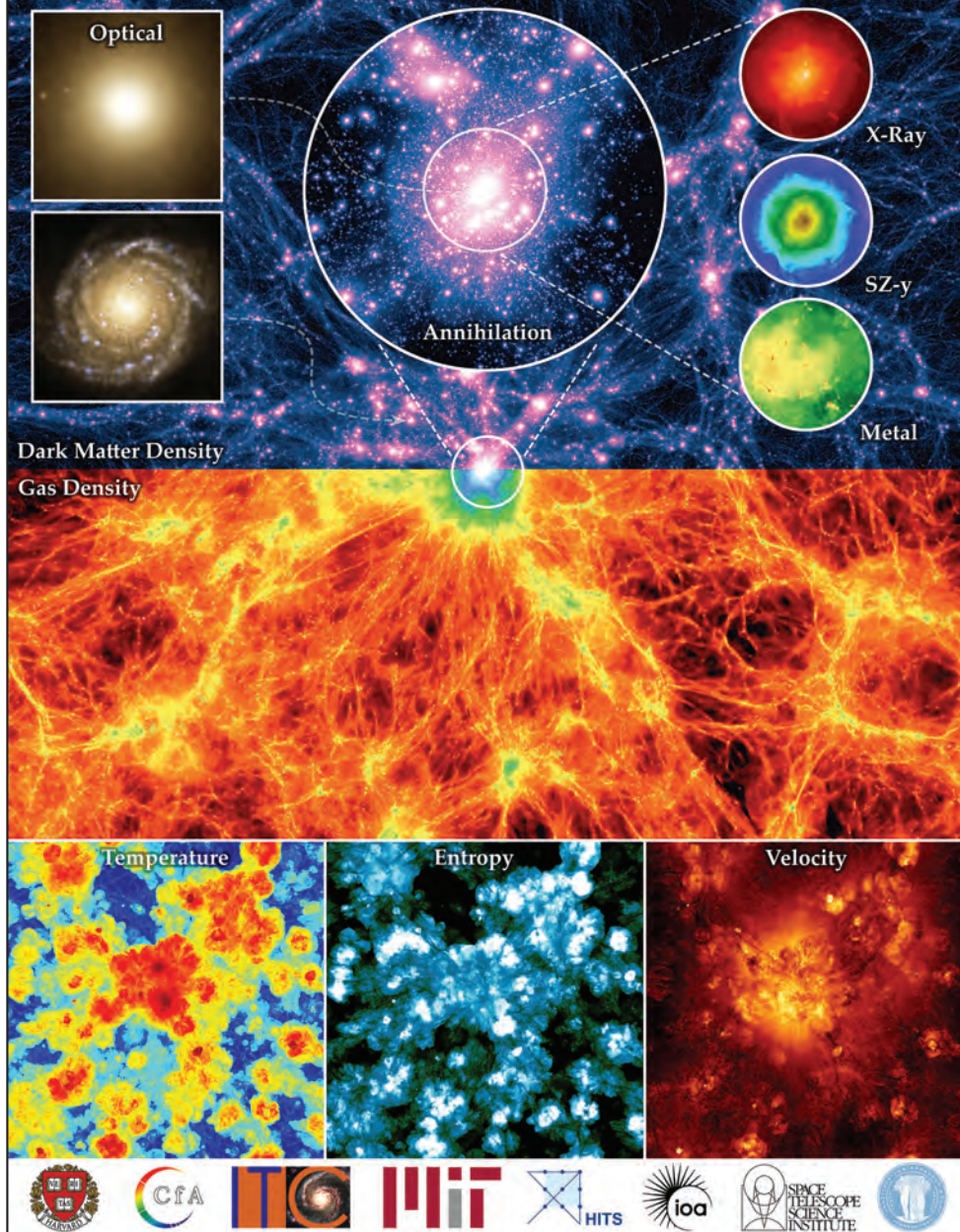
Připravil: Libor Lenža

Sazba a tisk: RAP GROUP s.r.o., Hranická 838, 757 01 Valašské Meziříčí

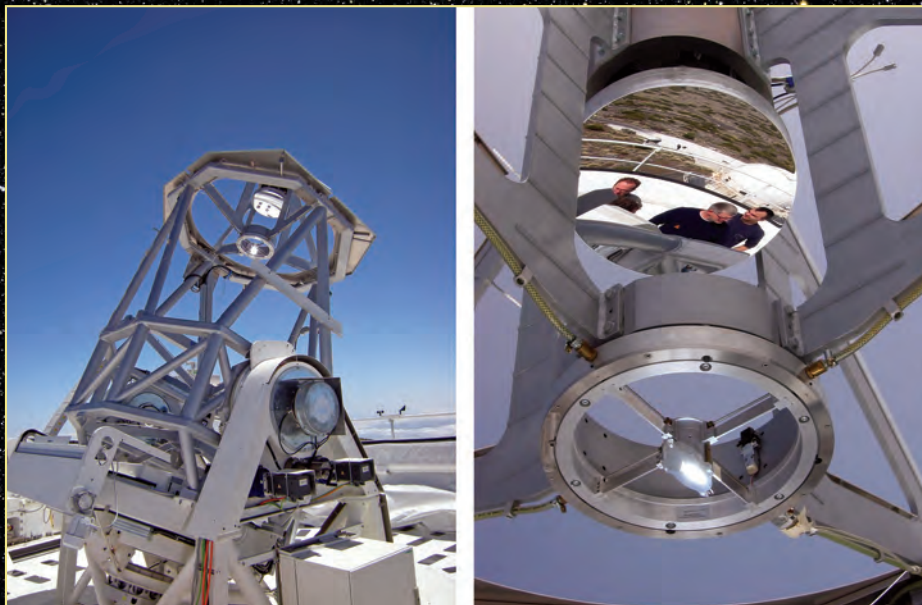
Vzdělávací materiál byl vydán v rámci projektu Brána do vesmíru podpořeného EU prostřednictvím OP Přeshraniční spolupráce SR-ČR 2007-2013.

The Illustris Simulation

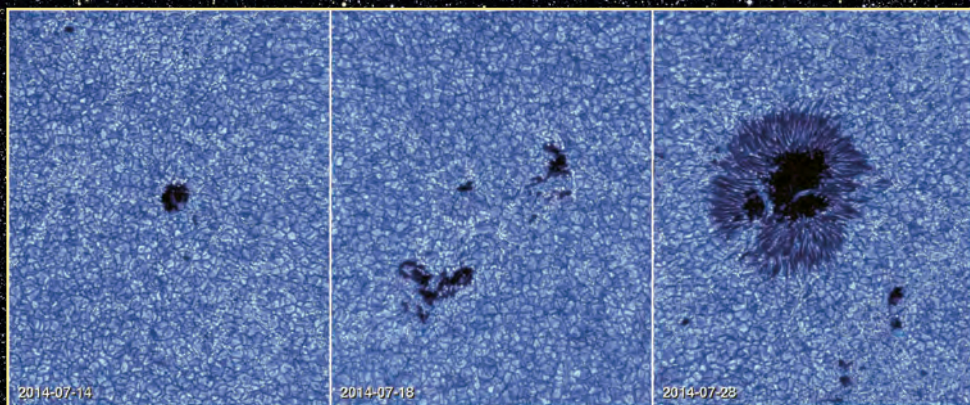
M. Vogelsberger · S. Genel · V. Springel · P. Torrey · D. Sijacki · D. Xu · G. Snyder · S. Bird · D. Nelson · L. Hernquist



Informační poster k projektu ILLUSTRIS. Projekt simulace vzniku a vývoje vesmíru.



GREGOR a jeho primárne ohnisko F1 (vpravo), s plnou clonou, na ktorej je obraz Slnka. Nad clonou je sekundárne zrkadlo M2. Plášťová hadica privádza do clony chladiaci vodu.



Pór a jasné magnetické elementy (vľavo), vynárajúca sa aktívna oblasť (uprostred) a slnečná škvrna (vpravo) na snímkach získaných prístrojom BIC/GFPI v molekulárnom G páse v júli 2014.

*Na prvej strane obálky: Model prvej objavené čiernej diery
Cyg X1. Látka preteká z modrého obra na čiernu dieru.*