

JAK VZNIKAL SVĚT

Petr Kulhánek

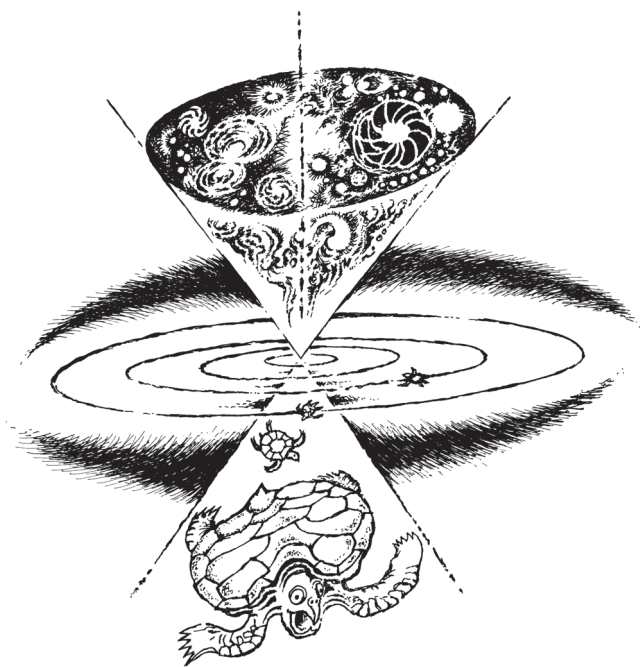
2019

Text © Petr Kulháněk
Obálka a grafika © Ivan Havlíček

ISBN 978-80-906638-1-7

JAK VZNIKAL SVĚT

aneb třináctero příběhů o kosmologii



Petr Kulháněk
2019

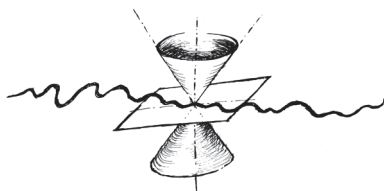
Obsah

Předmluva	10
<i>Jak jsme se myšlili</i>	<i>10</i>
1. Krize síly	15
<i>Od newtonovské mechaniky k Faradayovu poli</i>	<i>15</i>
<i>Problém síly</i>	<i>18</i>
<i>Dvě řešení</i>	<i>20</i>
<i>Teorie všeho</i>	<i>23</i>
<i>Víte, že</i>	<i>25</i>
2. Expanze a kosmologický princip	27
<i>Objev expanze vesmíru</i>	<i>28</i>
<i>Kosmologický princip</i>	<i>31</i>
<i>Kosmologický posuv</i>	<i>32</i>
<i>Fridmanovo řešení</i>	<i>34</i>
<i>Víte, že</i>	<i>37</i>
3. Příběh reliktního záření	39
<i>Velký třesk</i>	<i>40</i>
<i>Bellovy telefonní laboratoře</i>	<i>43</i>
<i>Od družice k sondám</i>	<i>44</i>
<i>Sféra posledního rozptylu</i>	<i>49</i>
<i>Víte, že</i>	<i>50</i>
4. Hledáme hranice	53
<i>Časová hranice</i>	<i>54</i>
<i>Fotometrický paradox</i>	<i>56</i>
<i>Život v konečném vesmíru</i>	<i>59</i>
<i>Proměnlivý horizont</i>	<i>62</i>
<i>Víte, že</i>	<i>64</i>

5. Tam, kde vládne temnota	67
<i>Temná hmota – od Zwickyho k Rubinové</i>	69
<i>Detekce temné hmoty</i>	71
<i>Zrychlená expanze a temná energie</i>	76
<i>Několik nápadů</i>	81
<i>Víte, že</i>	84
6. Za stěnou	87
<i>Čtyři interakce (desetiny nanosekund)</i>	88
<i>Vznik neutronů a protonů (mikrosekundy)</i>	91
<i>Reliktní neutrino (sekundy)</i>	95
<i>Vznik lehkých jader (minuty)</i>	97
<i>Víte, že</i>	100
7. Co se skrývá ve hvězdách	103
<i>První hvězdy</i>	104
<i>Hvězdné porodnice</i>	108
<i>Termojaderný kotol</i>	112
<i>Supernovy</i>	113
<i>Víte, že</i>	116
8. Velkorozměrové struktury	119
<i>Přehledové projekty</i>	122
<i>Od galaxií k nadkupám</i>	126
<i>Numeričtí simulanti</i>	129
<i>Víte, že</i>	132
9. Milujeme inflaci	133
<i>Problémy standardního modelu</i>	135
<i>Inflační hypotéza</i>	137
<i>Nový inflační scénář</i>	139

<i>Experimentální možnosti</i>	142
<i>Víte, že</i>	143
Barevná příloha	145
10. Na lovu reliktních gravitačních vln	161
<i>Dlouhá cesta</i>	162
<i>Obří interferometry</i>	165
<i>Radioteleskopické sítě</i>	168
<i>Podpisy reliktních gravitačních vln</i>	171
<i>Víte, že</i>	173
11. Absolutní horko	175
<i>Hmota a antihmota</i>	176
<i>Na vlně symetrie</i>	179
<i>Štěpení sil</i>	182
<i>Planckovy škály a sny o počátku</i>	184
<i>Víte, že</i>	186
12. Jeden těžký porod	189
<i>Inflační model</i>	190
<i>Ekpyrotický model</i>	192
<i>Za všechno může černá díra</i>	195
<i>Na vlně fantazie</i>	196
<i>Víte, že</i>	198
13. Osudová	201
<i>Tepelná smrt vesmíru</i>	202
<i>Hvězdná éra</i>	203
<i>Éra degenerace</i>	205
<i>Éra černých děr</i>	209
<i>Temná éra</i>	210
<i>Víte, že</i>	212

Jednotky	213
Elementární částice	217
Časová osa dějů ve vesmíru	222
Historie poznání (od 20. století)	223
Rejstřík	226
Rejstřík osob	231



Předmluva

Jak jsme se mýlili

Pohledy ke hvězdám v sobě vždy zahrnovaly nádech tajemna. Neznámý svět nad hlavou skýtal od pradávna prostor k hlubokým úvahám a spekulacím o tom, jak vypadá vzdálený vesmír, jaká je jeho minulost a budoucnost a co má člověk v tomto bezbřehém prostoru a čase za úkol. První kosmické sondy brázdící Sluneční soustavu podhalily drobný zlomek z tohoto tajemství a i ten předčil veškerá naše očekávání. Pokud žasneme nad naším nejbližším kosmickým okolím, jak podivná a složitá musí být nejvzdálenější zákoutí vesmíru!

V této knížce se vydáme až k horizontu pozorovatelného vesmíru. Tam ale vesmír nekončí, pokračuje dál, jen lidské oko tam nedohlédne. Říkáte si, jak je to možné? Světlo se šíří sice obrovskou, ale konečnou rychlostí. Od počátku vesmíru mělo zatím k dispozici jen 13,8 miliardy roků. Z libovolné oblasti vesmíru nemohlo světlo letět déle, protože k tomu prostě nemělo dostatek času. Proto existuje obzor, za který v tuto chvíli nevidíme. Od našeho obzoru k nám světlo letělo celou dobu existence vesmíru. My na obzoru vidíme horké plazma Velkého třesku, ale dnes tam jsou hvězdy a galaxie, tak jako v našem okolí. Žádný obzor však není nepřekonatelný. Ten v krajíně můžeme pokořit cestou k němu. Stojí to sice trochu sil, ale před námi se otevře nová krajina, která byla předtím našim zrakům skryta. Vesmírný obzor můžeme pokořit pouhým vyčkáváním. Stačí si počkat třeba miliardu roků a za tu dobu k nám doletí i světlo z ještě vzdálenějších končin, než vidíme dnes, a my pak dohlédneme i za hranici obzoru dnešního. Zdá se tedy, že se nám obzor viditelného vesmíru bude stále zvětšovat. Může to být pravda, a nemusí. Svou roli hraje i expanze vesmíru. Nesmí být v budoucnosti příliš překotná, jinak by se mohlo stát, že se vesmír bude natolik zvětšovat, že k nám světlo ze vzdálenějších končin nedolétne nikdy, protože se vzdálenost mezi námi a hvězdou, která ho vyslala, bude

zvětšovat rychleji, než putuje světlo. K tomuto zajímavému tématu se ještě vrátíme podrobněji.

Nejtajemnější částí astronomie je právě kosmologie, nauka o vesmíru jako celku, o jeho struktuře, minulosti a budoucnosti. Samotný slovní základ této vědecké disciplíny pochází z řečtiny. Slovo „*kosmos*“ v tomto jazyku znamená svět, ale také řád, eleganci a krásu. Vzpomeňme si na slovo kosmetika, které má stejný slovní základ. Ještě na počátku 20. století se zdálo být troufalé až nevhodné zabývat se původem vesmíru a jeho osudem. Časy se od té doby ale změnila a pozorovací možnosti posunuly kosmologii do nejbouřlivěji se rozvíjejících vědeckých disciplín. A smělé plány do budoucna nám umožní v dohledné době snad i poodhalit roušku tajemství samotného vzniku vesmíru. Nečekejme ale, že to bude jednoduché. Kdykoli jsme uvažovali o světě na dané úrovni poznání, mýlili jsme se. Když se na úsvitu naší civilizace člověk rozhlížel po krajině, bylo snadné uvěřit, že žijeme na rovné desce. Želvy podpírající plácatou Zemi už byly jen drobným dobovým koloritem této představy. Dnes víme, že tomu tak není a většina lidstva tento fakt bez problémů přijímá. Samozřejmě existují jedinci, kteří si svou „pravdu“ nenechají vzít ani v naší době. Nemusíme se jim proto smát. Pro někoho je konfrontace s okolním světem natolik krutá, že raději žije svůj sen a buduje si ve své mysli svůj vlastní svět, vlastní vesmír, který je pro něho krásný a pochopitelný.

Jiným příkladem jsou polární záře. Pomineme-li představy o plápolajících duších hříšníků či ocasech ohnivých lišek (tato vize původu polárních září dala vzniknout logu webového prohlížeče Firefox), bylo v 16. a 17. století docela běžným názorem, že jde o světla obyvatel vnitřní části duté Země. Možná nám to dnes připadá poněkud přitažené za vlasy, ale tenkrát to vypadalo jako logické vysvětlení polárních světél. Dole pod námi měl existovat další svět, nazývaný *Agartha*, jehož obyvatelé mají uvnitř své slunce a polárními průduchy proniká jeho svit do našeho světa jako polární záře. Věřil tomu například i velmi vzdělaný Edmond Halley, který dokázal pomocí Newtonova gravitačního zákona identifikovat komety z let 1456, 1531, 1607, 1682 jako jediné těleso a ještě předpovědět,



že se k nám tato kometa vrátí v roce 1758. Bohužel se tohoto triumfu svých výpočtů a celé newtonovské gravitace nedožil. Ještě ve 20. století věřil na dutozemi Adolf Hitler (zdaleka nebyl jediný) a ve své bláhové snaze podmanit si svět uspořádal výpravu do polárních končin, která měla jediný cíl: najít onen otvor, jímž by bylo možné proniknout do nitra Země a ovládnout i tamní civilizaci. Teprve 50. léta 20. století definitivně potvrdila, že polární záře jsou svitem horních vrstev atmosféry excitovaných nabitými částicemi slunečního větru.

Při pohledu na oblohu se hvězdy pohybují vzhledem k obzoru. Jak snadné bylo uvěřit, že obíhají upevněny na nebeských sférách kolem Země, která je středem všeho dění ve vesmíru. I tato představa se ukázala lichá a odnesl ji neúprosný čas. Středem vesmíru není ani Země, ani Slunce, jak se domnívali lidé později, ani naše Galaxie, které se někdy říká Mléčná dráha. Ještě na počátku 20. století věřili astronomové, že je Mléčná dráha jedinou galaxií v celém vesmíru. I to se ukázalo jako nepravdivé, v roce 1924 ukázal Edwin Hubble, že Velká mlhovina v Andromedě (viz barevná příloha, obr. 12) není skutečnou mlhovinou, ale galaxií daleko za hranicemi Mléčné dráhy. Vesmír se náhle rozšířil o mnoho dalších galaxií a člověk si připadal ještě menší a opuštěnější. Příběh temné hmoty a temné energie nám ukazuje, že vesmír nemusí být ani stvořen z atomární látky jako naše okolí a možná je hlavní složkou všeho kolem nás něco úplně jiného.

Zatím jsme se vždy v představách o fungování světa v minulosti mýlili. Proč bychom tedy právě nyní měli mít pravdu? Třeba je vše jinak, než si představujeme. Skvělé technologie současnosti nám ale dávají křídla, a tak můžeme opět popustit uzdu fantazii o fungování světa kolem nás. Nicméně buďme opatrní, velmi opatrní. Naše představy je třeba vždy konfrontovat s pozorováním, se skutečností tam kdesi venku, v nedozírných hlubinách vesmíru. Pokud to neuděláme a neotevřeme pomyslné okno do vnějšího světa, zůstanou naše představy jen sny. Možná krásnými, ale nereálnými konstrukcemi.

1. Krize síly

„Nemáš-li sílu, abys hořel a šířil světlo, alespoň nezacláněj.“

Lev Nikolajevič Tolstoj, ruský spisovatel

Slovo „síla“ jsme se naučili používat v mnoha významech: síla vůle, síla lásky, vnitřní síla, síla slz, vojenská síla, síla pravdy, síla ducha, síla instinktu, kouzelná síla atd. Všimli jste si? Všechny tyto síly jsou nehmatatelné a poněkud iluzorní. Skutečnou silou je, když se třeba poperou poslanci v parlamentu. Nejvyšší reprezentanti státu nám předvádějí hmatatelnou sílu v té nejhrubší podobě. Nám ale tentokrát půjde o sílu, o níž každý slyšel na základní škole. Sílu, bez níž by každá učebnice fyziky byla neúplná. Sílu, kterou fyzikové zavedli, aby ji nakonec ztratili.

Od newtonovské mechaniky k Faradayovu poli

Výpočty trajektorií těles založené na mechanických silách pocházejí ze 17. století, z období, kdy vznikala newtonovská mechanika. Isaac Newton zformuloval zákon setrvačnosti, který říká, že těleso setravává v rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud na něj nepůsobí síla. Tento zákon byl zcela revoluční a odporoval běžné zkušenosti, při níž se pohybující se těleso postupně zastaví. Takové chování je způsobeno odporem okolního prostředí, který vede k přeměně pohybové energie na odpadní teplo. Pokud by se ale těleso pohybovalo ve vakuu a bez přítomnosti ostatních těles, je mu pohyb vlastní. Raketa, které došlo palivo, se nadále bude pohybovat s neměnnou rychlostí a tento pohyb mohou změnit jen síly působící na raketu od okolních těles.

Isaac Newton šel ale ještě dále a zformuloval pohybový zákon: pokud na těleso začne působit nějaká síla, jeho pohybový stav

změní. Těleso změní svou rychlost úměrně velikosti působící síly a nepřímo úměrně své hmotnosti. Snadno změníme pohybový stav míčku, který má malou hmotnost a velmi nesnadno stav jedoucího vlaku, proti němuž je hmotnost míčku zanedbatelná. Při znalosti silového působení je možné z Newtonova pohybového zákona předpovídat nejen budoucí pohyb tělesa, ale i dopočítat jeho trajektorii v minulosti. Jak důvtipné bylo toto pojetí na rozdíl od chatrného popisu pohybu v minulosti!

Síla je v Newtonově pohybovém zákonu pouhým matematickým předpisem, který umožňuje výpočet dráhy tělesa. Je-li tento předpis správný, souhlasí vypočtená dráha s pozorováním, je-li špatný, musíme nalézt jiný, lepší předpis. Jedním z takových „předpisů“ je Newtonův gravitační zákon, který říká, že na dvě libovolná tělesa působí síla úměrná jejich hmotnostem a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti. Gravitační sílu považujeme za jednu ze základních interakcí, proto popis jejího působení matematickou formulou nijak nevadí. Přijmeme-li gravitaci jako fundamentální interakci, nemusíme nic vysvětlovat ani odpovídat na otázku, proč na sebe tělesa působí takovou či onakou silou.

Přesto se zamysleme nad klady i zápory takového přístupu. Největším kladem je už zmíněná možnost předpovědi budoucí trajektorie. Závislost gravitačního zákona na druhé mocnině vzdálenosti je klíčová. Vede na uzavřené trajektorie, například v naší Sluneční soustavě na eliptické dráhy planet. U jiné než druhé mocniny by dráhy těles nebyly uzavřené. Ve skutečnosti se tak jako tak eliptické dráhy pomalu stáčí – je to způsobeno poruchami od ostatních planet a v blízkosti Slunce ještě relativistickými jevy. Newtonovy pohybové zákony používají čas a prostor jako neměnné jeviště dějů. Přítomnost těles nemá na toto jeviště prázdňový vliv. Tyto zákony selhávají při vysokých rychlostech, v takovém případě je musíme nahradit jejich relativistickými variantami. To by pořád ještě nebyl důvod k panice. Tím největším problémem je fakt, že na změny v rozložení hmoty reaguje pohybový zákon okamžitě. Představme si, že by nám někdo ukradl Slunce. Víím, je to absurdní představa, ale jeden nikdy neví. Podle Newtonovy formulky na to naše Země

zareaguje okamžitě. To ale není pravda. Jakákoli informace se k nám ze Slunce dostane nejdříve za osm minut. Tak dlouho letí světlo ze Slunce k Zemi a jeho rychlost nemůže nic překonat, ani zpráva o znárodnění či odcizení Slunce. Při malých vzdálenostech se celkem nic neděje. Ale napříč propastnými vzdálenostmi mezi objekty ve vesmíru jde o zásadní problém Newtonových pohybových rovnic. Vůbec neuvažují šíření informace konečnou rychlostí, což u nekonečného vesmíru vede dokonce k paradoxům. Výpočet provedený dvěma různými způsoby dá dva různé výsledky, což je pro správně koncipovanou teorii vyloučené. Zkrátka platnost Newtonových pohybových rovnic je omezená a musíme s tím počítat.

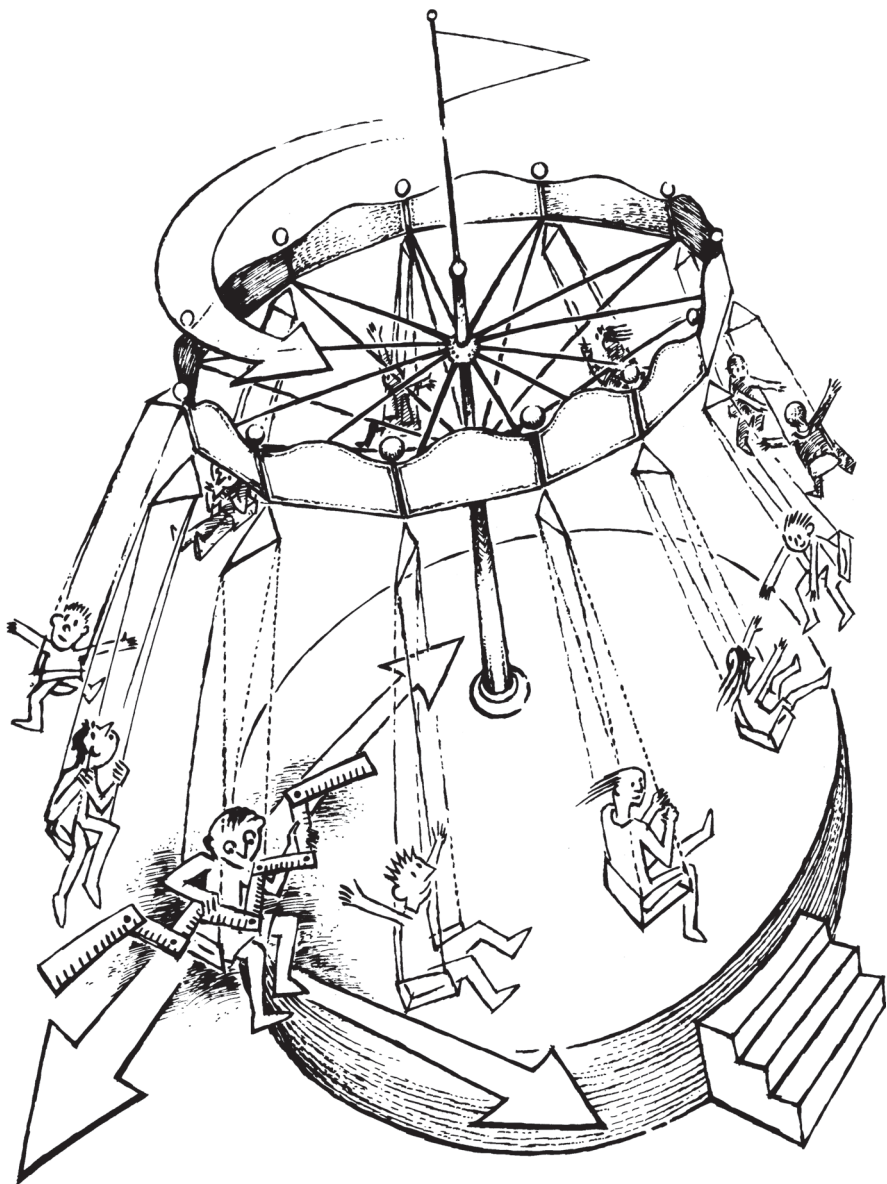
Problém konečného šíření interakce poprvé uceleně vyřešil až v 19. století vynikající anglický experimentátor Michael Faraday představou pole, které se nachází mezi oběma objekty. Pokud se jeden objekt pohne, převezme energii a hybnost tohoto pohybu pole, které bude tyto atributy transportovat k druhému objektu. Pohneme-li například elektronem (zataháme za něho elektrickým impulzem), bude po určitou dobu energie a hybnost onoho „zatahání“ lokalizována v poli, které je posléze předá jiné nabitě částici, a ta se poté pohne podobně jako ta první. Jak si ale pole představit? Pomoci může koncept siločar. U elektrického pole jde o myšlené čáry, v jejichž směru působí na nabitě částice síla. Zobrazit je můžeme například za pomoci travních semínek, která se v elektrickém poli chovají jako malé elektrické dipóly a seřadí se ve směru siločar. Také u magnetického pole můžeme zavést siločáry. Mají směr, ve kterém se stočí malé střílky kompasu či malé magnetické dipóly. Magnetické siločáry můžeme zobrazit za pomoci železných pilin, které jsou samy o sobě malými dipóly a stočí se ve směru siločar pole. V našich končinách existuje skupina lidí, která se žíví neustálým přejmenováváním známých pojmů. V současnosti bychom správně neměli říkat ani silokřivky, ani siločáry, ale magnetické indukční čáry. Nikdo tento pojem sice nepoužívá, ale v učebnicích musí být. Není to tak dávno, kdy jsem kvůli tomu musel přepisovat jednu učebnici fyziky plazmatu. V této knížce budeme ale říkat siločáry a výstřelků našich normotvůrců si nebudeme všímat. Podobně lze pojem pole zavést i pro gravitaci a představit si gravitační siločáry, podél nichž působí

na objekty gravitační síla. Pole vlastně nemá jiný účel, než že slouží jako zprostředkovatel interakce (vzájemného působení) a zajišťuje konečnou rychlost jejího šíření.

Problém síly

Pole má k síle blízko, opět je neviditelné a tak trošku tajemné, neboť zprostředkovává interakci na dálku a nedokážeme si pod ním představit cokoli konkrétního. Jde o podobnou konstrukci, jakou je síla coby matematický předpis. Ten opět neříká, co to síla je. Veškeré pokusy o definici síly (té fyzikální) zkrachovaly. Představme si, že se sílu pokusíme definovat pomocí Newtonova pohybového zákona jako součin hmotnosti a zrychlení. Pak musíme říct, co to je hmotnost a co to je zrychlení. Ponechme hmotnost hmotností a věnujme se druhé veličině – zrychlení. To je změnou rychlosti za nějaký časový úsek. A co je to rychlost? Změna dráhy v daném časovém intervalu.

Abychom tedy definovali sílu, musíme umět měřit dráhu. To se zdá na první pohled velmi jednoduché, ale není tomu tak. K měření vzdáleností totiž musíme mít souřadnicový systém. To ale nejsou tři čáry namalované na tabuli nebo na papíře. Skutečný souřadnicový systém musí být vytvořen ze tří tyčí opatřených ryskami, pomocí nichž budeme měřit vzdálenosti. Takové tyče by měly být „dostatečně“ tuhé, aby se neprohýbaly a neměnily svou velikost. Nakonec by bylo dobré vyřešit, kam naši trojici měřicích tyčí umístíme. Kolotoč nebude určitě tím nejlepším místem, na naše těleso by působily odstředivé i další síly. Ideální je tzv. *inerciální systém*. A jak je definován? Slovo *inertia* znamená latinsky nečinnost či zahálku, ve fyzice ho lze přeložit jako setrvačnost. Je to takový systém, v němž platí zákon setrvačnosti, tj. tělesa, na něž nepůsobí síla, se pohybují rovnoměrně přímočaře. Všimli jste si? Snažili jsme se definovat pojem síly a v poslední větě jsme ono slovo opět použili. Matematik takové definici říká „*definice kruhem*“. Ve skutečnosti o žádnou definici nejde. Nikdy se nikomu sílu nepodařilo definovat. Zůstává pouhým předpisem, který umožňuje výpočty a její smysl je mírně řečeno nejasný.



Dvě řešení

V průběhu dvacátého století se objevila dvě řešení problému síly a obě jsou svým způsobem překvapivá. První je Einsteinova *obecná relativita* z podzimu 1915, kdy ji představil před Pruskou akademií věd, a druhá *kvantová teorie pole* ze třicátých let, na níž se podílela celá řada fyziků. Obecná relativita se stala nejúspěšnější teorií gravitace a kvantová teorie pole stejně úspěšnou teorií ostatních tří interakcí – elektromagnetické, silné a slabé.

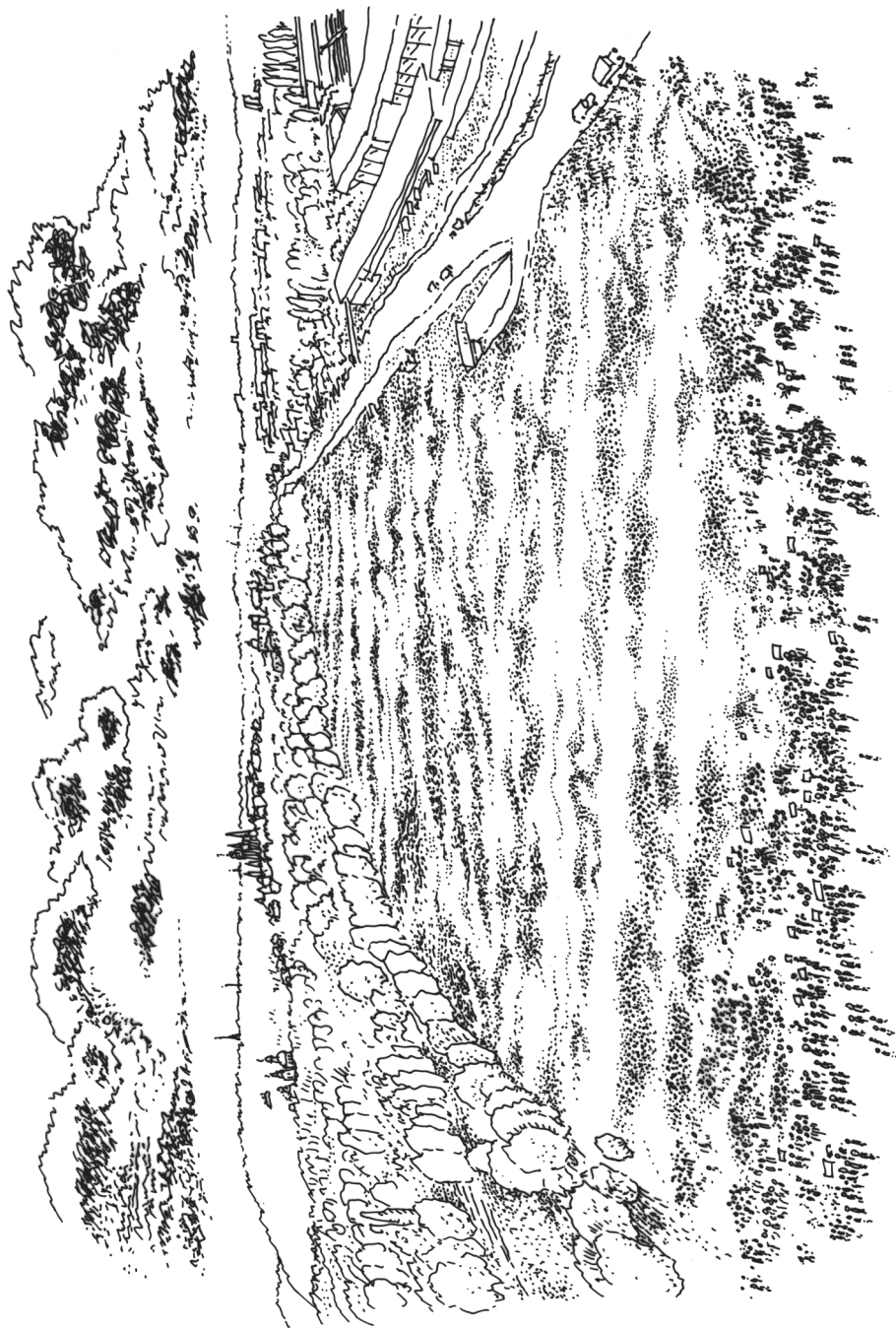
Představme si nejprve stručně obecnou relativitu neboli geometrickou teorii gravitace. Její ústřední myšlenka je velmi jednoduchá. Každé těleso svou přítomností poněkud zakříví prostor a čas kolem sebe. V tomto pokřiveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. *geodetikách*. Naše Země se tedy pohybuje kolem Slunce po elipse nikoli proto, že by na ni působila síla, ale protože Slunce takto pokřívilo prostor a čas kolem sebe. Všimli jste si? Einstein jako první vyhnal nepohodlnou sílu z fyziky a nahradil ji zakřivením času a prostoru. Jak si představit zakřivený prostor? Poznáme ho tak, že v něm neplatí základní vztahy eukleidovské geometrie, které jsme se učili ve škole. Součet úhlů v trojúhelníku není 180° , obvod kružnice není $2\pi r$ atd. Pokud bychom například z nějaké sondy zmapovali povrch Slunce a z takto změřené plochy chtěli podle známého vztahu dopočítat poloměr Slunce, spletli bychom se přibližně o jeden kilometr. To není sice mnoho (poloměr Slunce je přibližně 700 000 kilometrů), ale odchylka od známého vzorečku to bezesporu je. Když si obtáhnete tužkou pětikorunu, tak jak to udělal herec Josef Kemr ve filmu „*Marečku, podejte mi pero*“, musíte pětikorunu nejprve odsunout, aby nezakřivovala prostor kolem nakreslené kružnice, a teprve pak bude platit známý vztah pro obvod.

A zakřivený čas? To neznamená nic jiného, než že v různých vzdálenostech od těles plyne čas různě. Jinak plyne na povrchu Země a jinak v družici letící vysoko nad našimi hlavami. Při zpracování údajů GPS navigace se musí čas na družici letící ve výšce 20 000 kilometrů nad zemí přepočítávat na čas v jedoucím automobilu.

Pokud by se tak nedělo, narostla by v naší zeměpisné šířce chyba v určení polohy za 24 hodin o 8 kilometrů a naše navigace by byla k ničemu. Dlužno ale podotknout, že se na tom podílejí celkem tři jevy: zakřivení času naší Zemí, rotace Země a dilatace času způsobená pohybem družice vzhledem k povrchu Země.

Myšlenky obecné relativity jsou sice na první pohled jednoduché, ale jejich matematické zpracování, tj. popis časoprostoru pokřiveného tělesy, je poměrně složitou záležitostí. Newtonovo statické jeviště se zbortilo. Tělesa sama zakřivují prostor a čas, a tím ho spoluvytvářejí. Některé více, jiné méně. Ale bez těles by podle obecné relativity neexistoval ani čas, ani prostor. Obecná relativita předpověděla jevy, které jsou newtonovské fyzice na hony vzdálené: černé díry, červený gravitační posuv, kosmologický posuv, gravitační vlny, gravitační čočky, stáčení pericenter binárních systémů, strhávání časoprostoru rotujícím tělesem, expanzi vesmíru a mnohé další.

Druhým řešením problému síly byla kvantová teorie pole, která silové působení nahrazuje polními částicemi. Jako první vznikla kvantová teorie elektromagnetického pole. Představme si na chvíli, že elektrony jsou malí trpaslíčci, kteří si mezi sebou pinkají foton – polní částici. Nejde ale jen tak o obyčejnou částici. Jde o objekt mikrosvěta, který je nelokální, nemá konkrétní polohu a rychlost. Je podobný demonstrujícímu davu. Při pohledu z dálky vidíme jen vlnící se masu, veškeré podrobnosti zmizí. Občas se v ní vynoří klubičko, to zrovínka nějaký řečník vykřikl něco zajímavého a dav se kolem něho shlukl. Podobně se chová elementární částice, vlní se, neznáme její polohu ani rychlost a občas se vynoří oblast vyšší pravděpodobnosti detekce. Polní foton je objektem mikrosvěta, polem i částicí zároveň. A protože se vyskytuje pouze mezi dvěma elektrony, nemůže být nikdy zaregistrovaný, tj. skončit v nějakém detektoru. Takový objekt nemusí splňovat zákon zachování energie ani hybnosti (není ani jak to zkontrolovat). Tyto zákony samozřejmě musí platit pro interagující trpaslíčky. Součet jejich energií před interakcí a po interakci musí zůstat stejný. Tím, že polní částice může mít energii a hybnost tak říkajíc do počtu (i záporné hodnoty), může způsobovat jak přitahování, tak odpuzování. Koncept polních částic



byl nakonec úspěšný nejen pro elektromagnetickou interakci, ale i pro silnou interakci, která zajišťuje soudržnost atomového jádra a jejíž polní částice nazýváme gluony (z anglického *glue* = lepidlo), a pro slabou interakci s polními částicemi Z^0 , W^+ a W^- , která je původcem radioaktivního rozpadu, konkrétně beta rozpadu, nebo sloučení dvou protonů při termojaderné syntéze probíhající v nitru Slunce – naší životodárné hvězdy.

Dlouhá staletí jsme nedokázali definovat sílu. A najednou tuto definici nepotřebujeme. Moderní teorie gravitace využívá namísto síly zakřivený prostor a čas a moderní kvantová teorie pole, která je úspěšná pro ostatní tři interakce, používá namísto síly polní částice. Finální řešení to ale není. Fyzika se prozatím stala poněkud schizofrenní disciplínou, neboť jednu z interakcí popisuje jinak než všechny ostatní.

Teorie všeho

Samozřejmě, že největší touhou fyziků je mít jednotnou teorii pro všechny interakce. Ideální by bylo, pokud by zmínění trpasličí hráli svůj kvantový ping pong v pokřiveném světě. Takovou teorii se ale zatím nepodařilo vytvořit. První sjednocení provedl James Clerk Maxwell, když v 19. století ukázal jednotnou povahu elektrických a magnetických dějů. Z jeho uceleného popisu vyplynula existence elektromagnetického vlnění jiných vlnových délek, než má světlo, nové skládání rychlostí, které vedlo ke vzniku speciální relativity, i další zajímavé důsledky. S trochou nadsázky lze říci, že jeho teorie změnila naši civilizaci. Dnes si nedokážeme náš život bez rádiových vln, mikrovln, infračerveného záření na dlouhovlnném konci spektra a ultrafialového, rentgenového a gama záření v krátkovlnné oblasti spektra představit.

Další zajímavý pokus o sjednocení provedl německý matematik a fyzik Theodor Kaluza v roce 1921. Byl fascinován elegancí Maxwellových rovnic a studoval jejich krásu z hlediska matematiky. Poté, co Albert Einstein publikoval obecnou relativitu, začal si doslova hrát i s těmito rovnicemi. Napadlo ho, že by mohlo být zajímavé, jak by

vypadaly, pokud by přidal k časové a třem prostorovým dimenzím ještě jednu další dimenzi. Jeho matematické cvičení mělo neočekávaný výsledek: v soustavě rovnic obecné relativity se automaticky objevily i Maxwellovy rovnice pro elektromagnetické pole. S dalšími úvahami, které se pokoušely o sjednocení elektřiny a magnetismu s gravitací za pomoci páté dimenze, mu pomáhal švédský teoretický fyzik Oskar Benjamin Klein. Dnes těmto pokusům říkáme Kaluzovy-Kleinovy modely. Šlo samozřejmě o nekvantové sjednocení a týkalo se jen dvou interakcí, vůbec nepočítalo se slabou a silnou interakcí.

Kaluzův a Kleinův experiment se pokusil zobecnit Albert Einstein spolu s polským fyzikem Leopoldem Infeldem. Předpokládali, že elektromagnetické pole je nositelem energie, s níž se pojí určitá hmotnost, která, tak jako ostatní tělesa, zakřivuje čas a prostor a toto zakřivení zahrne do relativity elektromagnetické pole. Při výpočtech využívali další dimenze a složité vlastnosti pokriveného časoprostoru. Nicméně jejich pokusy byly opět nekvantové a opět nevažovaly slabou a silnou interakci.

Na poli kvantové teorie učinili první úspěšný pokus američtí teoretici Steven Weinberg a Sheldon Glashow spolu s pákistánským teoretikem Abdusem Salamem. Na konci padesátých let 20. století se jim podařilo nalézt jednotný popis pro elektromagnetickou a slabou interakci. Ukázali, že za vysokých energií jde o jednu jedinou, tzv. *elektroslabou interakci*, která se při nízkých energiích štěpí na elektromagnetismus a slabou interakci. Jimi předpovězené polní částice byly nalezeny na přelomu let 1983 a 1984 v evropském středisku jaderného výzkumu CERN.

Veškeré pokusy dát dohromady pokrivený svět Alberta Einsteina s kvantovými interakcemi ale prozatím ztroskotaly. Nadějná se zdála *teorie strun*, která považuje částice za různé vibrace jednorozměrných útvarů, tzv. *strun*, ve vícerozměrném časoprostoru (deset dimenzí i více), doplněná principem *supersymetrie*. Taková supersymetrie znamená, že za vysokých energií by každá částice měla existovat ve dvou různých variantách, jejichž chování je zcela odlišné.

Jedna forma zaplňuje kvantové stavy jeden po druhém a druhá varianta je schopná sdílet jediný kvantový stav s více jedinci. Jenže i na těch největších urychlovačích světa se žádné podpisy extradimenzí ani supersymetrie nenalezly. Možná bude třeba vyšších energií, ale není ani vyloučené, že jde o slepou uličku.

Dalším zajímavým pokusem o sjednocení všech čtyř interakcí je smyčková gravitace, která za prvotní považuje Einsteinovu obecnou relativitu a pokouší se pokřivenému světu přidat kvantové vlastnosti. Kvantuje prostor podobným způsobem, jako je tomu například u energie v kvantové mechanice. Prostorové předitivo je tvořeno sítí zvláště smyček s rozměry kolem 10^{-35} metru (tzv. Planckova škála), které daly této hypotéze jméno. Síť takových smyček se nazývá *spinová pěna*. Čas na této úrovni nemá smysl, vynoří se až jako makroskopický důsledek interakcí na mikroskopické škále. Podle smyčkové gravitace není látka v černých děrách navždy ztracena, padající atomy a molekuly po průchodu horizontem černé díry nevytvoří v jejím středu centrální singularitu, ale díky existenci smyček se odrazí. Pro vnějšího pozorovatele dojde po velmi dlouhé době k explozi černé díry a návratu látky do okolí. Pokud by vznikaly černé díry i na počátku vesmíru, mohli bychom exploze některých z nich už pozorovat. Jde o konkurenční hypotézu ke strunové teorii, jejíž osud je opět nejasný.

Existuje ještě třetí řešení, které navrhl nizozemský profesor teoretické fyziky Erik Verlinde v roce 2010. Gravitační nepovažuje za samostatnou interakci, ale za statistické projevy objektů mikrosvěta v makrosvětě. K této hypotéze se ještě vrátíme. Jen budoucnost ukáže, zda některá z těchto představ zvládne popsat záladnosti skutečného světa, či zda je vše úplně jinak.

Víte, že

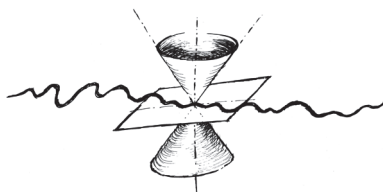
■ Víte, že o první měření rychlosti světla se pokusil Galileo Galilei už v roce 1638? Spolu s asistentem měli lampy, jejichž světlo zakrývali a odkrývali na dvou protějších kopcích. Rychlost světla se jim sice určit nepodařilo, ale závěr byl správný: světlo se pohybuje

extrémně rychle. Galileo správně předpokládal, že se světlo šíří konečnou rychlostí.

■ Víte, že Michael Faraday se nezabýval jen elektřinou a magnetizmem? Známe jsou například jeho zákony elektrolýzy. Pokoušel se také vysvětlit spojování ledových bloků pod tlakem, tzv. regelaci ledu. Za vyššího tlaku se led mění ve vodu, což umožňuje jeho spojování, ale i další jevy, například klouzání ledovců po podloží.

■ Víte, že Theodor Kaluza byl nejen schopným matematikem, kterého uchvátila matematická stavba klasické elektrodynamiky a obecné relativity, ale zajímal se i o cizí jazyky? Ovládal jich sedmáct, včetně arabštiny.

Poučení na závěr: *Co nejde silou, jde ještě větší silou. Objekt našeho zájmu pak ale nemusí experiment přežít.*



2. Expanze a kosmologický princip

„Vesmír není povinen být v dokonalé harmonii s lidskou ctižádostí.“

Carl Sagan, americký astrofyzik

Na počátku 20. století považovali učenci vesmír za neměnný, nikdo si tehdy nedovedl představit, že by mohl podléhat vývoji, jaký jsme znali třeba ze zemské geologie. Za jeden lidský život jsou změny skutečně natolik malé, že je nebylo možné tehdejšími prostředky postřehnout. Všeobecně byla vžitá představa, že vesmír není nic jiného než naše Galaxie, té se někdy říká Mléčná dráha. Proto byl i Albert Einstein poněkud zaskočen, když z jeho obecné relativity vyplynulo, že by měl vesmír pod vlivem přitažlivé gravitace zkolabovat a nemůže být statický. V roce 1917, pouhé dva roky po zformulování nové teorie gravitace, do rovnic přidal tzv. *kosmologický člen* (někdy hovoříme zkráceně také o *kosmologické konstantě*), který vesmír tak trochu přifukuje, a tím jeho kolapsu zabrání. Jaké ale bylo Einsteinovo překvapení, když v roce 1922 ruský matematik, fyzik a meteorolog Alexandr Fridman ukázal, že Einsteinovo řešení je nestabilní! Rovnováha mezi gravitačním přitahováním a nafukováním kosmologickou konstantou je velmi křehká. Stačí sebemenší porucha a vesmír buď zkolabuje, nebo se rozfoukne. Einsteinovo zklamání netrvalo dlouho. V letech 1927 až 1929 se ukázalo, že vesmír expanduje a statický není. Einstein kosmologickou konstantu z rovnic vyškrtl a prohlásil ji za největší omyl svého života.

Říká se, že se dobří holubi vracejí a Einsteinova konstanta asi takovým dobrým holubem skutečně byla. Celých 43 let po jeho smrti, v roce 1998, se kosmologická konstanta vynořila znova, tentokrát v souvislosti s objevem zrychlené expanze vesmíru. O tom si povíme ale až v páté kapitole „*Tam, kde vládne temnota*“.

Objev expanze vesmíru

Flagstaff je arizonské městečko v nadmořské výšce 2 kilometry, které se nachází na křižovatce slavné silnice Route 66 křižující Ameriku od západu na východ a silnice 89 mířící severojižně. V okolí je celá řada observatoří, ale jen jedna z nich je na okraji města na Mars Hill (Marsovský kopec). Založil ji americký podnikatel, astronom a diplomat Percival Lowell v roce 1894 a dodnes nese jeho jméno. Lowell věřil, že Mars je osídlen Marťany, jejichž rozsáhlá díla lze pozorovat kvalitními přístroji ze Země. Celý svůj život podřídil hledání Marťanů a pozorování Marsu. Marťany sice nenašel, ale na jeho observatoři byla pořízena data vedoucí k objevu expanze vesmíru, nalezena rotace spirálních galaxií, spektroskopicky změřeny rotační periody planet a v roce 1930 zde objevil mladičký Clyde Tombaugh planetu Pluto. Není náhodou, že se první dvě písmena této trpasličí planety shodují s iniciálami zakladatele observatoře. Dnes považujeme Pluto za trpasličí planetu.

V prvních dvou desetiletích 20. století se předpokládalo, že mlhavé obláčky na obloze jsou součástí Mléčné dráhy. Někteří astronomové ale tušili, že jde o cizí galaxie, a tak se začal pomalu prosazovat opatrný název *extragalaktické mlhoviny*. Dne 26. dubna 1920 se ve Smithsonianském muzeu národní historie ve Washingtonu konala tzv. Velká debata o povaze spirálních mlhovin mezi americkými astronomy Harlowem Shapleyem a Heberem Doustem Curtisem. Shapley zastával názor, že spirální mlhoviny jsou součástí Mléčné dráhy, zatímco Curtis dokazoval, že musejí být samostatnými hvězdnými ostrovy. Spor byl ukončen až v roce 1924, kdy mezi astronomy celý rok kolovala zpráva, že Edwin Hubble už od roku 1923 detekuje ve Velké mlhovině v Andromedě hvězdy a z měření vzdálenosti za pomoci tzv. cefeid určil, že se nachází daleko za hranicemi

Mléčné dráhy. Hubble to oficiálně oznámil až na 33. setkání Americké astronomické společnosti, které probíhalo ve Washingtonu od 30. prosince 1924 do 1. ledna 1925. Oznámení bylo poněkud nezvyklé, Hubble sám nebyl přítomen a jeho příspěvek byl přečten. Shapley i Curtis na zasedání byli a bylo jim jasné, že Velká debata skončila. Tiskem článek o Hubblově významném objevu vyšel až v lednu 1925.

V roce 1912 změřil na Lowellově observatoři americký astronom Vesto Slipher modrý posuv spektrálních čar ve Velké mlhovině v Andromedě (viz barevná příloha, obr. 12). To znamenalo, že by se k nám tento objekt měl přibližovat. (Dnes víme, že tomu tak skutečně je a s touto galaxií se ta naše v budoucnosti prolne.) Povzbuzen úspěchem začal Slipher měřit posuvy spektrálních čar i u dalších extragalaktických mlhovin. Do roku 1915 pořídil pěknou řádku záznamů a zjistil, že posuvy ostatních objektů jsou červené, a tedy by se od nás měly vzdalovat. Interpretace červeného posuvu galaxií byla ale v té době ještě nejasná. V roce 1916 zemřel Lowell, zakladatel observatoře, a Slipher se zaslouženě stal jejím druhým ředitelem. Červené posuvy galaxií byly během několika let potvrzeny i na dalších místech, například na Lickově observatoři v blízkosti kalifornského San José a o zhruba deset let později na observatoři Mt. Wilson, která se nachází v blízkosti Los Angeles, opět v Kalifornii, zhruba 500 kilometrů vzdušnou čarou směrem na západ. V roce 1917 bylo na Mt. Wilson dopraveno zrcadlo o průměru 2,5 metru a byl jím osazen Hookerův dalekohled. Ředitelem observatoře se stal v roce 1919 americký astronom Edwin Hubble. Spolu s Miltonem Humasonem začal proměřovat spektra vzdálených galaxií. Na Mt. Wilsonu tak doplnili Slipherovu sadu měření o některá další.

Kolem roku 1925 do příběhu expanze vesmíru poprvé zásadně vstupuje věda na evropském kontinentě. Na Lovanské univerzitě v Belgii přednáší obecnou relativitu velmi vzdělaný katolický kněz, abbé Georges Lemaître. Obdobně jako Fridman, analyzoval různé modely vesmíru, které plynuly z Einsteinovy obecné relativity, a došel k závěru, že by případná expanze vesmíru měla mít za důsledek červený posuv spektrálních čar galaxií. V roce 1925 se ve

Washingtonu dokonce setkal jak s Vesto Slipherem, tak s Edwinem Hubblem. Abbé Lemaître byl také v těsném kontaktu s Albertem Einsteinem a pravidelně ho informoval o svých výpočtech. V roce 1927 vydal přelomový článek „*Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*“ („Homogenní vesmír s konstantní hmotností a radiální rychlostí extragalaktických mlhovin rostoucí se vzdáleností“), v němž ukazuje, že expanze vesmíru musí vést na červené posuvy galaxií a že mezi vzdáleností a rychlostí vzdalování musí platit lineární vztah, tj. čím vzdálenější galaxii pozorujeme, tím větší červený posuv naměříme. Lemaître dokonce odhadl z dostupných měření červeného posuvu koeficient úměrnosti, který byl později nazván Hubbleovou konstantou. Její hodnota mu vyšla 575 km/s na megaparsek. Dnes udávaná hodnota Hubbleovy konstanty je 69 km/s na megaparsek, tj. dvě galaxie vzdálené od sebe megaparsek (3,26 milionů světelných roků) se vzájemně vzdalují rychlostí 69 km/s. Jde zhruba o osminu Lemaîtreovy hodnoty. Chyba byla způsobena tím, že astronomové tehdy ještě neuměli měřit tak velké vzdálenosti, v nichž se nacházejí galaxie, s potřebnou přesností. Lemaîtreův článek vyšel ve francouzštině a málokdo z tehdejší kosmologické komunity byl schopen si ho přečíst. I přesto byly Lemaîtreovy aktivity dostatečně známy, sám Albert Einstein nebyl ze závěrů článku příliš nadšený. K tomu, že expanze vesmíru povede na červený posuv galaxií, došel nezávisle o rok později i americký matematik a fyzik Howard Percy Robertson.

Až dva roky po Lemaîtreovi, v roce 1929, vydává Hubble svůj článek o expanzi vesmíru, kde ukazuje, že se vzdáleností objektu rychlost vzdalování roste. Koeficient této úměrnosti mu vyšel podobný jako Lemaîtreovi – není divu, stejně jako on vycházel ze Slipherových měření a tehdejších znalostí vzdáleností ve vesmíru. Článek byl napsán velmi povrchně, bez jakékoli argumentace a pouze konstatoval naměřená fakta. Na svislé ose grafu byla dokonce omylem uvedena rychlost v kilometrech. Hubble necitoval ani Slipherova měření, která použil, ani Humasona, který prováděl měření na Mt. Wilsonu. Hubble rozhodně nebyl první, kdo objevil červené posuvy galaxií a lineární závislost mezi rychlostí vzdalování a vzdá-

leností, které se tenkrát začalo nesprávně říkat Hubblův zákon. Přesto se stal ikonou americké astronomie a až na konci roku 2018 členové Mezinárodní astronomické unie odhlasovali, že by se zákon měl nazývat Hubblův-Lemaîtreův. Hned v roce 2019 se ale objevil návrh, aby finální název byl HLS zákon (*Hubblův-Lemaîtreův-Slipherův*), což by nejlépe odráželo historické skutečnosti.

Kosmologický princip

Dokážete si představit čtyřrozměrný zakřivený svět, který navíc expanduje? Myslím, že to nedokáže nikdo, a pokud tvrdí, že ano, je to obratný manipulátor, kterého je pro astronomii škoda a měl by se spíše věnovat jiným oborům – mohl by vyniknout například v politice nebo v nějaké řídicí funkci. Většinou si pomáháme jednorozměrnými či dvourozměrnými analogiemi, nejčastěji různě pokrivenými plochami.

Samotná expanze, při níž je rychlost vzdalování úměrná vzdálenosti, evokuje pocit, že se nacházíme ve středu expanze. Vždyť přesně to pozorujeme: vše se rozpíná – až na několik blízkých objektů, u nichž mohou převážít vlastní rychlosti nad expanzí – právě od nás. Už jsme si ale řekli, že se můžeme snadno mýlit, pokud posuzujeme věci jen podle prvního dojmu. Představme si obyčejnou prádelní gumu, na níž jsou rozmístěny sponky. Na obou koncích začneme gumu natahovat. Co uvidíme? Znázorněme si to na malém živočichu zevlujícím na jedné ze sponek. Uvidí, že všechny sponky se vzdalují právě od něho, a to dokonce tím rychleji, čím jdou dále! Skvělý příklad HLS zákona. Pokud ale dotyčný živočich přeleze z jedné sponky na druhou, uvidí stejný obraz. Nezáleží na tom, odkud expanzi pozoruje, v každém místě se mu bude zdát, že expanze probíhá právě od něho a rychlost je úměrná vzdálenosti. Matematicky lze dokázat, že stejné tvrzení platí i naopak. Pokud v jednom místě vesmíru zjistíme, že rychlost expanze závisí lineárně na vzdálenosti, budeme stejný jev pozorovat i ve všech ostatních místech vesmíru.

Všimněme si, že se při natahování gumičky nemění velikost sponek. Ty drží pohromadě elektromagneticky a s rozpínáním gumičky to

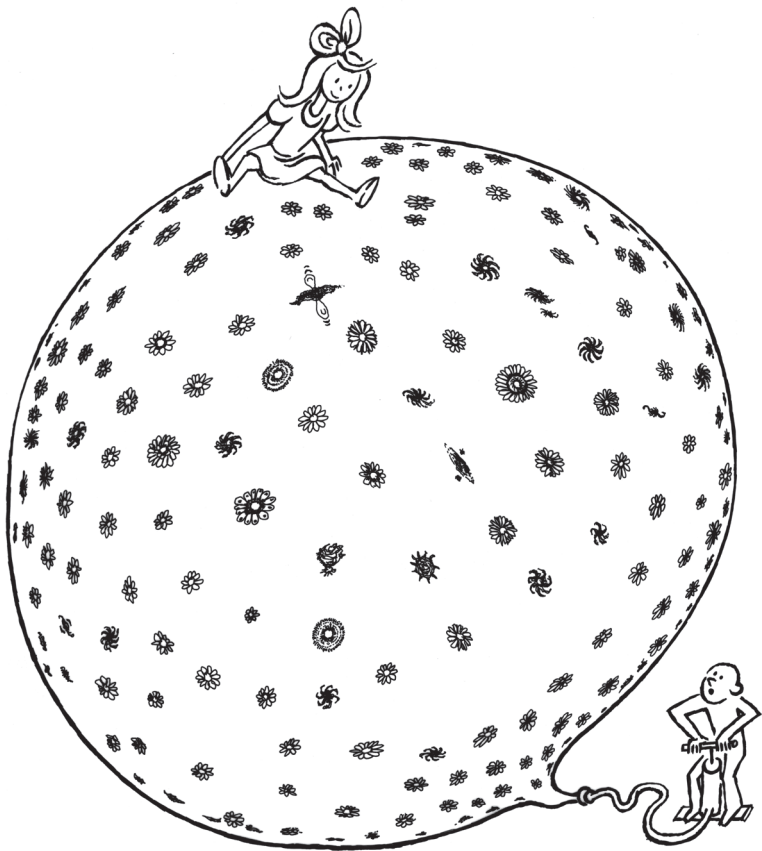
nemá nic společného. Podobně předpokládáme, že i ve vesmíru probíhá expanze časoprostoru, ale nemění se vzdálenosti struktur vázaných elektromagneticky či gravitačně. Tyto vzdálenosti jsou dány velikostí konstanty jemné struktury (elektromagnetismus) a velikostí gravitační konstanty (gravitace).

Pokud by se jednorozměrný příklad s gumičkou nebyl dost názorný, představme si poutový balóněk, na který někdo fixem namaloval zřetelné značky. Budeme-li balóněk nafukovat, značky se budou vzdalovat od sebe a na každé z nich upozorujeme, že se ostatní značky vzdalují právě od vás, a to tím rychleji, čím jsou dále. Střed expanze není na žádné ze značek, expanze probíhá z každé z nich. A do třetice ještě jeden třírozměrný příklad: obří molitanová houba, která se natahuje všemi směry. Obyvatel každé z bublinek opět spatří, že se ostatní bublinky vzdalují od něho s rychlostí úměrnou jejich vzdálenosti.

Střed expanze vesmíru je tedy v každém jeho místě. Expanze probíhá z každého bodu vesmíru. A ve všech místech vesmíru uvidíme stejný obraz expanze vesmíru. Tomuto tvrzení se říká *kosmologický princip* a lze ho vyjádřit jednoduchou větou: „Vesmír vypadá a chová se ve všech místech stejně.“ Samozřejmě musíme tolerovat drobné odchylky. Rozřízneme-li vánočku, budou v řezu tu a tam patrné rozinky. Rozřízneme-li ji o centimetr vedle, bude řez vypadat zhruba stejně, i když tu uvidíme jiné rozinky a poněkud jinak rozmístěné. Jsme přesvědčeni, že podobné je to i s naším vesmírem.

Kosmologický posuv

Z obecné relativity lze ukázat, že světlo letící vesmírem kopíruje expanzi, tedy natahuje svou vlnovou délku. Fotony, které vylétly na konci Velkého třesku, měly vlnovou délku ve stovkách nanometrů, tedy ve viditelné oblasti spektra. Dnes k nám putují ze všech směrů a mají vlnovou délku kolem jednoho milimetru. Nejde ale jen o fotony z horké počáteční fáze vesmíru, jíž se budeme věnovat až ve čtvrté kapitole. Elektromagnetické záření z každého zdroje, který je ve velké vzdálenosti, je posunuto k červenému



konci spektra. Tomuto posuvu říkáme „červený kosmologický posuv“ a charakterizujeme ho relativní změnou vlnové délky $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, kde λ_0 je vlnová délka v době vyslání signálu. Pro malé kosmologické vzdálenosti splývá kosmologický červený posuv s Dopplerovým jevem, proto bylo možné měření z počátku dvacátého století interpretovat dopplerovsky, tedy jako změnu vlnové délky v závislosti na rychlosti vzdalování objektu. Pro velké vzdálenosti, například deset miliard světelných roků, to už možné není a lze jen konstatovat, že vlnová délka elektromagnetického signálu kopíruje expanzi vesmíru. Největší dosud změřený červený kosmologický posuv je

u galaxie GN-z11 ze souhvězdí Velké medvědice, u níž posuv činí 11,1. V době vyslání elektromagnetického záření touto galaxií měl vesmír pouhou dvanáctinu dnešních rozměrů.

Pokud známe průběh expanze, je možné červený kosmologický posuv přepočítat na vzdálenost objektu. Pro malé kosmologické vzdálenosti lze využít Hubbleův-Lemaîtreův-Slipherův zákon. Čím více se ale blížíme k Velkému třesku, tím přesnější musí být naše znalost parametrů expanze. Proto většina současných astronomů posuv na vzdálenost nepřepočítává a v astronomickém žargonu rovnou měří vzdálenost v jednotkách kosmologického posuvu. Často se tak dočteme, že daný kvazar (obnažené aktivní jádro galaxie) či jiný objekt je například ve vzdálenosti $z = 6,6$. Na internetu můžeme nalézt nejrůznější kalkulačky, které nám hbitě převedou tuto hodnotu na vzdálenost. Každá dá ale jiný výsledek. Jak je to možné? Výpočet totiž závisí nejenom na Hubbleově konstantě, ale i na zakřivení vesmíru, množství temné hmoty a temné energie v něm a na tom, zda počítáme jen dobu, po kterou světlo letělo, nebo skutečnou vzdálenost včetně expanze. Kvalitní kalkulačku, v níž je možné tyto parametry nastavit, provozují na Kalifornské univerzitě v Los Angeles (stačí do Googlu zadat *Cosmology Calculator UCLA*). Pro dnes přijímané hodnoty vstupních parametrů vyjde, že světlo z objektu GN-z11 k nám letělo 12,8 miliardy roků a uletělo (se započtenou expanzí) vzdálenost 27 miliard světelných roků.

Do konce roku 1989 se u nás říkalo *rudý kosmologický posuv*. Po odklonu od komunistické ideologie se rudá barva z našich končin postupně vytrácí. Setrvačnost je ale obrovská, a tak i dnes toto sousloví ještě někde uslyšíte.

Fridmanovo řešení

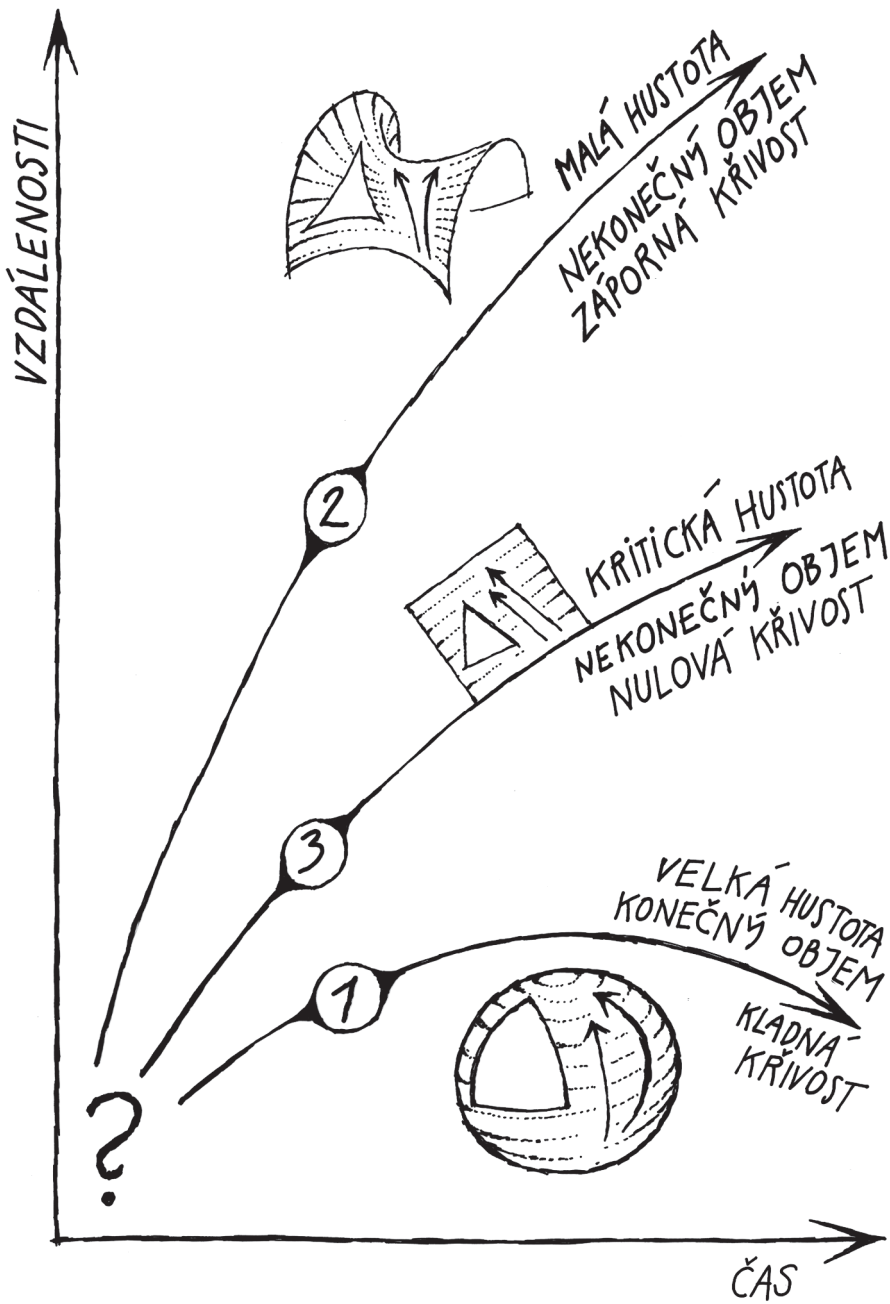
Alexandr Fridman provedl jako jeden z prvních podrobnou analýzu řešení rovnic obecné relativity pro homogenní (ve všech místech stejný) a izotropní (ve všech směrech stejný) vesmír. Ukázal, že pro nulovou kosmologickou konstantu může mít expanze tři různé průběhy. Pro dosti velkou hustotu látky převládne gravitační smršť-

tování a vesmír se v budoucnosti opět zhroutí do husté a horké podoby. Fridman spočítal, že takový vesmír bude mít konečné rozměry a kladnou křivost. Ve dvourozměrné analogii by tomu odpovídaly vlastnosti povrchu koule. V tomto případě jde o křivost vesmíru jako celku, tzv. *globální křivost*. Představme si roli bublinkové fólie. Jednotlivé bublinky nám prezentují lokální zakřivení způsobená přítomností hvězd, galaxií či kup galaxií. Celkově je ale plocha fólie v roli rovná. Můžeme ji položit na velkou ohřátou kouli a fólie se vytvaruje do kladné křivosti, což odpovídá v této analogii globálnímu zakřivení vesmíru.

Druhou možností je nízká průměrná hustota ve vesmíru. V takovém případě by gravitace na zastavení expanze nestačila, pouze by ji brzdila, ale expanze by probíhala napořád. Takový vesmír by měl nekonečný objem a zápornou křivost. Ve dvourozměrné analogii tomu odpovídá plocha podobná koňskému sedlu.

Třetím scénářem je vesmír „připravený akorát“ – jako kaše v pohádce „*O Mášence a třech medvědech*“. Takový vesmír by měl přesně kritickou hustotu (dva až tři protony v jednom metru krychlovém), nekonečný objem, nulovou křivost a rozpínal by se neustále. Ve dvourozměrné analogii si můžeme představit obyčejnou rovnou plochu, například nekonečný arch papíru.

Tři Fridmanova řešení dobře korespondují s jednoduchou úlohou z klasické mechaniky – kamenem vrženým vzhůru. K vymrštění kamene musí existovat nějaký prvopočáteční impuls. Obdobně ve vesmíru „cosí“ na počátku způsobilo jeho expanzi. Co by to mohlo být, si povíme v předposlední kapitole této knihy. Pokud kámen vrhneme malou rychlostí, doletí do konečné výšky a poté spadne na zem. Tomu odpovídá Fridmanovo řešení konečného vesmíru s velkou hustotou a převládající gravitací. Pokud kámen vrhneme vyšší rychlostí, než je úniková, a zanedbáme efekty atmosféry, odletí pryč. Jeho vzdálenost se bude stále zvětšovat, ale rychlost bude klesat. Podobně tomu je ve Fridmanově řešení s hustotou nižší, než je kritická. Expanze je sice brzděná, ale probíhá neustále. Řešení „tak akorát“ odpovídá kameni vrženému právě únikovou rychlostí.



Rychlost bude sice limitně klesat k nule (kámen by ji dosáhl v nekonečné vzdálenosti), ale let kamene (v případě vesmíru expanze) bude přesto neustále pokračovat.

Na závěr poznamenejme, že existuje i celá řada dalších zajímavých řešení. Holandský matematik, fyzik a astronom Willem de Sitter například ukázal, že i vesmír bez hmoty (s nulovou křivostí) může expandovat, pokud je nenulová hodnota kosmologické konstanty. Taková expanze bude zrychlená a řešení tohoto druhu nazýváme *de Sitterův vesmír*. Teoretická konstrukce vesmíru se zápornou křivostí, v němž není látka, se nazývá *anti de Sitterův vesmír* (AdS). De Sitter našel řešení pro kladnou, zápornou i nulovou hodnotu kosmologické konstanty. Willem de Sitter byl profesorem astronomie na Leidenské univerzitě a ředitelem Leidenské observatoře.

Víte, že

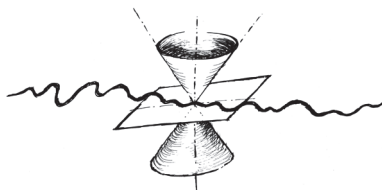
- Víte, že na Mt. Wilsonu byly učiněny i další důležité astronomické objevy? V roce 1919 zde Albert Michelson interferometricky poprvé určil průměr hvězdy (šlo o Betelgeuse), Fritz Zwicky zde v roce 1933 objevil temnou hmotu, v roce 1938 Seth Barnes Nicholson objevil dva měsíce Jupiteru a na zdejší sluneční věži byly v roce 1960 nalezeny pětiminutové oscilace Slunce.
- Víte, že Alexandr Fridman byl za 1. světové války letcem a vyučoval na letecké škole? Učarovalo mu balónové létání, kterému se věnoval po válce. Při posledním letu měl jeho balón poruchu, Fridman ve stratosféře prochládl, dostal zápal plic a zanedlouho po tomto letu zemřel.
- Víte, že Edwin Hubble nebyl jen astronomem, ale vystudoval i práva a krátce provozoval právnickou praxi? Také byl nadšeným sportovcem, velké úspěchy měl v basketbalu a boxu a nechybělo příliš mnoho, aby se stal profesionálním boxerem.
- Víte, že Hubblův dalekohled, který byl na počest Edwinu Hubbleovi vynesena na oběžnou dráhu v roce 1990, měl chybně vyleštěné zrcadlo? Významný americký astronom Jesse Leonard

Greenstein, který odhalil podstatu kvazarů, zabýval se zastoupením prvků ve hvězdách a orientací magnetického pole ve spirálních ramenech Galaxie, tehdy prohlásil, že „Hubble má takové zrcadlo, jaké si zaslouží.“

■ Víte, že Hubbleova konstanta je konstantní pouze v prostoru a nikoli v čase? V průběhu miliard roků se totiž rychlost expanze výrazně mění, a s tím i hodnota Hubbleovy konstanty.

Poučení na závěr:

- 1) *Vesmír má v oblíbě červenou barvu.*
- 2) *Rozpínavost je vesmírná přirozenost.*
- 3) *Nepublikujte francouzsky v belgických časopisech.*



3. Příběh reliktního záření

*„Nejenže je vesmír podivnější než si myslíme,
je dokonce podivnější, než si dokážeme představit.“*

John Burdon Sanderson Haldane, genetik a evoluční biolog

Není příliš složité přijít na to, že pokud se vesmír rozpíná, měl by mít horký a hustý počátek. Jako první si to uvědomil abbé Georges Lemaître, který v roce 1931 publikoval svou *teorii prvotního atomu*. Vesmír si na počátku představoval jako extrémně malou, horkou a hustou kuličku. Dnes víme, že v případě nekonečného vesmíru by rozměr vesmíru na počátku vůbec nemusel být malý. Tuto vizi horkého původu světa v roce 1948 podrobně rozpracoval George Gamow, který v roce 1934 emigroval z tehdejší sovětské Ukrajiny do Spojených států. Představa horkého počátku vesmíru a jeho vývoje jitrila už tak neklidné vody astronomie oněch let a vědecká komunita se rozdělila na dva nesmiřitelné tábory. Jeden zastával existenci počátku vesmíru a druhý teorii stacionárního vesmíru, jejímž autorem byl anglický astronom Fred Hoyle. Ten prosazoval, že expanze vesmíru nevede ke zředování látky, neboť se ve vesmíru stále rodí nové a nové částice, které zaplňují prostor vzniklý při nafukování vesmíru. Vesmír proto může expandovat, aniž by v něm musely být patrné nějaké dlouhodobější změny.

Fred Hoyle byl vynikajícím astronomem, který se především zabýval detaily vzniku prvků v nitru hvězd. Jeho záběr byl ale velmi široký a rozhodně nezahrnoval jen ryzí vědu. Spolu se svým synem psal vědeckofantastické povídky a pravidelně popularizoval astronomii. Fred Hoyle měl dokonce i svůj vlastní pořad na rozhlasové stanici

Rádio 3 společnosti BBC. Dne 28. března 1949 v 18.30 se poněkud rozvášnil a označil Gamowovu teorii horkého původu světa jako *Big Bang* (Velký třesk). V žádném případě ale nezamýšlel dát této teorii přitažlivý název. Jeho označení bylo pejorativní, měl na mysli velké plácnutí, velký nesmysl. Džina vypuštěného z láhve už nelze nikdy vrátit zpět, a tak se tento původně posměšný název docela rychle ujal a dnes ho už používá každý.

Velký třesk

Dříve bývalo zvykem jako Velký třesk označovat pouze okamžik vzniku vesmíru, podivnou počáteční singularitu, ve které podle rovnic obecné relativity vychází nekonečná teplota a nekonečná hustota látky. Takové lokalizované nekonečno je ale v rozporu s naší zkušeností, a pokud v nějaké teorii vyjde, většinou to znamená její selhání. V takové situaci bychom se měli poohlédnout po teorii jiné. Nejinak je tomu i zde. Nemůžeme posuzovat vznik vesmíru jen na základě obecné relativity – současné teorie gravitace. Extrémní podmínky těsně po vzniku vesmíru nutně ke svému popisu potřebují kvantovou teorii. Velký vliv zde samozřejmě měly ostatní interakce – elektromagnetická, silná i slabá. A v kvantové teorii je dobře známo, že veškeré stavební částice látky (tzv. *kvarky* a *leptony*) nemohou zaujmout stejný kvantový stav. To znamená, že je nelze stlačit libovolně blízko k sobě a teplota ani hustota nemohou dosáhnout nekonečných hodnot. Podle kvantové teorie není počáteční singularita vůbec nutná. Vesmír mohl vzniknout například fázovým přechodem z jakési kvantové pěny, zkrátka náš vesmír mohl vzniknout z nějaké jiné formy vesmíru, která zde byla dříve, pokud má slovo „dříve“ vůbec smysl. K našim představám o vzniku vesmíru se podrobně vrátíme v kapitole dvanácté „*Jeden těžký porod*“. Dnes se jako Velký třesk označuje celé počáteční období, při němž byl vesmír horký a nacházel se v plazmatickém skupenství.

Teď nejspíše nastal okamžik, kdy bychom si měli vysvětlit, co je to plazma. Když zahříváme pevnou látku, například led, nejprve se naruší krystalické vazby a led se stane kapalinou. Tu drží pohromadě van der Waalsovy a jim podobné síly. Při dalším ohřevu vezmou za

své i tyto vazby a kapalina se stane plynem. Co se bude dít, pokud budeme v zahřívání pokračovat? Dodávaná energie nejprve způsobí excitaci elektronů v atomárních obalech a nakonec dojde k jejich odtržení. A právě takové prostředí, v němž se volně potulují částice s kladným i záporným nábojem, nazýváme plazma. V českém jazyce používáme pro jeho označení střední rod (hovoříme o plazmatu), zatímco pro krevní složku používáme výhradně ženský rod (hovoříme o plazmě).

Plazma je pro elektromagnetické záření zpravidla neprůhledné a nejinak tomu bylo v průběhu Velkého třesku. Elektromagnetické záření rozkmitá volné elektrony, které se mu postaví do cesty, ty převzou jeho energii a záření zanikne. Kmitající elektron ale vysílá záření jiné, a tak je cesta záření plazmatem nekonečným příběhem o pohlcování a opětovném vyzařování elektromagnetického signálu volnými elektrony. Tytéž procesy probíhají ve Slunci nebo v kanálu blesku, proto jsou oba tyto plazmové útvary neprůhledné. Velký třesk skončil v okamžiku, kdy teplota látky poklesla na několik tisíc stupňů Celsia a v takto chladném prostředí začaly elektrony vytvářet atomární obaly. Plazma se změnilo v neutrální plyn a postupně vymizely všechny volné elektrony. Záření si oddechlo a vydalo se na dlouhou pouť vesmírem, který se pro něho poprvé stal téměř dokonale průhledným. Všimněme si, že i v místnosti osvětlené žárovkou světlo dopadne až na náš pracovní stůl. Je to jen proto, že počet volných elektronů ve vzduchu (plynném skupenství) je minimální a světlo se nemá na čem rozptýlit. Elektrony vázané v atomárních obalech mají fixní energii a nemohou se rozkmitat. Mohou pouze vyzařít nebo pohltit foton, přeskočí-li z jedné energetické hladiny na druhou. Takové procesy ale nejsou příliš časté.

Podmínky v plazmatické éře našeho vesmíru analyzoval na konci první poloviny 20. století právě George Gamow se spolupracovníky – Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem. Nejprve počítali, jak se v zárodečném plazmatu formovala jádra lehkých prvků. Jejich modely závisely na tehdejších znalostech jaderné fyziky, a tak nebyly příliš přesné. V hrubých obrysech se nicméně shodovaly s dnešní představou vzniku lehkých jader. Kromě toho Gamowova

skupina také počítala, jak se elektromagnetické záření oddělí od látky na konci Velkého třesku. Dnes toto záření nazýváme *reliktní záření* a Gamowovy odhady byly obdivuhodně přesné. Dobu trvání Velkého třesku odhadoval na 700 000 roků, dnes víme, že to bylo 400 000 let, což je řádově shodná hodnota. Obdobně správně odhadl Gamow teplotu reliktního záření na necelých sedm kelvinů, skutečná hodnota jsou tři kelviny.

V roce 1948 vydala Gamowova skupina dva články o horkém původu světa. Gamow měl poněkud zvláštní smysl pro humor a napadlo ho, že pokud má ve skupině Alpher, který připomíná řecké písmeno alfa a jeho vlastní jméno připomíná gamu, bylo by dobré, aby mezi autory článku byla také beta. Proto oslovil Hanse Betheho (ten se zabýval jadernými reakcemi v nitru hvězd), který souhlasil, a jeden z článků měl nakonec trojici autorů v pořadí Alpher, Bethe a Gamow, což připomínalo počátek řecké abecedy. Dnes se hovoří o $\alpha\beta\gamma$ modelu.

Gamow věděl, že se reliktní záření uvolnilo jako světlo, ale na pouti rozpínajícím se vesmírem se jeho vlnová délka prodloužila do mikrovlnné oblasti. Proto se pokoušel přesvědčit vědecké skupiny, které měly k dispozici radarovou techniku, aby reliktní záření hledaly na obloze. To už ale bylo na tehdejší poměry asi poněkud příliš. Kosmologové byli považováni za snílky, podivíny a tak trochu blázny. Zabývat se osudem vesmíru zkrátka člověku nepřísluší, a kdo tak činil, nebyl dle tehdejších standardů zcela při smyslech. A teď si představme, jak Gamow tvrdí: „*Když se podíváte na oblohu, uvidíte mikrovlnný svit z konce Velkého třesku!*“ Nikdo mu neuvěřil a nikdo se o hledání něčeho tak iluzorního vůbec nepokusil. Jedině americký fyzik Joseph Weber, který byl vynikajícím odborníkem na rádiovou techniku, nabízel svou pomoc, ale Gamow ke své smůle o jeho služby zájem neprojevil. Weber se později stal autorem prvního experimentu na hledání gravitačních vln, tzv. Weberových válců. Při vyhodnocování experimentů se ale dopustil několika chyb, které ho u některých kolegů zdiskreditovaly.

Pokud máte ještě někde doma staříčkou analogovou televizi, naladte si ji tam, kde nevysílá žádný program. Objeví se charakteristické

zrnění – šum nejrůznějšího původu. Dle povětrnostních podmínek by mělo být 5 až 20 procent tohoto šumu tvořeno právě reliktním zářením. Jde o jeden z nejhodnotnějších televizních programů vůbec. Uvařte si kávu, naladte zrnění a pokochejte se pohledem na konec Velkého třesku!

Bellovy telefonní laboratoře

Bellovy telefonní laboratoře jsou špičkovým vědeckým ústavem. Z jejich líně se rekrutovala celá řada nositelů Nobelových cen a mimo jiné zde byl postaven i první tranzistor, který odstartoval elektronickou revoluci naší civilizace. V období počátků kosmonautiky bylo vedení Bellových telefonních laboratoří jasné, že telekomunikace budou jednou probíhat přes družice umístěné na oběžné dráze. Když Sověti vypustili v roce 1957 první Sputnik, v Bellových laboratořích už připravovali jednoduchou telekomunikační družici ECHO. Šlo o dvě polokoule o rozměru větší vodnaté hlavy, v nichž byl smotán balón pokovený hliníkem. První start družice se nezdařil, ale napodruhé vynesla dne 12. srpna 1960 družici ECHO na oběžnou dráhu z mysu Canaveral nosná raketa Thor-Delta. Na orbitě byly obě polokoule ve výšce 1 600 kilometrů nad zemí odděleny a balón nafouknut plynem na průměr 30 metrů. Balón sloužil jako pasivní odražeč a hned v den startu byl vyslán první signál z Laboratoře tryskových motorů (NASA JPL) v kalifornské Pasadeně. Impulz se odrazil od balónu a byl přijat anténou Bellových telefonních laboratoří na Murray Hill v Holmdelu (New Jersey). Byl to slavný den, kdy se ukázalo, že je opravdu možné dopravit signál na oběžnou dráhu, tam ho zpracovat – v tomto případě pouze odrazit – a přijmout zpět na Zemi.

K experimentům postavil specializovanou nálevkovitou anténu inženýr Bellových laboratoří Arthur Crawford. Jeho anténa se sběrnou plochou 25 m² pracovala na vlnové délce 7,3 centimetru. Poměr citlivosti v předním a zadním směru byl 3000:1. Když byly v roce 1963 experimenty s družicí ECHO 1 ukončeny, padlo rozhodnutí, že Crawfordova anténa poslouží ještě jednou a bude využita k pořízení mikrovlnné mapy hvězdné oblohy. Tento nelehký

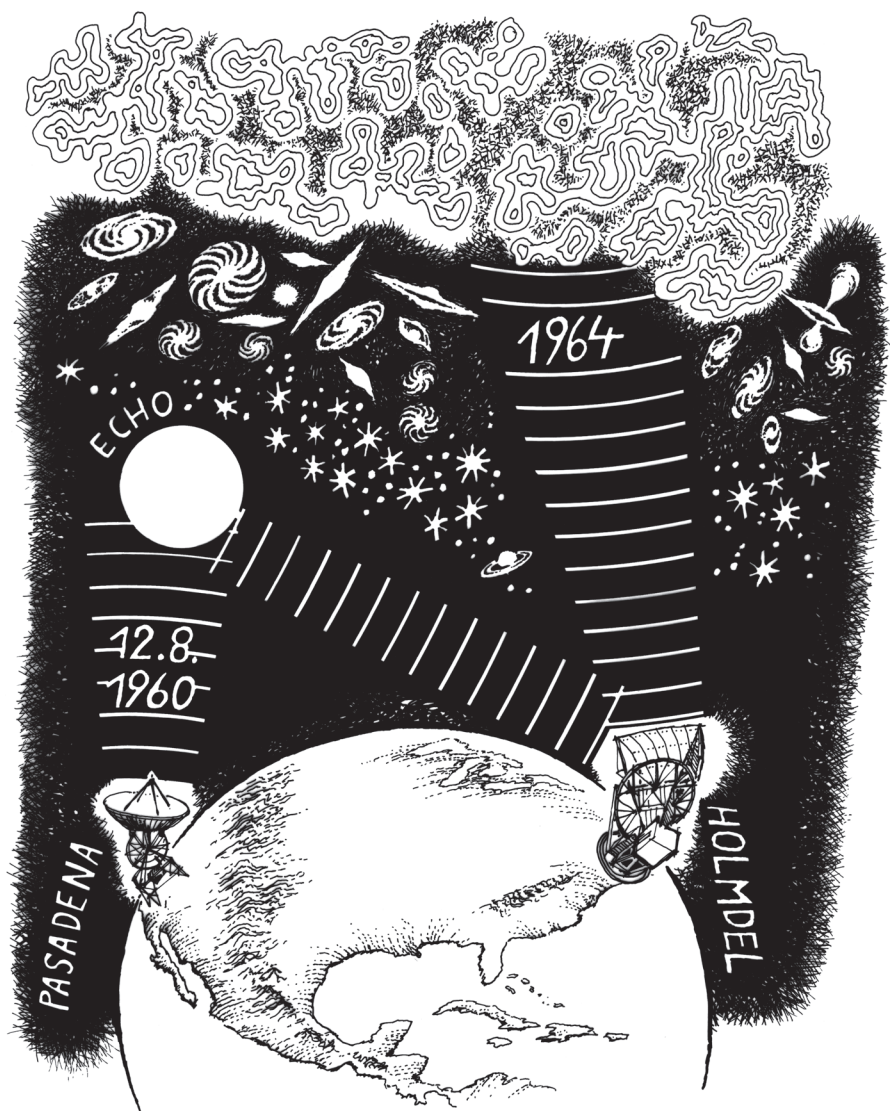
úkol dostali dva zaměstnanci Bellových laboratoří – Arno Allan Penzias a Robert Woodrow Wilson.

Anténa byla nejprve zrekonstruována pro astronomické účely. Hned při prvních testech zaznamenali Penzias a Wilson neobvyklý šum. Postupně vyloučili jako jeho možný zdroj blízký New York, nedávné testy jaderných zbraní v Tichém oceáně, van Allenovy radiační pásy, Slunce i střed Galaxie. Šum přicházel rovnoměrně z celého vesmíru.

Na počátku 60. let nezávisle na Gamowovi předpověděl existenci reliktního záření americký teoretik Robert Dicke a pokoušel se toto poselství z konce Velkého třesku nalézt se skupinou amerických fyziků a astronomů, v níž byli James (Jim) Peebles, David Todd Wilkinson a Peter Roll. Právě když se pokoušeli zkonstruovat vhodnou anténu, dozvěděli se o šumu naměřeném Penziasem a Wilsonem. Robert Dicke ihned pochopil, že by mohlo jít o reliktní záření a situaci komentoval slovy: „*Pánové, někdo nám vypálil rybník!*“ Nakonec vyšel v roce 1965 v *Astrophysical Journal* slavný dvojčlánek: v první části odvozuje Dickeho princetonský tým, že by v současnosti měl být kolem nás všudypřítomný šum z konce Velkého třesku. V navazujícím článku Penzias a Wilson popisují nalezení šumu neznámého původu na Crawfordově anténě. Nobelovu cenu za objev reliktního záření v roce 1978 získali jen Penzias a Wilson. Dicke mezi oceněnými nebyl.

Od družice k sondám

Mikrovlnné záření pozadí, jak se reliktnímu záření někdy říká, má maximum intenzity záření na vlnové délce přibližně jeden milimetr. Je jasné, že Crawfordova anténa postavená jen pro vlnovou délku 7,3 centimetru nebyla nevhodnějším nástrojem. Pro definitivní potvrzení, zda je šum objevený Penziasem a Wilsonem opravdu reliktním zářením z konce Velkého třesku, byla v USA postavena specializovaná družice COBE. Její název je zkratkou z anglického *COsmic Backgroud Explorer, Výzkumník kosmického pozadí*. Úspěch mise byl obrovský. COBE byla dopravena na oběžnou dráhu v roce 1989.



Inženýři z Bellových telefonních laboratoří zkonstruovali družici ECHO, která v roce 1960 uskutečnila první satelitní telefonát. Šlo o 30 metrů veliký balón, který odrazil signál mezi Pasadenou a Holmdelem, městy vzdálenými 3700 kilometrů. První slova přenesená přes družici pronesl prezident Spojených států Dwight David Eisenhower, který ocenil význam tohoto experimentu. Nálevkovitá anténa z Holmdelu později posloužila při objevu reliktního záření.

Přístroje byly chlazené kapalným héliem a nebylo jasné, jak dlouho je chlazení udrží v činnosti. Proto byl hlavní vědecký program nasměrován do prvních okamžiků po startu.

Za pouhých 8 minut provozu tato družice změřila teplotu reliktního záření (2,73 K) s relativní přesností 10^{-3} a proměřila závislost intenzity na vlnové délce, ze které vyplynulo, že jde o reliktní záření. Dodnes jde o nejrychleji splněné cíle kosmického programu. Družice COBE ale pracovala až do roku 1993 a největší objev na ni teprve čekal. V roce 1992 zjistila, že reliktní záření má v různých směrech různou teplotu. Jde sice o velmi malé změny teploty (až na pátém desetinném místě), ale nesmírně důležité. Tyto fluktuace jsou vůbec první struktury, které ve vesmíru vidíme již na konci Velkého třesku a které se později vyvinuly v dnešní galaxie a kupy galaxií. Můžeme je chápat jako jakýsi paleolitický otisk, který rozvlněná látka vtiskla do obrazu reliktního záření. Dnes jsou tyto fluktuace jedním z nejdůležitějších zdrojů informací o raném vesmíru. Při pohledu na ně se díváme na samotný závěr období Velkého třesku. Snímek fluktuací reliktního záření z roku 1992 ukončil debaty o existenci či neexistenci Velkého třesku. Na snímku jsme se totiž přímo podívali na jeho závěrečnou fázi. Právem byli autoři experimentů na družici COBE, John Mather a George Smoot, odměněni Nobelovou cenou za fyziku pro rok 2006.

Z nepatrných flíčků v reliktním záření je možné získat celou řadu informací. K tomu je ale zapotřebí provést tzv. frekvenční analýzu – zjistit, v jakém množství jsou zastoupeny různé úhlové velikosti těchto flíčků. Nejčastější jsou fluktuace s úhlovým rozměrem kolem jednoho stupně, COBE měla rozlišení jen 7° , a proto nebyla její data pro takovou analýzu dosti podrobná. Bylo jasné, že data pro takový úkol musí pořídit mnohem lepší zařízení, než byla COBE. V roce 2001 startovala americká sonda MAP (*Microwave Anisotropy Probe*). Tentokrát šlo o sondu, tj. nebyla umístěna na oběžné dráze, ale v Lagrangeově bodě L2 soustavy Země-Slunce (1,5 milionu kilometrů od Země ve směru od Slunce). V tomto místě už pozorování neruší tepelný šum atmosféry Země. Úhlové rozlišení sondy MAP bylo necelých $0,3^\circ$, což umožnilo nasnímat reliktní záření v dosta-

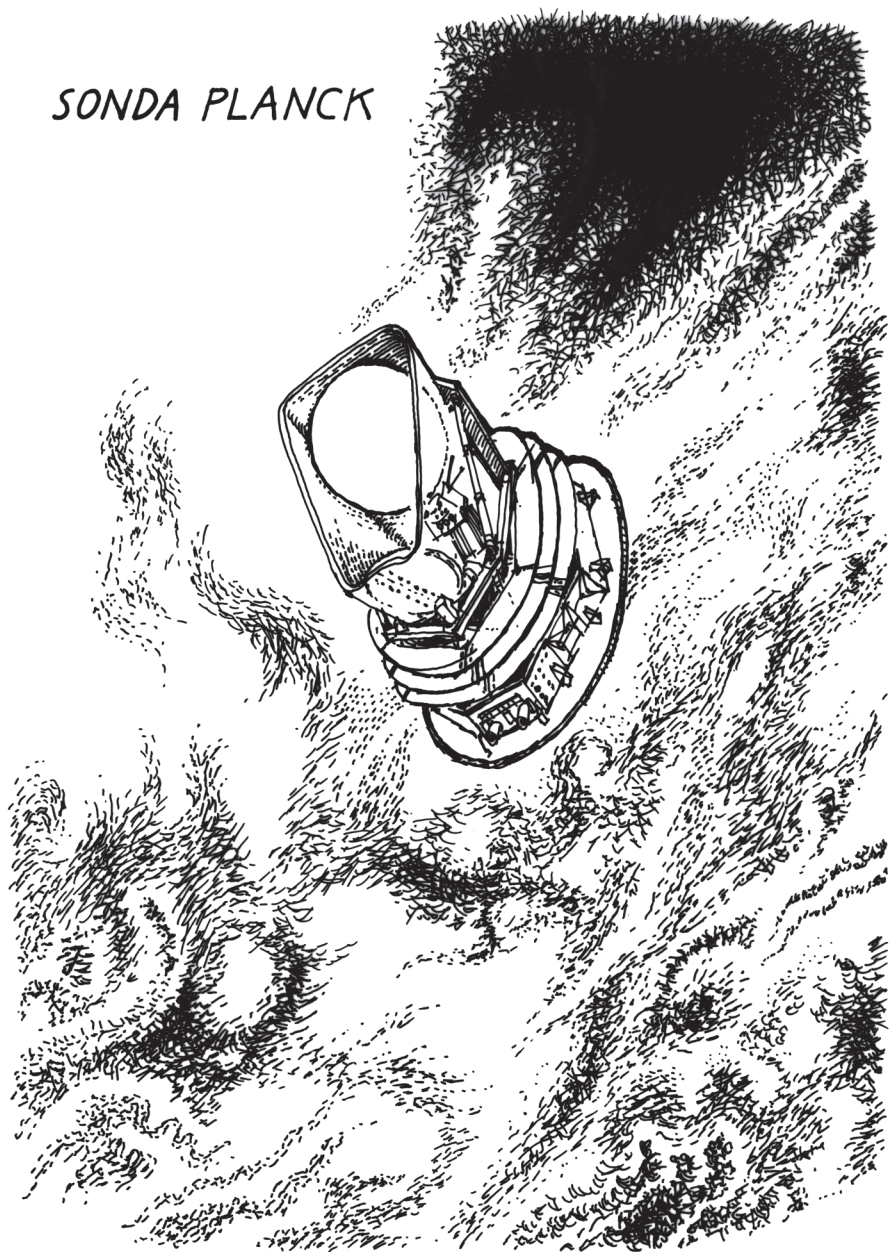
tečném rozlišení pro frekvenční analýzu. Výsledky byly zveřejněny na slavnostní tiskové konferenci dne 11. února 2003.

Z frekvenční analýzy pořízené mapy fluktuací reliktního záření byla zjištěna řada důležitých údajů. Stáří vesmíru je 13,7 miliard let, jsou v něm přibližně 4 % atomární látky, 23 % temné hmoty a 73 % temné energie. Reliktní záření se oddělilo od látky v čase zhruba 400 tisíc let po vzniku vesmíru, čímž skončil Velký třesk a začal temný věk vesmíru. Šlo o obrovský posun v našich znalostech. O den dříve by nám každý astronom řekl, že vesmír může být starý od 10 do 25 miliard roků. Po výše zmíněné tiskové konferenci bylo jasné, že je stáří vesmíru 13,7 plus minus 0,3 miliardy roků.

V průběhu práce sondy MAP zemřel jeden z jejích duchovních otců – David Todd Wilkinson. Proto byla tato mimořádně úspěšná sonda přejmenována z MAP na WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, Wilkinsonova sonda pro výzkum anizotropie mikrovlnného záření*).

V roce 2009 startovala další sonda – evropský Planck, zatím nejpreciznější přístroj pro výzkum reliktního záření. Úhlová citlivost byla 5 obloukových minut. Sonda pořídila 4 úplné přehledky oblohy ve vlnovém rozsahu od 0,2 mm do 10 mm. Jedno oskenování oblohy trvalo přibližně půl roku, sonda se přitom otáčela a zaznamenávala data z pásu o šířce 15°. Ohnisko bylo chlazené na pouhou desetinu kelvinu a sonda byla podobně jako WMAP umístěna v Lagrangeově bodě L2 soustavy Země-Slunce. Sonda Planck měřila v devíti pásmech, což umožnilo odečíst nejrůznější parazitní signály (například záření prachu z Mléčné dráhy) a byla schopná detekovat polarizaci signálu (rovinu kmitů elektrického pole). Jedním ze zdrojů polarizace reliktního záření jsou volné elektrony vznikající při interakci látky s intenzivním ultrafialovým svitem prvních hvězd. Tento jev umožnil datovat existenci velkého množství hvězd první generace do období 550 milionů roků po vzniku vesmíru. Podrobněji se na hvězdy první generace zaměříme v sedmé kapitole „*Co se skrývá ve hvězdách*“. Sonda Planck provedla zatím nejpreciznější měření fluktuací reliktního záření a zpřesnila kosmologické parametry nalezené

SONDA PLANCK



sondou WMAP: stáří vesmíru je 13,8 miliardy roků a základní tři ingredience našeho vesmíru jsou zastoupeny takto: atomární látka 5 %, temná energie 69 % a temná hmota 26 %. Mapy fluktuací a polarizace reliktního záření, které byly uvolněny v roce 2018, jsou v barevné příloze na obr. 1.

	COBE	WMAP	Planck
start	1989	2001	2009
teplotní rozlišení	400 μK	20 μK	1 μK
úhlové rozlišení	7°	15'	5'
počet pásem	3	5	9

Sféra posledního rozptylu

Když se podíváme na Slunce, vidíme ho, jak vypadalo před 8 minutami. Takovou dobu k nám od Slunce letí elektromagnetický signál. Při pozorování galaxie v Andromedě si musíme uvědomit, že vidíme obraz starý 2,5 milionu roků. A při pozorování velmi vzdálených objektů k nám signál letí tak dlouho, že už dnes možná ani neexistují. Na jednu stranu je poněkud frustrující, že nevidíme reálný obraz, ale na druhou stranu nám konečná rychlost šíření světla umožňuje pozorovat, jak vypadal vesmír kdysi dávno. Čím dále se podíváme, tím mladší vesmír spatříme. Nikdy ale nelze proniknout za stěnu reliktního záření. V průběhu Velkého třesku byl vesmír v plazmatickém skupenství, které je pro světlo neprůhledné, a proto při pozorování v elektromagnetickém spektru dohlédneme nejdále na konec Velkého třesku. Někdy o této neproniknutelné stěně hovoříme jako o *sféře posledního rozptylu*, protože ji tvoří látka, v níž se naposledy rozptýlily fotony na volných elektronech. Ty byly v časech pozdějších integrovány do atomárních obalů a vesmír se stal pro světlo průhledným.

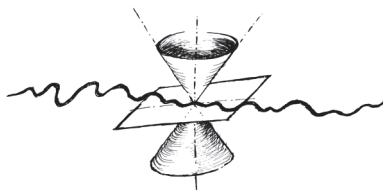
Jak ale nakouknout do samotné kuchyně Velkého třesku, za onu neproniknutelnou stěnu reliktního záření pozadí? O stavu vesmíru „za stěnou“ leccos vypovídají analýzy fluktuací reliktního záření. Pokud se ale nechceme spokojit jen se sofistikovanými výpočty, bude třeba jednou zachytit posly přicházející zpoza stěny – například reliktní neutrina nebo reliktní gravitační vlny.

Víte, že

- Víte, že se papež František opakovaně vyjádřil ve prospěch teorie Velkého třesku a evoluce? Poprvé se tak stalo v říjnu 2014, kdy prohlásil, že člověk může současně věřit v Boha i Velký třesk a vědecké důkazy o Velkém třesku jsou velmi přesvědčivé.
- Víte, že teplota na konci Velkého třesku byla řádově shodná s teplotou povrchu Slunce? Není to náhoda, při teplotě několika tisíc kelvinů se kolem atomových jader totiž formují atomární obaly. Teplota v kanálu blesku je několikanásobně vyšší, přibližně třicet tisíc kelvinů a stupeň ionizace atomů je vysoký.
- Víte, že reliktní záření pozoruje i řada pozemských přístrojů? Jejich rozlišení bývá lepší než u sond, ale pozorují jen malou část oblohy, což neumožňuje z takto pořízených dat provést frekvenční analýzu.
- Víte, že bylo reliktní záření pozorováno i z balónů? Éra balónových experimentů kulminovala na přelomu tisíciletí a k nejvýznamnějším patřily experimenty BOOMERanG (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics*) a MAXIMA (*Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array*). Cílem bylo snížit absorpci mikrovln atmosférou na minimum.
- Víte, že balónový experiment BOOMERanG létal na Antarktidou a mapoval reliktní záření z výšky až 42 kilometrů? Při dvou vědeckých letech (1998 a 2003) bylo použito odrazné zrcadlo o průměru 1,3 metru a detektory byly chlazené na 0,27 K. Bylo dosaženo rozlišení několika desetin úhlového stupně.

■ Víte, že chceme-li pozorovat mikrovlny z vesmíru, musíme být buď hodně vysoko, kde je již nepohlcuje atmosféra, nebo ve velké zimě, kde vodní pára zmrzne? Ideálními místy na Zemi tak jsou Atakamská poušť (5 000 metrů nad mořem) a jižní pól (zima větší než na Sibiři).

Poučení na závěr: *Nejsou mikrovlny jako mikrovlny. V mikrovlnném reliktním záření si oběd neohřejete, i kdybyste se na uši stavěli.*



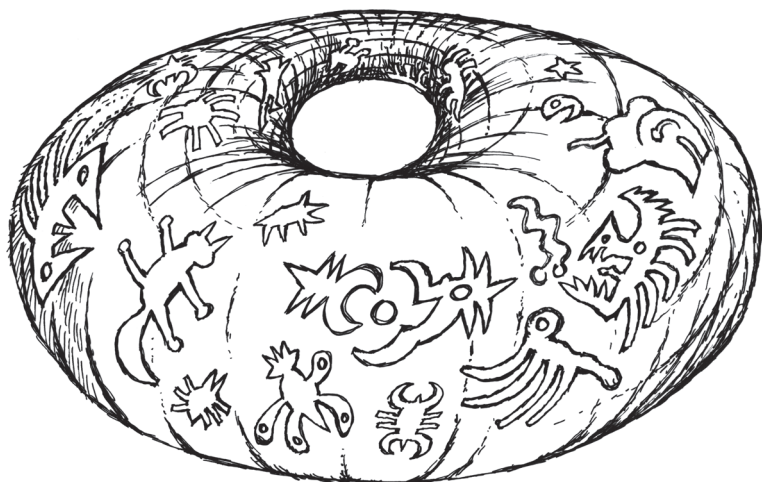
4. Hledáme hranice

*„Pouze dvě věci jsou nekonečné. Vesmír a lidská hloupost.
S tou první si tím však nejsem tak jist.“*

Albert Einstein

Často se hovoří o konečnosti či nekonečnosti bez ohledu na to, co si pod takovým pojmem představujeme. Jednou z možností je posuzovat konečnost či nekonečnost podle nějaké míry – u křivky může jít o délku, u plochy o plošnou výměru a u třírozměrné oblasti o objem. V tomto smyslu hovoříme o konečném vesmíru tehdy, pokud má konečný objem. Vzhledem k tomu, že předpokládáme, že ve vesmíru platí kosmologický princip a všude je nějaká látka, znamenal by vesmír s nekonečným objemem také jeho nekonečnou hmotnost a energii. To sice vypadá na první pohled divně, na druhou stranu u „velkých“ věcí nás vždy zajímají jen intenzivní veličiny, tj. veličiny vztažené na něco – například hustota, která je vztažena na jednotku objemu. U Mrtvého moře nás také nezaujme jeho hmotnost, ale spíše jeho extrémní hustota. A hustota je pro vesmír vždy konečná. Fyzikům vadí spíše lokalizovaná nekonečna (tzv. singularity), která bychom mohli cestou někde potkat a o nichž jsme přesvědčeni, že v přírodě neexistují, nebo jsou alespoň dobře zamaskovaná, že je nevidíme. Nekonečno ve smyslu celku není zase až tak děsivé, protože na něj nemůžeme nikdy narazit. Dodnes nevíme, zda je vesmír v tomto smyslu konečný nebo nekonečný.

Jinou otázkou je, zda ve vesmíru někde narazíme na hranici nebo nějakou bariéru, za níž končí svět. V tomto případě by snad bylo lepší namísto o konečnosti, nebo nekonečnosti hovořit o omezenosti či jednoduše jen o existenci hranice. Z dosavadních zkušeností věříme, že při putování vesmírem nikde na žádnou hranici, za níž by končil svět, nenarazíme. Platí to i pro konečný vesmír, ten by musel být nějakým způsobem zakřivený, aby hranici neobsahoval.



Hezkými příklady jsou nafouklá cyklistická duše nebo poutový balónek. Představme si, že na jejich plochách žijí nějaké dvojrozměrné bytosti, říkáme jim „placatky“. Jejich svět je konečný ve smyslu plošné výměry, a přesto nemá žádnou hranici, na kterou by placatky mohly narazit. Podobně si představujeme i třírozměrný konečný vesmír. Jeho objem je sice konečný, ale nejsou v něm žádné prostorové hranice.

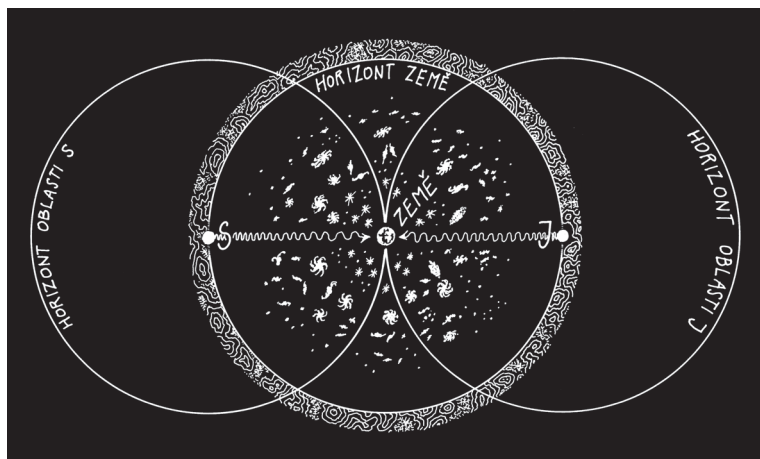
Časová hranice

Jednu hranici ale vesmír dozajista má. Tou je hranice časová. Vesmír existuje jen určitou dobu a světlo mohlo od jeho vzniku doletět jen do konečné vzdálenosti, proto nemůžeme nikdy vidět celý vesmír, ale jen jeho část. Pojďme si to vysvětlit podrobněji.

Už víme, že expanze vesmíru probíhá současně ve všech jeho částech, každý bod můžeme považovat za střed expanze. Kam se podělo reliktní záření, které v naší domovině kdysi na konci Velkého třesku vzniklo? Samozřejmě tu už dávno není, odlétlo pryč všemi směry. V současnosti má za sebou pouť trvající 14 miliard roků – tak dlouho přibližně existuje vesmír. Mohlo by nás napadnout, že je tedy reliktní záření, které vzniklo u nás, ve vzdálenosti 14 miliard světelných

roků. To je ale omyl. Při jeho putování se vesmír nafukoval, proto dolétlo mnohem dále. Různé modely odhadují tuto skutečně proleženou vzdálenost na 40 až 50 miliard světelných roků.

Vezměme to ale naopak. Odkud k nám přiletlo reliktní záření, které pozorujeme my nyní v okolí naší rodné Země? Od období Velkého třesku k nám také putovalo zhruba 14 miliard roků, proto přiletá ze všech směrů ze vzdálenosti 40 až 50 miliard světelných roků. Tam dnes vidíme konec Velkého třesku. Až jednou nebudeme omezeni světelným signálem a budeme pozorovat reliktní neutrina, či reliktní gravitační vlny, dohlédneme jen o něco málo dále, princip ale zůstane stejný. Ve všech směrech uvidíme v jisté vzdálenosti Velký třesk a dál už nic. To je naše časová hranice daná konečnou rychlostí světla. Hovoříme o horizontu pozorovatelného vesmíru. Je tedy snad tam konec vesmíru? Ne, není. Vše totiž vidíme s časovým zpožděním, za které může právě konečná rychlost šíření světla. Tam, kde my dnes vidíme Velký třesk, uplynulo také 14 miliard roků. Vyvinuly se tam hvězdy a galaxie a možná tam také žijí inteligentní bytosti – na jihu jižané, na severu severané, na východě východníci a na západě západáci. Mají tam své planety, a pokud se podívají směrem k nám, neuvidí naši Sluneční soustavu, ale horké plazma Velkého třesku, protože k nim právě dolétly fotony nesoucí informaci o konci Velkého třesku v našich končinách.

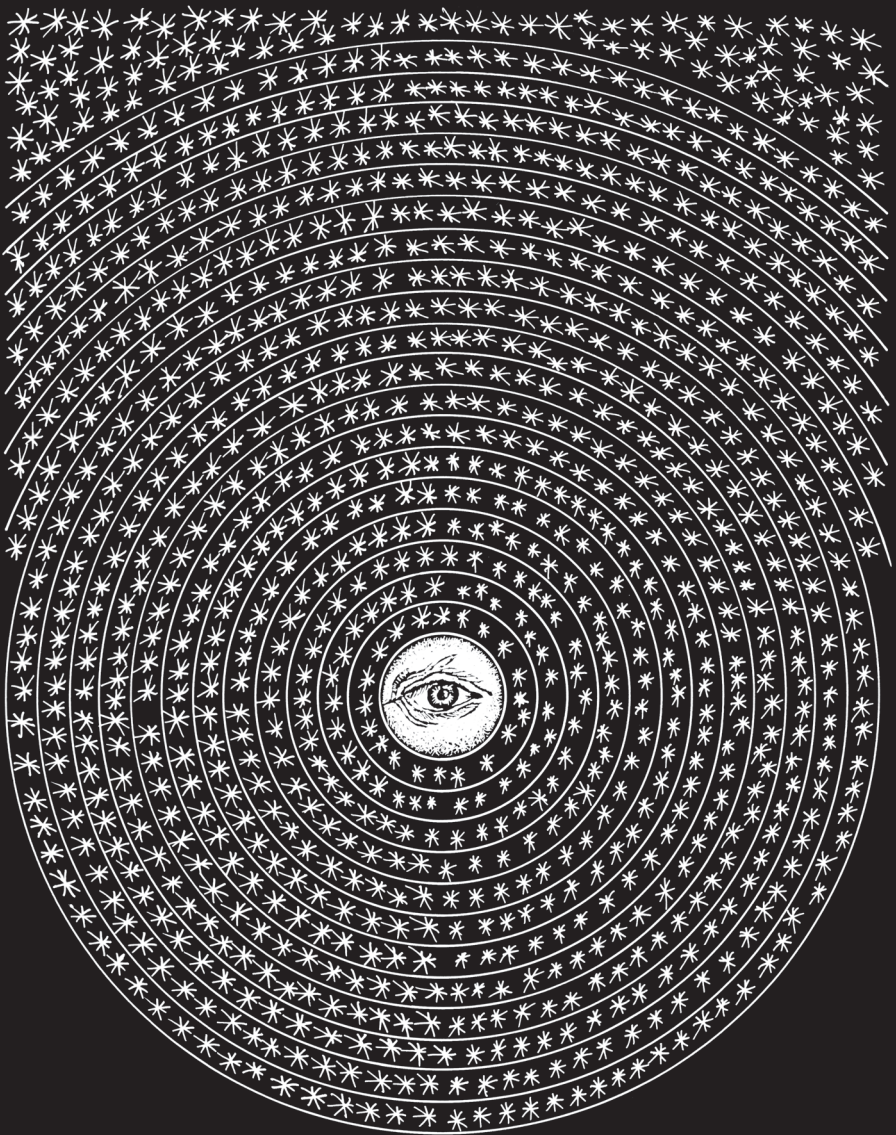


Každý bod ve vesmíru tak má svůj obzor, za který pozorovatelé nevidí, protože světlo ze vzdálenějších oblastí nemělo dostatek času, aby k nim dolétlo. Je to obzor ne nepodobný tomu v krajině. Když pohlédneme při výletě na obzor, ani na chvíli nezaváháme a víme, že za obzorem krajina pokračuje. Ve vesmíru je tomu nejinak. Za obzorem (horizontem pozorovatelného vesmíru) pokračuje vesmír dál a dál. To jen signál z těchto oblastí k nám ještě nepřilétl. Za miliardu roků se náš obzor rozšíří a spatříme ještě vzdálenější světy než dnes. Jak velkou část vesmíru tedy vidíme? Jde jen o zlomek propastných hlubin vesmíru. Pokud je vesmír nekonečný, vidíme jen malou konečnou oblast z nekonečných dálav bezbřehého vesmíru.

Fotometrický paradox

Až do první třetiny dvacátého století si sotva někdo dokázal představit, že se vesmír může vyvíjet. V neomezeném vesmíru dojdeme jednoduchou úvahou k zajímavému sporu s pozorováním. Představme si, že ve vesmíru rovnoměrně vyplněném hvězdami budeme kolem sebe vytvářet slupky určité tloušťky, například deset světelných roků. V blízkých slupkách bude jen málo hvězd, ale vzdálenější slupky budou mít větší plochu a tím větší objem a budou obsahovat více hvězd. Počet hvězd poroste s druhou mocninou vzdálenosti slupky (to je tím, že plocha koule je úměrná druhé mocnině poloměru). Jas hvězd naopak klesá s druhou mocninou vzdálenosti, takže se obě závislosti vyruší a každá slupka bude stejně jasná, neboť vzdálenější slupky obsahují sice více hvězd, ale jejich jas je ve stejném poměru nižší. Jaký je výsledek? Pokud je slupek nekonečně mnoho a každá z nich přispěje stejně, musí být obloha v noci nekonečně jasná!

Ano, jde o zjevný nesmysl a jedna chyba v úvaze je patrná na první pohled. Představme si, že jsme v hlubokém lese. Je-li les dostatečně rozlehlý, uvidíme v každém směru nějaký kmen stromu. Neuvidíme ale všechny kmeny, některé budou v zákrytu. I hvězdy mají konečné rozměry a neuvidíme je všechny, některé budou zakryty jinými. V každém směru bychom tedy měli vidět povrch nějaké hvězdy a obloha v noci by měla být proto jasná přibližně jako povrch Slunce.



Výsledek této úvahy už není tak dramatický: obloha v noci by neměla být nekonečně jasná, ale jen tak jasná, jako je povrch Slunce. Ani s tímto výsledkem nemůžeme být samozřejmě spokojeni, neboť je ve zjevném rozporu se skutečností.

Výše popsaný paradox se nazývá *fotometrický paradox* (někdy také *paradox noční tmy*) a byl pravděpodobně znám už velmi dávno. První dochovaná zmínka o paradoxu pochází od Keplera a je z roku 1610. Kepler hledal řešení paradoxu v konečnosti vesmíru, což není z hlediska dnešních znalostí správné. I v konečném vesmíru (vzpomeňme si na naši cyklistickou duši obydlenu placatkami) by světlo hvězd přicházelo z libovolné vzdálenosti, neboť takový vesmír nemá hranici a světlo hvězdy by naši pneumatiku mohlo oběhnout vícekrát a proletět i vzdálenost mnohem větší, než je rozměr vesmíru. Výsledkem je, že bychom hvězdy viděli i ve velké vzdálenosti.

V osmnáctém století se fotometrickým paradoxem podrobně zabýval švýcarský astronom Jean Phillipe Loys de Cheseaux, který o něm referoval před Francouzskou akademií věd někdy kolem roku 1740. V devatenáctém století fotometrický paradox proslavil německý fyzik a astronom Heinrich Wilhelm Olbers, který o něm často hovořil na přednáškách. Poprvé ho zmínil v roce 1823 a v roce 1826 uvedl jako důvod temné noční oblohy nejen konečnost vesmíru, ale i to, že vesmír nemusí být statický. Olbers fotometrický paradox natolik proslavil, že se mu často říká *Olbersův paradox*.

Fotometrický paradox také nedal spát americkému básníku a prozaikovi Edgaru Allanu Poeovi. Stačí si vzpomenout na jeho nesmrtelná díla *„Jáma a kyvadlo“* nebo *„Havran“*. Edgar Allan Poe došel k závěru, že v noci je tma prostě proto, že světlo hvězd nemělo dost času k nám dolétnout. Toto řešení je velmi jednoduché a z dnešního pohledu pravdě nejbližší.

Pokusů o řešení fotometrického paradoxu byla celá řada a v 19. století byl velmi populárním viníkem noční tmy mezihvězdný prach. Ten by skutečně na první pohled mohl světlo vzdálených hvězd zastínit natolik, že by v noci nastala opravdová tma. Řešení je to sice

elegantní, ale neudržitelné. Pokud by mezihvězdný prach absorboval světlo, nemohla by se energie tohoto pohlceného světla ztratit. Prach by se postupně zahříval, až by dospěl do tzv. *termodynamické rovnováhy*. V ní by začal sám zářit a vydávat přesně tolik energie, kolik pohltil. Paradox bychom tak jen jemně modifikovali a na svitu noční oblohy by se společně podílely hvězdy i mezihvězdný prach.

Fotometrický paradox ve skutečnosti nemá jediné řešení – na tom, že noční obloha je tmavá, se podepisují celkem čtyři fyzikální jevy. Prvním z nich je vývoj hvězd a dalších objektů ve vesmíru. Hvězdy nežijí neomezeně dlouho, rodí se, stárnou a umírají. Předpoklad o jejich neměnném svitu po neomezenou dobu je tedy mylný. Druhým je samotné konečné stáří vesmíru. Vesmír existuje jen 14 miliard roků, naše stále vzdálenější a vzdálenější slupky nelze zkonstruovat – ty, z nichž by k nám světlo letělo déle, než je stáří vesmíru, pro nás prostě neexistují. Třetím fyzikálním jevem je expanze vesmíru. Při ní dochází k červenému kosmologickému posuvu a fotony přicházející ze vzdálenějších hvězd budou mít nižší energii a jejich svit bude posunutý mimo hranice viditelné oblasti, takže je prostě neuvidíme. Posledním a nejdůležitějším důvodem je konečná rychlost šíření světla. Od některých hvězd k nám světlo nemělo čas dolétnout. O jejich vzniku se dozvíme až v budoucnosti. S konečnou rychlostí šíření světla je také spojena existence horizontu pozorovatelného vesmíru, tedy fakt, že z celého vesmíru vidíme jen velmi malou část.

Noční tma je tedy tichým svědectvím o vývoji hvězd, expanzi vesmíru a o konečné rychlosti šíření světelného signálu. Kdykoli pohlédneme v noci na temnou noční oblohu posetou hvězdami, vzpomeňme si, že tento prostý fakt trápil generace fyziků a astronomů a jeho vysvětlení není vůbec jednoduché.

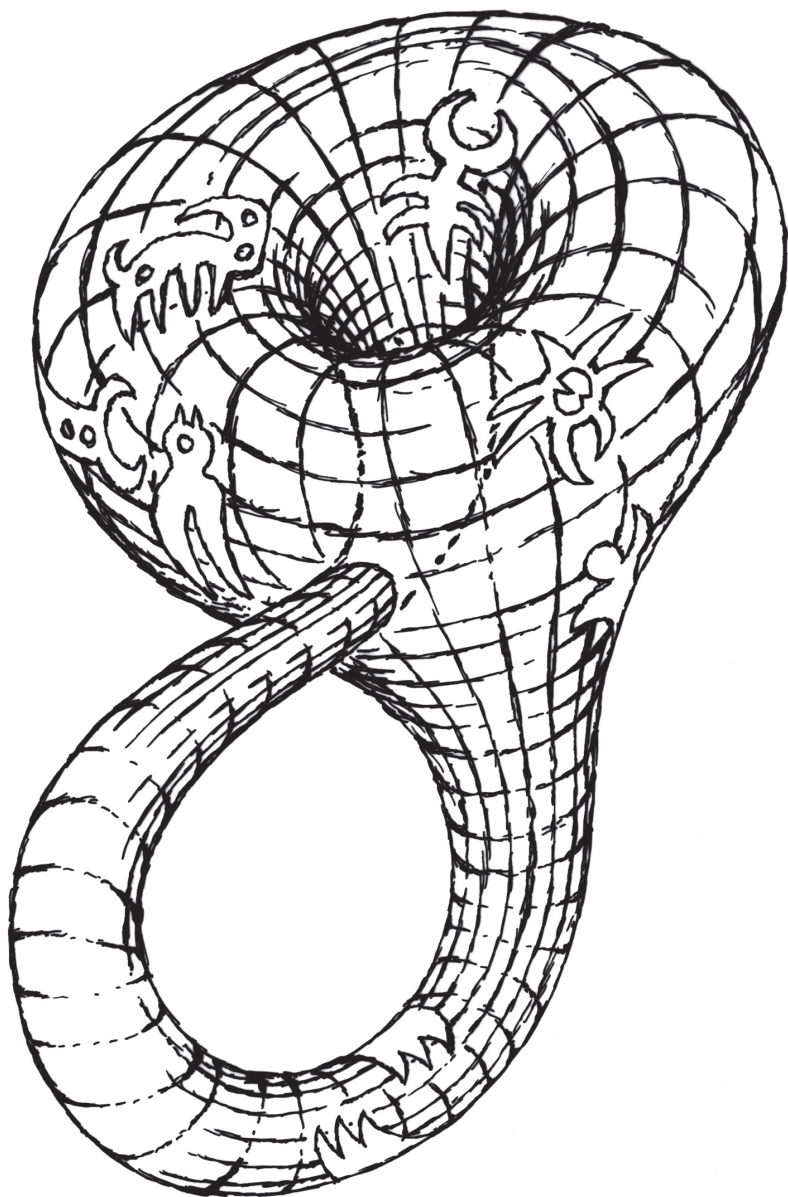
Život v konečném vesmíru

Jak by vypadal konečný vesmír? Těžko si dokážeme představit třírozměrný zakřivený vesmír, který nemá hranice a je přesto konečný. Musíme si opět pomoci dvojrozměrnými analogiemi.

Vezmeme obdélníkový list papíru, na němž žijí naše staré známé placatky. Snadno najdou hranice svého světa (4 strany obdélníka) a mohou ho zmapovat. A nyní přijde z třetí dimenze zlomyslný skřítek, papír jim sroluje a jeho levý a pravý okraj slepí lepidlem. Placatky dál žijí ve svém světě, nijak se nezměnil, jen dvě z jeho čtyř hranic zmizely. V jejich světě dál budou platit zákony eukleidovské geometrie a bude mít stejnou velikost. Ale ten svět bude přesto jiný, dvě hranice přestaly existovat a pro skřítku venku půjde o válec. Matematik by řekl, že svět předtím a poté má stejnou geometrii (rovinnou) ale různou topologii (z obdélníku se stal povrch válce, který má jiné globální vlastnosti než arch papíru). Pokud budou placatky pozorné, objeví i jednu zvláštní vlastnost svého nového domova. Vyšlou-li světelný paprsek ve správném směru, vrátí se po určité době zpátky a bude jejich svět obíhat. Placatky tak mohou v jednom směru spatřit vícenásobné obrazy předmětů.

Našemu skřítkovi se hra s placatkami zalíbila a rozhodl se jim život ještě více zkomplikovat. Jejich obdélník vrátí do původního stavu a opět ho sroluje, ale před splením ho na kratší straně přetočí. Vznikne velmi zvláštní útvar, tzv. *Möbiův pásek*. Je pojmenovaný podle německého matematika a astronoma Augusta Ferdinanda Möbia. Když se placatka vydá podél pásku, dostane se po určité době na druhou stranu! Teprve po dvou obězích se ocitne tam, odkud se vydala. Tento svět má jeden jediný povrch. Zmizely nejen dvě hranice, ale i rub a líc. Papír s jedním jediným povrchem, to opravdu stojí za vyzkoušení!

Představme si nyní, že nejde o papír, ale o deformovatelnou gumovou elastickou plachtu. A náš škodolibý skřítek se pokusí placatkám zamotat hlavu ještě více. Z jejich obdélníkového světa nejprve udělá povrch válce. A nyní vezme horní okraj válce, ohne ho dovnitř a spojí s dolním okrajem válce. Zkrátka jim ze světa udělá pneumatiku neboli toroid. Všechny hranice zmizely. Placatky žijí v konečném světě bez hranic. Tentokrát už ale jejich svět bude opravdu křivý a nebudou platit známé vzorečky z Eukleidovy geometrie. Obyvatelé navíc uvidí ve dvou směrech periodické obrazy. Nikde nenarazí na žádnou hranici, a přesto bude jejich svět



konečný. Navíc bude vypadat tak trošku jako ementál. Bude v něm díra, o které ale placatky nevědí! Pokud by skřítek smazal hranice slepením zbývajícího okraje Möbiova pásku, získal by ještě podivnější útvar – *Kleinovu láhev* (viz předchozí strana).

Jak jsme už viděli, konečný svět rozhodně nemusí znamenat, že bytosti v tomto světě narazí na nějakou hranici. Jejich svět může být bez hranic. V některých směrech ale bytosti zde žijící mohou vidět vícenásobné obrazy. Tedy pokud jejich svět existuje dostatečně dlouho a nerozpíná se příliš rychle – světlo bude mít dostatek času, aby oběhlo vesmír kolem dokola, a to dokonce několikrát.

Existuje několik projektů, které se snaží či snažily detekovat vícenásobné obrazy vzdálených objektů, například kvazarů. Záporný výsledek těchto experimentů rozhodně neznamená důkaz nekonečnosti vesmíru. Především nemusíme být dostatečně připraveni na to, abychom vícenásobné obrazy vůbec rozpoznali. To hlavní ale je, že díky existenci horizontu vidíme jen velmi malou část našeho vesmíru. A tak se zatím musíme spokojit s tím, že netušíme, zda je vesmír konečný či nekonečný.

Proměnlivý horizont

Od roku 1998 víme, že se rozpínání vesmíru v současnosti zrychluje. Co by to znamenalo pro horizont pozorovatelného vesmíru, pokud by expanze nabrala opravdu na obrátkách? Víme, že se objekty od nás vzdalují tím rychleji, čím jsou dále. Může tato rychlost překročit rychlost šíření světla ve vakuu? Od školních let je v nás budována představa, že rychlost světla je nepřekročitelná a nic se nemůže pohybovat rychleji než světlo. Tato představa je zcela mylná a musíme ji uvést na pravou míru a teprve poté se vrátit k našim úvahám o horizontu vesmíru.

Správná formulace by měla znít takto: *Rychlost šíření informací nesmí překročit hodnotu 299 792 458 metrů za sekundu. Touto maximální možnou rychlostí se podle našich znalostí šíří světlo ve vakuu a gravitační vlny.* Uvedme si několik příkladů rychlostí vyšších, než

má světlo. Diamant má index lomu 2,5, což znamená, že se v něm světlo šíří 2,5× pomaleji než ve vakuu, tedy rychlostí přibližně 120 tisíc kilometrů za sekundu. Do diamantu může vlétnout elementární částice, jejíž rychlost je výrazně vyšší než rychlost světla v něm. Konec konců, nemusí jít o diamant, postačí obyčejná voda, v níž se elektrony klidně mohou také pohybovat nadsvětelnou rychlostí. Dalším příkladem je tzv. fázová rychlost, tj. rychlost šíření hřebenu nějaké vlny. Ta může být bez problémů také nadsvětelná, neboť většinou nepřenáší žádnou informaci. Typickým příkladem jsou ionosférické vlny, které mají rychlost šíření fáze nadsvětelnou. (Vzpomeňte si na kola na rybníce, která vzniknou po vhození kamene. Vlny se od místa dopadu kamene pohybují fázovou rychlostí, touto rychlostí se ale nepohybuje voda samotná.) Jiný příklad: pohybujme výkonným laserem tak, že se otočí jednou kolem dokola za jednu sekundu. Pokud zasáhne Měsíc, bude se jeho stopa na měsíčním povrchu pohybovat osminásobkem rychlosti světla ve vakuu. Ničemu to nevádí, prasátko mezi různými místy povrchu Měsíce nepřenáší žádnou informaci.

Vraťme se nyní do expandujícího vesmíru a představte si rychle se nafukující balónek, na němž je nakresleno větší množství bodů, které představují galaxie. Z jednoho z těchto bodů vyběhne placatka sdělit něco důležitého sousedům. Pokud se bude balónek nafukovat dosti rychle, placatka nikdy do sousední galaxie nedojde. A neplatí to jen o placatce samotné, ale i o světle. Při velmi rychlé expanzi nebude mít obyvatel jedné galaxie šanci poslat zprávu do galaxie sousední. Světlo se prostě bude loudat pomaleji, než probíhá nafukování balónku či expanze vesmíru.

U nás taková situace není, vidíme světlo mnoha galaxií a jsme schopni k nim i vyslat naše signály. Pokud se ale expanze bude nadále zrychlovat, může se stát, že se náš obzor začne zmenšovat a při extrémní rychlosti expanze nám najednou zmizí i Galaxie v Andromedě, neboť světlo už nebude mít dostatek času, aby k nám z ní dolétlo. Obzor se zmenší natolik, že nakonec už neuvidíme ani Pluto, pak nám zmizí Neptun a další planety. V okamžiku, kdy k nám nedolétnou už ani paprsky životodárného Slunce, nastane

definitivní konec. Zatím se ale expanze zrychluje jen umírněně, takže nemusíme mít obavy.

Expanze vesmíru je v současnosti podsvětelná, proto vidíme na horizontu pozorovatelného vesmíru Velký třesk. Vzdálenosti na obrázku na protější straně jsou v logaritmické škále.

Víte, že

■ Víte, že se světlo může pohybovat ještě pomaleji než v diamantu? Ve speciálně připravených prostředích se fotony mohou loudat rychlostí srovnatelnou s pohybem chodce. Dánské fyzičce Lene Hauové se dokonce v roce 2000 podařilo světlo pomocí důmyslného systému laserů zastavit a poté znova rozpohybovat.

■ Víte, že nabitá částice pohybující se nadsvětelnou rychlostí (v daném prostředí) za sebou táhne charakteristický kužel Čerenkovova záření? Toto záření se často využívá v detektorech částic s vysokou energií.

■ Víte, že placatky by měly problémy s trávením, pokud by fungovaly jako my lidé? Trávicí ústrojí by totiž jejich tělo rozdělilo na dva oddělené celky, takže by se rozpadly na dvě podbytnosti a byly by svým způsobem přirozeně schizofrenní.

■ Víte, že o fotometrickém paradoxu existuje původní česká literatura? Jedná se o knížku „Proč je v noci tma?“ Petera Zamarovského, která vyšla v roce 2011 v našem nakladatelství.

Poučení na závěr: *Nelámejme hůl nad neschopnými politiky. Jejich obzor je sice často velmi omezený, pokud ale fungují tak jako vesmír, postačí posečkat miliardu let a jejich obzor se přece jen o něco málo rozšíří.*



5. Tam, kde vládne temnota

*„Černá noc vesmíru a ledový oheň magie.
Svět uvnitř světa, sen uvnitř snu, kapka v kapce,
zrcadlo v zrcadle... – tanec ve stínech.“*
Alexej Pechov, ruský spisovatel

Je zvláštní, jak člověk reaguje na různé barvy a zejména na jejich intenzitu. Světle laděné teplé barvy v nás evokují radost, štěstí a světlé zítřky. Naopak tmavé studené barvy vyvolávají pocity deprese a marnosti. Zcela jiné dojmy ale máme u temně modré až černé barvy. Ta v nás vyvolává tajemno, úctu a někdy až strach. Člověk se do jisté míry bojí rád. Dobrovolně chodíme na horory do kina a dokonce se těšíme, jak se budeme krásně bát, ať už jde o skřeky hejkalů v temném lese či jiné sofistikovanější metody, jak postrašit diváka.

Pocity zvědavosti a nevyřčeného tajemství spojené s temnými tóny pravděpodobně mají původ v pohledech na noční oblohu, při nichž většinu lidí napadají vznešené otázky, na něž neznají odpovědi. Snad s tím souvisí i zvyk nosit tmavé obleky na slavnostní příležitosti či jako projev úcty při odchodu blízkých.

V astronomii se to přímo hemží temnotou. Máme zde temnou hmotu, temnou energii, temný věk, temné skvrny, temná vlákna, temné mlhoviny i zoufalé volání po zachování temné oblohy pro příští generace. Temnota v názvu grantového projektu je i skvělou obchodní značkou a nejedna grantová agentura vydává na temnotu nemalé finanční prostředky. V naší knížce nemůžeme temnotu opominout, proto se v této části našeho kosmologického vyprávění zaměříme na dvě temné strany astronomie – temnou hmotu a temnou energii.



Temná hmota – od Zwickyho k Rubinové

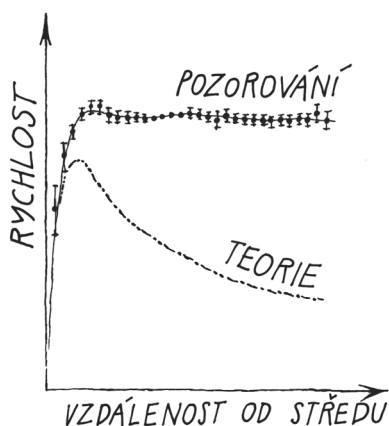
V roce 1924 Edwin Hubble dokázal, že Andromeda není mlhovinou, ale galaxií ležící daleko za hranicemi Mléčné dráhy. V následujících letech bylo objeveno mnoho dalších galaxií a dokonce se ukázalo, že se sdružují ve větší celky, kupy galaxií. V roce 1933 sledoval jednu takovou kupu – kupu galaxií ve Vlasech Bereniky – švýcarsko-americký astronom Fritz Zwicky. Kupa leží ve vzdálenosti přes 300 milionů světelných roků a je v ní přes 1 000 galaxií. Zwicky vyhodnocoval statistickými metodami pohyby jednotlivých členů kupy a zjistil, že pohyby galaxií neodpovídají množství hmoty, které v kupě pozoruje. Proto usoudil, že část hmoty v kupě z nějakých důvodů nevidíme a nazval ji „*Dunkle Materie*“, což je německý výraz pro temnou hmotu. Zwicky si představoval, že jde o běžnou látku, která z nějakých důvodů nesvítí. Dnes se většina astronomů přiklání k tomu, že jde o nové elementární částice neznámé povahy.

Fritz Zwicky byl v pravém slova smyslu nadnárodní osobností. Jeho maminka pocházela z Čech, narodil se v bulharské Varně, vystudoval matematiku a fyziku ve Švýcarsku a aktivní kariéru astronoma strávil ve Spojených státech, kde prováděl pozorování na observatoři Mt. Wilson. Byl to vynikající vědec, který za svůj život pozoroval více supernov než všichni astronomové před ním, podílel se na vývoji tryskových motorů, spolu s Walterem Baadem předpověděl existenci neutronových hvězd a navrhl, že by některé kupy galaxií mohly posloužit jako obří gravitační čočky zesilující obraz vzdálených objektů. Na druhou stranu šlo o velmi kontroverzní postavu, o níž kolují desítky úsměvných historek, z nichž nejznámější jsou ty o bastardech. Tímto nehezským slovem běžně označoval své studenty. Kolegy na Mt. Wilsonu dokonce označoval jako sférické bastardy, protože prý byli stejnými bastardy ze všech stran...

Problém nastíněný Zwickým zůstal nejasnou zajímavostí až do roku 1968. V té době spektroskopicky sledovala spirální galaxie americká astronomka Vera Rubinová a určovala jednak jejich vzdalování od nás a jednak oběžnou dobu molekulárních mračen v různých vzdálenostech od středu galaxií. V obou dvou případech učinila významné

objevy. U vzdalování galaxií našla odchylky od Hubblova-Lemaîtreova-Slipherova zákona, které ji dovedly k objevu nadkup galaxií – největších struktur ve vesmíru, do nichž se sdružují kupy galaxií.

Naměřené rotační křivky ale byly ještě zajímavější. Podle gravitačního zákona by mělo husté jádro galaxie rotovat jako tuhé těleso, tj. s rostoucí vzdáleností od jádra by měla oběžná rychlost narůstat. Naopak na periferii, kde je galaxie řídká, by měla rotační rychlost klesat – podobně je tomu ve Sluneční soustavě: Merkur obíhá Slunce rychleji než Země, která je od Slunce dále.



Rotační křivky naměřené Rubinovou byly ale úplně jiné. V periferní oblasti spirálních galaxií oběžná rychlost neklesala, ale zůstávala až do velké vzdálenosti od centra galaxie v podstatě konstantní. Jak je to možné? Vera Rubinová uvažovala správně. Pokud jsou rychlosti oběhu molekulárních mračen a hvězd vyšší, než vychází z gravitačního zákona, musí na ně působit větší odstředivá síla, než je gravitační přitahování, a objekty z vnějších částí galaxie by měly odletět pryč. To, že se tak neděje, může být způsobeno jen tím, že v galaxiích a kolem nich je velké množství hmoty, kterou nevidíme. Rubinová tak nezávisle a zcela jiným způsobem potvrdila Zwickyho závěr z roku 1933: Existuje látka, která nesvítí, a my ji vidíme jen zprostředkovaně z jejího gravitačního působení. Dnes se pro tuto entitu vžil název *temná hmota*.

Detekce temné hmoty

Temná hmota by podle současných měření měla tvořit 27 procent energie a látky ve vesmíru. Pokud budeme uvažovat jen látku (atomární a temnou), představuje temná hmota dokonce 84 procent veškeré látky ve vesmíru. S největší pravděpodobností jde o nějaké exotické částice, kterým dáváme neméně exotické názvy. Tyto částice interagují s okolím především gravitačně, proto jsme se o nich dozvěděli. Mají vliv na pohyby galaxií v kupách i na pohyby jednotlivých hvězd v galaxiích samotných.

Tyto obtížně polapitelné částice pravděpodobně neinteragují elektromagneticky, jinak by produkovaly elektromagnetické záření a temná hmota by svítila obdobně jako atomární látka. S největší pravděpodobností neinteragují ani silnou interakcí, neboť bychom je v tomto případě dávno zachytili v našich detektorech. Zbývá tedy jediné slabá interakce s dosahem pouhých 10^{-17} metru, což znamená, že k tomu, aby došlo k interakci, je zapotřebí, aby se na tuto vzdálenost částice temné hmoty přiblížila k nějaké jiné částici. Takové události jsou pravděpodobně velmi vzácné, přesto se je snaží detekovat několik desítek zařízení rozestých po celém světě. Žádný z těchto detektorů ale zatím částice temné hmoty nezachytil.

Nejjednodušší je detekce založená na gravitační interakci. Oblasti temné hmoty mění pohyby hvězd i celých galaxií. Zakřivují ale i časoprostor, což se projeví na chodu světla. Světlo procházející kolem jakékoli hmotné oblasti je zakřiveným prostorem ohýbáno podobně, jako při průchodu skleněnou čočkou. Hovoříme o tzv. *gravitačních čočkách*. Světlo vzdálených galaxií (například nějaké kupy) je viditelně gravitačně čočkováno mezilehlou temnou hmotou. Obrazy galaxií jsou charakteristicky deformovány. Jsou protaženy do oblouků různých velikostí a směrů. Počítačová analýza těchto oblouků umožňuje zpětnou rekonstrukci temné hmoty. U nás takové výpočty provádí například David Heyrovský na Matematicko fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Ukázku rekonstrukce rozložení temné hmoty v některých galaxiích naleznete v barevné příloze na obr. 16.

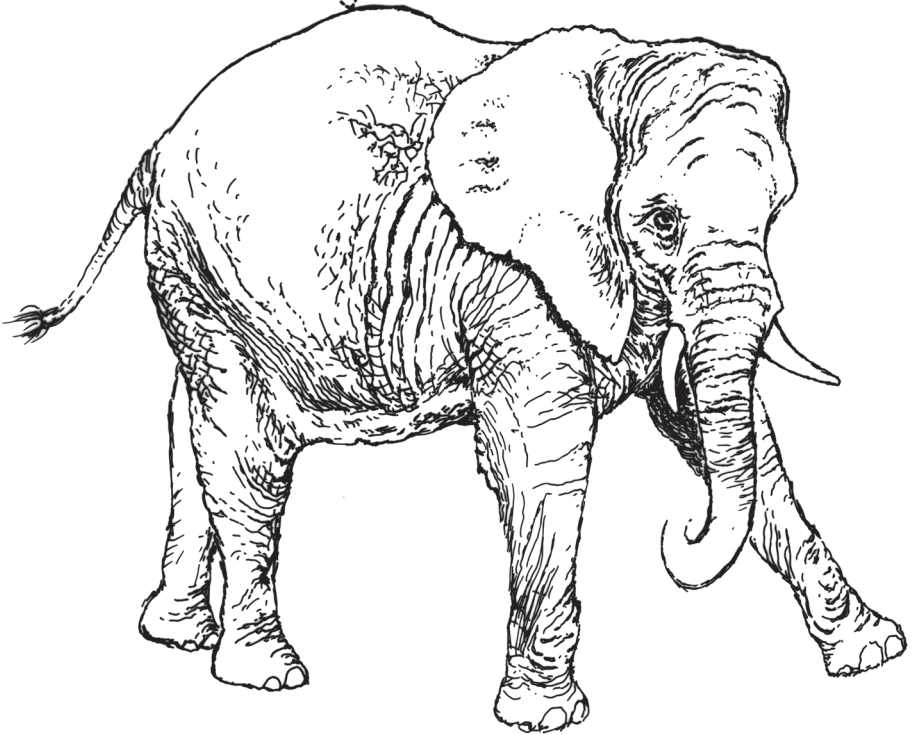
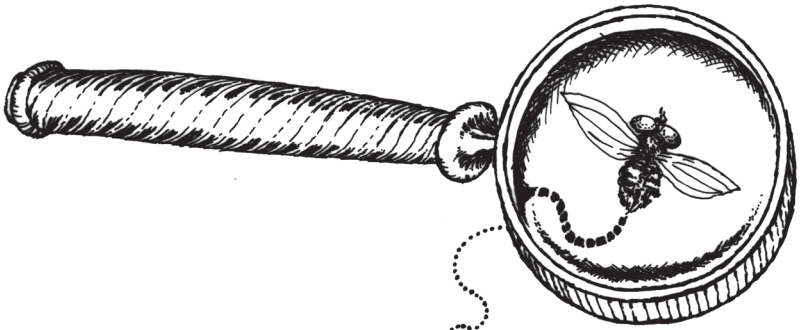
Veškeré negravitační detektory jsou založené na slabé interakci částic temné hmoty s okolní látkou. Existuje celá řada kandidátů na tyto částice. Obecně temnou hmotu dělíme na horkou (HDM, z anglického *Hot Dark Matter*) a chladnou temnou hmotu (CDM, z anglického *Cold Dark Matter*). Projevy těchto typů částic jsou odlišné. Horkou temnou hmotu tvoří částice s malou hmotností a vysokou rychlostí. Za dobu existence vesmíru prolétly podstatnou část pozorovatelného vesmíru. Naopak, částice chladné temné hmoty mají velkou hmotnost a malou rychlost, proto za dobu existence vesmíru prolétly jen malou část pozorovatelného vesmíru. Temná hmota se bude skládat z obou druhů částic. Minoritní by měla být horká temná hmota, protože narušuje počáteční gravitační struktury a rozměňuje je. Naopak chladná temná hmota zesiluje počáteční fluktuace a vytváří z nich větší struktury. A přesně to pozorujeme. Počáteční fluktuace viditelné v reliktním záření se za miliardy let přetvořily v dnes pozorované velkorozměrové struktury. Většinou složkou temné hmoty proto musí být chladná hmota a menšinou horká hmota. K částicím horké temné hmoty patří neutrino – ta ale nejsou tím, co hledáme. Chladnou složku by měly tvořit různé exotické částice – mezi nejnadějnější kandidáty patří tzv. wimpy (zkratka z anglického *Weakly Interacting Massive Particles*, slabě interagující hmotné částice). Wimpy by měly být posledními superpartnery běžných částic (pokud platí princip supersymetrie, viz první kapitola „*Krize síly*“).

Wimpy se hledají v řadě experimentů, které jsou většinou umístěny hluboko pod zemí, v místech, kam běžné částice neproniknou. K nejslavnějším patří experiment DAMA/Libra. Nachází se v největší podzemní laboratoři světa – 1 400 metrů pod horským masivem Gran Sasso ve střední Itálii. Experiment umístěný v této italské národní laboratoři dává jakýsi signál již od roku 1996. Jde o scintilační NaI detektor. V první fázi (1996 až 2002) byl detektor provozován s 87 kilogramy scintilační látky pod názvem DAMA (*DARK MATter*). Při interakci s částicí temné hmoty by ve scintilátoru měl vzniknout slabý záblesk elektromagnetického záření. Ten je následně zesílen fotonásobiči na detekovatelný signál. Od roku 1998 je

v signálu rozpoznávána relativně slabá roční variace. Ta by mohla být způsobena tím, jak Země v průběhu roku letí střídavě ve směru toku wimpů a proti toku wimpů vázaných gravitačně s Galaxií. Od roku 2003 pracuje detektor pod názvem Libra s 233 kg scintilační látky NaI/Th a v získávaném signálu jsou roční variace velmi výrazné. Při naší návštěvě nás napadlo, zda by obdobné variace nemohly souviset s jarním táním sněhu. Vzniklá voda může spláchnout do blízkosti laboratoře i radioaktivní horniny. Obdobný signál ale zaznamenává i detektor CRESST (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers*) – nachází se opět pod horou Gran Sasso, používá ale jiný scintilátor (CaWO_4), a také experiment CoGeNT (*Coherent Germanium Neutrino Technology*) v americkém dole Soudan v Minnesotě, kde je sucho. Původ všech signálů je značně obtížně interpretovatelný a vůbec není jisté, zda měřené signály nějak souvisí s hledanými částicemi temné hmoty.

K nejcitlivějším detektorům současnosti patří XENON, který zaznamenává pod horou Gran Sasso zpětné rázy jader kapalného xenonu, při nichž by mělo docházet k zábleskům, excitaci a ionizaci. Detektor XENON má také nenulový signál, ten je ovšem přičítán zpětným rázům jader xenonu způsobenými srážkou s neutrony v pozadí. V současnosti (2019) probíhá rekonstrukce detektoru, celková hmotnost kapalného xenonu dosáhne osmi tun, detektor bude mít po upgradu název XENONnT a měl by minimalizovat neutronový šum.

Existují i jiní kandidáti na částice temné hmoty, například *axiony*, které by se měly v silném magnetickém poli měnit na fotony nebo *chameleony* – částice, jejichž hmotnost se mění podle hustoty prostředí, kterým právě procházejí. Hledání axionů a chameleonů probíhá ve specializovaných detektorech (například CAST v CERNu), zatím ale nepřineslo žádné ovoce. Zvěřinec částic, které by mohly být částicemi temné hmoty, je ale mnohem bohatší. Někteří autoři uvažují o temných elektronech, temných neutronech, temných fotonech, higgsinech, neutralinech, gravitinech a dalších extravagantních částicích.



Není vyloučeno, že se částice temné hmoty projevují i při srážkách na největším urychlovači světa – Velkém hadronovém kolideru (LHC), který se nachází v evropském středisku jaderného výzkumu CERN v blízkosti Ženevy. Při analýze obrovského množství srážek by mohly pomoci kvantové počítače, které se začínají prosazovat v různých oblastech vědy. Kvantový počítač může simulovat miliardy rozpadových kanálů současně. Objevila se i nová generace čipů CCD, říká se jim „Skipper“ CCD. Megapixlová pole jsou poprvé schopná detekovat jednotlivé elektrony a fotony. Pokud má takový „změřený“ foton společnou vlnovou funkci s jiným fotonem (hovoříme o tzv. kvantové provázanosti), můžeme měřením na Zemi zjistit informace i o velmi vzdáleném fotonu nebo jiné částici. Kvantové zákony nám umožňují provádět zcela nové typy měření, která se v minulosti zdála nedostižným snem.

Nové kvantové detektory vyvíjejí v Lawrenceově národní laboratoři v Berkeley, ve Fermilabu, v CERNu i jinde. Příkladem mohou být krystaly (například galium arzenidu) ponořené do kapalného helia. Takové detektory slouží jednak jako velmi citlivé kalorimetry (měří uvolněnou tepelnou energii), a jednak jsou schopny zaznamenat i interakci relativně lehké částice (lehčí, než se předpokládá u wimpů). U dřívějších detektorů se nějakým způsobem měřil zpětný ráz atomového jádra. Pokud by částice temné hmoty měly malou hmotnost, jádro se ani nehne (představte si mouchu, která narazí do slona). Nové kvantové detektory zaznamenají i onu „mouchu“. Náraz lehké částice způsobí kvantové vibrace; vzniknou kvazičástice, kterým říkáme *rotony* (rotační kvanta) a *fonony* (vibrační kvanta), a ty mohou způsobit únik jednotlivých atomů helia z povrchu detektoru. Vylétávající atomy helia jsou pak už relativně snadno detekovatelné.

Ještě na jeden detektor bychom neměli zapomenout. Není hluboko v podzemí, ale létá nad našimi hlavami. Na konstrukci Mezinárodní kosmické stanice je připevněn od roku 2011. Detektor AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*) byl vyroben v CERNu, je zmenšeninou detektorů na urychlovači LHC. První varianta (AMS) byla úspěšně otestována v roce 1998 na palubě raketoplánu Discovery.

Detektor měl hmotnost tři tuny a objem deset metrů krychlových. Finální verze má hmotnost 6 700 kilogramů a byla připevněna na rameno Mezinárodní kosmické stanice dne 16. května 2011. Detektor dokáže zachytit různé atypické částice přicházející z vesmíru. Na obrázku je v horní části detail umístění jednotlivých přístrojů, v dolní části je poloha detektoru AMS 02 na Mezinárodní kosmické stanici. Základní části detektoru jsou: (1) vrchní křemíková vrstva, která dokáže rekonstruovat dráhu nabitě částice v poli permanentního magnetu; (2) separátor lehkých a těžkých částic, který detekuje rentgenové fotony vyzařované nabitou částicí a z jejich množství určí, zda jde například o pozitron nebo o proton; (3) je počátek sledovače stop, který trasuje pohyb částice a který zjistí první časovou značku. Následují 4 vrstvy měřící čas a polohu průletu (4) a poslední část označená (5) zaznamenaná závěrečný časový okamžik průletu sledovačem stop; následuje Čerenkovův detektor (6) a elektromagnetický kalorimetr (7). V barevné příloze naleznete na obr. 5 fotografii AMS při vybalování z raketoplánu a na obr. 6 je už připevněn k Mezinárodní kosmické stanici.

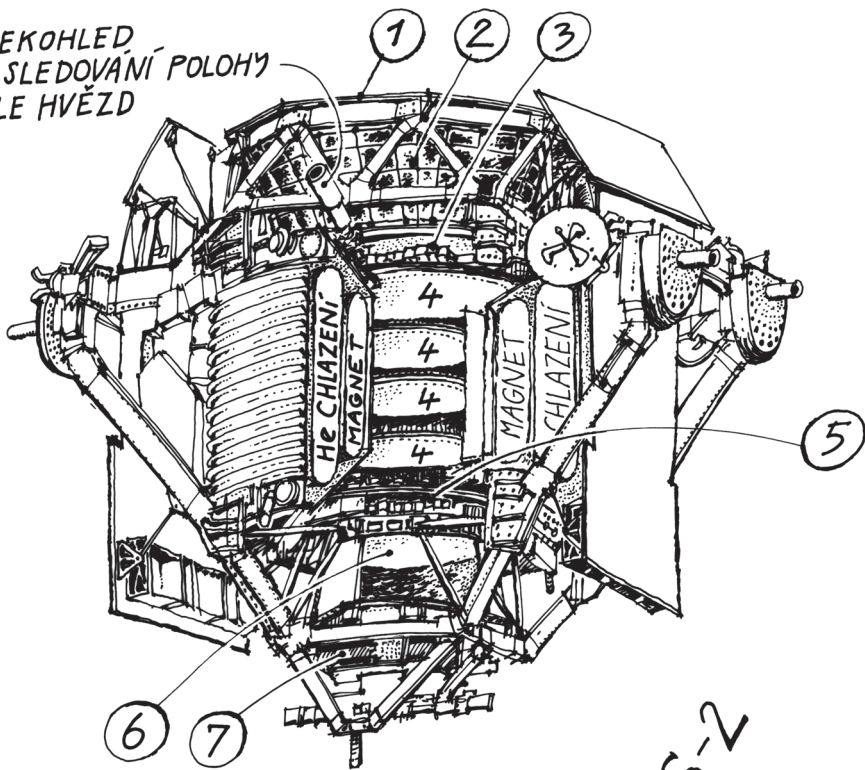
Od roku 2013 měří AMS 02 trvale nadbytek pozitronů (antičástic k elektronům) a potvrdil tak výsledky vesmírného detektoru kosmického záření PAMELA z roku 2008. Uvažuje se o dvou možných příčinách. První z nich jsou procesy v blízkosti neutronových hvězd, kde mohou vznikat páry elektronů a pozitronů. Druhou možností je anihilace wimpů (pravděpodobně jsou samy sobě antičásticí), při níž by mohly jako finální produkty vznikat mj. i pozitrony.

Je jasné, že experimentů, které se podílejí na lovu temné hmoty, je celá řada a pokud částice temné hmoty existují, je jen otázkou času, kdy budou do nastražených pastí polapeny.

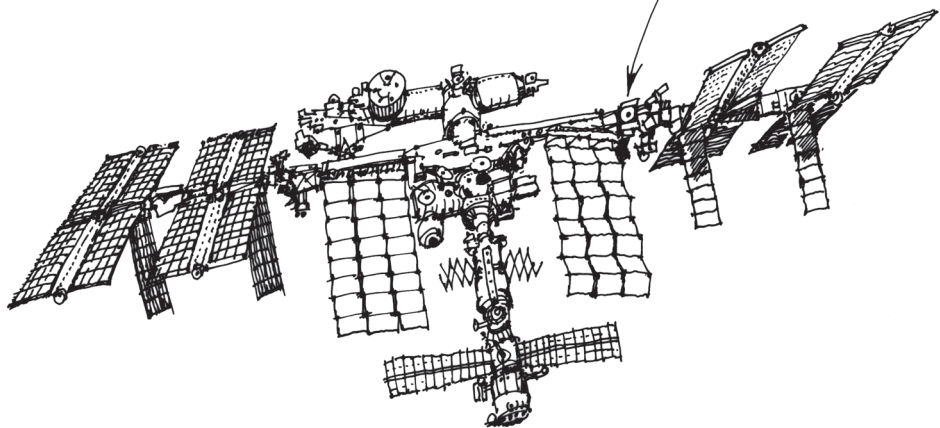
Zrychlená expanze a temná energie

Odhad velikosti základních kosmologických parametrů, jako je například Hubblova konstanta, se vždy potýkal s přesným určením velkých vzdáleností ve vesmíru. Čím vzdálenější jsou objekty, tím nepřesnější byl odhad vzdálenosti. U nejbližších objektů lze využít

DALEKOHLÉD
PRO SLEDOVÁNÍ POLOHY
PODLE HVĚZD



AMS-2



trigonometrie, vzdálenost lze určit například měřením roční *paralaxy* – úhlu, pod kterým vidíme hvězdu z různých míst oběžné dráhy Země kolem Slunce. 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 jasnosti potom určíme, jak daleko se nachází. Metoda cefeid pomáhá u blízkých galaxií, v nichž lze cefeidy ještě rozlišit. V kosmologických vzdálenostech byly do konce dvacátého století prováděny jen hrubé odhady. Chyběla „standardní svíčka“, pomocí které by se daly určit tak velké vzdálenosti ve vesmíru.

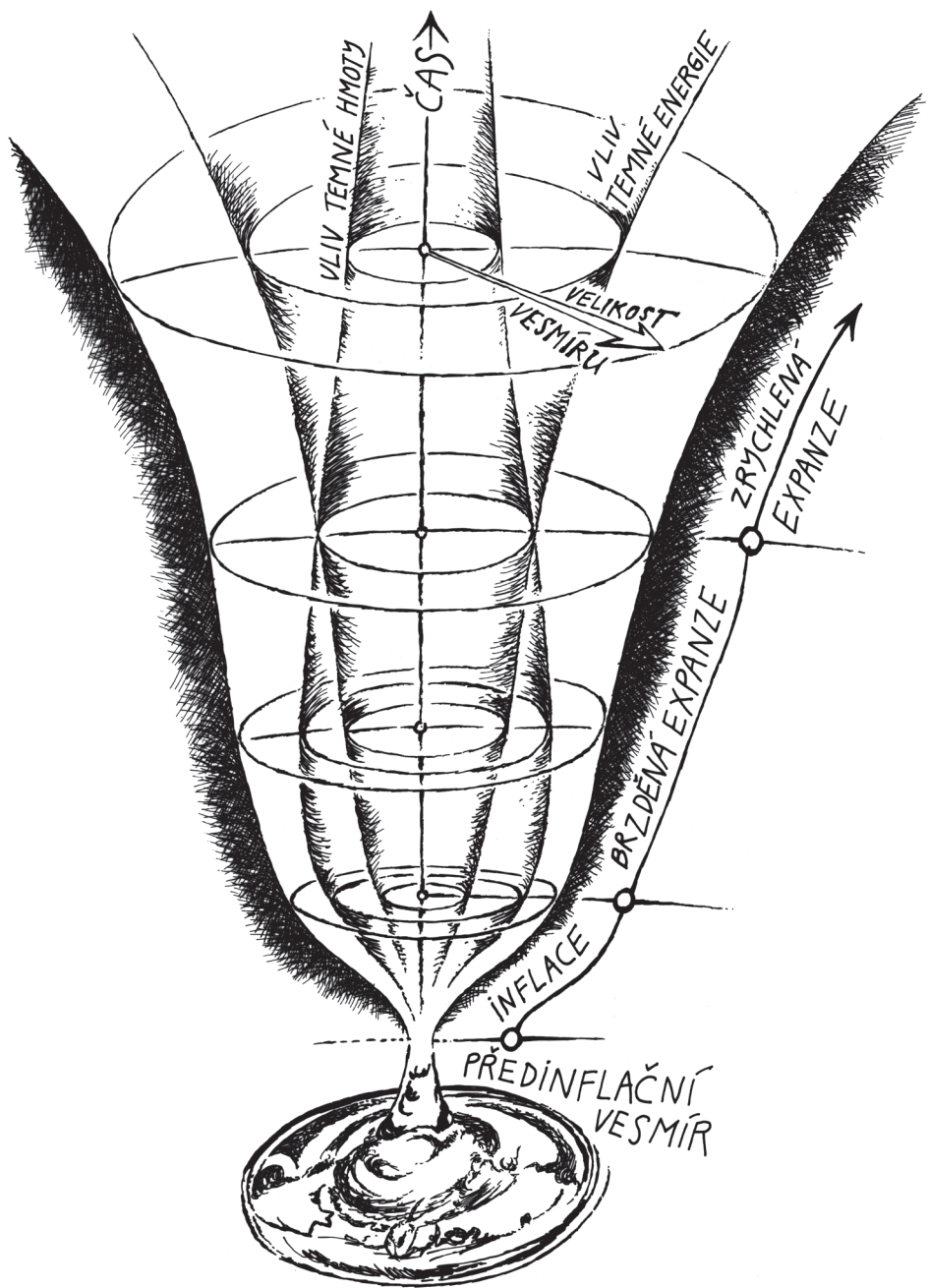
Na konci dvacátého století se k určování vzdálenosti začaly používat jako standardní svíčky zdaleka viditelné *supernovy typu Ia*. Supernova typu Ia je závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy, ve které dochází k přenosu látky z obra (nebo jiné hvězdy) na bílého trpaslíka, který tak zvětšuje svou hmotnost. Bílí trpaslíci jsou stabilní pouze do tzv. Chandrasekharovy meze (1,4 sluneční hmotnosti). Tato mez je pojmenována po indickém astrofyzikovi Subrahmanyanu Chandrasekharovi, který počítal detaily rovnováhy v bílém trpaslíkovi. Po překročení této meze se bílý trpaslík zhroutí, dojde k bouřlivému termonukleárnímu hoření uhlíku, kyslíku a niklu v celém objemu trpaslíka a uvolněná potenciální energie se explozivně projeví jako supernova typu Ia. Uvolněná energie je vždy zhruba stejná, takže z pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy, a s tím i galaxie, v níž explodovala. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze jednoznačně identifikovat podle jejího spektra. Navíc jsou tyto objekty ve vesmíru relativně časté, v průměrné galaxii dojde ke dvěma explozím za století.

V letech 1998 a 1999 prováděly měření vzdálenosti a červeného posuvu galaxií za pomoci supernov Ia dvě nezávislé vědecké skupiny. Jedna byla vedená Saulem Perlmutterem (Lawrencova národní laboratoř v Berkeley) a druhá Adamem Riessellem (Vědecký institut Vesmírného dalekohledu v Baltimore). 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. Snažili se spočítat tzv. *decelerační parametr*, který popisuje, jak je expanze brzděná gravitačním přitahováním. Výsledek byl překvapivý. Decelerační parametr vycházel záporný, což znamenalo, že nedochází k očekávanému zpomalování rozpínání vesmíru, ale k jeho urychlování. Za takové chování nemůže být odpovědná gravitace, která tělesa pouze přitahuje k sobě.

Představme si, že vyhodíme do vzduchu kámen. Jeho let se vždy zpomaluje, nikdy se nestane, že by od nás letěl rychleji a rychleji. Gravitace je přitažlivá a jeho pohyb brzdí. Zrychlování expanze bylo jedním z největších překvapení astrofyziky druhé poloviny dvacátého století. Do roku 1998 si nikdo nedokázal představit, že by byl vesmír na velkých škálách ovládán jinou silou než gravitační. Po Perlmutterových a Riessových pozorováních bylo ale jasno: původce expanze je třeba hledat v nějaké neznámé entitě rozfukující vesmír. Tato entita byla nazvána *temnou energií*. Temná energie se projeví nenulovou hodnotou kosmologické konstanty (viz druhá kapitola „*Expanze a kosmologický princip*“). Na konci 20. století se tedy Einsteinem navržená a později naopak zavržená kosmologická konstanta dostává opět na scénu. Z měření Perlmutterovy i Riessovy skupiny vycházelo, že podíl celkové hmoty-energie vázané na expanzi je kolem 70 % a že zrychlená expanze převládla od zhruba poloviny stáří vesmíru. Nejvzdálenější použitou supernovou byl objekt 1997ff ze souhvězdí Velké medvědice. Světlo této supernovy mělo červený kosmologický posuv 1,7 a putovalo k nám přes deset miliard roků. Supernovu vyfotografoval Hubblův dalekohled už v roce 1995 na slavném snímku s názvem „*Hubbleovo hluboké pole*“. Identifikována byla ale až v roce 1997.

V posledních letech existuje celá řada projektů vyhledávajících supernovy typu Ia. Obě zmíněné skupiny pořídily do roku 2010 soubor více než pětiset supernov. Tyto objekty byly vyhledávány také v klíčovém projektu HST pro určení Hubbleovy konstanty i v současných přehlídkových projektech, například projektu GOODS. Zrychlená expanze vesmíru je natolik zásadní objev, že



byl ověřován i jinými způsoby. Ke stejnému výsledku se došlo také z analýzy fluktuací reliktního záření a do třetice z tvaru velkorozměrových struktur ve vesmíru.

Několik nápadů

Zatímco temná hmota vytváří komplikované struktury – vlákna a stěny, temná energie je jakýmsi spojitým beztvarym fluidem, které se nemění v prostoru a možná ani v čase. Pokud je hustota temné energie v čase konstantní, znamená to dvě věci: 1) temné energii pouze stačilo čekat na svou příležitost, protože hustota látky i záření ve vesmíru s expanzí postupně klesá. Bylo jen otázkou času, kdy začne temná energie dominovat. Podle současných měření k tomu došlo mezi pěti až sedmi miliardami let od vzniku vesmíru. 2) nemění-li se hustota temné energie a objem přitom narůstá díky expanzi, celkové množství temné energie ve vesmíru stále roste.

Z mnoha různých, někdy až exotických vysvětlení, dnes zůstala jen tři: 1) může jít o důsledek působení vakuových polí kvantové povahy; 2) může jít o novou silovou interakci či pole, které se pracovně nazývá *kvinteseence*; 3) obecná relativita nepopisuje správně gravitační interakci na extrémně velkých škálách.

Vakuum je v kvantové teorii netriviální dynamický systém, kvantové zákony neumožňují existenci úplně prázdnoty. Ve vakuu stále vznikají a zanikají fluktuace nejrůznějších polí, díky nimž neustále vznikají a zanikají páry virtuálních částic a antičástic. Tyto páry způsobují známé jevy, jako jsou polarizace vakua, Lambův posuv spektrálních čar, Casimirova vakuová síla a další. Vakuová energie se s expanzí nezmenšuje, zůstává konstantní – je dána hustotou virtuálních párů v objemové jednotce. Přesně tak se chová temná energie. Nenulová hodnota vakuové energie se projevuje jako člen s kosmologickou konstantou v obecné relativitě. V teoretické mechanice lze ukázat, že tlak, který vyvíjí systém na okolí, je úměrný hustotě energie systému. Koeficient úměrnosti se nazývá „parametr w “. Pro atmosféru v tíhovém poli je $w = 1$, pro elektromagnetické záření je $w = 1/3$ (tlak záření je roven třetině hustoty jeho energie, což

umožňuje například fungování slunečních plachetnic), pro vakuové fluktuační vychází $w = -1$, což vede na „podtlak“ a s ním spojenou zrychlenou expanzi vesmíru. Proto je klíčovou úlohou současné experimentální astronomie změřením parametru w pro temnou energii. Z dostupných měření je hodnota přibližně rovna -1 , což by bylo v souladu s vakuovým původem temné energie. Pokud je tomu skutečně tak, kvantové procesy se uplatňují nejen v mikrosvětě, ale v podobě zrychlené expanze i na těch největších škálách ve vesmíru.

Pokud temná energie není vakuové povahy, je její původ zcela nejasný. Mohlo by jít o tzv. *kvintesenci*, skalární pole, které by způsobovalo zrychlenou expanzi a hrálo by roli jakési páte interakce. Pro kvintesenci může být parametr w proměnný v čase a tato forma energie nemusí být ani prostorově homogenní. Experimentální určení hodnoty parametru w pro temnou energii je proto mimořádně důležité.

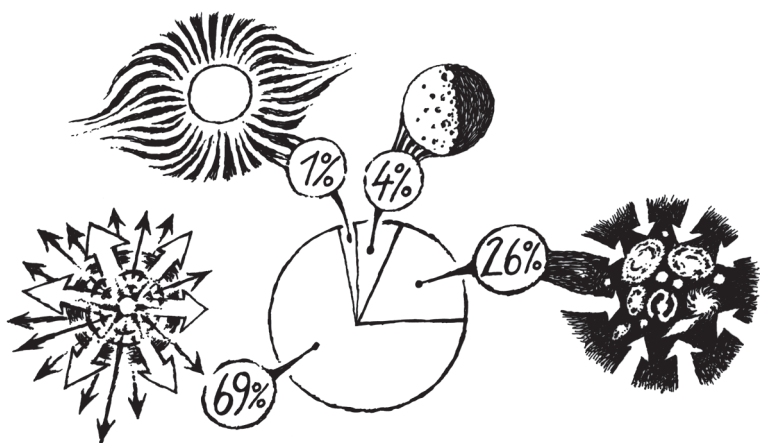
Poslední dnes uvažovanou možností je to, že jsme dosud gravitační interakci zcela neporozuměli a že se na velkých škálách prostě chová jinak, než si myslíme. To by ale znamenalo, že obecná relativita je pouze limitou nějaké jiné teorie gravitace, kterou zatím neznáme. Existuje velmi mnoho pokusů modifikovat gravitační zákon už na newtonovské úrovni. Tyto snahy se souhrnně označují MOND (*Modified Newtonian Dynamics*, modifikovaná Newtonova dynamika) a jejich zastánci se pokoušejí tímto způsobem vysvětlit jak rotační křivky hvězd v galaxiích (temnou hmotu), tak zrychlenou expanzi vesmíru (temnou energii). Výsledky jsou poněkud rozporuplné a modifikovaná Newtonova dynamika má jak své příznivce, tak nesmiřitelné odpůrce.

V závěru první kapitoly už jsme se zmínili o hypotéze holandského teoretika Erika Verlindeho. Ten gravitaci nechápe jako samostatnou interakci, ale jako důsledek projevů kvantových procesů v mikrosvětě. Pohyby těles by měla způsobovat změna entropie (fyzikální veličina popisující jednak neuspořádanost systému a jednak množství informací v něm uložených) a tato změna entropie by se měla projevit jako gravitační síla. Podobnou povahu má například osmotická

síla (prosakování rozpouštědla skrz membránu). Verlinde předpokládá, že entropie má dva zdroje. První z nich je lokalizovaný na plochách (například na „povrchu“ elementárních částic), druhý je objemový a souvisí s kvantovými fluktuacemi vakua. Právě dva zdroje entropie vedou na gravitační působení odlišné od obecné relativity. Podle Verlindeho analýz je plošná entropie zdrojem běžné gravitační síly, která ubývá s druhou mocninou vzdálenosti od objektu. Objemová složka entropie ale přináší jinou závislost připomínající poněkud snahy zastánců modifikovaní gravitace. V každém případě vede objemová složka na zrychlenou expanzi, což je v souladu s představou jejího vakuového původu. Velmi důležitý je fakt, že samotná přítomnost látky snižuje objemovou složku entropie a navíc vede k jejímu přerozdělení. Poměr objemové a plošné složky tedy závisí na průměrné hustotě okolního prostředí. V hustých oblastech, například ve Sluneční soustavě, je tento poměr velmi malý a vede na předpovědi ve shodě s obecnou relativitou. V oblastech s nízkou hustotou látky, například pro galaxii jako celek, už je ale objemovou složku entropie třeba započíst, což vede na ploché rotační křivky, podobné těm, které měříme v periferních oblastech spirálních galaxií a které jsou chápány jako důsledek existence galaktického halo z temné hmoty. Verlindeho pojetí tak považuje temnou energii a temnou hmotu za pouhý rub a líc jediné mince – za projevy objemové složky entropie. Veškeré výpočty jsou bohužel zatím prováděny jen pro sféricky symetrické rozložení hmoty, a tak má tato nezvyklá hypotéza ještě vůči ostatním teoriím co dohánět. Sympatické je, že se v posledních dvou letech objevila řada měření, jejichž autoři se snaží předpovídané odchylky od obecné relativity ověřit experimentálně. Sady dat jsou ale zatím malé, a proto autoři studií nedocházejí k jednoznačným závěrům. Gravitace, která se vynoří v makrosvětě jako posel z mikrosvěta (anglicky *Emergent Gravity*, česky vynořivší se gravitace), je proto fyziky a astronomy zatím chápána spíše jako okrajová záležitost. Jen budoucnost ukáže, zda je gravitace silou srovnatelnou svým charakterem s ostatními třemi interakcemi, nebo pouhou iluzí.

Dnešní fyzika zná dobře projevy temné energie spojené se zrychlenou expanzí vesmíru. Nezná však zatím její podstatu. Z experimentů

se zdá, že vesmír má, jak už jsme zmínili, jen tři hlavní ingredience: temnou energii (69 %), temnou hmotu (26 %) a atomární látku (5 %). Současný kosmologický model je často označován písmeny Λ -CDM. Písmenko Λ znamená kosmologickou konstantu a symbolizuje zrychlenou expanzi vesmíru. Písmena CDM označují chladnou temnou hmotu, která by měla být druhou nejvýznamnější složkou ve vesmíru.



Víte, že

■ Víte, že slovo supernova pochází od Fritze Zwickyho, objevitele temné hmoty? V letech 1937–1941 Zwicky našel 18 supernov v jiných galaxiích. Do té doby bylo známo pouze 12 supernov mimo naši Galaxii.

■ Víte, že první gravitační čočku objevil Dennis Walsh už v roce 1979? Obraz kvazaru ve vzdálenosti 8 miliard světelných roků rozdvojila gravitační čočka tvořená galaxií nacházející se v poloviční vzdálenosti. Objevitelský snímek byl pořízen Arizonským dvoumetrem v souhvězdí Velké medvědice.

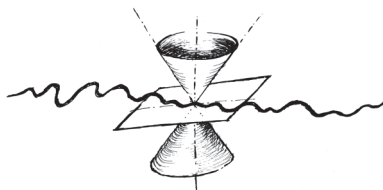
■ Víte, že astrofyzik David Heyrovský, který se na MFF UK zabývá gravitačním čočkováním, je vnukem profesora Jaroslava Heyrovského, který získal Nobelovu cenu za vynález polarografie?

■ Víte, že Národní laboratoř Gran Sasso byla vybudována ve střední Itálii jako odbočka dálničního tunelu, který spojuje města Teramo a L'Aquila? Nachází se 1 400 metrů pod horou Gran Sasso a tvoří ji tři haly, každá o délce 100 metrů a výšce necelých 30 metrů. Je zde umístěno přibližně 20 funkčních experimentů. Celková plocha laboratoř, které byly otevřeny v roce 1987, je 17 300 m². V podzemí jsou detektory neutrin, kosmického záření a temné hmoty.

■ Víte, že by v principu bylo možné detekovat axiony i v tokamacích? Tokamaky jsou sice primárně určené pro uskutečnění termojaderné fúze, v jejich komoře je ale dostatečně silné pole na to, aby axiony změnilo na detekovatelné elektromagnetické záření. Experimenty tohoto druhu se plánují, nebyly ale zatím uskutečněny.

■ Víte, že byl v roce 2012 nalezen most temné hmoty mezi kupami galaxií Abell 222 a Abel 223 v souhvězdí Velryby? Na objevu se podílely japonský dalekohled Subaru (je na Havajských ostrovech na hoře Mauna Kea) a rentgenová vesmírná observatoř XMM Newton.

Poučení na závěr: *Nejsou nakonec některé temné stránky naší společnosti pouhým zrcadlením všudypřítomné temnoty vesmíru?*



6. Za stěnou

„Jdi za svým snem a Vesmír ti otevře dveře tam, kde dřív byly jen zdi.“
Joseph Campbell, americký mytolog

Pohledy do dálky znamenají pohledy do minulosti. Jak daleko ale můžeme do minulosti jít? Díváme-li se do vesmíru dalekohledy, využíváme elektromagnetické záření. Stále dokonalejšími přístroji se naše pohledy přibližují k období vzniku vesmíru. Raný vesmír byl v průběhu Velkého třesku v plazmatickém skupenství. To je ale pro většinu elektromagnetického spektra neprůhledné. Naši zvědavost zastaví až neproniknutelná „Stěna“ konce Velkého třesku, takzvaná *sféra posledního rozptylu*, která pochází z období čtyř set tisíc roků, kdy se ve vesmíru formovaly atomární obaly, a plazma se stalo neutrálním plynem. Neutrálním plynem elektromagnetické záření prochází, zatímco plazmatem nikoli. Můžeme zkoumat vesmír i za touto na první pohled nepřekonatelnou bariérou? Odpověď je kladná. Jednou snad zachytíme reliktní neutrína, posly z období jedné jediné sekundy existence vesmíru. Možná se nám podaří polapit i reliktní gravitační vlny z období úplného počátku vesmíru. Pomocí počítačových simulací můžeme analyzovat fluktuace reliktního záření – malé flíčky na Stěně – a pomocí sofistikovaných modelů se domýšlet, co se odehrávalo za Stěnou. Na největších urychlovačích světa dokážeme uměle připravovat zárodečnou polévku, z níž se rodil vesmír a prohlédnout si, jak se látka za takových extrémních podmínek chovala. Na Velkém hadronovém kolideru v CERNu dokáží připravit obdobu látky, která byla ve vesmíru v čase pouhé desetininy biliontiny sekundy (10^{-13} s). Tady končí hranice našeho poznání. Co bylo dříve, jsou zatím jen nepodložené spekulace, hypotézy a sny o tom, jak by vesmír mohl fungovat podle našich představ. Pojdme se proto nyní seznámit s tím, co víme o vesmíru za Stěnou v časech, kdy dokážeme naše představy alespoň rámcově ověřovat, tj. od 10^{-13} sekundy do 400 tisíc roků, kdy vesmír zprůhledněl a Velký třesk skončil.

Čtyři interakce

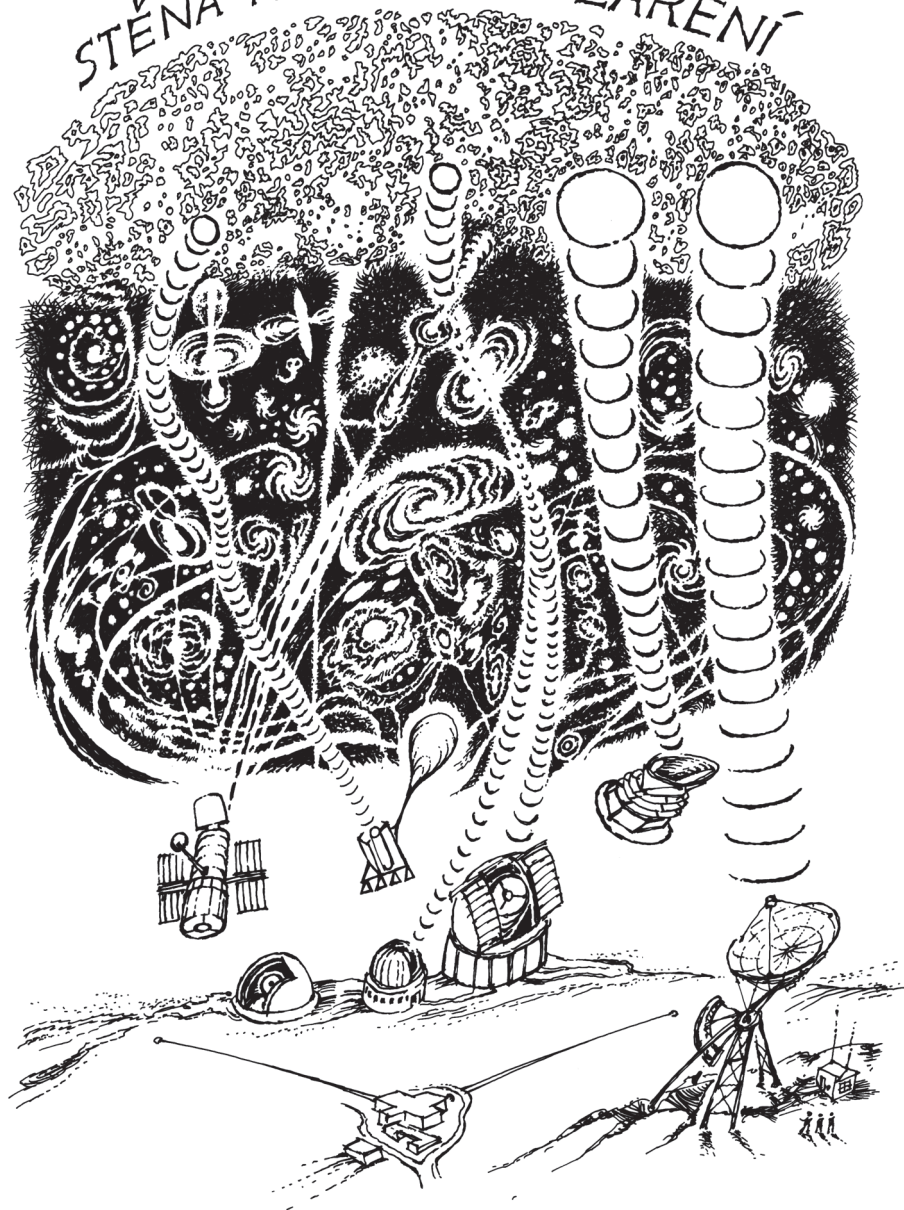
(desetiny nanosekund, 10^{15} K, 100 GeV)

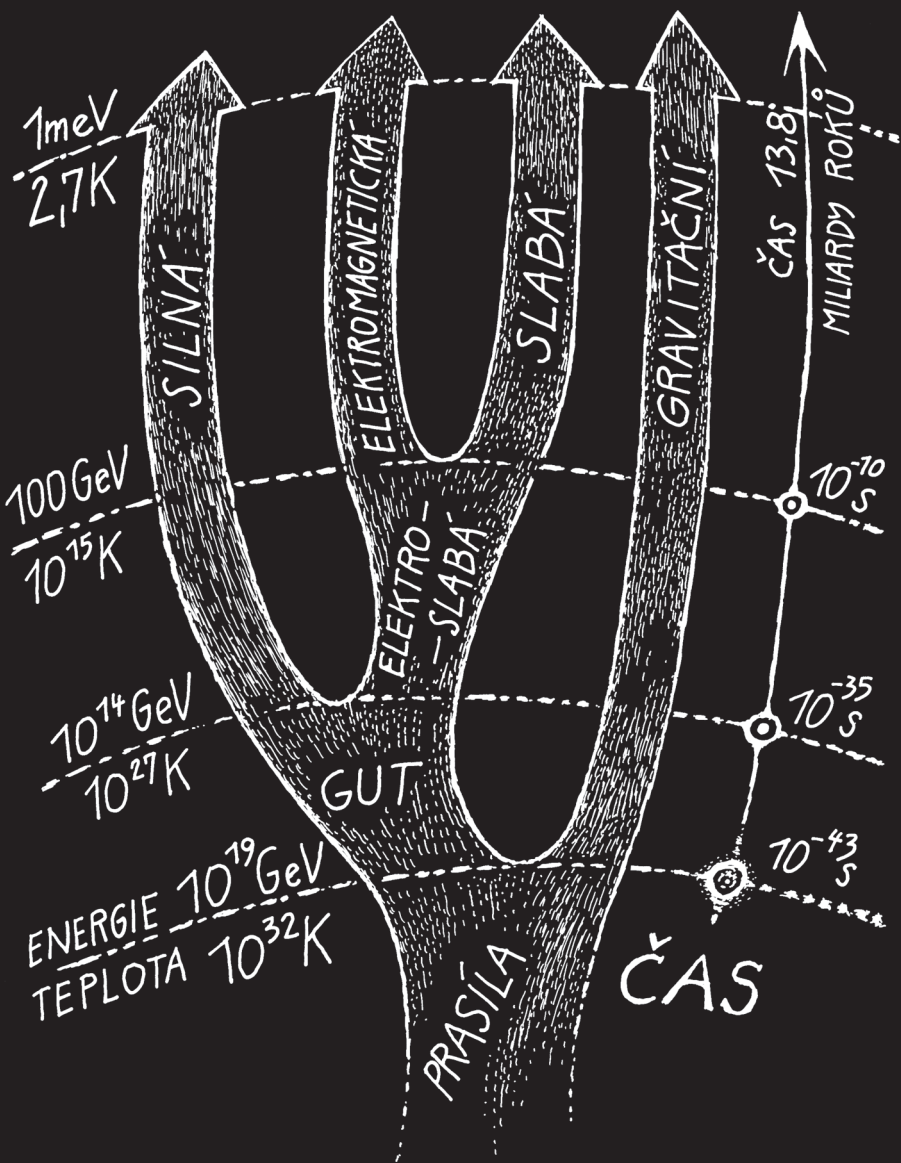
V současnosti pozorujeme ve vesmíru čtyři druhy sil (budeme používat slovo síla, i když víme, že s ním fyzika má jisté problémy): gravitační, elektromagnetickou, silnou a slabou. Každá z nich má v přírodě jiný úkol. Gravitace je síla působící na všechna tělesa, vzájemně je přitahuje i na velké vzdálenosti. Elektromagnetická síla je zodpovědná za soudržnost atomů, molekul i větších celků. Působí na nabitě částice a její dosah je opět velmi veliký. Silná interakce má dosah 10^{-15} metru a drží pohromadě atomové jádro. Slabá interakce má ještě kratší dosah, 10^{-17} metru a je zodpovědná například za beta rozpad částic nebo za fúzi dvou protonů. O jisté schizofrenii současné fyziky, kdy je gravitace popsána pokřiveným světem a ostatní tři interakce polními částicemi, jsme si pověděli hned v první kapitole „*Krise síly*“. Představte si dům z cihel, které jsou pospojovány maltou. Roli cihel hrají v přírodě elementární částice, kterým říkáme leptony a kvarky. Mezi leptony patří elektrony a neutrino, z kvarků jsou tvořeny větší celky, například neutrony a protony. Roli malty hrají další objekty: říkáme jim nosiče sil neboli polní částice a patří mezi ně fotony (elektromagnetická interakce), gluony (silná interakce) a částice W^+ , W^- a Z^0 (slabá interakce), viz kapitola „*Elementární částice*“. Zda podobný koncept funguje i pro gravitaci a existují její polní částice, kterým se říká gravitony, nevíme.

Mnoho fyziků věří, že na počátku byla ve vesmíru jediná *prainterakce*, můžeme jí říkat také *prasíla*. Z ní se při chladnutí vesmíru postupně oddělovaly jednotlivé druhy sil. Taková „oddělování“ mají charakter posloupnosti fázových přechodů – v chladnoucím systému k nim dochází docela běžně – vzpomeňte si například na chladnoucí páru, z níž se stane voda a poté led. Nejprve by se měla oddělit gravitační interakce, poté silná interakce a nakonec by mělo dojít k rozštěpení posledního „slepence“ – tzv. *elektroslabé interakce* – na elektromagnetickou a slabou sílu.

Experimentálně máme zdokumentováno jen poslední štěpení, ostatní patří do říše neověřených představ a snů. Ponechme zatím

STĚNA RELIKTNÍHO ZÁŘENÍ





fantazie o velmi raném vesmíru stranou a začněme naše vyprávění až v čase 10^{-10} sekundy. Teplota je „příjemných“ 10^{15} kelvinů a průměrná energie jedné částice je něco málo přes 100 gigaelektronvoltů (význam těchto jednotek je vysvětlen v závěru knížky v části „*Jednotky*“). Při vyšších energiích se elektromagnetická a slabá interakce chovají jako jedna jediná síla nekonečného dosahu se čtyřmi polními částicemi s nulovou hmotností. Jakmile ale teplota poklesne pod 10^{15} kelvinů, dojde ke změně. Začne působit všudypřítomné Higgsovo pole, tři polní částice přibrzdí, což se projeví tak, jako by měly nenulovou hmotnost. Jednu částici ale toto pole ponechá beze změny. Obě nově zrozené interakce mají zcela odlišné chování. Elektromagnetická interakce má jako polní částice fotony, kterým zůstala nulová klidová hmotnost. Takové polní částice zajišťují nekonečný dosah interakce, která působí jen na nabitě částice. Slabá interakce má tři polní částice, dvě z nich nabitě W^+ , W^- a jednu nenabitou Z^0 . Všechny získaly nenulovou hmotnost (cca 80 až 90 GeV), což způsobuje konečný dosah slabé interakce (10^{-17} metru). Ta působí na leptony i kvarky.

Procesy, které probíhaly ve vesmíru v čase 10^{-10} sekundy, dokážeme částečně zopakovat na největších urychlovačích světa. Změna, k níž došlo ve vesmíru, je výrazná. Z elektroslabé prasičky vznikají dvě nové síly velmi odlišných vlastností. Svět předtím a poté je jiný. Poprvé ve vesmíru působí všechny čtyři interakce, jak je známe dnes. Zjednodušeně bychom mohli říct, že v tomto okamžiku vzniká vesmír, který se podobá tomu našemu, alespoň co se sil týče.

Vznik neutronů a protonů (mikrosekundy, 10^{13} K, 1 GeV)

Dalším zajímavým údobím je čas od jedné do deseti mikrosekund. Teplota vesmíru postupně klesá k hodnotě 10^{13} kelvinů a průměrná energie částic se snižuje až na jeden gigaelektronvolt. Vesmír je zaplněn hustou zárodečnou polévkou, v níž dominují volné kvarky a gluony. V postupně se ochlazujícím vesmíru začíná působit gluonové pojídlo a kvarky se spojují do větších celků, kterým říkáme

hadrony. Tento proces se proto odborně nazývá *hadronizace látky*. K největším skupinám hadronů patří *mezony* složené z kvarku a anti-kvarku a *baryony* složené ze tří kvarků. Právě k baryonům patří *neutrony* a *protony*, které hojně vznikají v tomto období a které se později stanou základními stavebními kameny atomových jader. Někdy se proto látka složená z atomů nazývá *baryonová látka*, protože největší část její hmoty nesou baryony v atomovém jádře. Většina těžkých částic, z nichž jsou složena naše těla, vznikala v období mezi jednou a deseti mikrosekundami.

Na konci 70. let dostali fyzikové zdánlivě bláznivý nápad – připravit uměle pralátku, z níž vznikaly v průběhu Velkého třesku neutrony a protony, zkrátka udělat si takový „*Malý třesk*“ doma v laboratoři. První experimenty tohoto typu se začaly provádět v 80. letech v Lawrenceově národní laboratoři v Berkeley. V letech 1994 až 2000 se příprava kvarkového-gluonového plazmatu přesunula do evropského střediska jaderného výzkumu CERN (*Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire*). CERN je úžasné vědecké městečko v blízkosti švýcarské Ženevy, v němž je celá řada urychlovačů a jiných šikovních zařízení pro výzkum elementárních částic. Na každém kroku je znát vzrušená atmosféra z důležitých vědeckých objevů. V roce 1994 zde ještě nebyl Velký hadronový kolider, v jeho tunelu byl urychlovač elektronů a pozitronů nazývaný LEP (*Large Electron-Positron collider*). V té době tu ale už byl urychlovač SPS (*Super Proton Synchrotron*), v němž se dosud proháněly jen protony.

V nových experimentech se začalo s urychlováním jader atomů olova ^{208}Pb na energii 3,5 TeV. Jádra byla poté nastřelena na statický terčik, taktéž z olova. Po šesti letech usilovné práce se příprava vesmírné pralátky nakonec podařila. Dne 10. února 2000 byl na slavnostním zasedání částicového střediska CERN oznámen objev nové formy hmoty, kvarkového-gluonového plazmatu. Uvolněná energie při srážkách byla natolik obrovská, že ohřála oblast srážky na teplotu stotisíckrát vyšší, než panuje v nitru Slunce, a vzniklé pekelné podmínky postačily k „rozmělnění“ protonů a neutronů na kvarky a gluony. Na kratičký okamžik (10^{-22} sekundy) vznikla kvarková-gluonová koule, z níž se rodily neutrony, protony a další

částice – obdobně, jako tomu bylo ve vesmíru v prvních mikrosekundách jeho života.

Na experimentech se podílelo přes 500 vědců z více než dvaceti zemí světa. O detailech se dočtete v knížce „*Blyškání aneb třináctero příběhů o plazmatu*“ (AGA 2013).

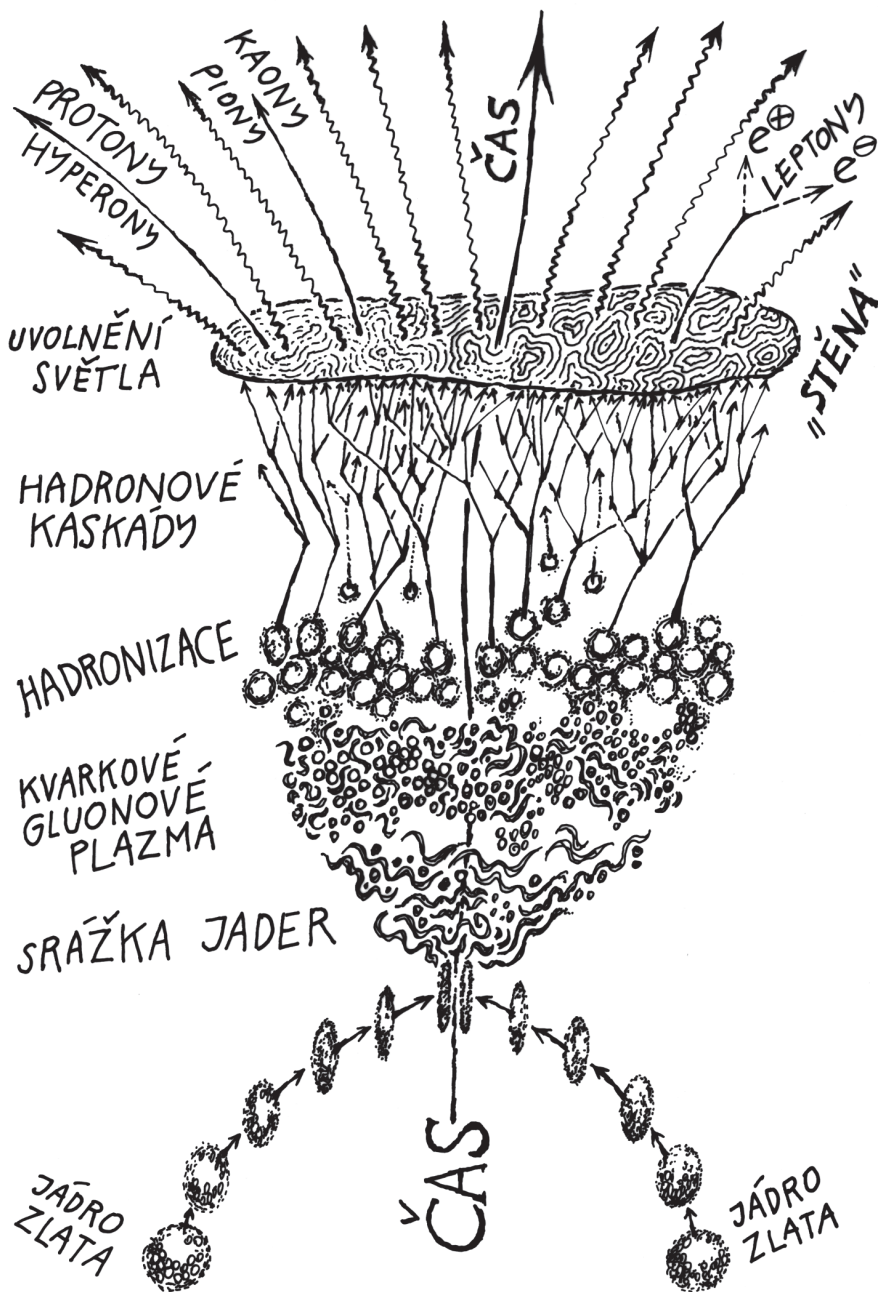
Kolem roku 2000 se v CERNu začal stavět nový urychlovač LHC. Proto se experimenty odstěhovaly opět do USA, tentokrát do Brookhavenské národní laboratoře na Long Island v blízkosti New Yorku, na výkonnější urychlovač RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*). Experimenty s kvarkovým-gluonovým plazmatem se zde dělají dodnes, Američané při nich využívají jádra zlata ^{197}Au (viz obr. na str. 94). Malý třesk se provádí na detektorech STAR a Phoenix (česky Fénix, viz barevná příloha, obr. 2), a to s energiemi desetkrát vyššími, než byly dosažitelné na urychlovači SPS v CERNu. V roce 2008 byla v Evropě dokončena stavba největšího urychlovače světa LHC, a proto se od roku 2010 experimenty vrátily i do Evropy. Konají se na detektoru ALICE (viz barevná příloha, obr. 3), který je jedním ze čtyř detektorů na urychlovači LHC.

Experimenty přezdívané „*Malý třesk*“ ukázaly zcela novou cestu výzkumu vesmíru – přímé experimenty na největších urychlovačích světa. Výroba vesmírné pralátky se stala skutečností.

* * *

Vraťme se nyní zpět do vesmíru, do období mezi jednou a deseti mikrosekundami po vzniku světa. Z kvarkového-gluonového plazmatu se tu houfně rodily nejenom neutrony a protony, ale také anti-neutrony a antiprotony. Už v zárodečné polévce existovala mírná nerovnováha mezi částicemi a antičásticemi – na miliardu částic bylo přibližně o jednu antičástici méně. K tomuto tématu se vrátíme v jedenácté kapitole „*Absolutní horko*“.

Ze zárodečné kvarkové-gluonové polévky vznikalo nepatrně více neutronů než antineutronů a protonů než antiprotonů. Vesmír neustále chladl a velmi brzy poklesla energie částic pod hodnotu



1 GeV. To je prahová energie (rovná přibližně klidové energii protonu), pod níž už je energeticky výhodné, aby protony anihilovaly s antiprotony a neutrony s antineutrony. Většina neutronů a protonů anihilačních zanikla, ale na každou miliardu zůstala jedna částice tak říkajíc na ocet. Některé protony a neutrony nenalezly své antičásticové protějšky a zůstaly ve vesmíru zachovány pro budoucnost. Z nich jsou vytvořeny hvězdy i naše těla.

Reliktní neutrina (sekundy, 10^{10} K, 1 MeV)

Neutrino jsou částice, které v současnosti lehce procházejí veškerou látkou – naším tělem, Zemí, Sluncem i celou Galaxií. Ale ne vždy tomu tak bylo. Za vysokých energií neutrina interagují s látkou velmi intenzivně. Ve vesmíru se neutrina oddělila od látky kolem jedné sekundy (v období zhruba od desetin sekundy do dvou sekund). V kratších časech se neutrina účastnila mnoha srážek, při nichž mimo jiné měnila neutron na proton + elektron, nebo obráceně proton na neutron + pozitron. Tyto reakce udržovaly rovnováhu mezi neutrony a protony, takže jich bylo ve vesmíru v té době stejné množství od každého druhu.

Neutrino, která se oddělila kolem jedné sekundy od ostatní látky, nazýváme *reliktní neutrina*. O 400 tisíc let později se něco podobného stalo fotonům. Reliktní neutrina v sobě nesou cenné informace o vesmíru starém pouhou sekundu, jen je polapit. V době oddělení měla tato neutrina teplotu 10^{10} kelvinů a s expanzí vesmíru postupně chladla. Dnes mají teplotu 1,96 kelvinu, což je méně, než mají reliktní fotony (2,73 kelvinu). Jak je to možné, když se neutrina oddělila dříve, tj. opustila látku, která byla teplejší?

Na vině je překotná anihilace elektronů a pozitronů, která probíhala zhruba v deseti sekundách existence vesmíru. Při anihilaci zbyl opět na miliardu pozitronů a miliardu elektronů jeden elektron, který díky nesymetrii mezi hmotou a antihmotou nenalezl partnera k anihilaci a přežil. Z těchto zbylých elektronů se na konci Velkého třesku vytvořily elektronové obaly prvků. Při anihilaci elektronů

a pozitronů se vesmír opět ohřál (zhruba o 40 %). Tento ohřev se týkal veškeré látky, ale neměl už žádný vliv na reliktní neutrina, která se oddělila od látky dříve. Proto je jejich teplota o něco nižší, než je teplota reliktního záření.

Uvolnění neutrin od látky způsobilo ve vesmíru pohromu. Jak už víme, neutrina udržovala rovnováhu mezi neutrony a protony. Volný neutron je nestabilní částice, která má střední dobu života přibližně 15 minut (poločas rozpadu 10 minut), poté se samovolně rozpadá na proton, elektron a elektronové antineutrino. Jakmile přestala neutrina udržovat rovnováhu, neutrony se začaly rozpadat, jejich počet klesal a počet protonů naopak vzrůstal. Dodnes nepřežil jediný volný neutron. Naštěstí jsou vázané neutrony stabilní, a tak neutron, který si zachytil svůj proton, nebo se integroval do lehkého atomového jádra, přežil. Po první hodině existence vesmíru se stav ustálil na 13 % neutronů vázaných v atomových jádrech a 87 % protonů.

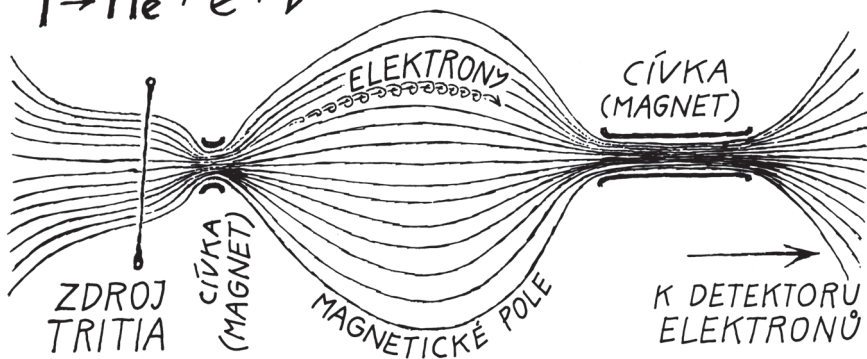
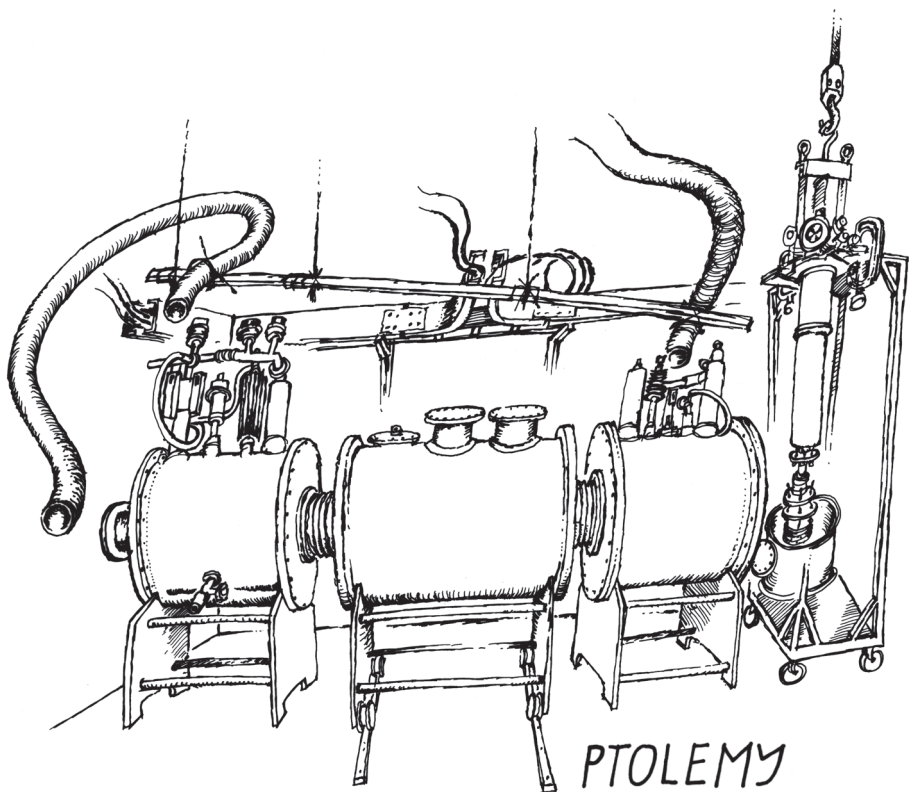
Jak chytit reliktní neutrina? Současné teplotě reliktních neutrin 1,96 kelvinu odpovídá energie 0,16 meV. Ostatní neutrina (sluneční, atmosférická, geoneutrina, neutrina ze supernov, reaktorová neutrina atd.) mají energie o mnoho řádů vyšší. Naše stávající detektory nejsou na tak nízké energie citlivé. V současnosti se testují dvě metody záchytu reliktních neutrin. První z nich je založena na tzv. *Z sprškách*. Reliktní neutrina by mohla podle teorie občas anihilovat se svými vysoce energetickými protějšky z vsudypřítomného kosmického záření (mělo by k tomu dojít jen pro určitou vybranou – rezonanční – energii neutrina z kosmického záření). Při tom by měla vzniknout nestabilní částice Z^0 (polní částice slabé interakce) s energií 91 GeV. Ta se velmi rychle rozpadne na celou spršku fotonů, protonů a antiprotonů. Takové spršky jsou hledány, zatím bezvýsledně, v několika projektech. Jinou metodou detekce je obyčejný beta rozpad tritia (vodík se dvěma neutrony v jádře). Za normálních okolností se tritium rozpadá s poločasem rozpadu 12,32 roku na ^3He , elektron a elektronové antineutrino – v jádře tritia dojde k beta rozpadu neutronu na proton, elektron a antineutrino. Takový rozpad by měl mít ještě jeden kanál, při němž

z jádra nevyletne antineutrino, ale naopak do něho vletne neutrino s nízkou energií. Steven Weinberg navrhl už v roce 1962, že by tak bylo možné detekovat reliktní neutrina. Reliktní neutrino by se integrovalo do jádra tritia a donutilo ho k rozpadu. Tritium se proto může rozpadat dvojím způsobem – samovolně, a vlivem dopadajících neutrin reliktního záření. Oba dva kanály by mělo být možné v experimentech od sebe odlišit. Ve Spojených státech staví v Princetonské univerzitě unikátní podzemní kalorimetr PTOLEMY (*Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield*), který by měl být zprovozněn v roce 2022, a jsou do něho vkládány naděje na zachycení reliktních neutrin. Reliktní neutrino by mělo, jak jsme psali, vyprovokovat beta rozpad tritia a elektrony z tohoto rozpadu budou prolétat důmyslnou konfigurací elektrických a magnetických polí, které propustí jen ty nejenergetičtější. Právě tyto elektrony nesou důležité informace o zachyceném reliktním neutrinu. V Evropě na Karlsruhském institutu technologií už funguje experiment KATRIN (*Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment*) založený na podobném principu, jeho hlavním úkolem je ale zjištění hmotových stavů neutrin, případný záchyt reliktních neutrin zde bude vyhodnocován jen jako jakási „bokovka“. Více o honbě za reliktními neutrinami se dozvíte v knížce *„Astronomie a fyzika – Souvislosti“* (AGA, 2018).

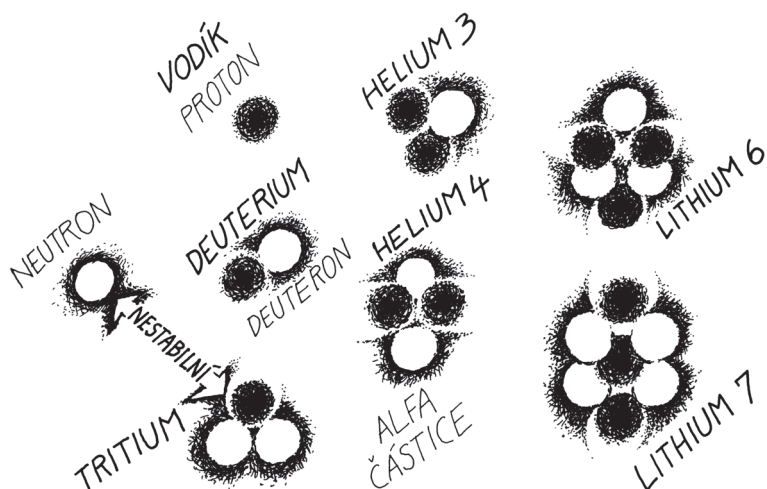
Detekce reliktních neutrin je velkou výzvou, jde o jednu z mála možností, jak relativně přímou metodou nahlédnout za „Stěnu“ posledního rozptylu. Reliktních neutrin není málo. V každém centimetru krychlovém, který odpovídá jedné kostce na hru „Člověče, nezlob se“, jich je 300. Je to nejvíce ze všech druhů neutrin. Doufejme, že se nám podaří je v brzké budoucnosti zachytit.

Vznik lehkých jader (minuty, 10^9 K, 100 keV)

Za Stěnou se odehrála ještě jedna veledůležitá událost – vznik lehkých atomových jader. Podmínky pro slučování protonů a neutronů do větších celků byly příhodné jen ve velmi krátkém časovém údobí – přibližně od jedné do deseti minut. V časech kratších



byly energie částic natolik veliké, že každý větší celek, který vznikl, byl okamžitě rozbit dopadajícími částicemi. A v časech pozdějších ubylo díky expanzi vesmíru vhodných srážek a navíc razantně poklesl počet volných neutronů, protože většina z nich se už rozpadla na protony. Proces tvorby lehkých atomových jader se nazývá *primární nukleogeneze*.



V prvkotvorném období vznikala jen nejjednodušší jádra. Bylo velmi nepravděpodobné, že by se setkala více částic v jedné oblasti a k mnohanásobným srážkám po sobě nebyl dostatek času. Jako první publikoval v roce 1948 model vzniku lehkých jader rusko-americký fyzik George Gamow se svými spolupracovníky Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem. Už jsme se s nimi setkali v kapitole o reliktním záření. V rámci tehdy dostupných znalostí z jaderné fyziky vytvořili sice dosti nepřesný, ale v hrubých obrysech správný model. Dnes máme přesné modely založené na detailní znalosti průběhu srážek jednotlivých elementárních částic. V uvedeném období vznikaly deuterony – vázané stavy protonu a neutronu (jádra deuteria), jádra helia ^3He , mimořádně stabilní jádra helia ^4He (obsahují dva protony a dva neutrony, někdy těmto jádrům říkáme alfa částice), jádra tritia (dva neutrony a jeden proton, jsou nestabilní, proto se později rozpadla) a ze složitějších jader něco málo lithia

${}^6\text{Li}$ a ${}^7\text{Li}$, stopy berylia ${}^7\text{Be}$ a snad i některé izotopy bóru. V každém případě se nukleogeneze zastavila před uhlíkem, jehož jádro je příliš složité na to, aby vzniklo v tomto období. Těžší jádra vznikala až ve hvězdách a ještě těžší při explozích supernov, ale o tom si povíme až v příští kapitole.

* * *

Vznik elektromagnetické a slabé interakce, hadronizace látky (vznik neutronů a protonů), anihilace baryonů s antibaryony, oddělení reliktních neutrin, anihilace elektronů s pozitrony, vznik lehkých atomových jader – to vše jsou procesy, které se odehrávaly v průběhu Velkého třesku za Stěnou tvořenou sférou posledního rozptylu světla na volných elektronech. Velký třesk skončil vytvořením atomárních obalů, což znamenalo zánik volných elektronů i zánik zárodečného plazmatu. Světlo přestalo interagovat s látkou a oddělilo se ve formě reliktního záření. Viděli jsme, že pohledy za Stěnu jsou možné. Doufejme, že v blízké budoucnosti zachytíme reliktní neutrina nebo reliktní gravitační vlny, které pocházejí z ještě dřívějšího období. Na největších urychlovačích světa můžeme připravit pralátku skrytou za Stěnou a experimentovat s ní. Naše urychlovače ale mají omezenou energii, kterou dokáží částicím předat. Stále platí, že největším urychlovačem světa byl Velký třesk. Energie, které měly částice těsně po vzniku vesmíru, jsou v našich laboratořích nedosažitelné. A možná je to tak dobře.

Víte, že

- Víte, že vznik kvarkového-gluonového plazmatu se při srážce dvou jader pozná podle množství vznikajících částic J/ψ ? Tyto částice jsou vázaným stavem kvarku a antikvarku „c“ a při vzniku kvarkového-gluonového plazmatu vylétne z místa srážky nižší počet částic J/ψ než při běžné srážce.
- Víte, že byl urychlovač LHC spuštěn nadvakrát? Krátce po spuštění došlo 19. září 2008 k poruše, při níž exploze kapalného hélia (vlivem nedokonalého odvodu proudu při zániku supravodi-

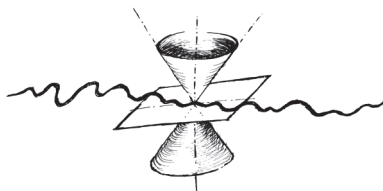
vosti) poškodila přes 50 supravodivých magnetů. Urychlovač byl po havárii opětovně spuštěn 20. listopadu 2009.

■ Víte, že pokud byste na pokožku obkreslili kostku na hru „Člověče, nezlob se“, protéklo by touto ploškou za jedinou sekundu 9 bilionů reliktních neutrin? Na druhém místě jsou sluneční neutrina (vzniklá při fúzních reakcích v jádře Slunce) s 60 miliardami neutrin za sekundu.

■ Víte, že by poměrné zastoupení lehkých jader ve vesmíru bylo jiné, pokud by existovaly čtyři generace elementárních částic? Fyzika mikrosvěta si zde podává ruce s kosmologií. Všechny částice látky jsou ve třech generačních provedeních, například obyčejný elektron, těžký elektron (mion) a supertěžký elektron (tauon). Obdobně je tomu u kvarků.

■ Víte, že v období tvorby lehkých jader bylo elektromagnetické záření husté jako voda? Fotony mají sice nulovou klidovou hmotnost, ale mají nenulovou energii, kterou podle vztahu $E = mc^2$ můžeme převést na hmotnost a hustotu.

Poučení na závěr: *Žádná stěna neodolá zubu času na věky. Ta vesmírná se rozpadla v čase 400 000 roků, ta berlínská vydržela jen 28 roků a padla v listopadu 1989.*



7. Co se skrývá ve hvězdách

„Každá myšlenka je ukradena z prvků vesmíru.“
Stanisław Jerzy Lec, polský spisovatel

Když v období kolem 400 tisíc roků skončil Velký třesk, plazma se přeměnilo na neutrální plyn. V průběhu Velkého třesku se světlo rozptylovalo na volných elektronech a vesmír byl neprůhledný. Jakmile ochladl natolik, že se vytvořily elektronové obaly a volné elektrony vymizely, stal se průhledným (viz třetí kapitola „*Příběh reliktního záření*“). Ve vesmíru se zešerilo a započal temný věk vesmíru. Možná vás napadne, jak je to možné? Kam se všechno to světlo podělo? Samozřejmě, že ve vesmíru existovalo dál a existuje až dodnes – vždyť ho chytáme jako reliktní záření.

Situace se ve vesmíru po Velkém třesku podobala tomu, co zažíváme při návštěvě kina. Projektor – výkonný zdroj světla – posílá na plátno světelné obrazy. Pokud jde o podhradné kino plné špíny a prachu, spatříme na prachových zrnkách kužel světla mezi projektorem a plátnem. Pokud jde ale o kino, ve kterém je udržována čistota – tedy alespoň ve vzduchu – na zemi bude jistojistě vyspaný popcorn a vylitá Cola, a bude zhasnuto, nastane v kině tma jako v pytli. Obraz uvidíme na plátně a světlo jen tehdy, když přímo pohlédneme do projektoru. V takovém kině je nad našimi hlavami současně světlo i tma. V prostoru mezi atomy putuje neviditelné elektromagnetické záření, jehož je světlo součástí, a „vynoří“ se až na plátně, kde právě padouch rdousí nevinnou oběť. I ve vesmíru byly po skončení Velkého třesku nesvítící neutrální atomy a mezi nimi proplouvalo bez větší interakce elektromagnetické záření. Tomuto období říkáme *temný věk vesmíru*. Z měření sondy Planck víme, že temný věk vesmíru započal přibližně v období 400 tisíc

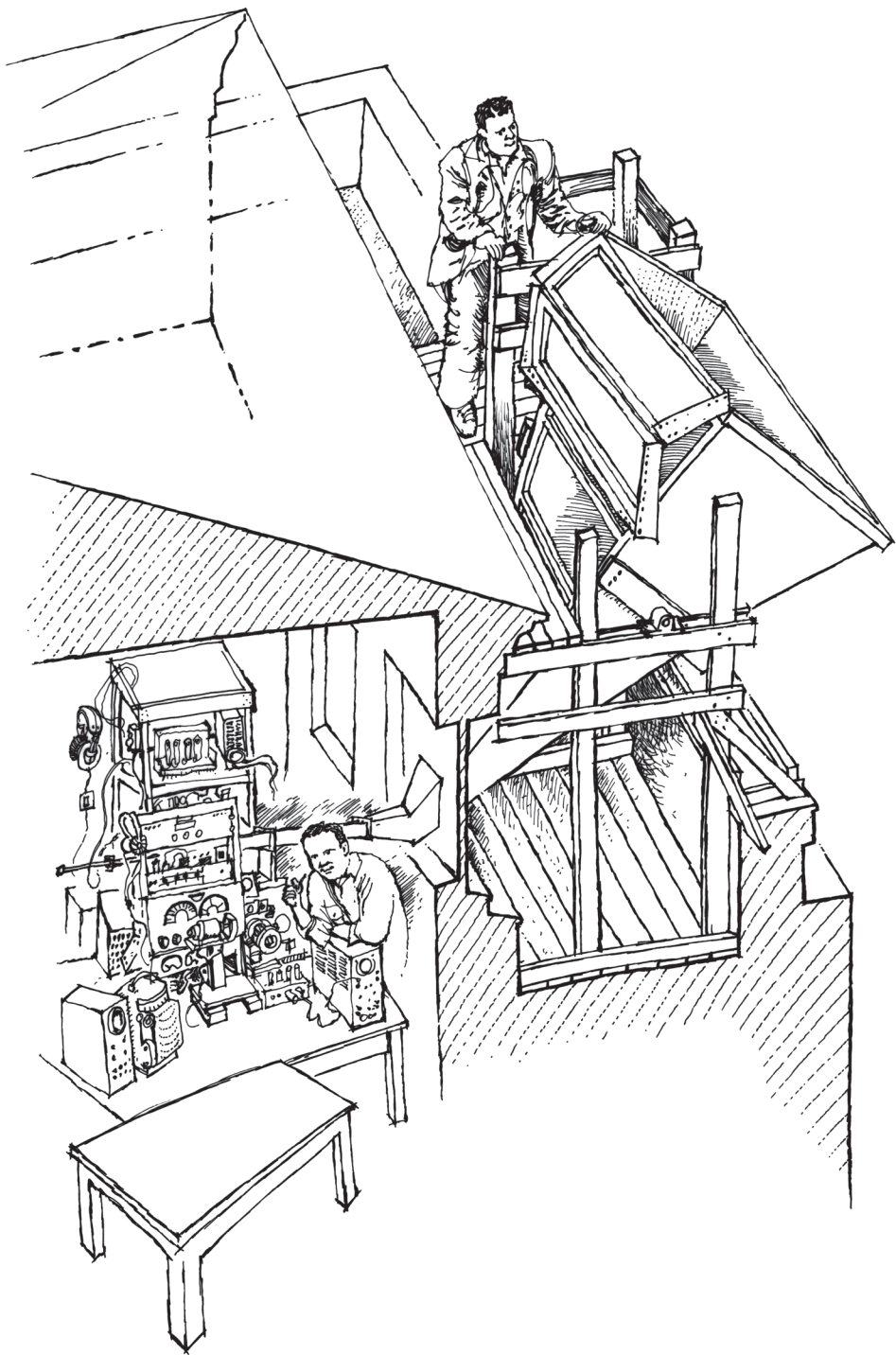
roků (vznik atomárních obalů) a skončil v čase 550 milionů roků, kdy první generace hvězd svým extrémním svitem ionizovala okolní prostředí a ve vesmíru se opět rozsvítilo. Vesmírné prostředí se stalo řídkým plazmatem a temný věk vesmíru skončil.

První hvězdy

Sonda Planck detekovala první hvězdy pomocí polarizace reliktního záření. Polarizací nazýváme rovinu kmitů elektrického pole. Tuto rovinu mohou různé jevy měnit. První generace hvězd vysílala intenzivní ultrafialové záření, které ionizovalo alespoň některé atomy v mezihvězdném prostředí. Tím vznikly ionty a volné elektrony. Reliktní záření, které dosud prolétalo neviditelně prostředím, narazilo najednou tu a tam na volný elektron. Volný elektron dopadlé záření pohltil a znovu vyzářil. Pokud k elektronu přiletí současně z různých směrů elektromagnetické vlny různých frekvencí (postačí vlny přilétající ze dvou oblastí s různou teplotou), rozkmitá se elektron současně na obou frekvencích a záření, které začne vydávat, má charakteristickou polarizaci. Právě z této polarizace reliktního záření datovala sonda Planck existenci prvních hvězd do období 550 milionů roků.

K polarizaci reliktního záření je ale zapotřebí už docela velké množství volných elektronů, což znamená, že první generace hvězd byla v tomto období už hojně zastoupena. Kdy ale vznikaly skutečně první hvězdy, třeba jen v omezeném množství? Dlouhou dobu se vědělo, že by odpověď mohla dát chladná vodíková oblaka. Vodík se skládá z protonu v jádře a elektronu v atomárním obalu. Obě částice mají spin rovný $\frac{1}{2}$ a projekce tohoto spinu může mít buď stejný, nebo opačný směr. Energie obou stavů se nepatrně liší a energetickému rozdílu odpovídá vlnová délka 21 centimetrů.

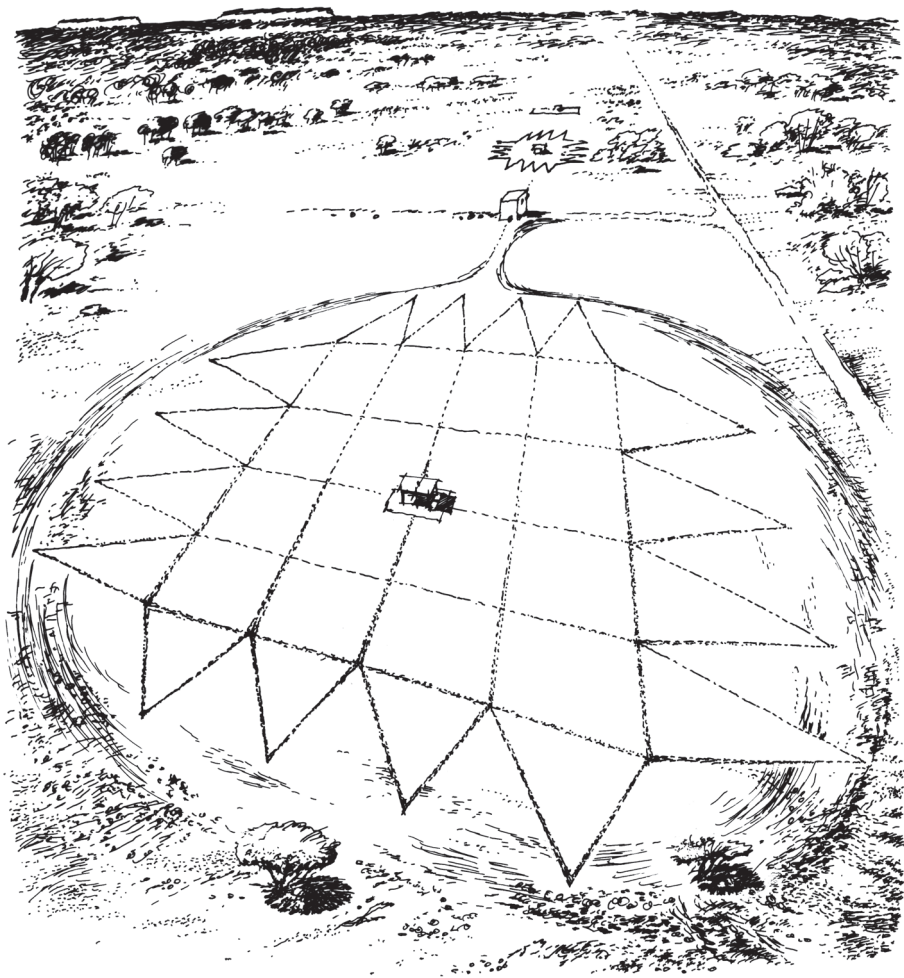
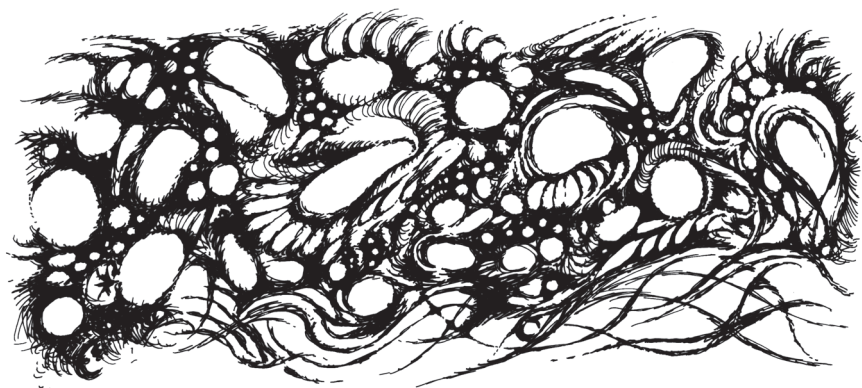
Na myšlenku pátrat po rádiové vlně 21 cm a mapovat s její pomocí vodíková oblaka poprvé připadl holandský astronom Jan Hendrik Oort spolu se svým studentem Hendrikem Christoffelem van de Hulstem již v roce 1945. Jejich článek ale tehdy vyšel v holandštině a nejspíše zapadl. Je to tentýž Oort, jenž předpověděl existenci



kometárního oblaku obklopujícího Sluneční soustavu, který je po něm dnes pojmenovaný. Nakonec se hledanou čáru podařilo zachytit v roce 1951 americkému radioastronomovi Haroldu Irvingu Ewenovi a americkému fyzikovi Edwardu Millsu Purcellovi. Byla to vůbec první spektrální čára detekovaná v rádiovém oboru. Čáru objevili speciální nálevkovitou anténou (na obrázku na str. 105) ze střechy Lymanových laboratoří Harvardovy univerzity a zjistili, že se jedná o záření oblaků neutrálního vodíku v Mléčné dráze.

V kosmologických vzdálenostech by měla být situace odlišná. Svit prvních hvězd, který procházel chladnými vodíkovými oblaky, by v nich měl být absorbován, a to právě na vlnové délce 21 centimetrů. Takové pohlčení znamená excitaci vodíkových atomů v okolí prvních hvězd. Pozorování velmi vzdálených oblaků vodíku by tedy mělo přinést absorpční čáru na vlně 21 centimetrů – nezaměnitelný podpis skutečně prvních vznikajících hvězd. O hledání této spektrální čáry se pokoušely generace astronomů. Veškeré předpovědi ale poukazyvaly na to, že signál bude natolik slabý, že šance ho zachytit jsou minimální. Bylo také jasné, že díky expanzi vesmíru bude hledaný signál posunutý z 21 centimetrů na podstatně delší vlnovou délku, čím delší, čím dříve první hvězdy vznikaly.

K úspěšnému zachycení absorpční čáry 21 cm nakonec opravdu došlo – podařilo se to projektu EDGES. Tým pod vedením Alana Rogerse z Massachusettského institutu technologií (MIT) publikoval převratný objev v časopise *Nature* v březnu 2018. EDGES je zkratka z anglického *Experiment to Detect Global EoR Signature*. Skupina vyvinula specializovanou anténu (viz obrázek vpravo), která poněkud připomíná laboratorní stůl. První verze antény pracovala s frekvencemi 100 až 200 megahertzů, hledání ale nebylo úspěšné. Druhá verze antény umožňovala sledovat i nižší frekvence. Nakonec hledanou čáru našli na frekvenci 78 MHz, což odpovídá vlnové délce téměř 4 metry! Natolik se absorpční čára způsobená prvními hvězdami díky expanzi vesmíru protáhla. Takovému nárůstu vlnové délky odpovídá vznik prvních hvězd datovaný do období 180 milionů roků, tedy velmi záhy po konci Velkého třesku. Obě měření se krásně doplňují: měření polarizace reliktního záření



přináší informace o ionizaci mezihvězdného prostředí velkým množstvím hvězd první generace, zatímco absorpční čára chladného vodíku nese informace o vzniku skutečně prvních hvězd.

Není bez zajímavosti, že Rogersův tým testoval svou anténu na observatoři v Haystacku (v blízkosti MIT). Ostrá měření ale probíhala v západní Austrálii, v australské poušti na půdě Murchisonské radioastronomické observatoře.

První generace hvězd se vůbec nepodobala dnešním hvězdám. Tyto první hvězdy byly velmi hmotné, řádově šlo o stovky Sluncí. V jejich nitrech byl velký tlak a panovala tam vysoká teplota, proto termojaderná syntéza probíhala podstatně rychleji než u dnešních hvězd. Hvězdy první generace žily jen krátce – od deseti do stovek milionů roků a poté explodovaly jako gigantické supernovy. Tyto exploze obohatily okolní prostředí o prvky ve vesmíru dosud nevídané, šlo vesměs o mnohem těžší jádra než ta, která vznikala na počátku vesmíru. Z takto obohaceného materiálu následně vznikaly další generace hvězd.

Hvězdné porodnice

Hvězdy vznikají v zárodečných mlhovinách, zpravidla ve velkém množství, často hovoříme o tzv. *hvězdných porodnicích*. Ne každá mlhovina je ale pro vznik hvězd dostatečně vhodná. Anglický matematik a astronom James Jeans odvodil v roce 1902 kritérium pro vznik hvězd (*Jeansovo kritérium*). Ukázal, že k tomu, aby mohlo dojít ke shlukování plynu, musí být mlhovina na hranici nestability, a ta je dána především rozměry mlhoviny. Hvězdy mohou vznikat jen v obřích mlhovinách, ty menší jsou pro jejich zrod nevhodné. Vznik hvězdy probíhá ve dvou fázích. První stádium nazýváme *globule*. Hustý shluk plynu z mlhoviny se začne hroutit vlastní gravitací. Jednotlivé atomy padají volným pádem do středu globule. Uvnitř globule narůstá tlak a teplota, globule tepelně září. Stádium globule končí v okamžiku, kdy dalšímu pádu zabrání tlak plynu uvnitř globule a vznikne rovnováha mezi gravitační a tlakovou silou.

Vzniklou rovnovážnou konfiguraci nazýváme *protohvězda*. Protohvězda se zmenšuje velmi pomalu, hovoříme o tzv. *gravitační kontrakci*. Uvolněná gravitační energie se přeměňuje na záření. Teplota v nitru protohvězdy nepostačuje k zažehnutí jaderných reakcí, takže ještě nejde o skutečnou hvězdu. K tomu je třeba, aby se protohvězda zmenšila a v jejím středu se zvýšily tlak a teplota. Gravitační energii uvolňovanou při zmenšování zárodku je nutné nějak odvádět. Samotné záření není dosti účinným kanálem odvodu energie. Velmi pomáhají prachová zrnka přítomná v původní mlhovině. Prach absorbuje světlo na libovolné vlnové délce a tepelně ho vyzařuje ve všech směrech na celé škále vlnových délek. Odvod tepla zářícím prachem je velmi účinný a může být pro vznik hvězdy v zárodečné mlhovině klíčový.

Protohvězda se pomalu smršťuje až do okamžiku, kdy v jejím středu stoupnou teplota a tlak natolik, že dojde k zažehnutí termojaderných reakcí. Srážející se protony vytvářejí větší celky a přitom uvolňují energii jaderného původu. Zrodila se hvězda s jaderným zdrojem energie.

Vznik hvězd neprobíhá ve velkých mlhovinách automaticky. Musí zde existovat nějaký počáteční impulz, který tvorbu hvězd v mlhovině odstartuje. Tím impulzem může být exploze blízké supernovy, průchod mlhoviny spirálním ramenem galaxie, magnetické pole, nebo srážka dvou galaxií. Hvězdy se málokdy rodí o samotě, většinou vznikají celé mnohačetné skupiny neboli hvězdokupy (viz barevná příloha, obr. 10).

Srážky galaxií jsou nejúčinnějším mechanismem vzniku hvězdných porodnic. Nepředstavujme si ale takovou srážku jako střet dvou automobilů, při kterém létají do okolí plechy, utržené končetiny a hlavy. Vzdálenosti mezi hvězdami jsou obrovské a přímý střet dvou hvězd je natolik nepravděpodobný, že je téměř nemožný. Dvě srážející se galaxie se ve skutečnosti prolínají. Gravitačně za sebe tahají, přicházejí o svá krásná spirální ramena a často splynou do jediné velké eliptické galaxie. Eliptické galaxie jsou tedy až dalším vývojovým stádiem a zpravidla za sebou mají několik kolizí, při nichž



Hvězdný pulec. Zárodek, v němž vzniklo několik hvězd. Útvar se nachází v souhvězdí Labutě ve vzdálenosti 7500 světelných roků. Fotografie byla pořízena Hubbleovým dalekohledem. NASA/JPL-Caltech/ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA), IPHAS.

se sloučily s jinými galaxiemi. Naši Galaxii čeká podobný osud. Přibližně za 4 miliardy roků se prolíneme a začneme spojovat do jednoho celku s Velkou galaxií v Andromedě (viz barevná příloha, obr. 12). Při prolínání galaxií se sice nesrážejí hvězdy, ale oblaka plynu a prachu ano. Právě srážka mezihvězdné látky je oním impulzem, který vede k překotné tvorbě hvězd v obou galaxiích.

Zajímavým útvarem je Stefanův kvintet. Jde o pěti galaxií, z nich jedna se náhodně promítá do stejného místa na obloze, ale čtyři zbývající spolu gravitačně souvisí a vzájemně se ovlivňují slapovými silami (viz barevná příloha, obr. 13). Nacházejí se ve vzdálenosti 300 milionů světelných roků v souhvězdí Pegase. V budoucnu pravděpodobně dojde k jejich sloučení do jediné galaxie.

Dříve, když byly vzdálenosti ve vesmíru menší a galaxie k sobě byly blíže, docházelo ke srážkám galaxií velmi často. Některé srážející se galaxie naleznete v barevné příloze na obr. 14.

K zažehnutí termojaderných reakcí musí být uvnitř protohvězdy dostatečný tlak a teplota. Minimální hmotnost protohvězdy, v níž k tomu může dojít, se odhaduje na osmdesátinásobek hmotnosti Jupiteru. Menší protohvězdy se nikdy skutečnou hvězdou nestanou, skončí jako *hnědí trpaslíci*, v jejichž nitrech nemohou vzniknout podmínky, které by umožnily jaderné slučování. Hnědý trpaslík získává energii z velmi pomalé gravitační kontrakce a není tedy skutečnou hvězdou.

Na obloze najdeme velké množství rozmanitých hvězdných porodnic z naší Galaxie. K nejkrásnějším patří Velká mlhovina v Orionu, kterou můžeme spatřit i v malém triedru a za dobrých pozorovacích podmínek dokonce pouhým okem. Hubblův dalekohled našel v této mlhovině veškerá vývojová stádia: globule, protohvězdy i nově zrozené hvězdy. Většina zárodků je zahalena do kokonu z plynu a jak se rodící se hvězda pohybuje, vzniká ve směru pohybu čelní rázová vlna ne nepodobná přířivé vlně před lodí brázdící klidné jezero. Kolem některých protohvězd jsou tlusté prachové disky, z nichž se rodí budoucí planetární systémy (hovoříme o tzv. *protoplanetárních discích*).

V roce 1995 vyfotografoval Hubblův dalekohled Orlí mlhovinu M16 spolu s mladou hvězdokupou v souhvězdí Hada. Jde o velmi krásnou hvězdnou porodnici, v níž nově vzniklé hvězdy odfoukly svým ultrafialovým zářením z mlhoviny těžší částičky prachu. Zbylý materiál vytvořil přízračné sloupy, z nichž doslova odkapávají nově se rodící hvězdy. Pro toto výrazné uskupení se ujal název „Sloupy stvoření“ a obrázek se stal ozdobou obálek časopisů i knih (viz barevná příloha, obr. 7). Podobných mlhovin, kde odfoukaný materiál vytvořil divotvorné sloupy, je více. Jmenujme například molekulární mračno Rozetu ze souhvězdí Jednorozce vyfotografované v roce 2010 evropským infračerveným dalekohledem Herschel (dalekohled o průměru zrcadla 3,5 metru umístěný ve vesmíru). Třetím příkladem je Mystická hora, mlhovina v souhvězdí Lodního kýlu, kterou Hubblův dalekohled vyfotografoval v témže roce. Všechny tři snímky se sloupy – Orlí mlhovinu, Rozetu a Mystickou horu naleznete v barevné příloze, obr. 7, 8, 9.

Termojaderný kotel

Hlavním zdrojem energie hvězd je termojaderná syntéza probíhající v jejich nitrech. Vodík se zde postupně slučuje na těžší a těžší prvky. Nejlépe energeticky vázaná jsou jádra železa, pro vznik těžších jader by energie musela být naopak dodávána. Proto v nitrech hvězd vznikají prvky až po železo.

V první fázi života hvězdy se slučuje pouze vodík na helium. Izotop helia se dvěma neutrony a dvěma protony v jádře je mimořádně stabilní a jeho jádro lze považovat za samostatnou částici. Historicky se jí říká alfa částice, protože se objevuje při radioaktivním rozpadu alfa. Alfa částice vznikaly ve vesmíru už i v období primordiální nukleosyntézy, tj. v prvních několika minutách existence vesmíru (viz šestá kapitola „*Za stěnou*“). Větší množství se ale vytvořilo až při jaderných reakcích ve hvězdách. Hvězdy slučující vodík na helium se nazývají *hvězdy hlavní posloupnosti* a patří k nim i naše Slunce. Slučování může probíhat mnoha různými reakcemi, jejichž četnost závisí zejména na teplotě v nitru hvězdy. Ve výsledku se vždy sloučí čtyři protony na jádro helia, dva pozitrony, dvě neutrina a energii, která umožňuje hvězdě dlouhodobě svítit a energeticky ovládnout své nejbližší okolí.

Poté, co se v nitru hvězdy spotřebuje vodík, vznikne v jejím středu tzv. heliové jádro. Vodíkové reakce se přesunou do jeho okolí, kde je vodíku ještě dostatek. Samotné jádro se smrští, což vede k zvýšení tlaku a teploty a k zažehnutí dalších termojaderných reakcí, při nichž se „palivem“ stává helium. Vodíkové reakce v okolí jádra mají za následek výrazné zvětšení rozměrů hvězdy, která se v této fázi stává obrem nebo dokonce veleobrem. Postupně dochází k rozvrstvení struktury hvězdného nitra a v různých vzdálenostech od jejího středu probíhají v oblasti jádra různé reakce.

K pochopení procesů probíhajících v nitrech hvězd vedla dlouhá cesta. Astronomové se nejprve domnívali, že zdrojem energie hvězd je pouze gravitační kontrakce. Záhy se ale ukázalo, že gravitační kontrakce samotná nestačí. U našeho Slunce by pokryla jeho výkon

jen po dobu necelého milionu roků. Slunce tu už ale je prokazatelně 5 miliard let. Jaderné reakce, jakožto hlavní zdroj energie hvězd prosazoval například německo-americký teoretik Hans Bethe (už jsme se s ním setkali, byl jedním z trojice podepsané pod slavným „Alfa-beta-gama“ článkem George Gamowa). V roce 1939 ukázal, že by termojaderná syntéza měla být zcela dominantním zdrojem energie všech hvězd.

K pochopení jaderných reakcí přispěl i další muž, se kterým jsme se už setkali. Není to nikdo jiný než anglický astronom Fred Hoyle, který použil jako první sousloví „Big Bang“ pro hanlivé označení teorie horkého původu světa. Hoyle ukázal, že ve hvězdách s velkou centrální teplotou je možné spojování alfa částic do větších celků. Dvě alfa částice vytvoří jádro bóru ${}^8\text{B}$ se čtyřmi protony a čtyřmi neutrony. Do tohoto jádra bóru se může integrovat další alfa částice (tzv. 3 alfa proces) a vznikne jádro uhlíku ${}^{12}\text{C}$. Proto je uhlík po vodíku a heliu třetím nejzastoupenějším prvkem ve vesmíru. Čtyři spojené alfa částice tvoří jádro kyslíku, dalšího prvku v pořadí (co do množství). Dále tento proces už nefunguje, větší jádra potřebují ke své stabilitě větší počet neutronů než protonů.

Hvězdy tedy nejsou stálicemi, jak se jim říkalo odedávna. Jejich stálost je pomíjivá. Termojaderné reakce probíhající v nitru hvězd mění jejich chemické složení i vlastnosti. V průběhu života hvězdy se mění jak její velikost, tak množství produkované energie. Hvězdy nejsou věčné jako Vladimír Iljič, ale mají svůj život, na jehož počátku jsou hvězdné porodnice a v jehož závěru je spotřebování jaderného paliva a smrt, která mnohdy přináší grandiózní podívanou v podobě odhozených obálek či obřích explozí.

Supernovy

Na konci života už nejsou vnější vrstvy hvězd příliš soudržné a hvězdy často odhazují obálky. Ty se od nich šíří rychlostí řádově 10 000 kilometrů za sekundu a vytvářejí nádherné mlhoviny. V jednoduchých dalekohledech našich předchůdců připomínaly tyto mlhoviny malé kotoučky, podobně jako planety. Proto se jim začalo

říkat *planetární mlhoviny*, i když s planetami nemají nic společného. I naše Slunce někdy za sedm až osm miliard let vytvoří krásnou mlhovinu, jen zde pravděpodobně už nebude nikdo, kdo by ji pozoroval. Planetární mlhoviny mají nejroztodivnější tvary, často formované magnetickými poli. Ukázky některých planetárních mlhovin naleznete v barevné příloze, obr. 11.

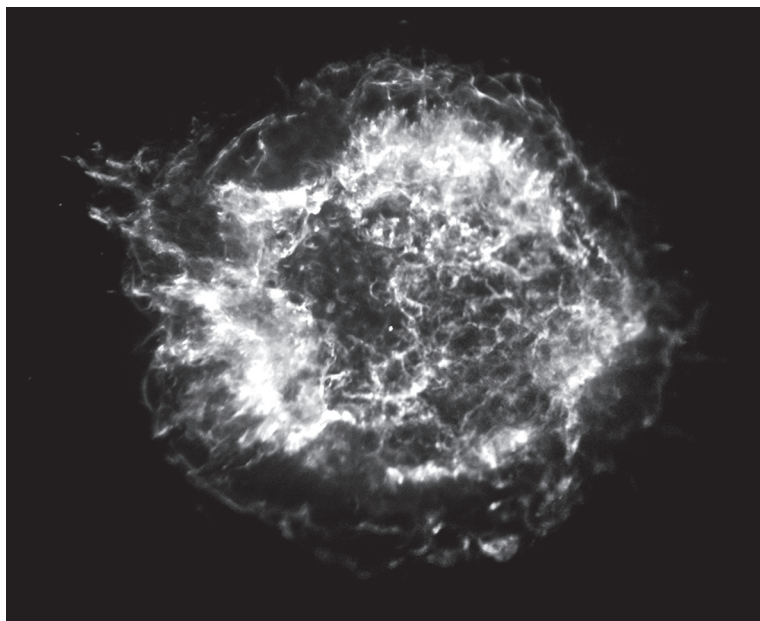
Hvězda, která spotřebovala „palivo“ pro termojadernou syntézu, se může stát bílým trpaslíkem, neutronovou hvězdou, nebo černou dírou. V bílých trpaslicích odolává přitažlivé gravitaci tlak elektronového plynu. Je to osud, který čeká i naše Slunce. Typický bílý trpaslík má rozměry srovnatelné s naší Zemí a hmotnost srovnatelnou se Sluncem. Typická hustota může být deset tun na centimetr krychlový. U hmotnějších hvězd ale elektrony nedokážou přitažlivé gravitaci odolat. Mrtvá hvězda se dále hroutí, vzrůstá v ní počet neutronů (vznikají z elektronů a protonů) až může gravitační kolaps zastavit tlak neutronů. Vzniká neutronová hvězda o rozměrech přibližně 20 až 50 kilometrů. Její hustota je enormní, může dosáhnout až deset miliard tun na centimetr krychlový. Pokud je hvězda ještě hmotnější, nepomůže jí nic a zhroutlí se do černé díry, objektu, z něhož nemůže uniknout nic, ani světlo.

Vznik neutronových hvězd a černých děr není doprovázen jednoduchým odhozením obálky, ale gigantickou explozí, které říkáme supernova. Hvězda rozmetá do okolí podstatnou část své hmotnosti a v závěru života připraví docela pěknou podívanou. Tlakové vlny se šíří při explozi jak ven, tak zpět do nitra bývalé hvězdy, kam přinášejí značné množství energie. Za těchto podmínek probíhají překotné termojaderné reakce, které vedou ke vzniku prvků i podstatně těžších než železo. Při reakcích vznikají neutrina s velkou energií, kterou odnášejí z umírající hvězdy pryč. Titěrná neutrina proto hrají klíčovou roli při odvodu energie z explodující supernovy.

Lehké prvky až po lithium vznikaly už v průběhu Velkého třesku. Těžší prvky až po železo se slučují v jádrech hvězd. Prvky za železem vznikají při explozích supernov. Odhazování obálek a exploze supernov obohacují o vzniklé prvky okolní mezihvězdné prostředí. Tyto

mlhoviny, obsahující materiál dávno zaniklých hvězd, se stanou kolébkou další generace hvězd. Kolem nich už mohou vznikat i planety, protože jejich zárodečné pramlhoviny mají veškeré prvky k tomu potřebné. I naše těla jsou vybudována z materiálu, který kdysi vznikl v nitrech hvězd a exploze supernov ho rozmetaly do okolí. Všichni bez výjimky jsme tak vystaveni z látky, která z větší části vznikla v dávných supernovách. Odhaduje se, že supernova, která byla zdrojem těžkých prvků v naší Sluneční soustavě, explodovala v končinách, kde se později rodilo Slunce, někdy přibližně před sedmi miliardami let.

Proces zániku a zrodu hvězd se ve vesmíru neustále opakuje. Tak, jako bájný Fénix povstal z popela, i hvězdy se rodí z popela hvězd předchozích generací.



Supernova v Kasiopeji označovaná jako Cas A. Látka mrtvé hvězdy byla rozmetána do širokého okolí. Snímek v rentgenovém oboru pořídila vesmírná observatoř Chandra. Napříč má útvar 29 světelných roků. Cas A je poměrně mladou supernovou. Její světlo k nám dorazilo někdy kolem roku 1680, přímá pozorování nejsou známa. Cas. A je ve vzdálenosti 11 tisíc světelných roků. NASA/CXC/SAO.



Mlhovina Řasy ze souhvězdí Labutě patří k velmi starým pozůstatkům po explozích supernov. Napříč má 1500 světelných roků a její stáří je 5 až 8 tisíc roků. Pozůstatky po supernovách se v prostoru udrží takto viditelné nanejvýš několik desítek tisíc roků. Pak natolik zřídnou, že přestanou být pozorovatelné.

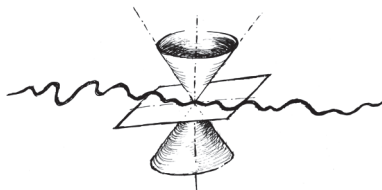
Zdroj: NASA/JPL-Caltech, sonda Galaxy Evolution Explorer.

Víte, že

■ Víte, že supernovy nemusejí vznikat jen při závěrečném kolapsu velmi hmotné hvězdy? Supernovy typu Ia jsou dvojhvězdy, u nichž za explozi může nárůst hmotnosti způsobený přetokem látky z jedné složky na druhou – na bílého trpaslíka, který se tak dostane do oblasti nestability.

- Víte, že prvky těžší než železo nevznikají jen při explozích supernov? K jejich vytváření také hojně dochází při sloučení dvou neutronových hvězd. Vznikají i velmi těžká radioaktivní jádra, jejichž rozpad způsobí gama záblesk.
- Víte, že v astronomii má slovo populace odlišný význam od slova generace? První generace hvězd vznikaly po Velkém třesku, následovala druhá a třetí generace hvězd. Walter Baade rozdělil v roce 1944 hvězdy podle obsahu těžkých prvků na populace. Populace I má vysoký obsah těžkých prvků, populace II má těžkých prvků málo a populace III, zavedená později, by měla mít těžkých prvků minimum. Dnes je jasné, že šlo o nešťastnou volbu – třetí populace hvězd vznikla nejdříve a první populace nejpozději.
- Víte, že hvězda Betelgeuse ze souhvězdí Orionu brzy vybuchne jako supernova? Tento obr s rozměrem dráhy Jupiteru je na konci svého života a v dohledné době se stane supernovou. Dohlednost je ale myšlena v astronomickém smyslu. Možná to bude za několik století a možná i za deset tisíc let.
- Víte, že Edward Mills Purcell, objevitel 21cm čáry neutrálního vodíku, nezískal Nobelovu cenu za tento objev, ale za objev jaderné magnetické rezonance?

Poučení na závěr: *Supernovy předvádějí na obloze velkolepá představení, která jsou ale jistým svědectvím hvězdného zániku. Stejně tak mohou být často okázalá vystoupení některých jedinců počátkem jejich konce.*



8. Velkorozměrové struktury

„Nikdy nezapomínej na to, že jsi jen malou částí v celém velkém vesmíru.“

Marcus Aurelius, císař Římské říše

Při pohledu na noční oblohu snadno nabudeme dojem, že vesmír je plný hvězd. Naši nejbližší hvězdou je Slunce, druhou nejbližší je Proxima Centauri nacházející se ve vzdálenosti 4,24 světelného roku. V roce 2016 objevil 3,6metrový dalekohled Evropské jižní observatoře planetu obíhající kolem Proximy ve vzdálenosti 0,05 astronomické jednotky. A není to planeta ledažaká. Její hmotnost je 1,3 hmoty naší Země, tedy se, alespoň co do hmotnosti, Zemi podobá. Samotná Proxima je červeným trpaslíkem, je mnohem méně svítivá než Slunce, a tak by se i v tak malé vzdálenosti od Proximy mohla udržet na její planetě voda v kapalném skupenství. Je pravděpodobné, že se planety nacházejí u většiny hvězd a je jich ve vesmíru velmi mnoho.

Hvězdy se málokdy vyskytují o samotě, naše Slunce je spíše výjimkou. Většinou jde o dvojhvězdy, vícenásobné systémy nebo celé hvězdokupy, v nichž se mohou nacházet desítky až miliony hvězd. To je dáno tím, že hvězdy vznikají houfně ve hvězdných porodnicích. I Proxima Centauri je součástí trojhvězdy (Proxima, Rigil Kentaurus a Toliman). Půjdeme-li do větších vzdáleností, zjistíme, že se tyto hvězdné systémy koncentrují do kompaktních obřích útvarů, kterým říkáme galaxie. Naši Galaxii píšeme, na rozdíl od jiných galaxií, s velkým počátečním písmenem „G“ a někdy ji nazýváme Mléčnou dráhou. Sousloví mléčná dráha se používá ve dvojím významu – jednak označuje stříbrný pás hvězd táhnoucí se na obloze, což je část Galaxie při pohledu zevnitř ve směru roviny Galaxie – a od

začátku minulého století se tak jmenuje také celá naše Galaxie, pak píšeme Mléčná dráha (s velkým počátečním M). Na průměr má přes 150 000 světelných roků a obsahuje podle dnešních měření 500 až 580 miliard hvězd. Výpočty vycházejí z pohybových charakteristik satelitních trpasličích galaxií, které jsou na Mléčnou dráhu gravitačně vázány a oproti dřívějším odhadům, vycházejícím jen z počítání hvězd a mapování mezihvězdné látky, jsou nejspíše velmi blízko skutečnosti.

Galaxie, které jsou považovány za základní stavební „cihly“ vesmíru, se podobně jako hvězdy sdružují do větších celků. Naše Galaxie je součástí Místní skupiny galaxií. Do ní patří ještě dvě srovnatelně velké soustavy – galaxie M31 v Andromedě a galaxie M33 v Trojúhelníku a velké množství trpasličích galaxií. Celkový počet galaxií v Místní skupině není znám, lokalizováno jich bylo přes osm desítek, ale bude jich jistě mnohem více, neb i v současnosti jsou stále objevení noví členové. Galaxie jsou ve skupině soustředěny do dvou center, část se pohybuje v okolí naší Galaxie a část kolem Galaxie v Andromedě. Místní skupina tedy tak trochu připomíná činku. Těžiště soustavy je mezi oběma velkými galaxiemi. Přibližně za 4 miliardy roků obě tyto galaxie splynou a vytvoří jednu obří eliptickou galaxii, která se stane centrem Místní skupiny. Hmotnost Místní skupiny se odhaduje na 2×10^{12} slunečních hmotností a průměr na 10 milionů světelných roků.

Naše Místní skupina je menší kupou galaxií. Podobných skupin je v našem okolí více: Skupina v Draku, Skupina ve Velké medvědi, Skupina kolem galaxie M81 a další. V blízkosti je také Kupa galaxií v Panně, to už je větší celek s hmotností 10^{15} Sluncí, vzdálený od nás 54 milionů světelných roků. Všechny tyto objekty jsou součástí Místní nadkupy, která se někdy také nazývá Nadkupa v Panně. Místní nadkupa zabírá prostor o průměru přes 100 milionů světelných roků a nachází se v ní přinejmenším stovka skupin a kup galaxií. Ale ani to není vše. Místní nadkupa je jen jedním výběžkem obří nadkupy Laniakea. Ta je naším skutečným vesmírným domovem, oblastí, uvnitř které galaktické kupy plují obrovitými proudy do hustých vláken a uzlů. Vně Laniakey gravitační

toky galaxií odnášejí jiné kupy do obdobných sousedních struktur. Laniakea obsahuje nejméně 150 000 galaxií, vyplňuje prostor do vzdálenosti půl miliardy světelných roků a má hmotnost 10^{17} Sluncí. Laniakea byla, jakožto největší gravitačně vázaná struktura, popsána v roce 2014. V okolí Laniakey jsou podobná obří gravitační centra: nadkupa v Herkulovi, Shapleyho koncentrace, nadkupa Perseus – Ryby, nadkupa Zajíc a další. Tyto nadkupy jsou propojeny vlákny plnými galaktických kup. V každém takovém vláknu se od jeho středu galaxie pohybují k tomu centru, které je bližší. Popis těchto největších známých velkorozměrových struktur publikovali v roce 2017 Daniel Pomarède, Yehuda Hoffman, Hélène Courtois a Richard Brent Tully v rámci dosud nejrozsáhlejšího kosmografického projektu nazvaného *Cosmicflows*. Blízký vesmír je tak dnes zmapován prostřednictvím pohybových polí na základě charakteristik 18 000 galaxií a tento projekt stále pokračuje. Katalog *Cosmicflows-3* mapuje struktury s potřebnou přesností až do oblasti, v nichž se galaxie od nás pohybují rychlostí 15 000 km/s s přesahem až do 30 000 km/s. V obřích vesmírných vzdálenostech miliard světelných roků (hovoříme o tzv. kosmologických vzdálenostech) je obtížné odhadnout skutečnou vzdálenost objektů – ta totiž závisí na použitém modelu expanze vesmíru. Proto se obvykle udává jen hodnota rychlosti vzdalování objektů, kterou lze snadno změřit a která je úměrná vzdálenosti objektu. Mezi koncentrickými vlákny a uzly tvořenými galaktickými nadkupami byly objeveny také obří bubliny, v nichž se galaxie téměř nenacházejí.

V tuto chvíli jde o největší objevené útvary ve vesmíru a možná to tak i zůstane, neboť oblast vesmíru, která je námi pozorovatelná, má svůj horizont (viz čtvrtá kapitola „*Hledáme hranice*“) a my vidíme jen malou část celého vesmíru – tu část, z níž k nám doputovalo světlo od okamžiku vzniku vesmíru. Vzdálenější oblasti, a tedy větší celky, spolu nedokáží gravitačně interagovat, neboť i gravitace, stejně jako elektromagnetické vlny, se šíří maximální možnou rychlostí šíření informace. Vesmír je tak složen z mnoha oblastí, které spolu nekomunikují. Není ale vyloučeno, že spolu tyto oblasti mohly interagovat kdysi, v dávné minulosti, v tzv. předinflační fázi (viz devátá kapitola „*Milujeme inflaci*“).

Přehledové projekty

Snahy pochopit, jak vypadá vesmír, vyústily v hledání jakéhosi typického reprezentativního místa oblohy, které by stálo za to prostudovat podrobněji. Nakonec volba padla na malou oblast v souhvězdí Velké medvědice o rozměru 2,5' (8 procent průměru Měsíce v úplňku). Ve zvolené oblasti bylo minimálně hvězd naší Galaxie, takže bylo možné pohlédnout ven do hlubokého vesmíru. Vybraná oblast byla snímkována Hubblovým dalekohledem od 18. do 28. prosince 1995, tedy deset dní. Pořízeno bylo celkem 342 snímků s expozicí od 15 do 40 minut. Snímkování prováděla širokoúhlá kamera WFPC2. Snímky byly potom složeny počítačem do jediného reprezentativního snímku s názvem „*Hubblevo hluboké pole*“. Na snímku je kolem 2 000 galaxií v nejrůznějších vývojových stádiích. Podobné „hluboké“ snímky se opakovaly nejrůznějšími přístroji, ale tento snímek byl první z nich. Do učebnic se zapsal pod zkratkou HDF (*Hubble Deep Field*).

Krátce poté, co byl pořízen snímek HDF ve Velké Medvědici, se začalo uvažovat o stejném pokusu provedeném na jižní obloze stejným dalekohledem. Tentokrát se Hubblův dalekohled svým skleněným okem podíval do souhvězdí Tukana. Pole bylo (stejně jako na severní polokouli) voleno tak, aby nerušily slabé hvězdy Mléčné dráhy, ani žádná blízká skupina galaxií. Snímek byl pořízen v říjnu 1998, expozice probíhala opět 10 dní a snímek se označuje HDF-S (*Hubble Deep Field South*).

Mnoho objektů z Hubbleova hlubokého pole je kosmologickým červeným posuvem posunuto do infračervené oblasti. Proto bylo Hluboké pole znovu exponováno Hubblovým dalekohledem v roce 1998, tentokrát ale infračervenou kamerou NICMOS (*Near Infra-red Camera and Multi-Object Spectrometer*). Na výsledném snímku byly identifikovány shluky až 12 miliard let staré a zárodky hvězd ve vzdálených obřích galaxiích.

Obdobné snímky, jako jsou HDF a HDF-S, byly pořízeny i jinými přístroji. Za všechny jmenujme například AXAF Deep Field, NTT

Deep Field a Chandra Deep Field snímány v rentgenovém oboru. V roce 2004 vznikl v souhvězdí Pece další snímek: *Hubbleovo ultrahluboké pole*, které označujeme zkratkou HUDF (*Hubble Ultra Deep Field*). Hrana pořízeného snímku měla 11' (třetina úhlového průměru Měsíce v úplňku). Celkem bylo pořízeno 800 snímků ve vizuálním a infračerveném oboru. Průměrná expozice jednoho snímku trvala 21 minut a na snímku se nachází neuvěřitelných 10 000 galaxií v různých vývojových stádiích, včetně tzv. *galaktických pulců* – právě se rodících galaxií. Výřez z ultrahlubokého pole naleznete v barevné příloze na obr. 15.

V průběhu let 2001 až 2010 proběhl projekt GOODS (*Great Observatories Origins Deep Survey*) zaměřený na sledování vývoje velmi starých objektů, vedlejším produktem je řada pozorování supernov SN Ia. Do projektu byly zapojeny 4 vynikající vesmírné dalekohledy: Hubbleův dalekohled (vizuální obor), Spitzerův dalekohled (infračervený obor), Chandra (rentgenový obor) a XMM-Newton (rentgenový obor). K pozorování byly vybrány dvě malé oblasti (20'×16') oblohy: na severní obloze ve Velké Medvědici a na jižní obloze v souhvězdí Pece.

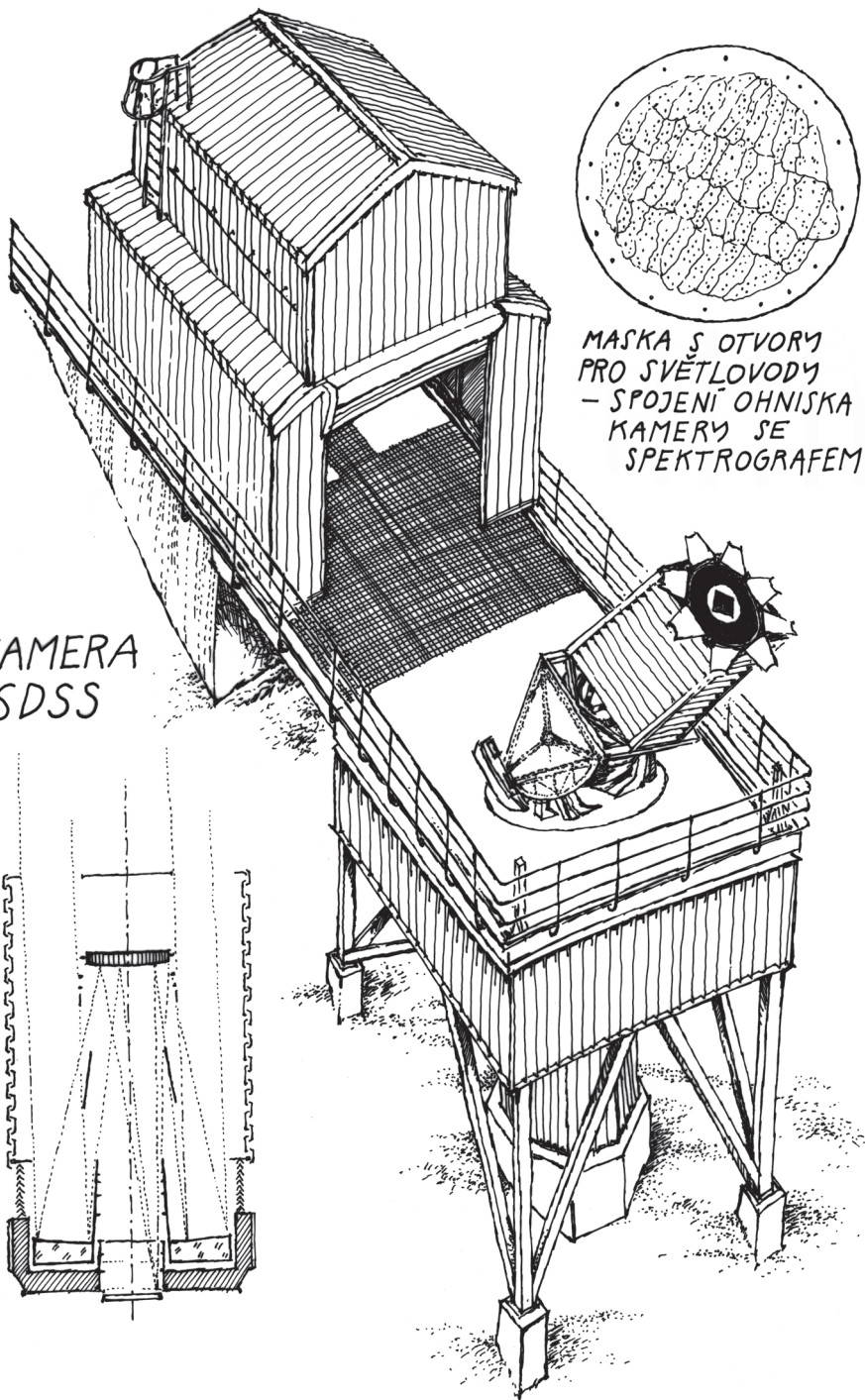
Na trochu větší části oblohy operuje projekt COSMOS (*Cosmic Evolution Survey*), přehlídka oblohy probíhající od roku 2002, které se účastní vesmírné observatoře od infračerveného po rentgenový obor (Spitzer, Hubble, GALEX, XMM-Newton a Chandra) a mnoho pozemských optických dalekohledů. Podrobně je sledováno čtvercové rovníkové pole o hraně 2°, což je přibližně čtyřnásobek úhlového průměru Měsíce v úplňku. Bylo detekováno přes dva miliony galaxií v nejrůznějších vývojových stádiích. Jde o největší současnou přehlídku tohoto druhu.

Astronomové potřebují nejen specializované snímky malých oblastí oblohy, ale také přehledové snímky velkých částí oblohy, z nichž se pak dělají prostorové mapy vesmíru. Takovou roli zastávají celooblohové přehlídky. Musíme si uvědomit, že z naší Galaxie nemůžeme pohlédnout do vzdáleného vesmíru ve všech směrech. V některých směrech je náš pohled zacloněn mezihvězdným plynem

a prachem, v jiných různými objekty, například galaktickým jádrem. Naše výhledy do dálky (a tím i do minulosti) jsou omezeny jen na určité kužele. Ideální je, když se v rámci celooblohových přehlídek dostupný výsek oblohy snímkuje opakovaně (tím se dají zjistit změny jednotlivých objektů, například exploze supernov) a současně pořizují spektra galaxií, čímž lze postupně zpřesňovat jejich vlastní pohyb a umístění v prostoru i zhruba zjistit jejich vzdálenost. Cesta k prostorovým mapám blízkého i vzdáleného vesmíru je dlážděna právě přehlídkami tohoto druhu.

Bezkonkurenčně nejznámější je *Sloanova digitální přehlídka oblohy* označovaná SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). Jde o ambiciózní projekt podporovaný nadací Alfreda Pritcharda Sloana, která byla založena v roce 1934. Alfred Sloan byl americký obchodník a po více než dvacet let výkonný ředitel společnosti *General Motors*. Sloanova nadace podporuje také vědu a školství. Projekt katalogizuje galaxie s mezní jasností do 23. magnitudy. Stanice SDSS je postavena v Novém Mexiku v Sacramento Mountains na observatoři Apache Point. Hlavním přístrojem projektu SDSS je fotografická kamera se zorným úhlem tří stupňů a o průměru primárního zrcadla 2,5 metru. Sběr dat začal v roce 2000, oblast dosažitelná dalekohledem činí 35 % oblohy. U miliardy objektů byla změřena poloha, jasnost a barva, u čtyř milionů galaxií a kvazarů byla určena spektra. V současnosti (2014 až 2020) běží už čtvrtá generace přehlídky SDSS. V době psaní této knížky (2019) lze využívat data z patnácti optických přehlídkových projektů, sedmi infračervených, devíti rádiových a čtyř přehlídek ve více oborech spektra.

Není v možnostech této publikace se zabývat jednotlivými projekty, proto se zmiňme jen o největší připravované celooblohové přehlídce všech dob, která bude prováděna dalekohledem LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*) o průměru 8,4 metru. Observatoř se staví v Chile v oblasti Cerro Pachón v nadmořské výšce 2 680 metrů. CCD čip zajišťující snímkování bude mít 3,2 miliardy pixelů a bude snímat na celé dostupné obloze, vždy v průběhu několika nocí, miliardy objektů v šesti frekvenčních pásmech. První světlo se očekává v roce 2020 a rutinní skenování oblohy od roku 2023.



MASKA S OTVORY
PRO SVĚTLOVODY
- SPOJENÍ OHNISKA
KAMERY SE
SPEKTROGRAFEM

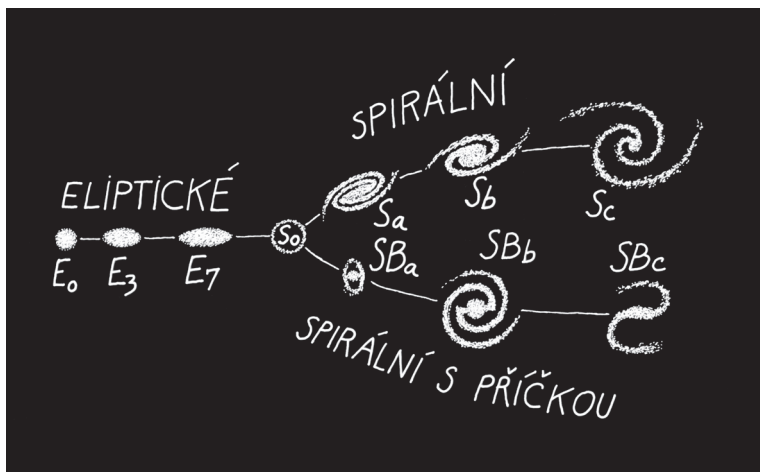
KAMERA
SDSS

Od galaxií k nadkupám

Jednotlivé galaxie se liší svou strukturou. Velmi časté jsou galaxie se spirálními rameny, typickým zástupcem je naše galaxie nebo galaxie v Andromedě. Všeobecně panující představa, že se ramena otáčejí spolu s hvězdami, je mylná. Ve skutečnosti jde o tzv. *hustotní vlny* ne nepodobné kruhům na vodě, které se šíří jinou rychlostí než samotná voda. U spirálních galaxií jsou spirální ramena také hustotní vlnou a otáčejí se jinou rychlostí, než obíhají hvězdy kolem středu galaxie. Spirální ramena tvoří *plochý disk*, celá galaxie vypadá jako dva hluboké talíře přiklopené okraji k sobě. V naší Galaxii žijeme spolu se Sluncem v okrajové části disku. Proto při pohledu do roviny disku vidíme na obloze ohromné množství hvězd – mléčnou dráhu. V jiných směrech pak vidíme osamocené hvězdy jednotlivých souhvězdí. Rozšířená oblast disku v okolí středu galaxie se nazývá *centrální výduť*. Některé spirální galaxie mají centrální příčku, ramena vycházejí až z jejich konců a nikoli rovnou ze středu galaxie. Kolem galaxií bývá *galaktické halo* – řídkší oblast, v níž se nacházejí zejména staré hvězdy a kulové hvězdokupy. U některých galaxií halo přechází v bubliny horkých plynů. Například naše Galaxie má pozorovatelné rentgenové a gama laloky.

Již jsme se zmínili, že při srážkách přicházejí galaxie o svá spirální ramena a stávají se velkými eliptickými galaxiemi. Na druhé straně je zde řada galaxií nepravidelných tvarů, které do kategorií *spirální – spirální s příčkou – eliptická* – jednoduše nezapadají. V okolí velkých galaxií bývá velké množství malých průvodců, tzv. trpasličích galaxií. Naši Galaxii doprovázejí Velké Magellanovo mračno, Malé Magellanovo mračno i další trpasličí galaxie.

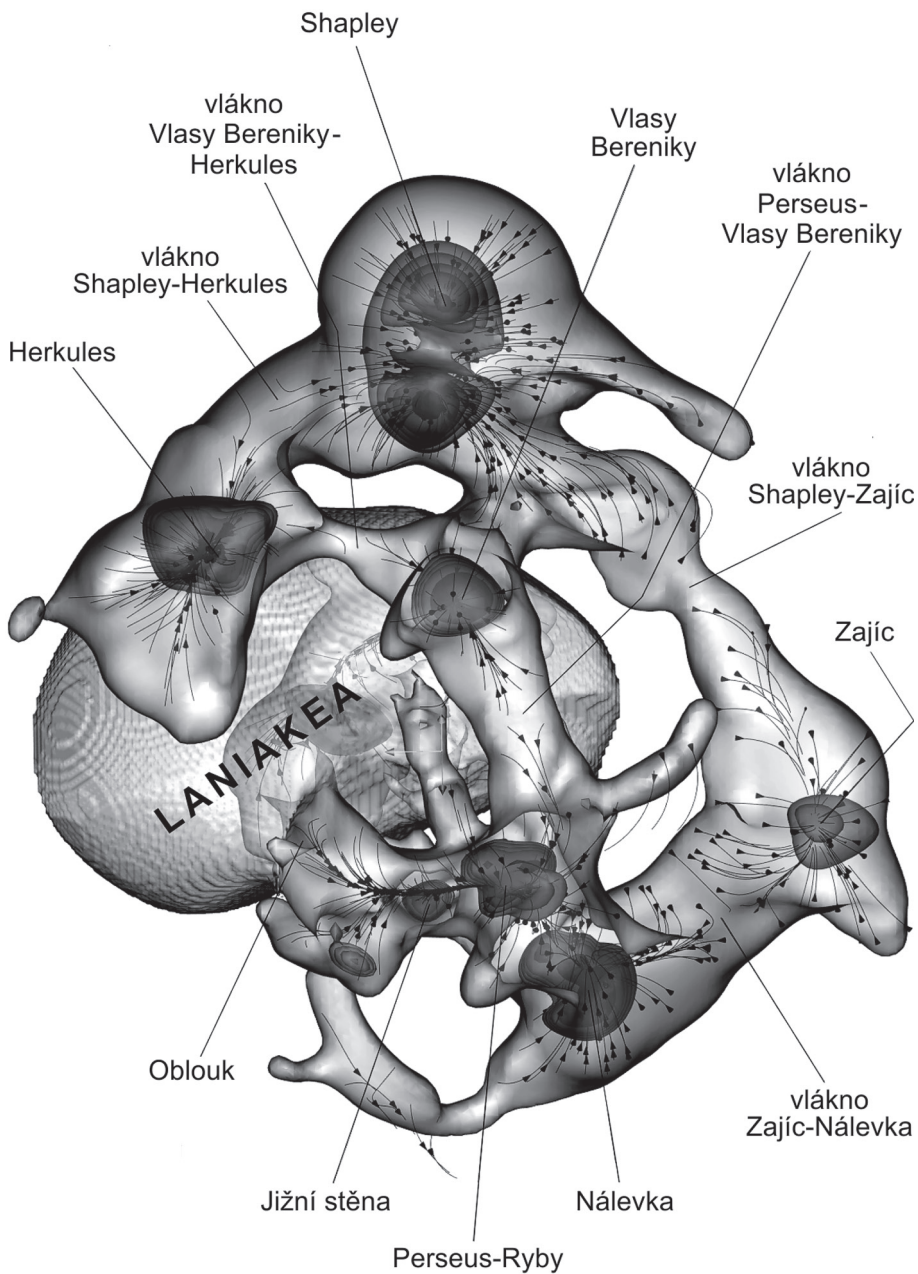
Obrátme však naši pozornost nikoli na jednotlivé galaxie, ale na jejich skupiny, kupy a nadkupy. Celoblohové přehlídky ukázaly, že většina kup spolu s galaxiemi je rozmístěna podél obřích stěn a vláken a mezi nimi existují oblasti zející prázdnotou, kde jsou galaxie a kupy galaxií jen výjimečně. Velkorozměrová struktura vesmíru tak připomíná jakousi pěnu s bublinami, jejichž stěny tvoří velmi mnoho galaxií.



Hubbleova klasifikace galaxií z roku 1926.

První takovou stěnu objevili američtí astronomové Valérie de Lapparentová, Margaret Gellerová a John Huchra v roce 1985 v přehlídce CfA2. Stěna obsahuje kupy ve Vlasech Bereniky, Lvu a Herkulovi a říká se jí *Velká stěna* (*Great Wall*). Celá stěna má charakter nadkupy galaxií. Napříč má rozměr 200 milionů světelných roků a její tloušťka je 16 milionů světelných roků. Největší dosud objevenou stěnou je *Velká stěna BOSS* (pojmenovaná podle přehlídky BOSS). Obsahuje přes 800 galaxií ze čtyř nadkup a napříč měří miliardu světelných roků. Mezi stěnami jsou obří prázdnoty. Extrémně velká bublina tohoto druhu leží ve směru souhvězdí Pastýře. Říká se jí *Velká prázdnota* (*Great Void*), alternativní názvy jsou: *Prázdnota v Pastýři* (*Bootes Void*) nebo *Velké nic* (*Great Nothing*). Oblast má průměr 330 milionů světelných roků a leží ve vzdálenosti 700 milionů světelných roků od Země. *Velké nic* objevil americký astronom Robert Kirchner v roce 1981.

Přesuňme se nyní k největším škálám. V posledním desetiletí se nedělají jen statické mapy, ale mapy s proudnicemi – tzv. rychlostní síť (*v-web*, viz barevná příloha, obr. 17), kde jsou zaznamenány pohyby jednotlivých galaxií, samozřejmě po odečtení expanze vesmíru. Právě rychlostní pole umožňuje snadnou identifikaci



struktur a nalezení jejich hranic. Naše Galaxie s Místní skupinou, dalšími skupinami a kupami galaxií je součástí *nadkupy Laniakea*. Laniakea obsahuje výrazné nahuštění hmoty, které se říká *Velký atraktor*. Do Velkého atraktoru jsou přitahovány galaxie z blízkého i vzdáleného okolí. Zajímavým místem je také *dipólový repeler* – obří oblast, od níž se velmi vzdálené kupy galaxií na horizontu měřitelné oblasti pohybují směrem k *Shapleyho koncentraci*. Snad jde o podobný jev jako u rozvodí v krajině. Z určité oblasti hor tečou potoky a řeky na různé strany, ale žádná opačným směrem. Je možné, že v dipólovém repeleru je maximum gravitačního potenciálu, což by pohyby směrem od této oblasti vysvětlilo.

Je velmi zajímavé sledovat, jak se prvotní fluktuace na konci Velkého třesku vyvinuly ve velkorozměrové struktury vesmíru na těch největších škálách. Prvotním fluktuacím také někdy říkáme *baryonové akustické oscilace*, neboť fluktuace reliktního záření odrážejí hustotní fluktuace tehdejší látky a ty lze chápat v jistém smyslu jako zvukové (akustické) vlny. Slůvko „baryonové“ potom znamená, že podstatná část hustoty látky byla nesena baryony – částicemi složenými ze tří kvarků, mezi něž patří i neutrony a protony, které jsou nositeli největší části hmoty atomových jader. Různé numerické simulace hledají souvislost mezi prvotními fluktuacemi a velkorozměrovými strukturami. Tyto simulace ukazují, že ke vzniku pozorovaných struktur je třeba správné procentuální zastoupení tří základních ingrediencí ve vesmíru – atomární látky, temné hmoty a temné energie. Studium struktur na největších škálách tak s sebou přináší cenné nezávislé informace o množství temné hmoty a temné energie ve vesmíru.

Numeričtí simulanti

Před půl stoletím se fyzikové a astronomové dělili na dvě skupiny: experimentátory a teoretiky. Rozdíl obou profesí byl zjevný. Experimentátoři prováděli zajímavá pozorování, která posouvala naše znalosti přírodních dějů. Naopak teoretici se snažili pozorování vysvětlit a popsat je takovými teoriemi, které předpovídají nové, dosud neznámé děje ověřitelné či vyvratitelné dalšími experimenty.

Časy se ale mění a tuto nádhernou symbiózu v posledních desetiletích dvacátého století narušili *numeričtí simulanti*. Stále početnější skupina lidí využívala rychle se rozšiřující výpočetní techniku k simulacím přírodních dějů. Mnohé teorie bylo možné ověřit či vyvrátit už na základě simulací a nebylo nutné provádět drahé experimenty. Simulace umožnily i procházet mnoho alternativ a nacházet optimální řešení. A výpočetní technika samozřejmě usnadnila zpracování obrovského množství dat chrhlených současnými experimenty. Počáteční nedůvěra v pravdivost numerických simulací postupně opadala a numeričtí simulanti se v průběhu několika desítek let plnohodnotně zařadili po bok experimentátorů a teoretiků. V současné době jsme svědky vzniku čtvrté skupiny. Věda se stala v poslední době docela lukrativním obchodem, a tak se vynořila celkem početná skupina příživníků, jejichž cílem rozhodně není pochopení přírodních zákonitostí, ale urvání co největšího balíku peněz a plnění ukazatelů, které tato skupina sama vymyslela a vnutila ostatním. Doufáme, že integrace těchto lidí do vědeckých struktur je jen dočasným fenoménem naší překotné doby.

Vraťme se ale od bezpáteřných příživníků k užitečným numerickým simulantům. Simulace velkorozměrových struktur i se započtením temné hmoty a temné energie patří k těm nejnáročnějším výpočtům současnosti. První velká simulace proběhla pod názvem *Simulace tisíciletí (Millenium Simulation)* v roce 2005. Simulaci uskutečnilo konsorcium VIRGO soustředící astrofyziky z Německa, Velké Británie, Kanady, Japonska a Spojených států. V simulaci byla sledována gravitační interakce více než deseti miliard částic („částice“ v simulaci reprezentovaly oblast o hmotnosti cca jedné miliardy Sluncí). Simulace proběhla v krychli o hraně 2 miliardy světelných roků. Výsledek simulace poskytl 25 TB dat s informacemi o rozložení a vývoji hmoty (atomární i temné) ve vesmíru. Simulace byla prováděna na superpočítači v Institutu Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova a trvala přes měsíc. V roce 2009 proběhla obdobná simulace *Millennium II*. Hrana krychle byla menší, „jen“ 400 milionů světelných roků. Uvnitř bylo opět přes deset miliard částic s hmotnostmi přibližně 7 milionů Sluncí. Simulaci provádělo 2048 procesorových jader počítače Power-6 v Garchingu. Simulace

trvala měsíc, a pokud by ji prováděl jednojádrový procesor, trvala by 160 roků. Simulace tisíciletí posunula naše znalosti o formování vláken temné hmoty i velkorozměrových struktur ve vesmíru.

Tuto největší simulaci historie překonala až simulace *Illustris*, jejíž data byla uvolněna v roce 2015. Simulace proběhla na superpočítačích Curie (CEA, Francie) a SuperMUC (Leibniztovo výpočetní středisko, Německo). Výpočet běžel na 8 192 procesorových jádrech, při největší zátěži potřeboval 25 terabajtů operační paměti a ze simulace bylo uloženo 230 terabajtů dat. Simulace probíhala 97 dní, a pokud by ji prováděl jediný procesor, trvala by 2 170 roků. V roce 2016 začala probíhat další simulace pod názvem *Illustris TNG* (TNG znamená *The Next Generation*). Celkem proběhly tři běhy označované TNG300, TNG100, TNG50. Číslo znamená velikost simulované oblasti v megaparsecích, čím menší, tím podrobnější simulace. Simulace TNG300 byla skončena v srpnu 2016, TNG100 v listopadu 2016 a poslední nejpodrobnější simulace TNG50 v dubnu 2019. Simulace probíhaly na superpočítači Hazel Hen ve stuttgartském superpočítačovém centru HPCC, poslední trvala 26 měsíců, tedy přes dva roky. Simulován byl vývoj galaxií, vznik rázových vln, ale i geneze magnetického pole.

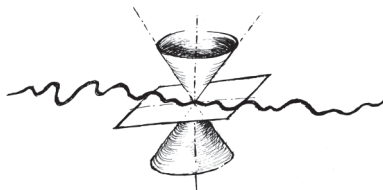
Simulace *Illustris* nebyla jen jednorázovou akcí, díky ní byly vytvořeny nástroje pro zpracovávání obrovského množství dat neustále chrlených mnoha celooblohovými přehlídkami. Nástroje *Illustris* se v současnosti využívají mimo jiné také pro zobrazování nejrůznějších kosmografických projektů, které z celooblohových přehlídek čerpají. Jedním z těchto výsledků bylo například přesnější určení hmotnosti Mléčné dráhy díky dynamice jejích satelitů v roce 2018, nebo předpověď průběhu prolnutí Mléčné dráhy s galaxií v Andromedě v příštích několika miliardách roků.

Snímek ze simulace *Illustris* najdete v barevné příloze na obr. 18. Současnou astronomii si už bez rozsáhlých numerických simulací nedokážeme představit. Nástup kvantových počítačů dá v blízké budoucnosti numerickým simulacím křídla a umožní výpočty netušených možností.

Víte, že

- Víte, že slovo galaxie bylo odvozeno z řeckého slova „*galaktikos*“, což znamená mléčný? Název galaxie tak v sobě reflektuje naši vlastní Galaxii, jejíž průmět na oblohu se nám jeví jako mléčná dráha.
- Víte, že první klasifikaci galaxií podle jejich tvarů nezávisle na sobě publikovali v roce 1926 švédský astronom Knut Lundmark a americký astronom Edwin Hubble? Hubble Lundmarka nařkl z plagiátorství a tvrdil, že mu jeho klasifikaci ukradl, i když ji publikoval před ním.
- Víte, že z počátku si astronomové mysleli, že eliptické galaxie jsou počátečním vývojovým stádiem spirálních galaxií? Sváděla k tomu domněnka, že k tvorbě spirálních ramen je zapotřebí velké množství času. Dnes víme, že velké eliptické galaxie vznikají naopak splynutím spirálních galaxií.
- Víte, že Spitzerův vesmírný dalekohled pro infračervený obor je pojmenován po Lymanu Spitzerovi, který sehnal pro NASA peníze na stavbu Hubblova dalekohledu? Spitzerův dalekohled má průměr 85 centimetrů a podílí se, stejně jako Hubble, na celooblohových přehlídkách prováděných z vesmíru.
- Víte, že Institut Maxe Plancka, v němž proběhla Simulace tisíciletí, je největší sítí vědeckých ústavů v sousedním Německu? Je pojmenován po Maxovi Planckovi, nositeli Nobelovy ceny za vytvoření základů kvantové teorie.

Poučení na závěr: *Neobjevit nic znamená být zapomenut. Ale objevit „Velké nic“, to už je jiné kafe a zajistí vám nesmrtelnost a slávu.*



9. Milujeme inflaci

„Ve vesmíru a ve státní správě se může stát cokoli.“
Martin Hobrland, český spisovatel

Model vzniku vesmíru založený na jeho expanzi se většinou nazývá *standardní model*. Měli bychom být ale opatrní. Ono se totiž tohle sousloví používá ve dvou zcela různých významech. Zaprvé jde o standardní kosmologický model, o kterém bude v této kapitole řeč. Pak ale také existuje standardní model elementárních částic, v němž se to hemží kvarky, leptony a polními částicemi všeho druhu (viz kapitola „*Elementární částice*“). Mně už se jednou tato nejednoznačnost názvů vymstila.

Při jedné rozhlasové diskuzi, která se natáčela v divadle, se mě rozhlasový reportér zeptal na standardní model. Asi jsem nesledoval diskuzi tak, jak bych měl, vše se totiž točilo kolem elementárních částic, a já začal zeširoka vyprávět o expanzi vesmíru. Dodnes netuším, kdo byl více zaskočen – zda dotyčný reportér, posluchači, nebo já, když jsem pochopil, že téma diskuze je poněkud odlišné.

Standardní kosmologický model rozumně popisuje vesmírný vývoj, nedokáže ale odpovědět na otázku samotného počátku vesmíru. Snad je to proto, že se opíráme hlavně o obecnou relativitu, která v samotném počátku selhává, snad proto, že jsme příliš troufalí, když se snažíme otázce vzniku vesmíru přijít na kloub. Jak uvidíme dále v této kapitole, některé nezodpovězené otázky standardního modelu by pomohla vyřešit velmi prudká expanze vesmíru v jeho počátcích. Ta by se později zklidnila na běžnou expanzi, kterou nyní pozorujeme. Pokud taková prudká expanze existovala, změnila drobné fluktuace mikrosvěta na makroskopické nehomogenity – takové, jaké pozorujeme například v reliktním záření. Fázi prudké expanze, kterou se budeme zabývat v této kapitole, nazýváme *inflace*. V tuto chvíli nevíme, zda existovala, nebo ne. Některé indicie v její

prospěch ale máme. Většina lidí bude znát slovo inflace z finančního světa. V roce 2008 byla ekonomická nestabilita Zimbabwe tak děsivá, že došlo k meziročnímu nárůstu cen o 90×10^{21} procent. Za miliardové bankovky jste si nekoupili ani rohlík. Jsem rád, že jsme Zimbabwe navštívili už v roce 2001, kdy šlo ještě o relativně stabilní zemi. Finanční experti takové děsivé inflaci dokonce říkají *hyperinflace*. Ve srovnání s vesmírnou inflací, při níž se podle našich představ změnila lineární rozměry vesmíru faktorem 10^{25} až 10^{30} za pouhých 10^{-37} sekundy, nejde ale o nic významného.

Pokud inflace existovala, klademe si samozřejmě otázku, jaký byl vesmír před inflací. Tak obrovská změna škál nás při pátrání zpět v čase přivede z makrosvěta do mikrosvěta. Předinflační vesmír by měl být ovládan především zákony kvantové teorie. A jí jsou vlastní nenulové fluktuace všech možných i nemožných polí. Před inflací by vesmír měl být vyplněný jakousi *kvantovou pěnou*, která má původ v relacích neurčitosti. Ty nám znemožňují znát současně hodnotu samotného pole a hodnotu jeho hybnosti. Výsledkem je skutečnost, že každé pole má sice nulovou průměrnou hodnotu, ale hodnota pole se přitom chaoticky mění v prostoru. Vesmír před inflací by tedy měl být zcela jiný, než je vesmír dnes. Samotnou inflaci, pokud vůbec proběhla, bychom měli považovat za onu časovou nulu, okamžik zrodu vesmíru. Dosud se za nulu považuje okamžik, ke kterému dojdeme, když sledujeme expanzi vesmíru zpět v čase – okamžik, v němž by podle standardního modelu měl mít vesmír nekonečnou hustotu a teplotu. Možná se zdá, že problém vzniku vesmíru zavedením inflace jen odsouváme. Logicky přichází další otázky: Jak dlouho zde byla kvantová pěna? Kdy tato pěna vznikla? Není vyloučeno, že takové otázky nemají žádnou odpověď. Pojem času máme spojený s hmotnými tělesy. Ta ho ovlivňují a dokonce vytvářejí. Bez těles by neměl čas existovat. Kvantovou pěnu si tedy nemůžeme představovat jako cosi existujícího po určitou dobu. Snad se vesmír vynořil spolu s časem z kvantové pěny – procesem podobným, jako je změna skupenství, kdy látka přechází z jedné formy do formy jiné. Možná vesmír jen změnil podobu do té, kterou dnes usilovně zkoumáme. A možná bylo vše jinak a naše představy jsou jen divokými sny a realita byla odlišná.

Problémy standardního modelu

Standardní kosmologický model přináší nejen uspokojení ze zevrubného pochopení vývoje vesmíru, ale také mnohá úskalí. K největším z nich patří *počáteční singularita*, tedy nekonečné hodnoty hustoty, teploty i dalších veličin na počátku vesmíru. Taková nekonečna podle našich zkušeností nikde nenacházíme, jedinou výjimkou by snad mohl být vesmír nekonečný jako celek, ale ani tím si nejsme jisti. Pokud se v našich teoriích objeví nekonečno, je to spíše signál, že teorie selhala a je třeba ji nějakým způsobem upravit nebo vymyslet teorii jinou, životaschopnější. Singularita na počátku vesmíru je jasným selháním obecné relativity, naší teorie gravitace. Extrémní podmínky při vzniku vesmíru nepochybně neumožňují jeho popis pouze na základě gravitační interakce. K popisu počátku vesmíru musíme využít i ostatní interakce, které jsou ryze kvantové povahy. Právě kvantové zákony mohou vzniku počáteční singularity zabránit (v nulovém objemu nemůže být nikdy jakýkoli počet částic) a vesmír by měl mít na počátku sice velkou, ale konečnou hustotu i teplotu. I samotná inflace by měla být především procesem kvantové povahy, takže jejím zavedením bychom problém počáteční singularity dokázali vyřešit.

Druhým velkým oříškem je tzv. *problém horizontu*. Dotkli jsme se ho už ve čtvrté kapitole „*Hledáme hranice*“. Z obrovského vesmíru vidíme jen malou část – tu část, ze které k nám doletěl signál od okamžiku vzniku vesmíru. Každý pozorovatel má určitý horizont, za který nevidí. Existují i pozorovatelé, jejichž horizonty se neprotínají. Pokud se podíváme na sever, uvidíme ve velké vzdálenosti stěnu reliktního záření, to samé spatříme i na jihu. Ze specializovaných družic a sond víme, že se obě oblasti v základních rysech silně podobají. Přesto mezi nimi nikdy nemohla proběhnout jakákoli komunikace, světlo ze „severu“ k nám letělo 14 miliard roků a z „jihu“ také. Mezi „severem“ a „jihem“ by muselo letět 28 miliard roků, což je dvojnásobek doby existence vesmíru. Ve vesmíru tedy v současnosti existuje velké množství oblastí, které spolu nemohly komunikovat – říkáme, že jsou *kauzálně nesvázané*. A přesto je vesmír v těchto oblastech velmi podobný. Na severu, jihu, západě

i východě vidíme podobné struktury, i když spolu tyto oblasti od počátku světa nikdy neinteragovaly.

Tato situace má v podstatě jen dvojí řešení. První z nich je pouhé konstatování, že věci jsou takové, jaké jsou. Vesmír je prostě ve všech místech stejný, i když tato místa nebyla nikdy propojena a nemají společnou historii. Snad „někdo“ nebo „něco“ takto nastavilo počáteční podmínky, z nichž se vesmír vyvíjel. Druhou možností, o něco vědeckější, je hledat takové procesy, které nějak umožnily v minulosti komunikaci jednotlivých částí vesmíru.

A právě takovým procesem je *inflation*. V předinflační fázi byly vzdálenosti ve vesmíru natolik malé, že jednotlivé dnes kauzálně nespojené oblasti spolu mohly komunikovat. Inflation by tedy mohla být oním procesem, který problém horizontu uspokojivě vysvětlí.

Třetím největší záhadou je tzv. *problém plochosti vesmíru*. Z druhé kapitoly „*Expanze a kosmologický princip*“ už víme, že vesmír s kritickou hustotou je na velkých škálách plochý. Takový vesmír dnes kolem sebe pozorujeme. Na první pohled nic divného, pokud si neuvědomíme, že sebemenší odchylka od kritické hustoty v dávné minulosti vesmíru by vedla buď k vesmíru s kladnou křivostí, v němž by převládla gravitace a záhy by zkolaboval, nebo k vesmíru se zápornou křivostí, který by se už dávno rozfoukl a my bychom nepozorovali žádné hvězdy, galaxie či jejich kupy. Aby se to nestalo, musel být vesmír velmi záhy po Velkém třesku „nastaven“ přesně na kritickou hustotu. V čase 10^{-43} s (Planckův čas, budeme se mu věnovat v jedné kapitole „*Absolutní horko*“) by musel být vesmír nastaven na kritickou hustotu s neuvěřitelnou relativní přesností $\delta\rho/\rho \sim 10^{-59}$! Jinak by v dnešní podobě neexistoval. Opět stojíme před otázkou „kdo“ nebo „co“ vesmír v minulosti nastavilo s tak extrémní přesností na kritickou hustotu. Fyzikálně nejzajímavější je hledání procesů, které způsobily, že vesmír získal přesně kritickou hustotu.

I zde pomůže *inflation*. Celkem snadno lze matematicky dokázat, že krátká fáze exponenciálního rozpínání vyhladí vesmír natolik, že se bude jevit jako plochý. Ponechme stranou matematiku zakřiveného

časoprostoru a představme si, že stojíme na povrchu koule o poloměru deset metrů. Samozřejmě, že budeme vnímat její zakřivení a nebudeme mít pochyb, že jde o kouli nebo něco jí velice podobného. A nyní přijde inflace. Během okamžiku se naše koule nafoukne faktorem 10^{20} ! Její poloměr bude po inflaci 10×10^{20} metru, tedy 10^{21} metru. Poloměr Země je 6×10^6 metru a i tak malý poloměr postačí k tomu, aby se nám povrch Země jevil víceméně plochý. Poloměr naší koule je o 14 řádů větší, po přepočtu na světelné roky vyjde přibližně 10^5 světelných roků, což je srovnatelné s rozměry naší Galaxie. Běžnými prostředky bychom neměli šanci odhalit odchylky od roviny. Inflace také vyhladí veškeré nehomogenity a anizotropie ve vesmíru. Inflace tedy vyřeší nejen problémy počáteční singularity a horizontu vesmíru, ale i otázku plochosti vesmíru.

Standardní kosmologický model má i jiné další nejasnosti. Nevíme například, proč ve vesmíru výrazně převažuje hmota nad antihmotou, proč nepozorujeme magnetické monopóly nebo proč je náš svět právě čtyřrozměrný. Na některé z našich otázek je inflační fáze v raném vesmíru obstojným lékem. Proto „milujeme inflaci“, i když zatím netušíme, zda jde o reálný proces nebo spíše o myšlenkovou konstrukci vysvětlující nesrovnalosti evidentních skutečností.

Inflační hypotéza

S myšlenkou inflace si jako první pohrával americký fyzik Alan Guth z Cornellovy univerzity při řešení problematiky neexistence magnetických monopólů. V roce 1979 měl základní koncept inflace dokončen a v roce 1980 o možné inflaci vesmíru referoval na semináři univerzity. Poté přešel na Stanfordovu univerzitu, takže první publikace, která vyšla v roce 1981, už byla pod její hlavičkou. Dnes je zaměstnancem Massachusettského institutu technologií (MIT). Alan Guth uvažoval, že by jedno z polí ve vesmíru mělo dvě různá minima energie a na počátku by se nacházelo ve vyšším energetickém stavu. Šlo by o stabilní konfiguraci, jen by vesmír byl ve stavu jakéhosi *falešného vakua*. Pokud by ono pole přešlo do nižšího, tedy skutečného energetického minima, uvolněná energie by vesmír rozfoukla a pole by se ocitlo ve skutečném vakuovém stavu.

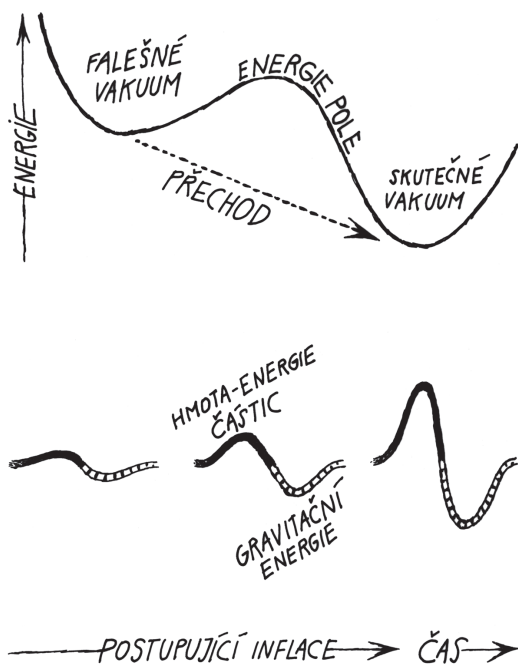
Jenže kde takové pole vzít? Mělo by být co možná nejjednodušší, se spinem rovným nule. Jediným takovým polem ve standardním modelu elementárních částic je Higgsovo pole, které uděluje částicím hmotnost, ale to v té době ještě nebylo objeveno. Higgsova částice (či pole, chcete-li) byla polapena na Velkém hadronovém kolideru v CERNu až v roce 2012. I když se Higgsovo pole jako pachatel inflace nabízí, může jít samozřejmě i o nějaké jiné, dosud nepoznané pole. Proto se v současnosti obecně hovoří o *inflatonovém poli* a jednou snad přijdeme na to, o jaké pole jde.

Na podobné problematice v tehdejší sovětském impériu také pracovali Alexej Starobinskij z Landauova ústavu teoretické fyziky a Andrej Linde z Lebeděvova fyzikálního ústavu. Celá trojice získala v roce 2014 prestižní Kavliho cenu za průkopnické práce v teorii kosmické inflace.

V průběhu inflační fáze se mikroskopické fluktuace zvětší na makroskopické, z nichž pak vznikají objekty, jaké známe. Navíc by při inflaci měly houfně vznikat elementární částice standardního modelu. Nevznikají z ničeho, ale do určité míry na dluh gravitační energie, která je záporná, zatímco energie rodících se částic je kladná. Snad jednou, až se vesmír rozplyne, bude tento dluh splacen a hustota energie částic i gravitační interakce budou zanedbatelné.

Přechod inflatonového pole ze stavu falešného vakua do skutečného energetického minima má stejnou povahu jako různé metastabilní stavy ve statistické fyzice či termodynamice. Představme si velmi čistou vodu, kterou za normálních podmínek pomalu ochlázujeme. Běžně by se při nule stupňů Celsia měla změnit v led, ale nestane se tak. Chybějící kondenzační jádra v čisté vodě způsobí, že se stane tzv. *podchlazenou kapalinou* a bude v kapalném stavu i několik stupňů pod bodem tuhnutí. V určitém okamžiku se ve zcela náhodném místě objeví zárodek nové fáze (ledu) a veškerá kapalina se velmi rychle změní v led. Stejně tak to funguje s ohřevem, kdy můžeme mít čistou přehřátou kapalinu, která ještě není párou. Obdobný průběh by měla mít i inflace. Vesmír není před inflací ve skutečném vakuu. V určitém okamžiku se objeví bublina rychle se

šířící nové fáze vesmíru – vesmíru ve skutečném vakuovém stavu. Jenže, co když takových bublin vznikne více? Propojí se v jeden jediný vesmír se skutečným vakuem, nebo budou odděleně vznikat bubliny jakýchsi dceřiných vesmírů, které se budou srážet? Nebo se budou od sebe vzdalovat a nikdy se nespojí? Jde o typickou ukázkou myšlenky, která sice určité problémy vyřeší, ale za cenu nových nezodpovězených otázek.



Nový inflační scénář

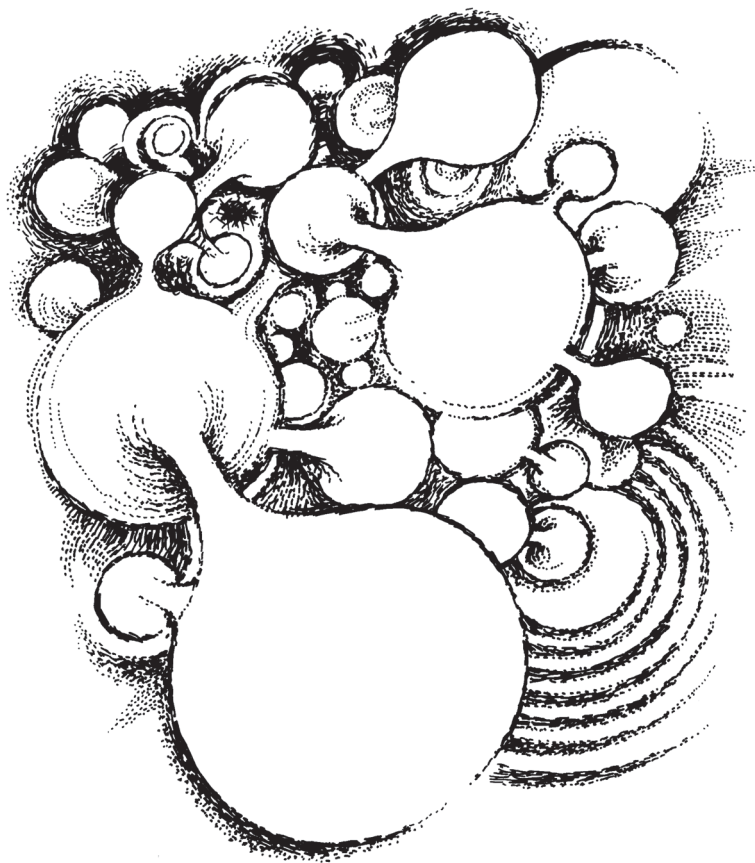
V Guthově modelu probíhala inflace příliš pomalu, bublin nové fáze vznikalo velké množství a srážky vznikajících bublin by nebyly dostatečně časté, aby vznikl homogenní vesmír. Různé skupiny zkoušely i jiné tvary průběhu potenciální energie pole než s dvěma oddělenými minimy. V roce 1982 ukázali nezávisle na sobě Andrej

Linde v Sovětském svazu a Andreas Albrecht s Paulem Steinhardtem ve Spojených státech, jak by mohla inflace fungovat realističtěji. V novém modelu nedochází k pomalému kvantovému tunelování mezi dvěma minimy potenciálu, ale inflace nastane při postupné změně energie pole. Rozdíl mezi oběma inflačními modely si můžeme znázornit na kuličce nacházející se na povrchu plochy. Ve starém inflačním modelu kulička nehybně leží v jednom z minim a kvantové procesy (tunelování) se jí snaží dostat do druhého, nížeji položeného minima. V novém inflačním scénáři je v naší analogii potenciálová bariéra mezi oběma minimy velmi plochá a s klesající teplotou postupně zmizí, takže se kulička samovolně začne kutálet po úbočí kopce do skutečného minima. V novém inflačním scénáři probíhá inflace podstatně rychleji a bublin nové fáze vznikne jen několik nebo dokonce jen jedna jediná. V průběhu „nové“ inflace opět vznikají kvantové fluktuace a zvětšují se do makroskopických rozměrů.

Nový inflační scénář silně připomíná to, co v termodynamice a statistické fyzice známe jako fázový přechod druhého druhu (při něm nedochází ke skoku energie, ale ke skoku veličin, které jsou změnami energie, například měrného tepla). Příkladem může být feromagnetikum složené z mnoha elementárních magnetů. Za vysoké teploty jsou tyto magnety orientovány zcela náhodně a systém nemá magnetické vlastnosti. Pokud feromagnetikum ochlazujeme, dojde při tzv. *Curierově teplotě* k fázovému přechodu. Elementární magnety začnou vytvářet domény se shodně orientovaným magnetickým polem (tzv. *Weissovny domény*) a feromagnetikum začne mít magnetické vlastnosti. Typické je, že jednotlivé oblasti shodně orientovaných elementárních magnetů jsou odděleny tzv. doménovými stěnami. Těm se někdy říká *topologické defekty* – jejich vznik je pro fázové přechody druhého druhu typický. V průběhu inflace by takové topologické defekty měly vznikat také. Jejich pozorovatelným důsledkem by měly být například *vesmírné domény* související s dnešní velkorozměrovou strukturou vesmíru nebo *kosmické struny* – lineární velmi tenké hmotné oblasti, které se postupně rozpadají za vzniku gravitačních vln. Odhaduje se, že v dnešním vesmíru by nemělo být více než 40 kosmických strun.

Pro představu: přibližně deset kilometrů kosmické struny by mělo mít hmotnost jako naše zeměkoule. Takové útvary ale zatím nebyly v žádném experimentu pozorovány.

Inflace se dnes nejčastěji dává do souvislosti s oddělením silné interakce od zbylých dvou interakcí. K tomu mělo dojít v čase přibližně 10^{-35} sekundy po počáteční singularitě, která je datována zpětnou extrapolací ze soudobé expanze a nemusela vůbec existovat, takže v tomto kontextu nemá „čas inflace“ příliš velký význam, zejména pokud inflaci přímo ztotožníme s počátkem našeho vesmíru. Dnes se zkoumají i možnosti vzniku inflační fáze bez fázového přechodu,



inflační fáze s chaotickými počátečními podmínkami nebo i existence několika inflačních fází a fázových přechodů v průběhu vývoje vesmíru. Hodnoty charakterizující inflaci se model od modelu liší, uvedme proto jen typická řádová čísla: inflační přechod by měl trvat zhruba 10^{-37} až 10^{-36} sekundy, mělo by dojít k lineárnímu nárůstu rozměrů faktorem 10^{20} až 10^{30} , ke zvýšení entropie faktorem 10^{80} až 10^{90} a pokles teploty v průběhu inflace by měl být v jejím závěru kompenzován ohřevem částic uvolněnou energií.

V roce 2002 získali nejvýznamnější protagonisté starého a nového inflačního scénáře – Alan Guth, Andrej Linde a Paul Steinhardt – Diracovu medaili, jedno z nejvýznamnějších ocenění ve fyzice.

Experimentální možnosti

Přímá experimentální detekce inflační fáze dnes není možná. Měřené spektrum fluktuací reliktního záření, charakteristika velko-rozměrových struktur a globální plochost vesmíru je nicméně s inflačním scénářem ve shodě a neznáme v současnosti jiný scénář, který by vedl ke stejným výsledkům. Nemůžeme ale také vyloučit, že pozorované struktury nemohly vzniknout jiným způsobem. Prudký nárůst fluktuací v průběhu inflace by měl vést ke vzniku tzv. *reliktních gravitačních vln*. Je to už třetí „relikt“, se kterým se setkáme. Na konci Velkého třesku v období cca 400 000 let po začátku se uvolnilo reliktní elektromagnetické záření, které dnes dokážeme našimi prostředky snadno pozorovat. Přibližně v jedné sekundě existence vesmíru by se měla od látky Velkého třesku uvolnit reliktní neutrina, kterým jsme na stopě (viz šestá kapitola „*Za stěnou*“). A v průběhu inflace by měly vznikat *stochastické* reliktní gravitační vlny. Slovo stochastický znamená náhodný, v tomto případě jde o superpozici gravitačních vln z velmi mnoha náhodně rozmístěných zdrojů (původně fluktuací). Vznikne signál, který tvoří pozadí pro ostatní gravitační vlny z konkrétního zdroje. Spektrum tohoto pozadí, tj. závislost intenzity na různých vlnových délkách, spočítat dokážeme. Současné technologické prostředky lidstva dávají naději, že tyto vlny polapíme v nejbližších desetiletích a důsledky inflace budeme schopni pozorovat i přímějšími metodami. Pokud by ovšem

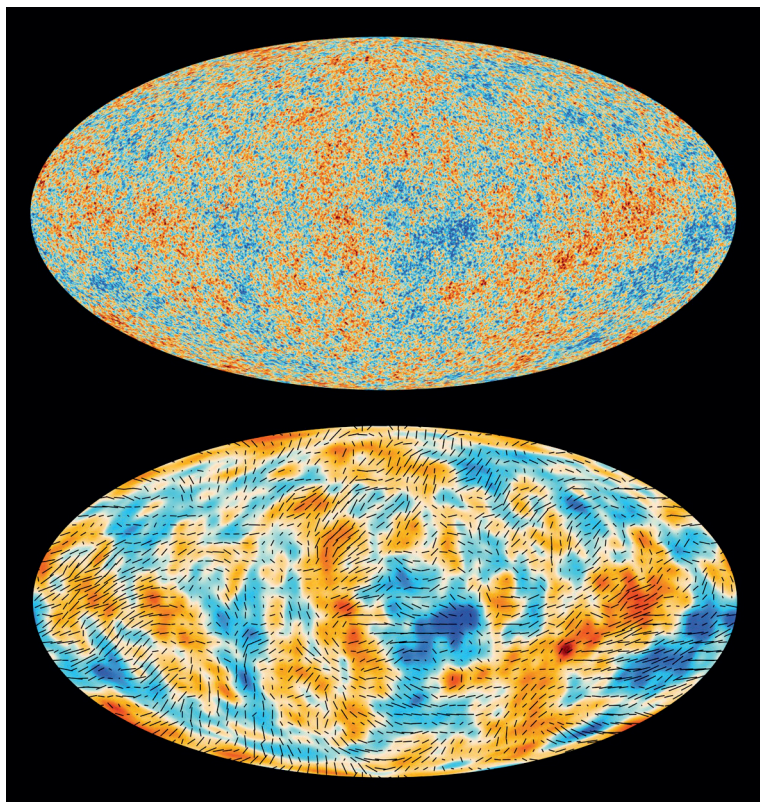
nalezené spektrum nesouhlasilo s inflačním scénářem, stala by se inflace pozoruhodnou slepou uličkou na cestě k poznání. Reliktní gravitační vlny by mohlo zachytit nyní budované radioteleskopické pole SKA (*Square Kilometer Array*), připravovaný obří vesmírný interferometr LISA (*Laser Interferometry Satellite Antenna*, viz barevná příloha, obr. 4) nebo jeho následovník BBO (*Big Bang Observer*). Podrobně se s těmito projekty seznámíme v desáté kapitole „*Na lovu reliktních gravitačních vln*“.

Víte, že

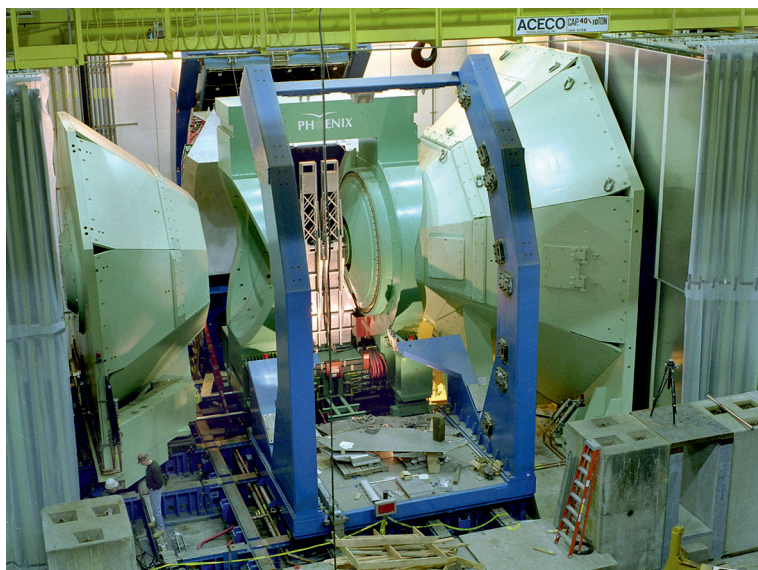
- Víte, že slovo inflace poprvé použil Alan Guth? K inflační teorii ho přivedla problematika neexistence magnetických monopolů, na které pracoval v 70. letech na Cornellově univerzitě.
- Víte, že Paul Steinhardt stál hned u zrodu dvou scénářů vzniku vesmíru? Nejprve navrhl tzv. nový inflační scénář a v pozdějších letech ještě ekpyrotický model, v němž vesmír vzniká dotekem dvou pravesmírů v mnohorozměrném multiverzu.
- Víte, že inflace je i lékem na neexistenci magnetických monopolů? V průběhu inflační fáze by se měl vesmír zředit natolik, že by z původně hojného počtu magnetických monopolů zůstalo v pozorovatelném vesmíru jen několik jedinců.
- Víte, že inflaci lze chápat jako počáteční podmínku pozdější mírumilovnější expanze? Pokud proběhla inflace, nemusíme už pátrat po tom, co způsobilo současnou expanzi vesmíru. Byla to totiž právě ona samotná inflace.
- Víte, že Starobinskij jako první ukázal, že kvantové korekce obecné relativity zabrání vzniku počáteční singularity? Právě úvahy o roli kvantových jevů při vzniku vesmíru ho nezávisle přivedly k inflační hypotéze.

Poučení na závěr: *Ne každá inflace je ovšem zavrženihodná. Zatímco z inflačního nárůstu cen čiší temná beznaděj, tak inflační scénář vzniku vesmíru jiskru naděje nabízí.*

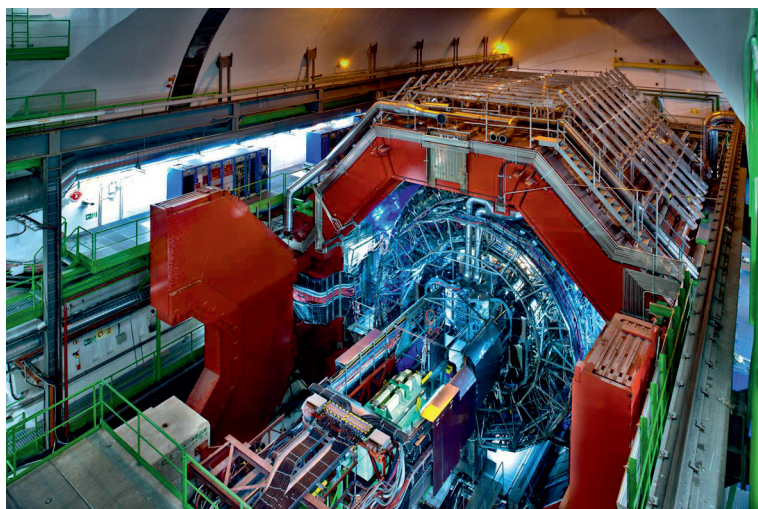
Barevná příloha



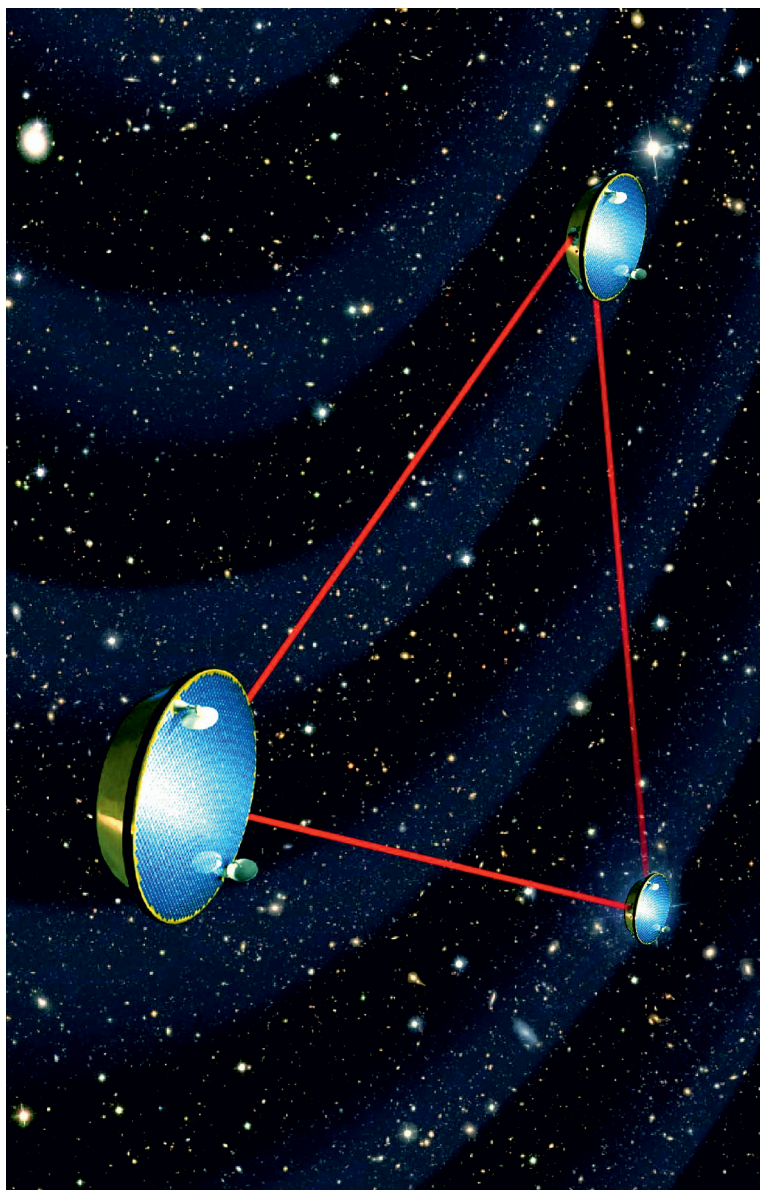
Obr. 1: Reliktní záření ze sondy Planck. Na horním snímku je výsledná mapa teplotních fluktuací. Na spodním snímku je záznam polarizace reliktního záření s vyhlazenou mapou teplotních fluktuací na pozadí. Zdroj: ESA, Planck, 2018.



Obr. 2: Detektor Phoenix na urychlovači RHIC na Long Islandu u New Yorku. Uskutečnilo se zde nejvíce „Malých třesků“ – simulací Velkého třesku při srážce dvou jader zlata. Zdroj: Brookhavenská národní laboratoř, Roger Stoutenburgh.



Obr. 3: Detektor ALICE na Velkém hadronovém kolideru ve středisku částicové fyziky CERN u Ženevy. „Malý třesk“ se zde simuluje pomocí srážek jader olova. Zdroj: CERN, ALICE.



Obr. 4: LISA, interferometr na oběžné dráze kolem Slunce. Cílem bude detekce gravitačních vln nízkých frekvencí. Mezi sondami je vzdálenost $2,5 \times 10^6$ km. Lasery měří vzdálenost testovacích hmotností. Start 2034. Zdroj: ESA, NASA.



Obr. 5: Částicový detektor AMS 2 v nákladovém prostoru raketoplánu Endeavour těsně před umístěním na Mezinárodní kosmickou stanici. Start proběhl dne 16. května 2011. Zdroj: NASA.



Obr. 6: Částicový detektor AMS 2 umístěný na rameni Mezinárodní kosmické stanice. Detektor analyzuje částice kosmického záření, které k nám přicházejí z blízkého i vzdáleného vesmíru. Zdroj: NASA.



Obr. 7: Sloupy stvoření, část Orlí mlhoviny (M16). Snímek rodících se hvězd v souhvězdí Hada pořídil Hubbleův vesmírný dalekohled v roce 2014. Objekt je ve vzdálenosti 5 600 světelných roků a největší sloup má výšku 5 světelných roků.
Zdroj: NASA, ESA, Hubble Heritage Team.

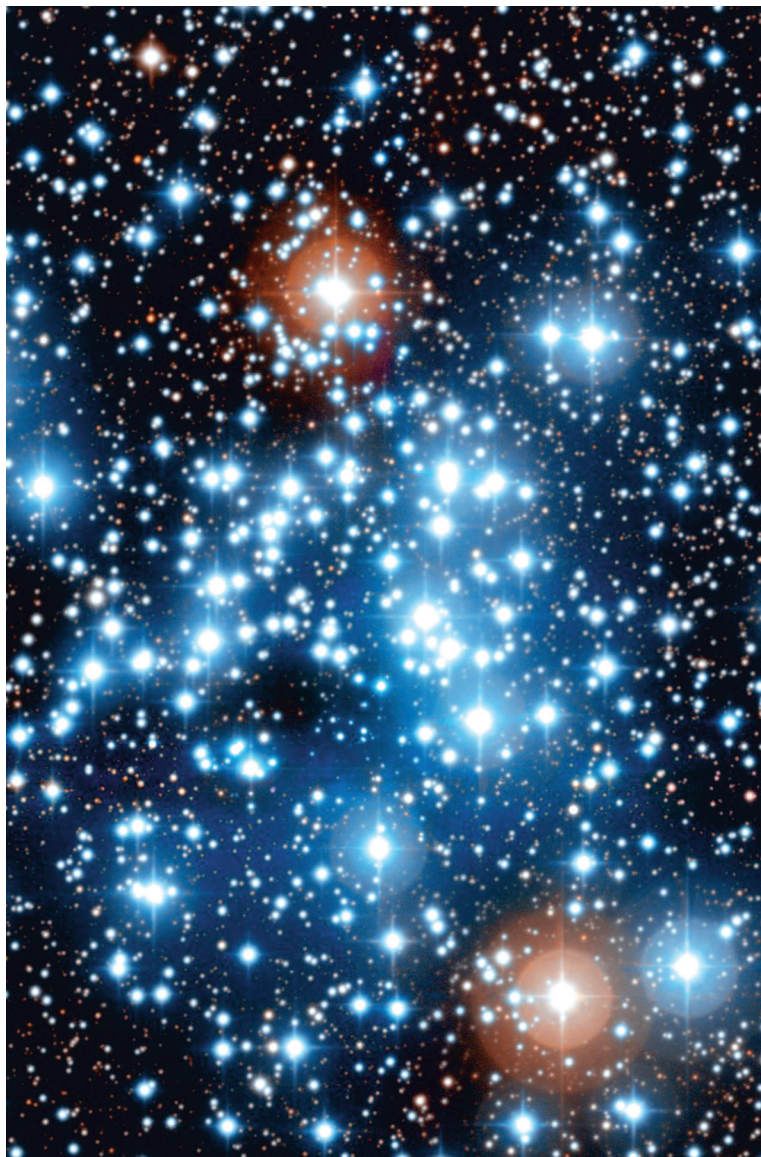


Obr. 8: Molekulární mračno Rozeta (Rosette) ze souhvězdí Jednorozce. Celá oblast, která se nachází ve vzdálenosti 5 200 světelných roků, je obří hvězdnou porodnicí. Fotografii pořídil infračervený dalekohled Herschel v roce 2010.
Zdroj: ESA, Herschelův vesmírný dalekohled.

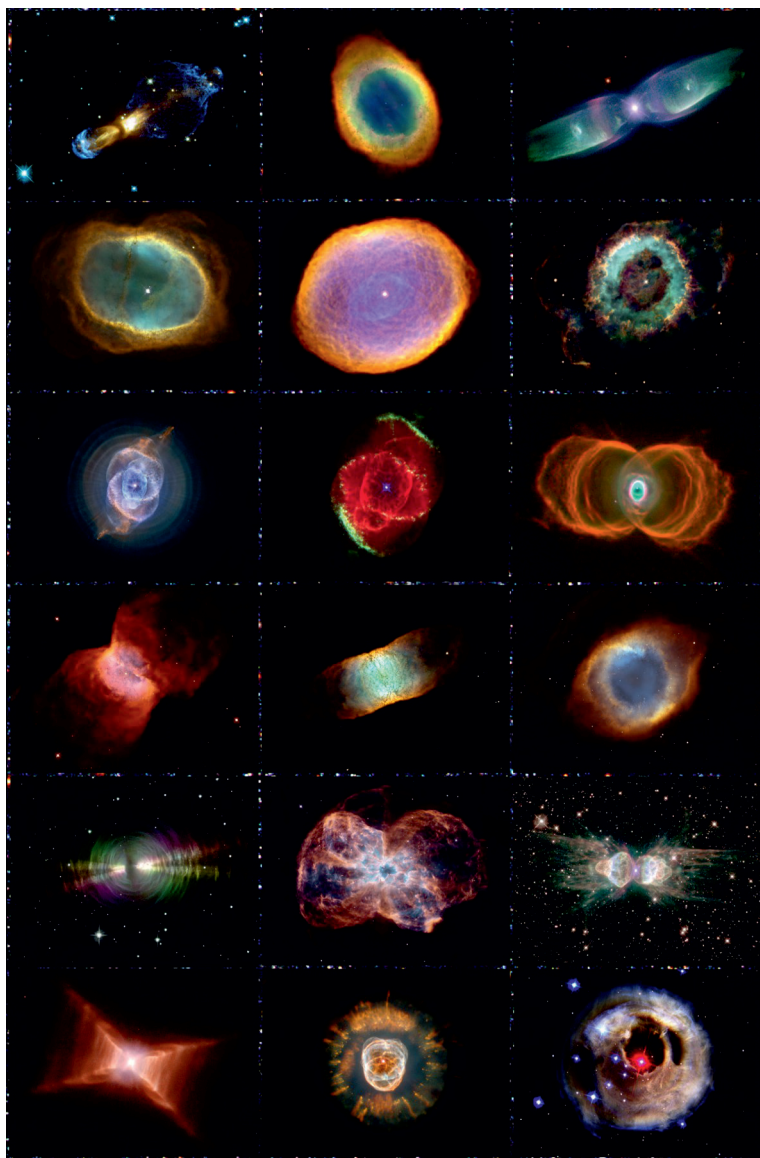


Obr. 9: Mystická hora. Snímek z Hubblova vesmírného dalekohledu, na kterém je hvězdná porodnice ze souhvězdí Lodního kýlu. Mlhovina se nachází ve vzdálenosti 7 500 světelných roků. Hubble pořídil tento zcela fascinující snímek v roce 2010.

Zdroj: NASA, ESA, Hubble Heritage Team.



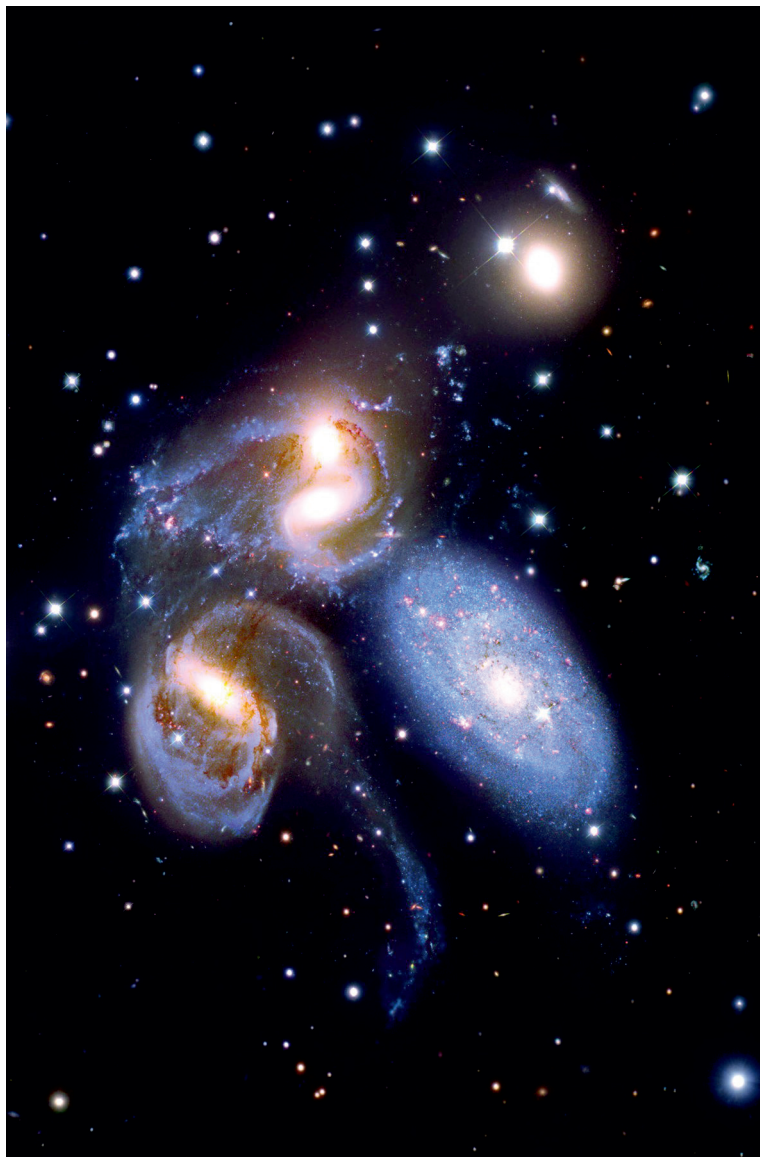
Obr. 10: Otevřená hvězdokupa NGC 3766. Hvězdy se většinou rodí ve větších skupinách. V této hvězdokupě mají hvězdy nejrůznější hmotnosti a barvy, které korelují s jejich povrchovou teplotou. Objekt se nachází v souhvězdí Kentaura ve vzdálenosti 5 500 světelných roků. Zdroj: ESO.



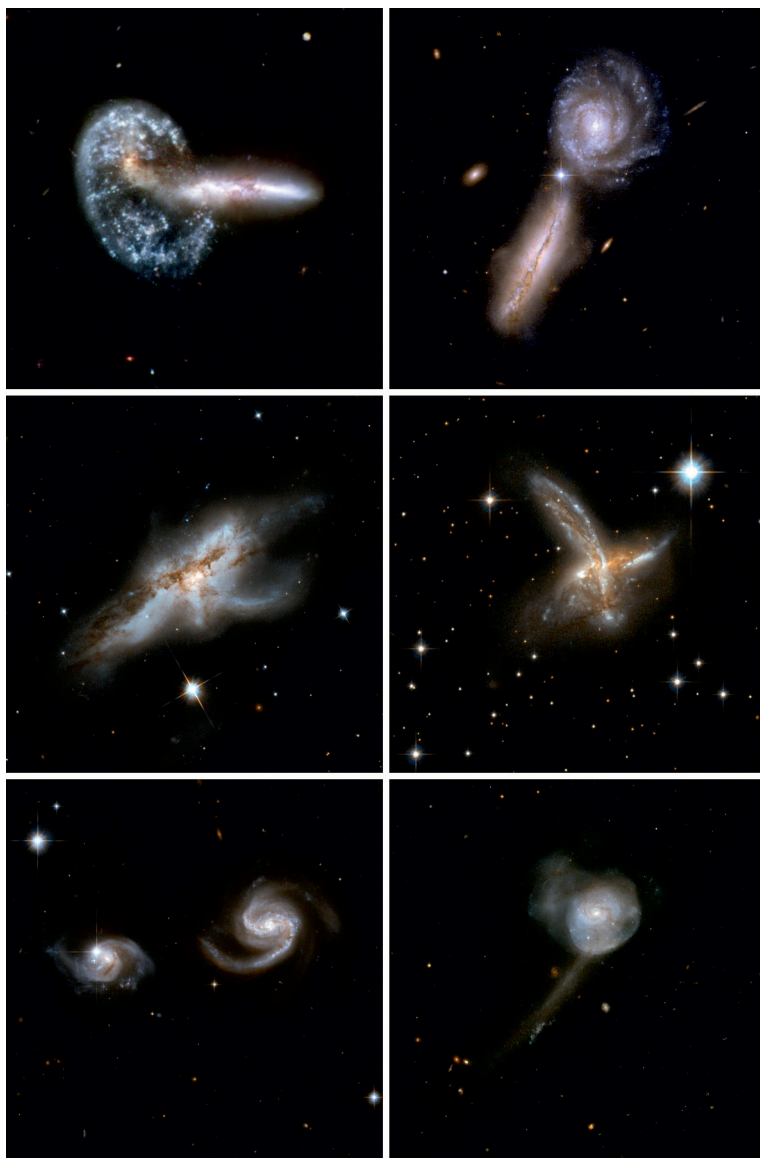
Obr. 11: Planetární mlhoviny. V závěrečných fázích odhazují některé hvězdy své obálky a na obloze vytvoří tzv. planetární mlhoviny. Tuto kolekci pořídil Hubbleův dalekohled. Zdroj: NASA, ESA, Hubble Heritage Team, G. Bonneau.



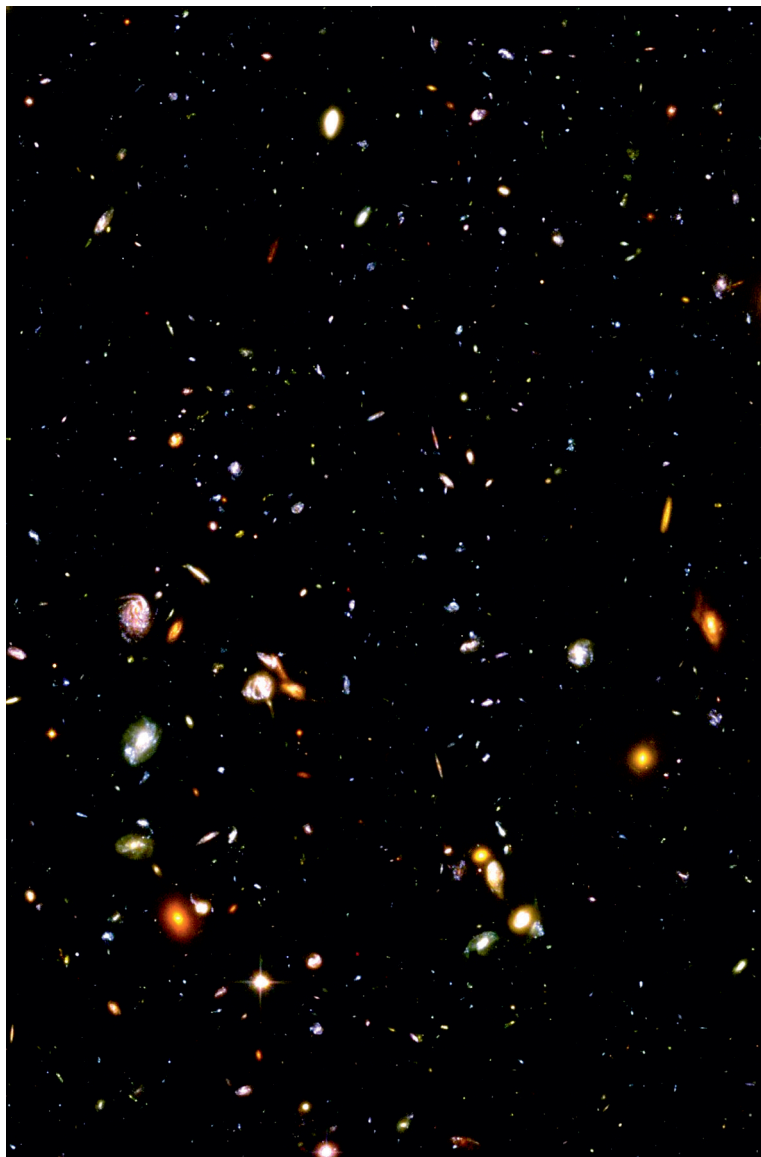
Obr. 12: Velká galaxie v Andromedě. Jde o první galaxii, u které se prokázalo, že leží za hranicemi Mléčné dráhy. Za několik miliard roků splyne s naší Galaxií.
Zdroj: ESA, NASA, HST, Davide De Martin.



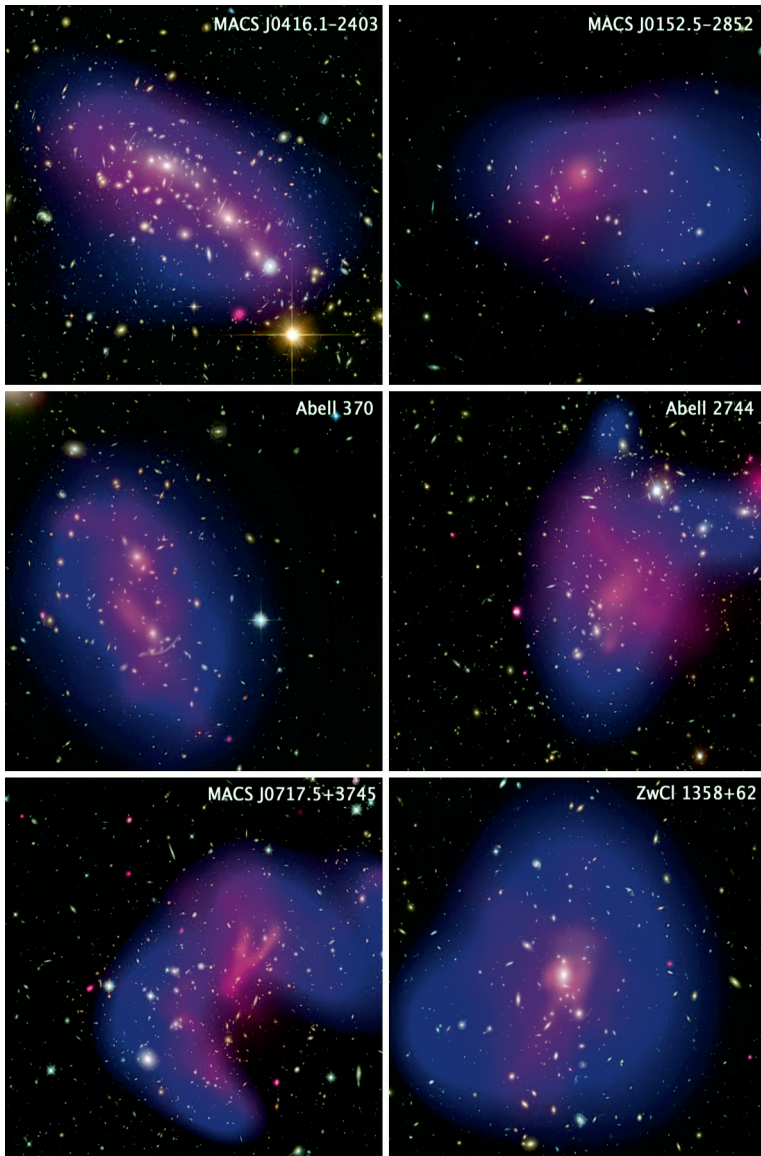
Obr. 13: Stefanův kvintet. Čtveřice blízkých galaxií, pátá (modrá) se do místa jen promítá a je v popředí. Skupina ze souhvězdí Pegase je ve vzdálenosti 300×10^6 ly a časem dojde k jejímu sloučení do jedné galaxie. Zdroj: HST, Subaru.



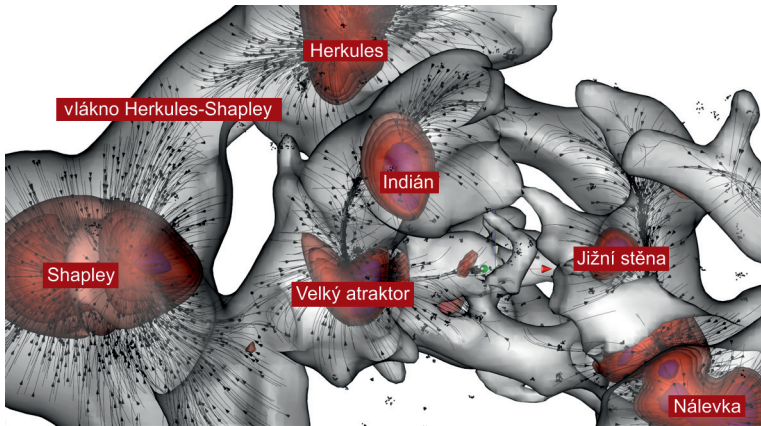
Obr. 14: Srážky galaxií. Snímky prolínajících se galaxií byly pořízeny Hubbleovým vesmírným dalekohledem. Galaxie při interakci ztrácejí svá spirální ramena a stánou se eliptickými galaxiemi. Zdroj: NASA, ESA, Hubble Heritage Team.



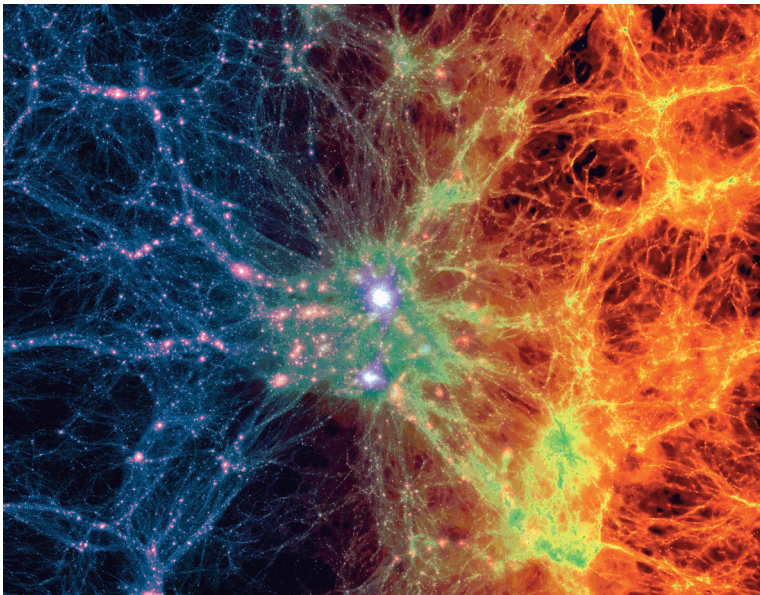
Obr. 15: Výřez z Hubbleova ultrahlubokého pole (HUDF). HUDF je snímek malého výseku oblohy v souhvězdí Pece, který vznikl v roce 2004 složením 800 snímků. Na celém snímku HUDF je zhruba 10 000 galaxií v různých vývojových stádiích.
Zdroj: NASA, ESA, Hubble Heritage Team.



Obr. 16: Šestice kup galaxií vyfotografovaná ve vizuálním oboru Hubblovým dalekohledem. Růžovou barvou jsou zobrazeny rentgenové emise zachycené observatoří Chandra. Modrou barvou je kódováno rozložení temné hmoty dopočtené z gravitačního čočkování. Zdroj: NASA, ESA, STScI, CXC.



Obr. 17: Výřez části rychlostní sítě velkorozměrových struktur v našem okolí. Dobře patrné jsou Shapleyho koncentrace, Jižní stěna, Velký atraktor a nadkupy Herkules a Indián. Místní skupina galaxií se nachází v počátku modrozelenočervené souřadnicové sítě (šipky) uprostřed zobrazení. Výřez zabírá oblast velikou zhruba $1,2 \times 10^9$ ly na šířku a 700×10^6 ly na výšku. Zdroj: IRFU.



Obr. 18: Illustris. Část struktur vzniklých v numerické simulaci vývoje vesmíru Illustris. Simulace probíhala na superpočítačích Curie (CEA, Francie) a SuperMUC (Leibniztovo výpočetní středisko, Německo). Zdroj: Illustris.

10. Na lovu reliktních gravitačních vln

*„Je mnohem lepší brát vesmír takový, jaký doopravdy je,
než setrvávat v bludu jakkoliv uspokojujícím a uklidňujícím.“*

Carl Sagan, americký astrofyzik

Kdykoli se objeví nová teorie, fyzikové mají ve zvyku testovat, zda dává také řešení v podobě vln. Vlny totiž považujeme za cosi velmi přirozeného. Když James Clerk Maxwell v roce 1873 zformuloval na základě tehdy dostupných experimentálních faktů klasickou elektrodynamiku, samozřejmě zkoumal, zda se elektrická a magnetická pole mohou šířit jako vlnění. Nebylo překvapivé, že ano a že světlo je jen malou částí elektromagnetického vlnění. Ale ostatní předpovědi tehdejší fyzikální svět znepokojily: elektromagnetické vlnění se mohlo podle teorie šířit prázdnotou – tedy vakuem – a jeho rychlost se s ostatními pohyby neskládala. Nakonec vše vedlo ke vzniku Einsteinovy speciální a později také obecné teorie relativity.

Už víme, že obecná relativita popisuje gravitaci pomocí zakřiveného prostoru a času. Hned v roce 1916 Albert Einstein zkoumal, zda se čas a prostor mohou rozvlnit. Závěr byl kladný. Ne každé těleso to ale dokáže. Rotující kulička nikdy čas a prostor nerozvlní. Dokonce nestačí ani elipsoid rotující kolem hlavní osy. Dvě hvězdy obíhající kolem sebe to už ale dokáží. Vzniknou kolem nich vlny podobné jako po vhození kamene do rybníka. Nevlní se ovšem nějaké materiální prostředí, ale prostor a čas sám. Pokud bychom měli v blízkosti rotující dvojhvězdy hodinky, šly by v pravidelném rytmu chvílku

rychleji a chvilku zase pomaleji. A také by se smršťovaly a natahovaly. Předměty na gravitační vlny reagují zajímavým způsobem, pokud se v jednom směru právě natahují, tak se v kolmém směru naopak smršťují. Představme si gymnastickou obruč, takovou tu, jak s ní baletky krouží kolem boků. Když ji v jednom směru stlačíme, v druhém se natáhne. A přesně tak reagují předměty na průchod gravitační vlny, třeba i hodinky, se kterými právě experimentujeme v blízkosti dvojhvězdy. Změny rozměrů a chodu času jsou velmi malé a jejich detekce je skutečným uměním. První zachycené gravitační vlny (v roce 2015) byly tak slabé, že by metrová tyč při jejich průchodu změnila svůj rozměr jen o 10^{-21} metru, tj. o jedenáct řádů méně, než je rozměr atomu. I proto trvalo celé století, než byly gravitační vlny polapeny. Gravitační vlny se pohybují od svého zdroje rychlostí šíření informace, tedy stejnou rychlostí, jakou se pohybuje světlo ve vakuu.

Musíme si ale dávat pozor, souslovím gravitační vlny se označují ve fyzice dvě různé věci. Jednak je to periodické zakřivení času a prostoru, o kterém bude řeč v této kapitole, a stejně označujeme i vlny kapaliny nacházející se v tíhovém poli, třeba obyčejné vlny na rybníku nebo na moři.

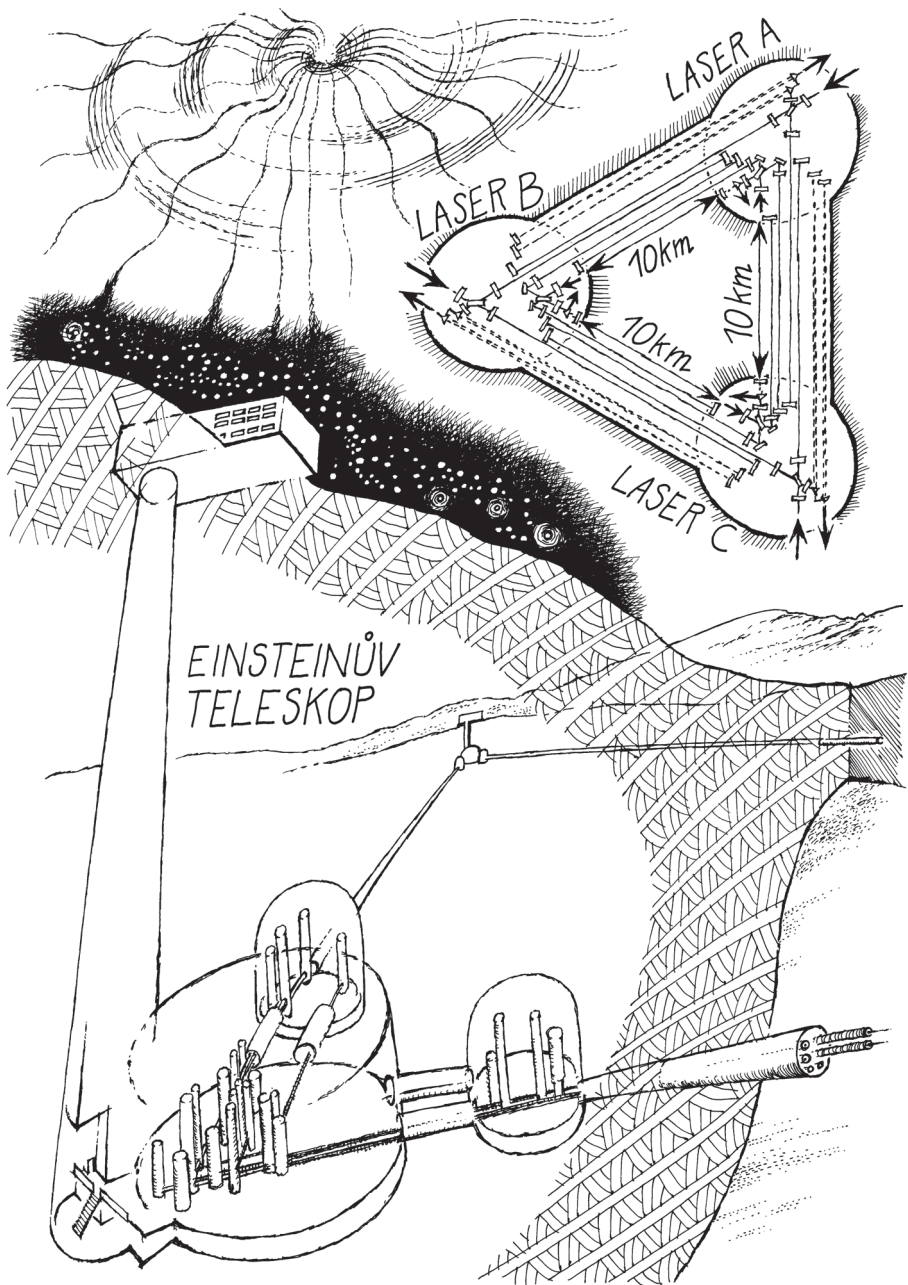
Dlouhá cesta

První snahy o detekci gravitačních vln pocházejí už z 60. let 20. století. Americký fyzik Joseph Weber se je pokoušel zachytit pomocí rezonančních válců, které se měly při průchodu gravitačních vln rozkmitat a piezoelektrické snímače na jejich bocích by v takovém případě signál zachytily. Jeden z válců byl umístěn na Marylandské univerzitě v blízkosti Washingtonu, D. C. a druhý v Argonské národní laboratoři v blízkosti Chicaga. Vzdálenost válců byla asi 1 000 km. To proto, aby byla případná detekce gravitačních vln potvrzena z nezávislého místa a byla vyloučena případná lokální porucha. Válce se chovaly jako oscilátory naladěné na frekvenci 1 660 Hz. Byly vyrobeny z hliníku, jejich hmotnost byla 1,4 tuny, průměr měly 66 cm a délku 153 cm. Každý válec byl zavěšen ve vakuu na kovovém vlákně a mechanicky oddělen od okolí. První

pokusy Weber konal od roku 1966, jeho zařízení bylo ale o pět řádů méně citlivé, než by bylo k detekci gravitačních vln třeba.

Velké naděje byly vkládány od 90. let do interferenčních detektorů. Laserový svazek je v nich rozdělen do dvou kolmých směrů, prochází tubusy ke koncovým zrcadlům zavěšeným na vláknech. Od nich se paprsky odrazí a opět se sejdou v detektoru, v němž vytvoří díky fázovému posunu interferenční obrazec, který se v případě příchodu gravitační vlny bude periodicky měnit. Výhoda takového uspořádání je hned dvojí: 1) když se jedno rameno zkracuje, druhé se v ten samý okamžik prodlužuje, což maximalizuje fázový posun obou vln; 2) v každém rameni může být ještě polopropustné zrcadlo, takže se svazek mnohonásobně odráží mezi koncovým a polopropustným zrcadlem, což výrazně zvýší citlivost detekce. Detektory tohoto typu jsou podrobněji popsány v knížce „*Astronomie a fyzika – Souvislosti*“. Úspěch se dostavil 14. září 2015 – téměř přesně sto let od zveřejnění obecné relativity – kdy americký detektor LIGO zachytil gravitační vlny od dvou splývajících černých děr středních hmotností. V současnosti existují tři takto velké detektory gravitačních vln: americký LIGO má dva přístroje s čtyřkilometrovými rameny, vzdálené od sebe 3 000 kilometrů, a v Evropě je ve střední Itálii detektor Virgo s tříkilometrovými rameny. V Japonsku se staví podzemní chlazený detektor KAGRA s tříkilometrovými rameny a v Evropě se uvažuje o podzemním desetikilometrovém Einsteinově teleskopu se třemi rameny (ve tvaru trojúhelníku), který by měl být postaven v nizozemské provincii Limburg někdy kolem roku 2028. Umístění detektorů do podzemí redukuje seismický šum a chlazení redukuje šum tepelný.

Detektory tohoto typu mají maximální citlivost ve stovkách hertzů a mohou detekovat gravitační vlny z různých binárních systémů. Pro detekci reliktních gravitačních vln, které by měly vznikat v průběhu inflační fáze nebo obecně při vzniku vesmíru, bude nutné konstruovat detektory pro mnohem delší vlnové délky, tedy s výrazně delšími rameny. Takové detektory je možné stavět jen ve vesmíru. Další možností je využít detekci jiného typu, například sledování změn fází pulzarů pomocí radioteleskopických sítí.



Obří interferometry

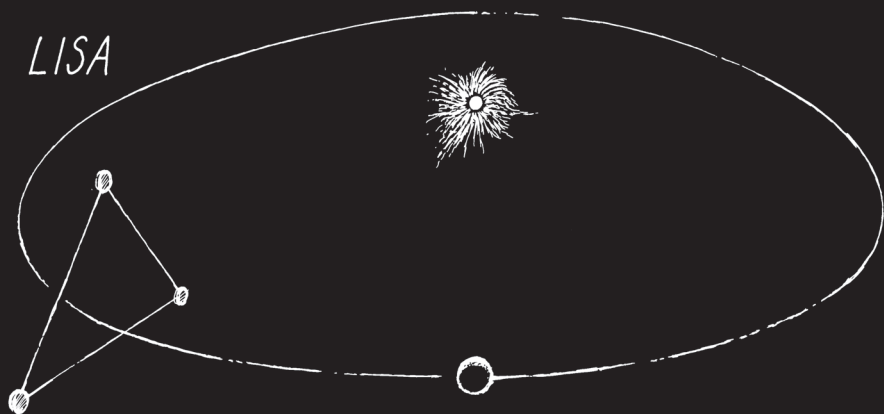
O stavbě obřího interferometru ve vesmíru se uvažuje už od konce 20. století. Projekt tří sond, které na sebe budou svítit laserovým paprskem na vzdálenost milionů kilometrů a zjišťovat aktuální polohu odrazné krychle – srdce sondy pohupující se na gravitačních vlnách – dostal název LISA, což je zkratka z anglického „*Laser Interferometer Space Antenna*“. Původní termín vypuštění byl rok 2016, ale společný projekt americké NASA a evropské vesmírné agentury ESA se potýkal s mnoha problémy, jak finančního, tak technického rázu. Američané z něho v roce 2011 z finančních důvodů odstoupili, projekt měnil jména, délku ramen i termín vypuštění a už se zdálo, že je odsouzen k zániku. Víru v úspěch mu vlila do žil evropská sonda LISA Pathfinder, která startovala v prosinci 2015. LISA Pathfinder je jakýsi předskokan mise, který ověřil, že základní koncepce je správná, že dokážeme nejen dostatečně jemně manévrovat se sondou tohoto typu, ale i detekovat polohu odrazné krychle. Po ohlášení objevu gravitačních vln získaly události docela rychlý spád a v roce 2017 byl projekt obřího interferometru LISA schválen. Termín vypuštění je rok 2034.

Jaká je tedy současná představa obřího interferometru LISA? Tři identické sondy poletí ve formaci trojúhelníku na samostatné dráze kolem Slunce, a to 20° za Zemí. Budou na sebe svítit infračervenými lasery na vzdálenost 2,5 milionů kilometrů. Laserové světlo se bude odrážet od vznášejících se krychlí ze slitiny zlata a platiny o hraně 46 milimetrů a hmotnosti 2 kilogramy. V každé sondě budou dvě takové krychle volně letící prostorem a pohupující se na gravitačních vlnách. Kolem testovací krychle bude klec s elektronikou, která bude sledovat její polohu vůči kleci. V ideálním případě by se krychle pohupovala na dráze spolu se sondou i klecí a stále plula v jejím středu. Jenže na sondu působí z venku mnoho negravitačních sil, například tlak slunečního záření, tlak slunečního větru, síly od nesymetrického tepelného vyzařování sondy i další. Jakmile se krychle přiblíží k měřicí kleci, musí sonda začít manévrovat tak, aby se krychle stále vznášela přesně uprostřed klece. Od jejích stěn budou krychli dělit pouhé dva milimetry.

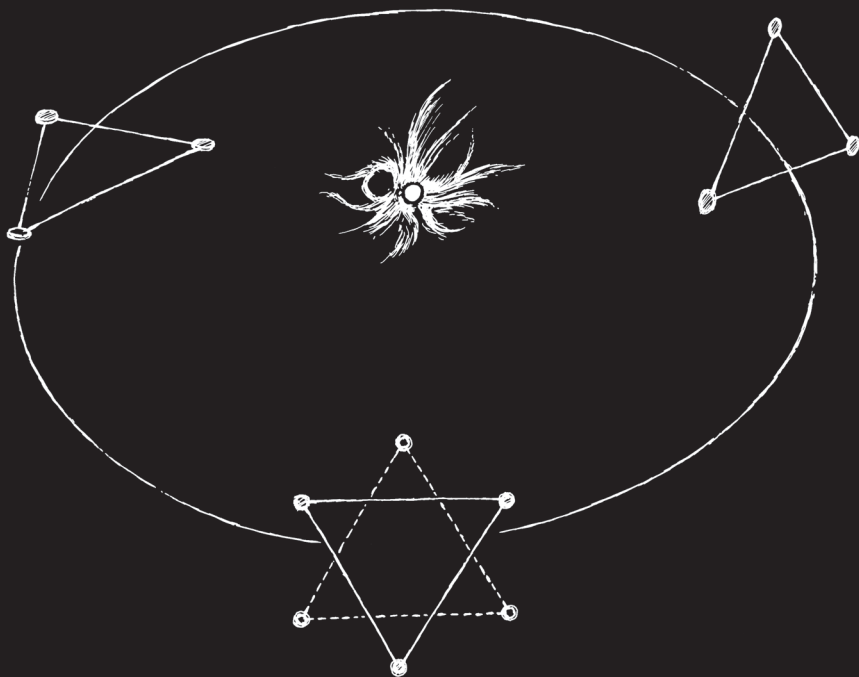
K dalšímu vybavení patří optická lavice zpracovávající signál. Sondy budou mít pro sledování paprsku ze zbývajících sond dva dalekohledy o průměru 30 centimetrů. Z výkonu 2 wattů dodávaného laserem dopadne na krychličku sousední sondy pouhých 700 pikowattů, tj. 35 miliardtin procenta. Manévrování bude zajištěno mikrotryskami vypouštějícími jen malé množství plynu. Nejjemnější navigaci budou mít na starosti koloidální mikrotrysky, z nichž budou unikat nabitě kapičky ovládané elektrickým polem. Zpětný ráz nepatrně pohne sondou v kýženém směru. Samovolné nabíjení krychlí bude deaktivováno ultrafialovým zářením. Detektor LISA (viz barevná příloha, obr. 4) bude schopen zachytit gravitační vlny vzniklé pádem hvězdy do velké černé díry, gravitační vlny emitované dvojicemi bílých trpaslíků, šum pozadí dvojhvězd v naší Galaxii a samozřejmě gravitační vlny emitované vzájemným oběhem dvojic obřích černých děr. LISA se dostane na hranici parametrů pro detekci reliktních gravitačních vln, při troše štěstí by se to mohlo podařit, ale budme raději skeptičtí, případná detekce nás pak může jen příjemně překvapit.

Pokud bude projekt LISA fungovat jak má, bude na oběžnou dráhu kolem Slunce v následujících letech vypuštěno dokonce 12 identických sond svítících na sebe lasery. Název projektu je BBO (*Big Bang Observer, Pozorovatel Velkého třesku*). Vzdálenosti sond budou tentokrát menší, „pouhých“ 50 000 kilometrů, požadovaná citlivost bude zajištěna větším množstvím sond. Šum detekovaného signálu by měl být pouhé procento šumu detektoru LISA. Detektor BBO bude složen ze čtyř trojúhelníkových formací. Jedna poletí kolem Slunce v rovině ekliptiky (oběžné dráhy Země kolem Slunce), druhá bude na ekliptiku kolmá a zbylé dvě trojúhelníkové formace budou složeny do šestiúhelníku. Budou tak schopny snímat stochastické signály očekávané u reliktních gravitačních vln. Ty budou hlavním cílem detektoru BBO, který by měl mít dostatečné rozlišení, citlivost i rozsah vlnových délek pro jejich zachycení. Budoucnost interferometrických detektorů je tedy naplánována na desetiletí dopředu a máme se na co těšit. Případná detekce reliktních gravitačních vln by poprvé umožnila seriózně uvažovat o procesech při vzniku vesmíru a neopírat se o pouhé vize a fantazie.

LISA



BBO

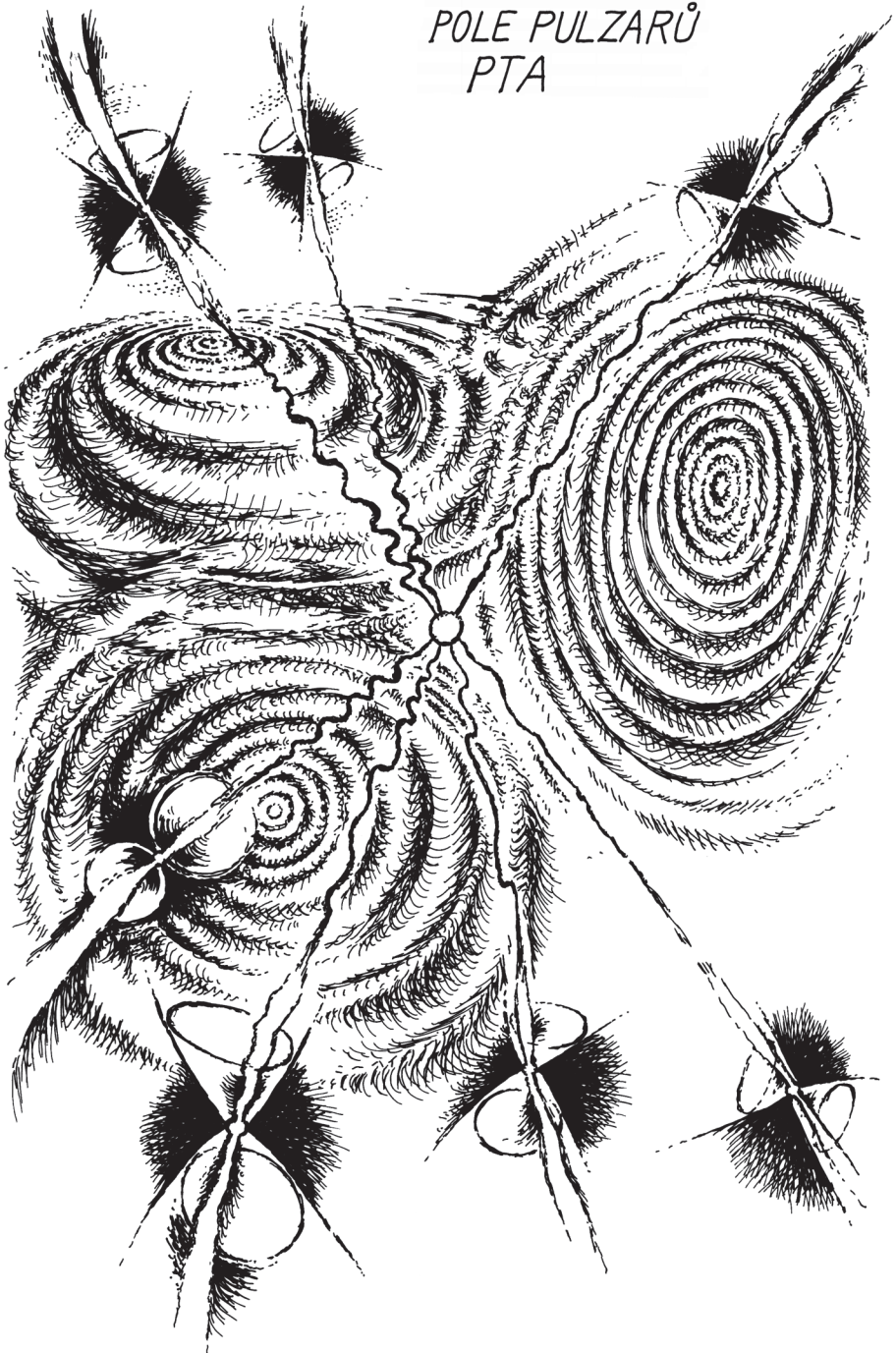


Radioteleskopické sítě

Pokud chceme pozorovat extrémně dlouhé vlnové délky, potřebujeme zařízení s mimořádně velkými rozměry. Naše civilizace ale zatím nedisponuje takovými prostředky, aby postavila detektor velký jako Sluneční soustava nebo dokonce jako celá Galaxie. Přesto se ale jedna možnost naskytá. V naší Galaxii existuje řada pulzarů – neutronových hvězd, jejichž osa rotace není totožná s osou magnetického pole. V magnetických pólech se hromadí nabitě částice a vytvářejí tam svítící skvrny. Jak objekt rotuje, svítící skvrna pravidelně osvětluje pozorovatele silně polarizovaným elektromagnetickým zářením, které vzniká při krouživém pohybu elektronů a dalších částic v magnetickém poli neutronové hvězdy. K pozorovateli tak přicházejí pravidelné impulzy, které daly pulzarům jejich jméno. Objevila je severoirská astronomka Jocelyn Bellová (dnes Burnellová) v roce 1967. Tehdy byla doktorandkou pod vedením britského radioastronoma Anthony Hewishe. Hewish za objev pulzarů nakonec získal Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1974. Šlo o jeden z více případů diskreditace Nobelovy ceny, která není vždy udělována skutečným objevitelům. Jocelyn Bellová-Burnellová ale získala velké množství jiných významných ocenění. A jedna dnes udělovaná medaile je dokonce spojena s jejím jménem: anglický *Institute of Physics* (IOP) uděluje od roku 2016 mladým úspěšným ženám ve fyzice medaili Jocelyny Bellové-Burnellové.

Pulzary vysílají natolik pravidelné pulzy, že představují téměř ideální hodiny rozmístěné napříč celou Galaxií. Signál pulzarů spadá většinou do rádiového oboru, a tak je možné je pozorovat radioteleskopy. Obří radioteleskopické sítě mají vynikající prostorové i časové rozlišení a jsou schopné detekovat i malá fázová posunutí signálu pulzarů přicházejícího z různých koutů Galaxie. Taková fázová posunutí vyvolává i průchod signálu přes gravitační vlnu. Matematickou analýzou signálu většího množství sledovaných pulzarů lze zrekonstruovat informace o gravitačních vlnách, kterými signál procházel. Nemusíme tedy stavět detektor veliký jako Galaxie. Sama příroda nám po celé Galaxii rozmístila ideální zdroje časového signálu. Stačí jen rekonstruovat deformace časoprostoru z fázových posunutí.

POLE PULZARŮ
PTA



Tato metoda detekce gravitačních vln se nazývá PTA (*Pulsar Timing Array, Pole pro měření časového signálu pulzarů*). První testy proběhly na australské síti radioteleskopů Parkes už v roce 2005. Australské radioteleskopy stály u zrodu radioastronomie a zajišťovaly v době programu Apollo spojení s posádkami letícími k Měsíci a zpět. Pozadu není ani evropská radioastronomie, metoda PTA se testuje na síti radioteleskopů, jimž vévodí stometrový Effelsberg na západě Německa, dalšími členy sítě jsou Lovellův radioteleskop v Jodrell Bank (jižně od anglického Manchesteru) s průměrem pohyblivé antény 76 metrů a radioteleskopy v nizozemském Westerborku a francouzském Nançay. Američané ověřují metodu PTA v Severoamerické nanohertzové observatoři, do které patří slavný radioteleskop Arecibo (nepohyblivá mísa o průměru 305 metrů vyplňující údolí na ostrově Portorico) a pohyblivý radioteleskop v Green Banku s rozměrem mísy 100×110 metrů.

Od roku 2018 je ve stavbě unikátní radioteleskopické pole SKA (*Square Kilometer Array*) – pole radioteleskopů, které bude mít celkovou sběrnou plochu jeden kilometr čtvereční. Půjde o tisíce antén tří různých typů – klasických mís, dipólových antén a radiometrů. Pole se staví hned dvě. Jedno v Austrálii a druhé v Jihoafrické republice. Ani v jedné lokalitě se nezačínalo na zelené louce, jak v Austrálii, tak v Africe už malá radioteleskopická pole byla, takže je na co navázat. Centrální část bude mít v průměru deset kilometrů a bude v ní polovina celé sběrné plochy. Z centrální části budou vybíhat další radioteleskopy po pěti spirálách až do vzdálenosti 3 000 kilometrů od centra. Spirály jsou voleny proto, aby se plynule měnily směry mezi různými dvojicemi radioteleskopů. Je jasné, že tak obří stavbu není možné uskutečnit v rámci jedné jediné země. Nejbližší stanice v australské části bude na Novém Zélandu. Nejbližší stanice v jihoafrické části budou v Botswaně, Ghaně, Keni, Namíbii, Zambii, na Madagaskaru a na Mauritiu. Ředitelství celého projektu je v Evropě, v anglickém Jodrell Bank, kde je umístěn Lovellův radioteleskop. Gigantická stavba je plánována na desetiletí, ale do roku 2020 by mělo být postaveno 500 antén v Austrálii a 200 v Jižní Africe. Antény se postupně zapojují do provozu, takže v současnosti jsou části pole SKA už funkční.

Tak nákladná a obrovská radioteleskopická síť umožní vědecký výzkum v oblastech nedosažitelných ostatními současnými přístroji. SKA by mělo přímo pozorovat první vznikající hvězdy a provádět mapování mezihvězdného vodíku v miliardách galaxií – výsledkem by měly být nejen informace o vývoji galaxií, ale i monitorování vzniku velkorozměrových struktur a přesnější popis zrychlené expanze vesmíru. Nebude samozřejmě chybět ani výzkum temné hmoty a její mapování z gravitačního čočkování elektromagnetického signálu velmi vzdálených objektů. Dalším cílem je pokusit se zjistit, za jakých podmínek ve vesmíru vznikají magnetická pole. Z hlediska kosmologie budou ale nejdůležitější pokusy o zachycení signálu reliktních gravitačních vln metodou PTA, tedy sledováním fázového posunu signálu z pulzarů v naší Galaxii. SKA jako jediný přístroj současnosti má parametry zcela dostačující pro tuto detekci a doufejme, že tato unikátní radioteleskopická síť bude úspěšná.

Podpisy reliktních gravitačních vln

Při pozorování neznámých jevů jsou vždy důležitá nezávislá pozorování konaná různými metodami. U reliktních gravitačních vln mají astronomové v hledáčku hned tři metody. První z nich je založena na přímé detekci obřími interferometry (LISA, BBO), druhá využívá fázový posun signálu pulzarů v naší Galaxii (radioteleskopické pole SKA) a třetí se pokusí hledat podpis reliktních gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. Pojdme si nyní vysvětlit podstatu této třetí nezávislé metody.

Reliktní gravitační vlny, které vznikly na samém počátku vesmíru, se šíří prostředím Velkého třesku a vytvářejí periodická zhuštění prostoru. Všudypřítomné elektromagnetické vlny budou mít v místech zředění delší vlnovou délku než v místech zhuštění. Na konci Velkého třesku tyto vlny dopadají na poslední volné elektrony a rozkmitají je. Z různých směrů přicházejí elektromagnetické vlny různých vlnových délek, proto začne elektron současně kmitat na několika frekvencích. Je to podobné jako skládání kmitů, které jsme se učili ve škole. Kmitající elektron převezme energii vln a sám vysílá do okolí vlastní elektromagnetické vlnění. Díky kmitům na

více frekvencích dochází k charakteristické polarizaci tohoto elektromagnetického signálu, který není ničím jiným než reliktním zářením. V reliktním záření by proto měl existovat otisk reliktních gravitačních vln v podobě charakteristické polarizace, tj. bude existovat určitá preferovaná rovina kmitů elektrického pole.

Věc není ale tak jednoduchá. Teplejší a chladnější oblasti v okolí elektronu také vysílají elektromagnetický signál různých frekvencí a opět způsobí polarizaci reliktního záření vysílaného elektrony. Naštěstí má polarizace reliktního záření pocházející z teplotních fluktuací zcela jiný charakter než polarizace vzniklá přítomností gravitačních vln. V okolí teplotních či hustotních maxim vytváří postupně se měnící rovina polarizace kružnice, v okolí minim míří radiálně (viz obrázek), hovoříme o tzv. E módu. U gravitačních vln je tomu jinak: v oblastech zředěného i zkomprimovaného prostoru (vlivem vlny) vytvoří rovina polarizace konfiguraci podobnou skloněným bodlinám ježka, hovoříme o tzv. B módu. Současná výpočetní technika dokáže snadno od sebe oba módy oddělit.

Třetí nezávislá metoda tedy spočívá v hledání otisku gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. Malou chvíli se zdálo, že data z detektoru reliktního záření BICEP 2 na jižním pólu v sobě kýžený signál mají. Nakonec ale analýza polarizace reliktního záření provedená z dat sondy Planck ukázala, že tuto polarizaci způsobil magnetický prach v naší Galaxii. Vše špatné bylo pro něco dobré. Nebyl sice zachycen podpis reliktních gravitačních vln, ale naměřená data umožnila pořídit mapy magnetického pole v naší Galaxii.

Zachycení reliktních gravitačních vln je jen otázkou času. A je jedno, zda to budou první obří interferometry, radioteleskopická pole nebo detektory sledující polarizaci reliktního záření. Pokud se jednou v budoucnosti podaří udělat spektrum reliktních gravitačních vln (závislost intenzity na vlnové délce), bude to významný krok v naší snaze přijít na kloub tomu, jak vznikl vesmír. Každý z modelů vzniku vesmíru totiž předpovídá jiné spektrum reliktních gravitačních vln. Ty modely, které nebudou ve shodě s naměřeným spektrem, bude možné okamžitě vyloučit z našich představ.

E MÓD
TEPLOTNÍ
A HUSTOTNÍ
FLUKTUACE



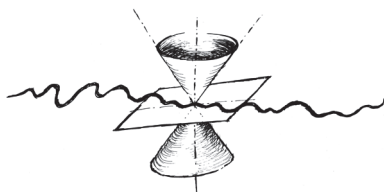
B MÓD
GRAVITAČNÍ
VLNY



Víte, že

- Víte, že Argonská národní laboratoř ve státě Illinois byla vůbec první americkou národní laboratoří? Byla založena v roce 1946, kdy vznikala jako součást projektu Manhattan. Je provozována Chicagskou univerzitou, Enrico Fermi zde zprovoznil první jaderný reaktor a Joseph Weber zde jako první hledal gravitační vlny.
- Víte, že Joseph Weber u svých válců jakýsi signál skutečně zaznamenal? Publikovaný článek byl ale podroben zdrcující kritice kolegů, kteří v něm našli zásadní chyby v interpretaci naměřených dat. Velký objev se tak nakonec nekonal.
- Víte, že radioteleskopické sítě také umožňují zobrazit těsné okolí černých děr? V roce 2019 se podařilo síti EHT (*Event Horizon Telescope*) vyfotografovat vnitřní svítící část akrečního disku obří černé díry ve středu galaxie M87 (kupa v Panně), jehož rozměr je 42 miliontin obloukové vteřiny.
- Víte, že se radioteleskopické pole, které se stalo základem SKA v Jižní Africe, jmenuje *MeerKAT*? Název je slovní hříčkou, KAT znamená *Karoo Array Telescope* (podle oblasti Karoo, kde stavba probíhá) a slovo „*meerkat*“ je anglické pojmenování pro malou šelmu, surikatu, žijící hojně v této oblasti.

Poučení na závěr: *Není vlna jako vlna. Elektromagnetické vlny mohou přinášet užitek i zkázu. Gravitační vlny jsou nositeli důležitého poselství o procesech ve vesmíru, zatím s nimi ale jen lehce koketujeme. Módní vlny strhávají emoce, ale pro poznání světa nejsou příliš důležité. Vlnám tsunami, nenávisti a zloby se vyhněte raději obloukem.*



11. Absolutní horko

*„Střed výsočný je dostupný jen mimo stín, kde bloudí čin.
Je blahý pramen vonných krás, jenž do šira se prostírá.
Ta pustina, ráj tajemna, je mimo prostor, mimo čas.“*

Mistr Eckhart, středověký filosof

Pomalou ale jistě se blížíme z oblasti celkem jasných faktů do oblasti bohaté lidské fantazie. Tato kapitola bude první, v níž nemusí být nic z toho, co se zde píše, pravda. Jde o naše představy, jak probíhal úplný počátek vesmíru a takové představy jsou nutně poznamenány našimi neznalostmi. Už jsme se dotkli toho, že v minulosti jsme se v názorech, jak funguje vesmír, zatím vždy mýlili. Je proto dost pravděpodobné, že se budeme mýlit i tentokrát. Bylo by ale obrovskou chybou o věcech nepřemýšlet a nepokoušet se jim přijít na kloub. Jsme v roli neandrtálce, který si opéká ulovenou zvěř na ohni a přemýšlí o tom, co to takový oheň je. Hranice ověřitelnosti našich představ je kdesi v čase 10^{-13} sekundy, kdy byl ve vesmíru takový stav látky, jaký dnes dokážeme připravit na největších urychlovačích světa. V časech kratších jsou na mapě našeho poznání bílá místa.

Naše tápání je krásně vidět i na posunu vnímání Velkého třesku v posledních desetiletích. Dříve jsme za Velký třesk označovali počáteční singularitu, okamžik vzniku vesmíru. Dnes víme, že kvantové procesy takové singularitě zabrání. V současnosti nazýváme Velkým třeskem celé plazmatické období, tj. prvních 400 tisíc roků. Tento posun našeho chápání vzniku světa byl v některých médiích oznamován palcovými titulky „Velký třesk neexistoval, vědci se mýlili!“ Snaha těchto periodik zaujmout čtenáře za každou cenu je samozřejmě na prvním místě a obsah sdělení je až druhotný.

Před několika desítkami let jsme také často tvrdili: otázka, co bylo před vesmírem, nemá hlubší smysl. Nebyl-li vesmír, nebyli tu ani

pozorovatelé, ani látka, která spoluvytváří prostor a čas. Slovo „před“ nemá žádný smysl. Stephen Hawking rád odpovídal v té době na otázku „*Co bylo před vesmírem?*“ slovy: „*Bůh připravoval peklo pro lidi, kteří se na to budou ptát!*“ Autorem tohoto výroku ale není Hawking, je mnohem staršího data, podobně znějící myšlenka je doložitelně připisována už Augustinovi z Hippony (svatý Augustin), biskupovi římského císařství z přelomu čtvrtého a pátého století. Dnes se domníváme, že ta otázka jakýsi smysl má. Z hlediska obecné relativity skutečně bez těles neexistuje prostor ani čas. Ale v extrémně hustém počátečním období platí zejména kvantové zákony a možná proběhla inflační fáze, která je skutečným počátkem vesmíru. Pro kvantové vlastnosti přírody jsou charakteristické divoké fluktuace, které by zde v předinflační fázi měly být. Toto období dnes označujeme indiferentním výrazem *kvantová pěna*. Příliš netušíme, jak by taková kvantová pěna měla vypadat a zda v ní vůbec měl pojem čas smysl. Nicméně už netvrdíme, že před počátkem vesmíru nebylo nic, a to je další velký posun v našem chápání počátku světa. Z těchto dvou ukázek (význam pojmu Velký třesk, smysl sousloví „před vesmírem“) je patrné, jak dramaticky se naše názory na vznik světa v poslední době změnily. V celé této kapitole se budeme pohybovat za hranicí standardního modelu elementárních částic i za hranicí našeho poznání. Berme to jako výlet do říše fantazie, kde je dovoleno vše. Jen budoucnost ukáže, zda alespoň některé naše fantazie a sny byly vzdáleným odrazem skutečného světa.

Hmota a antihmota

Všude, kam se ve vesmíru podíváme, spatříme hvězdy, mlhoviny a galaxie tvořené hmotou. Přitom dobře víme, že existují i částice antihmoty, které mají všechny kvantové náboje opačné (jedním z takových nábojů je elektrický náboj). Tu a tam přiletí s kosmickým zářením antiproton. V sekundárních sprškách kosmického záření, které vznikají při interakci primární částice s horní vrstvou atmosféry, se hojně objevují pozitrony i další antičástice. Všude tam, kde je nadbytek energie, vzniká mnoho párů částice-antičástice – zejména v aktivních galaktických jádrech nebo v blízkosti černých

děř a neutronových hvězd. Nikdy jsme ale v kosmickém zářením nezaznamenali celý antiatom, byť toho nejjednoduššího prvku vodíku. Vše kolem nás je z hmoty. Nutně se vkrádají otázky: Proč zde není antihmota? A pokud v minulosti ve vesmíru byla, kam se poděla?

Pokud se spolu potká částice hmoty s částicí antihmoty, anihilují, tj. jejich hmotnost se přemění na elektromagnetické záření. Tento fakt nás vede k představě, že setká-li se někde těleso z hmoty s tělesem z antihmoty, dojde k obrovskému výbuchu doprovázenému gigantickým impulzem elektromagnetického záření. Tak to ale funguje nanejvýš ve vědeckofantastické literatuře. Švédský fyzik Hannes Alfvén ukázal, že na styčné ploše oblastí hmoty a antihmoty skutečně budou jednotlivé částice a antičástice anihilovat a vznikne přitom elektromagnetické záření. Elektromagnetické pole je ale nositelem energie, hybnosti a momentu hybnosti. Elektromagnetické záření ze Slunce dokáže svým tlakem formovat tvar a směr kometárních ohonů i pohánět sluneční plachetnice napříč meziplanetárním prostorem. Elektromagnetické záření vznikající na styku hmoty a antihmoty vytvoří izolující vrstvu, která zabrání objemové explozi. Elektromagnetické záření samozřejmě z dotyčné oblasti odletí, bude ale nahrazeno novými fotony z další anihilace, a ty dalšími fotony atd. Celý anihilační proces bude probíhat plošně a nikoli objemově. A to je výrazný rozdíl. Žádná grandiózní exploze se nekoná, jen velmi pomalé „doutnání“ na styčné ploše hmoty a antihmoty.

Je to podobné, jako když kapka vody poskakuje na rozpálené plotně. Pod kapkou neustále vzniká vrstva páry, která zabrání jejímu okamžitému odpaření. Tento jev poprvé popsal německý lékař a teolog Johann Gottlob Leidenfrost v roce 1756. Proto mu dnes říkáme Leidenfrostův jev. K Leidenfrostovu jevu dochází jen v určitém intervalu teplot, pro vodní kapky jde o teploty od přibližně 250 °C do 320 °C.

Když Hannes Alfvén zjistil, že díky Leidenfrostovu jevu bude anihilace probíhat jen plošně, zformuloval odvážnou myšlenku: Co když žijeme v oblasti vesmíru, který je z hmoty, ale jinde ve vesmíru jsou podobná místa z antihmoty – antihvězdy, antigalaxie nebo i antilidé.



Takové oblasti hmoty a antihmoty by klidně mohly koexistovat a na styčných plochách by velmi pomalu probíhaly anihilační procesy.

Poznávání je postupným hledáním pravdy. Největší myslitelé všech dob přicházeli s řadou převratných myšlenek a jen některé z nich nakonec prošly testem pravdivosti – zda jsou či nejsou v souladu s chováním okolního světa. Hannes Alfvén uspěl se svojí představou zamrzlého magnetického pole, která mu přinesla Nobelovu cenu za fyziku, ale nebyl úspěšný s představou vesmíru zaplněného hmotou i antihmotou. Anihilace elektronů a pozitronů na styčných plochách oblastí, při níž vznikají dva fotony, by nutně vedla k intenzivní čáře elektromagnetického záření s energií 511 kiloelektronvoltů a vlnovou délkou 2,4 pikometru (rentgenové záření). Taková čára ale nebyla ve vesmíru nikdy ve velkém pozorována. Výjimkou jsou oblasti kolem galaktických jader, černých děr a neutronových hvězd, kde anihilují pozitrony ze vznikajících elektronových-pozitronových párů.

Docházíme tak k závěru, že v našem vesmíru dnes skutečně převládá hmota, a proto se pokoušíme zjistit, proč k takové nesymetrii mezi hmotou a antihmotou ve vesmíru došlo.

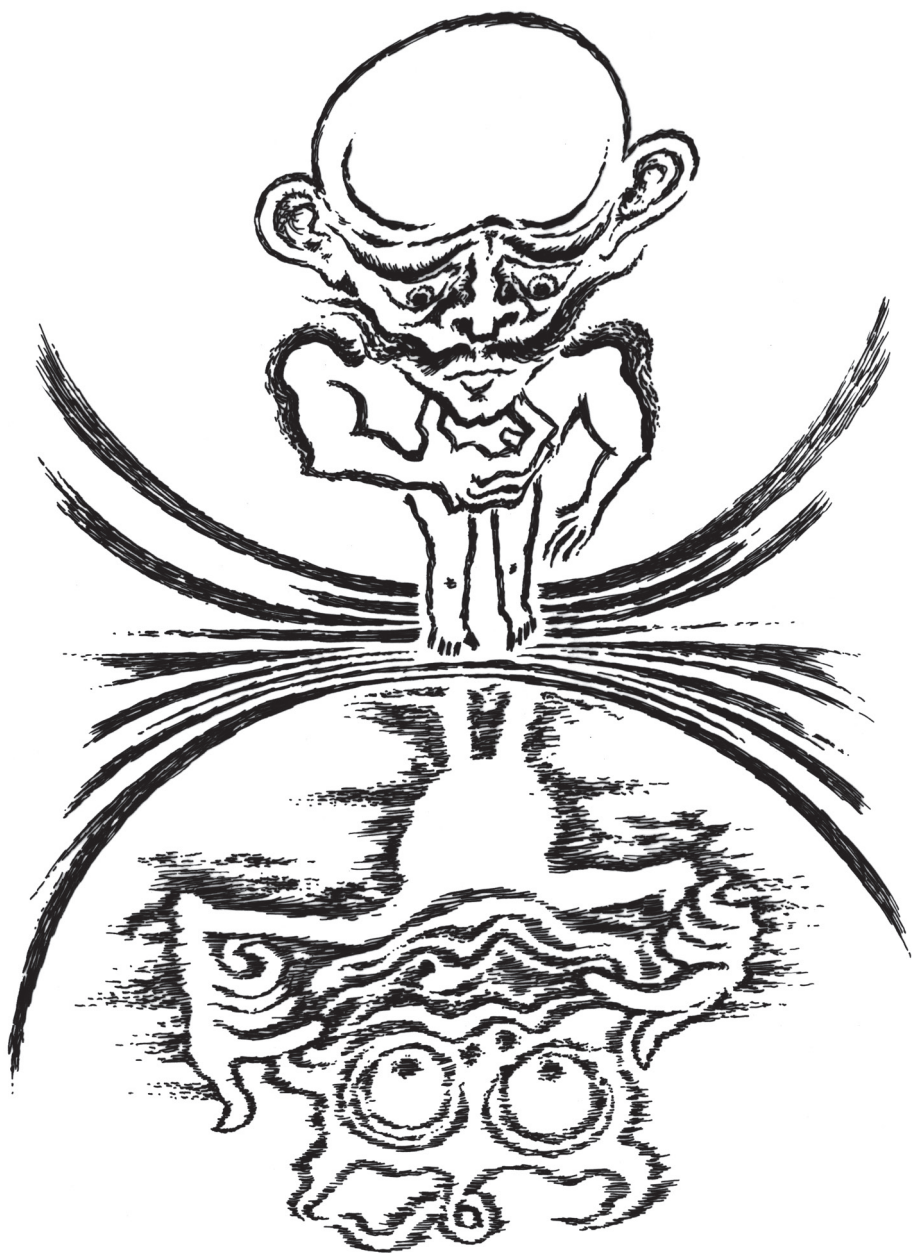
Na vlně symetrie

Pro další úvahy o kosmologii jsou velmi důležité přírodní symetrie. Při zkoumání geometrických symetrií tělesa různě otáčíme a ptáme se, jestli se jejich tvar nezměnil. Symetrie v přírodě zkoumáme pomocí experimentů. Představme si, že máme nějaký vytříbený experiment, v němž testujeme základní přírodní interakce. Budou tam kyvadélka podléhající gravitaci, elektromagnetickou interakci budeme testovat pomocí soustavy laserů, k nim přidáme několik magnetů a baterii, která pohání malý elektromotorek. Silnou interakci bude reprezentovat například miniaturní fúzní reaktor a slabou interakci zastoupí materiál podléhající beta rozpadu. Náš skvělý přístroj můžeme posouvat, otáčet a provádět s ním i další kejkle, abychom zjistili, co se změní, a co ne.

Postavme náš přístroj před zrcadlo a sledujme, jak vypadá jeho zrcadlový obraz. Přístroj v zrcadle není stejný jako ten před ním. Levotočivé závity jsou za zrcadlem pravotočivé a vše levé a pravé je vzájemně prohozené. Povoláme nejlepší konstruktéry na světě a necháme si od nich vyrobit kopii přístroje podle jeho zrcadlového obrazu. Budou se oba přístroje chovat stejně, nebo ne? Pokud ano, platí tzv. pravolevá neboli zrcadlová či paritní (P) symetrie. Poprvé se jí hlouběji teoreticky zabýval americký fyzik maďarského původu Eugen Wigner v roce 1927. Předpokládal, že v přírodě mohou probíhat i zrcadlově převrácené procesy stejnou měrou jako procesy původní.

Do roku 1956 fyzikové věřili v zrcadlovou symetrii. V roce 1956 byly ve sprškách kosmického záření pozorovány slabé rozpady částic (šlo o kaony a piony), které nezachovávaly pravolevou symetrii. Zrcadlový obraz rozpadu vypadal jinak než obraz původní. To by znamenalo, že pravý a levý směr není zcela rovnoprávný. K ověření tohoto důležitého tvrzení provedla čínsko-americká fyzička Chien Wu z Kolumbijské univerzity v roce 1957 experiment s izotopem kobaltu ^{60}Co . Kobalt reaguje na magnetické pole. Proto byl izotop ^{60}Co podroben působení velmi silného magnetického pole za nízkých teplot. Magnetické momenty atomů kobaltu se při nízké teplotě zorientovaly ve směru magnetického pole. Předem tedy byl znám směr magnetického momentu atomů kobaltu (ve směru vnějšího magnetického pole). Atom kobaltu podléhá beta rozpadu, při kterém se uvolňují elektrony (beta rozpad je způsoben slabou interakcí, stejně jako rozpad kaonů, pozorovaný v roce 1956). V experimentu se ukázalo, že ve směru orientace vnějšího pole vylétá méně elektronů než ve směru opačném. Narušení pravolevé symetrie ve slabé interakci tak bylo definitivně potvrzeno.

Dnes dokonce známe procesy, ve kterých pozorujeme stoprocentní narušení P symetrie. Neutrína se vyskytují jen v levotočivém provedení. Co to znamená? Představme si, že neutrína jsou malé projektily vystřelované z hlavně lovecké pušky. A v přírodě jsou hlavně jen s levotočivým drážkováním, které neutrína vždy roztočí (vlastní točivost je v tomto podobenství spin) jen doleva ve směru letu. Dobře tedy, ale co když v přírodě je symetrie taková, že všechna antineutrína jsou



pravotočivá (tj. antineutrinové antihlavně mají pravotočivé drážkování)? Pak by mohla platit symetrie, v níž zkonstruujeme přístroj podle zrcadlového obrazu z antihmoty. Takovou symetrii nazýváme CP symetrie. Písmenko C pochází z anglického slova *Charge* (náboj) a reprezentuje symetrii mezi hmotou a antihmotou.

Zkusme tedy po konstruktérech požadovat, aby zrcadlový obraz našeho přístroje vyrobili z antihmoty. Bude již nyní fungovat stroj stejně? Bohužel, v roce 1964 byly americkými fyziky Jamesem Croninem a Valem Fitchem pozorovány rozpady kaonů, které sice málo, ale přece jen narušovaly i CP symetrii. Za objev narušení CP symetrie získali James Cronin a Val Fitch Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1980.

V roce 1967 přišel sovětský teoretik Andrej Sacharov s myšlenkou, že by mírné narušení CP symetrie v silné interakci mohlo mít při vzniku vesmíru za následek převládnutí hmoty nad antihmotou. Sacharov stál mj. i u zrodu prvních tokamaků – zařízení pro uskutečnění termojaderné fúze v pozemských podmínkách. Od roku 1948 se aktivně podílel na vývoji sovětské vodíkové bomby. Sacharov se angažoval i politicky a vytrvale kritizoval sovětský režim. V roce 1975 získal Nobelovu cenu za mír, kterou mu sovětské vedení ale neumožnilo převzít.

Štěpení sil

Současná představa teoretiků je, že na počátku byla jedna jediná prainterakce, ze které se ty dnešní postupně oddělovaly. Nejprve to byla gravitace – snad někdy v čase kolem 10^{-43} sekundy, později interakce silná v čase kolem 10^{-35} sekundy a nakonec se rozdělila zbývající interakce na elektromagnetickou a slabou. K poslednímu štěpení došlo v čase 10^{-10} sekundy a je potvrzené experimentálně na největších urychlovačích.

Úplně první období vesmíru by tedy mělo nastat mezi jeho počátkem a oddělením gravitační interakce. Tady je nejistota našich představ největší, zatím ani netušíme, jaká je role gravitační interakce

v kvantové fyzice. Erik Verlinde tvrdí, že gravitace je pouhým statistickým projevem ostatních interakcí navenek (viz první kapitola „Krise síly“), jiní se domnívají, že klíčem k pochopení gravitace je mnohorozměrný svět s částicemi jako malými vibrujícími strunami, další si představují, že za gravitací stojí kvantové vlastnosti samotného času a prostoru. Snahy o popsání všech čtyř interakcí v rámci jediného celku se označují zkratkou TOE (*Theory of Everything, Teorie všeho*).

Ani o období mezi vznikem gravitace a oddělením silné interakce toho příliš nevíme. Snad by zde mohly existovat částice, které označujeme X a Y. Dokáží přeměňovat kvarky na leptony a naopak. Z kvarků jsou dnes tvořeny takové částice, jako je proton a neutron, do skupiny leptonů patří elektrony a neutrina (viz šestá kapitola „Za stěnou“). Veškeré teoretické snahy o popsání tohoto období se označují zkratkou GUT (*Grand Unified Theory, Velké sjednocení*), která symbolizuje jednotné chování všech tří kvantových interakcí. Pro naše úvahy o hmotě a antihmotě je v tomto období důležitý čas přibližně 10^{-30} sekundy. Průměrná energie částic by měla poklesnout natolik, že přestaly samovolně vznikat částice X a Y. To vedlo k utlumení přechodů mezi kvarky a leptony. Podle dnešních představ by při tomto procesu mohlo dojít k velmi malému narušení CP symetrie. Tak malému, že by v časech pozdějších než 10^{-30} sekundy mělo být ve vesmíru na miliardu antičástic o jednu částici více. Při pozdější anihilaci (v čase několika málo sekund) anihilovala miliarda částic s miliardou antičástic a jedna částice zbyla. Právě z těchto zbylých částic by měl být tvořen dnešní vesmír složený jen z hmoty. Znovu si ale připomeňme, že tyto úvahy jsou spíše rámcové, nejsou podloženy experimenty a není vůbec vyloučeno, že vše proběhlo úplně jinak.

Od času 10^{-10} sekundy, kdy se ve vesmíru vynořila elektromagnetická a slabá interakce, se pohybuje už na pevné půdě a probíhající procesy jsou zdokumentovány experimentálně. Ve vesmíru jsou poprvé všechny čtyři interakce, jak je známe dnes. V následujících okamžicích došlo k tvorbě neutronů, protonů a dalších částic, oddělení neutrin od látky, tvorbě lehkých atomových jader a nakonec

i k tvorbě celých atomů. O těchto procesech jsme si podrobně vyprávěli v šesté kapitole „*Za stěnou*“.

Planckovy škály a sny o počátku

K měření a vážení využíváme nejrůznější jednotky. Většina z nich je odvozena z vlastností naší Země. Například metr byl původně koncipován jako desetimiliontá část vzdálenosti od pólu k rovníku, sekunda byla určitým zlomkem dne a kilogram byl opět odvozen z metru – šlo o hmotnost decimetru krychlového destilované vody za přesně definovaných podmínek. Později se definice musely upravit, aby reflektovaly stále se zvyšující přesnost našich měření.

Jeden z nejvýznamnějších německých fyziků, Max Planck, zkoušel na konci 19. století nalézt pro naše měření nějaké přirozenější jednotky. K tomuto účelu využil tři základní konstanty charakterizující přírodní děje. První z nich je gravitační konstanta, která popisuje intenzitu gravitační interakce, druhou je rychlost šíření světla ve vakuu – ta charakterizuje elektromagnetické děje, a poslední je Planckova konstanta popisující kvantové vlastnosti mikrosvěta.

Planck se snažil tyto tři základní konstanty, které v sobě nesou poselství o vlastnostech vesmíru (při jiných hodnotách by se vesmír choval jinak), zkombinovat tak, aby výsledkem byly přirozené jednotky času, délky a hmotnosti. Ukázal, že takové kombinace existují a vedou na základní jednotku času řádově 10^{-43} sekundy, základní jednotku délky řádově 10^{-35} metru a základní jednotku hmotnosti řádově 10^{-8} kilogramu. Dnes těmto jednotkám říkáme Planckův čas, Planckova délka a Planckova hmotnost.

Pokud toto jsou základní jednotky veličin, které nám vesmír nabízí, pak se samozřejmě musíme ptát, proč jsou jednotky času a délky tak neskutečně malé. Jaký význam má Planckův čas a Planckova délka? Odpověď neznáme. Snad je Planckův čas okamžikem oddělení gravitační interakce od ostatních, snad je Planckova délka typickým rozměrem struktur v kvantové pění, ze které se rodil vesmír, nebo jde o rozměr strun, které vytvářejí elementární částice.



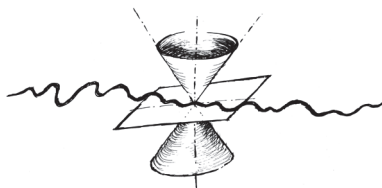
Planckovu hmotnost lze snadno převést na energii a teplotu (teplo a energie jsou jen jinými formami hmoty). Takto získaná Planckova energie činí 10^{19} GeV a Planckova teplota 10^{32} K. Opět se můžeme ptát, tentokrát obráceně: proč jsou tyto jednotky tak obrovské a jaký mají význam? Energie 10^{19} GeV by mohla být průměrnou energií částic v Planckově čase, možná jde také o maximální energii, kterou měly částice při zrodu vesmíru. Planckova teplota je nepředstavitelně velké číslo. Část fyziků si pokládá otázku: pokud existuje nejnižší možná teplota látky, absolutní nula, nemohla by existovat i nejvyšší možná hodnota, jakési absolutní horko, které by bylo nepřekročitelné? Mohlo by jít přímo o teplotu vzniku našeho vesmíru. Většina fyziků je ale k takové interpretaci značně skeptická. Jak jsme už naznačili v úvodu této kapitoly, pohybujeme se na velmi tenkém ledu našich hlubokých neznalostí procesů, které probíhaly při vzniku vesmíru. V současné době nevíme, jaký je skutečný smysl Planckových škál.

Víte, že

- Víte, že při anihilaci elektronu a pozitronu musí vzniknout minimálně dva fotony? Je to z důvodu zákona zachování hybnosti. Pokud by elektron s pozitronem letěly proti sobě, je jejich celková hybnost nulová. Vzniklý foton má ale vždy nenulovou hybnost, proto musejí vzniknout minimálně dva s opačným směrem letu.
- Víte, že Andrej Sacharov v roce 1979 ostře kritizoval obsazení Afghánistánu Sovětským svazem? Odplata byla rychlá: následovalo zatčení, odejmutí všech cen a vyznamenání a deportace do Gorkého. Teprve po změně poměrů po roce 1986 se mohl Sacharov ke své práci vrátit.
- Víte, že existuje i časová symetrie? Je to předpoklad, že stejný děj může probíhat i pozpátku. Zdá se, že ve vesmíru funguje jen kombinovaná CPT symetrie, tj. nafilmujte chování přístroje v zrcadle, postavte takový přístroj z antihmoty a pusťte ho podle natočeného filmu pozpátku. Dosud věříme, že teprve takový stroj se bude chovat stejně jako originál.

- Víte, že se Erwin Planck, syn Maxe Plancka, podílel na přípravě atentátu na Adolfa Hitlera? Bohužel byl za tuto činnost popraven a nepomohly ani přímluvy jeho otce u samotného vůdce.
- Víte, že Planck zavedl svou konstantu při pokusech o teoretický popis záření těles? Teoretická křivka souhlasila s experimentem, pokud se energie měnila po určitých skocích (říkáme jim kvanta), které jsou popsány Planckovou konstantou.

Poučení na závěr: *Je dobré znát meze svého poznání. Když něco nevíte, je mnohem jednodušší to přiznat, než se zaštiťovat cizími slovy, vymýšlet neexistující souvislosti a odvolávat se na nedohledatelné odborníky z americké NASA.*



12. Jeden těžký porod

*„Kdyby se všechno, co se přihodilo během historie vesmíru,
obrazně napěchovalo do rozvrhu jednoho dne,
Země by vznikla někdy pozdě odpoledne.
Dinosauři by se objevili pár minut před půlnocí.
A lidstvo by existovalo asi tak dvě vteřiny...“*
Jostein Gaarder, norský autor

Dokud jsme se opírali o Fridmanovy modely (viz druhá kapitola „*Expanze vesmíru a kosmologický princip*“), bylo vše jednoduché a krásné. Vesmír měl v podstatě jen tři možnosti budoucího vývoje závisící na jeho průměrné hustotě. Při nadkritické hustotě ho čekal další kolaps do velmi husté a horké oblasti, podobné té, z níž vesmír kdysi vznikl. Při podkritické hustotě by měla expanze stále pokračovat a vesmír se navěky zředovat. A při přesně kritické hustotě by expanze byla hraniční, podobně jako když hozený kámen uniká donekonečna tak, aby v něm měl právě nulovou rychlost. I minulost je ve Fridmanových řešeních velmi prostá: vedou k času, v němž měl vesmír nekonečnou hustotu a teplotu, tedy k tzv. počáteční singularitě.

Dnes je jasné, že svět není jen pod vlivem gravitace popsané obecnou relativitou. Ostatní tři kvantové interakce dokáží dramaticky zasáhnout do našich představ jak o konci, tak o počátku vesmíru. Objev zrychlené expanze z roku 1998 zcela změnil naše názory na budoucnost světa. Dokud nepoznáme podstatu tzv. temné energie, která by měla být za zrychlenou expanzi zodpovědná, můžeme si o předpovědi budoucnosti vesmíru nechat jen zdát. Právě temná energie se stále častěji dává do souvislosti s kvantovými procesy probíhajícími ve vakuu a kvantová fyzika zde hraje podstatnou roli.

A minulost? Už jsme se zmínili, že v extrémně hustých podmínkách na počátku Velkého třesku mohly mít kvantové procesy rozhodující význam. V každém případě mohou zabránit existenci počáteční singularity. Bohužel dodnes neznáme kvantovou verzi teorie gravitace, a tak jsou úvahy o počátku vesmíru značně bezzubé a neúplné. Spojení gravitace s kvantovou teorií je úloha, o kterou se pokoušejí teoretici z celého světa. Teorie strun, smyčková gravitace, Verlindeho entropická síla – to jsou jen některé možnosti, kam se vydat. Každá z nich zasahuje do našich představ o původu světa. Těžko dnes odhadnout, zda má některý ze současných modelů vzniku vesmíru naději na přežití a zda se budoucí generace nad našimi představami nebudou usmívat tak, jako my nad placatou Zemí podpíranou želvami nebo dutozemí našich předchůdců.

Inflační model

Nejrozšířenějším a nejpřijímanějším současným modelem vzniku vesmíru je inflace. Jejím největším problémem ale je, že netušíme, co ji způsobilo a sousloví „*inflatonové pole*“ sice zní učeně, ale sebehezčí pojmenování problém nevyřeší. Inflační model není jeden jediný. Existuje mnoho různých variant průběhu energie inflatonového pole, které vedou na zcela odlišné průběhy inflace, což ztěžuje experimentální ověřování inflační hypotézy. Navíc jsou všechny testy postaveny jen „jednosměrně“. Pojdme si to vysvětlit na příkladu plochosti vesmíru. Pokud inflace proběhla, vyhladila vesmír, a proto my dnes budeme pozorovat vesmír s nulovou křivostí. Dnes skutečně pozorujeme vesmír s nulovou křivostí. Je to důkazem inflace, nebo není? Samozřejmě, že není. Pokud bychom pozorovali výrazné nenulové zakřivení vesmíru, je inflační hypotéza mrtvá. Naopak, pokud pozorujeme plochý vesmír, je to sice ve shodě s inflační hypotézou, ale pouze ji to nevylučuje. Plochost vesmíru mohly zajistit i jiné procesy, které nás dosud nenapadly. Obdobně je to i s ostatními testy inflace, například problémem horizontu. Inflace zajistí, že spolu různé oblasti vesmíru v minulosti mohly komunikovat, a proto je vesmír homogenní a izotropní i na těch největších škálách. Nemůžeme si být ale jisti, že inflace je jediným procesem, který toto

způsobil. Dnes můžeme pouze uzavřít, že inflační hypotéza není v rozporu se současnými pozorováními vesmíru, což je pro její ověření stále poněkud málo.

Alan Guth začal uvažovat o inflaci v souvislosti s řešením problematiky neexistence magnetických monopolů. Ukázal, že inflace mohla způsobit, že původně hojné monopóly byly rozfouknuty natolik, že v pozorovatelném vesmíru zůstalo pouze několik jedinců, a proto je nedokážeme polapit. To, že monopóly v přírodě nevidíme, mohly způsobit i jiné děje. Opět platí opačné tvrzení: pokud bychom pozorovali hojný počet monopolů, inflační hypotéza by byla vyvrácena.

Nepřímých experimentálních indicií, které hovoří ve prospěch inflační hypotézy je několik a tři z nich jsou nejdůležitější: plochost vesmíru, spektrum hustotních fluktuací látky a gravitační vlny. Plochost vesmíru byla zatím nejlépe ověřena z analýzy fluktuací reliktního mikrovlnného záření, kterou provedla sonda Planck. Z měření vyplynulo, že vesmír má kritickou hustotu (tj. je plochý) s relativní přesností 0,5 procenta, tj. $\rho/\rho_c = 1 \pm 0,005$, kde ρ je hustota veškeré hmoty a energie ve vesmíru. Nemáme lepší vysvětlení než to, že jde o důsledek existence inflační fáze.

Hustotní fluktuace kvantové povahy, které byly v průběhu inflační fáze zvětšeny do makroskopických útvarů, by měly podle našich představ mít dvě složky: skalární a tenzorovou. V této knížce se nebudeme zabývat matematickými detaily, pouze konstatujeme, že skalární fluktuace jsou jednodušší a nevedou ke vzniku gravitačních vln. Naopak tenzorové fluktuace jsou komplikovanější a při inflaci vedou ke vzniku gravitačních vln a následně B módu polarizace reliktního záření, jak jsme popisovali v desáté kapitole „*Na lovu reliktních gravitačních vln*“. Z hlediska experimentu jsou důležité dvě hodnoty. První je tzv. *poměr tenzorových a skalárních fluktuací*. Nulová hodnota by znamenala neexistenci tenzorové složky fluktuací, což je v rozporu s většinou inflačních modelů. Nejpřesnější měření ze sondy Planck ukázala, že horní hranice poměru je 0,1, tj. tenzorové fluktuace tvoří maximálně deset procent všech fluktuací. Obě složky fluktuací by měly mít mocninné spektrum (zastoupení

různých fluktuací je mocninnou funkcí jejich velikosti). Druhým měřitelným parametrem je právě mocnina v tomto spektru, ale různé inflační modely předpovídají různou hodnotu, takže potvrdit či vyloučit jednotlivé modely není vůbec jednoduché.

Hodně se sází na zachycení reliktních gravitačních vln, které vznikaly v průběhu inflace z tenzorových fluktuací a jejichž spektrum je pro inflaci charakteristické. Mohlo by se to podařit obřím vesmírným interferometrům (LISA, BBO) nebo radioteleskopickým polím (SKA). Bez šance není ani nalezení podpisu reliktních gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. Zatím nejlepší sonda Planck, vyvinutá pro detailní výzkum reliktního záření, tento podpis sice nenalezla, ale budoucí generace citlivějších sond by to mohly zvládnout. Reliktní gravitační vlny by měly vznikat i podle jiných modelů původu vesmíru, než je inflace, ale jejich spektrum by bylo odlišné. Zjištění spektra gravitačních vln tedy může některé modely spolehlivě vyloučit.

Ekpyrotický model

Některé pokusy o sjednocení všech čtyř interakcí vedly k matematickým modelům využívajícím větší počet dimenzí. Nejjednodušší teorie strun pracují s deseti dimenzemi (viz první kapitola „*Krise síly*“), z nichž čtyři jsou makroskopické (běžný prostor a čas) a šest je svinutých, tj. jsou tak malé, že je nevidíme. Když srolujeme papír do tenké ruličky, z velké dálky se nám bude zdát jako jednorozměrný útvar, druhou (svinutou dimenzi) rozlišíme jen zblízka. Jiným příkladem může být chomáč vaty. Z dálky vypadá jako třírozměrný objekt, zblízka zjistíme, že je složený z mnoha vláčeknek. Obdobně by ve vesmíru mohly být makroskopické dimenze, které vnímáme, a svinuté, které nevidíme. Možná, že rozměry svinutých dimenzí, pokud existují, odpovídají Planckově škále.

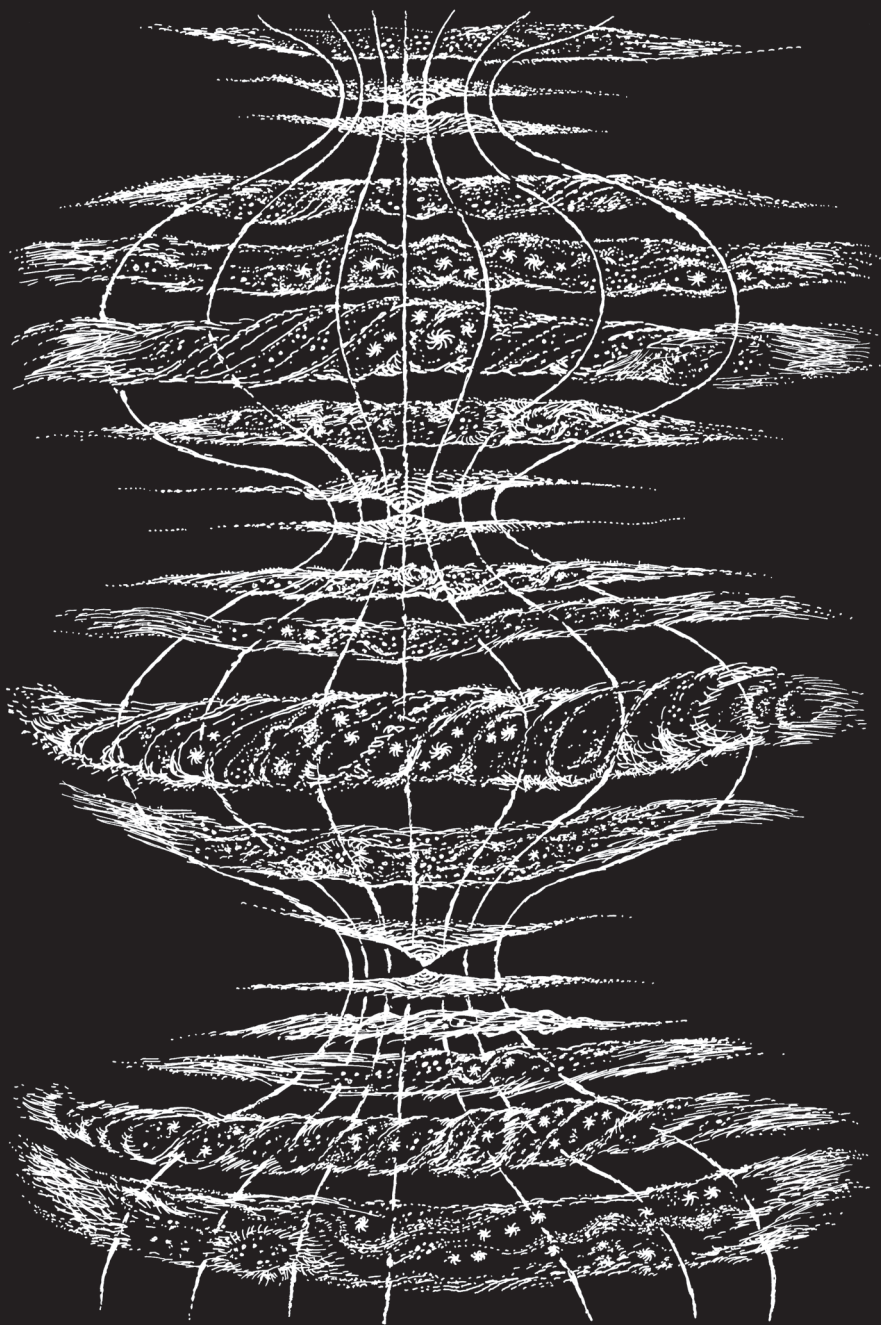
Mnohorozměrný svět by mohl mít méněrozměrné podmnožiny, kterým se ve strunových teoriích říká *brány*. Náš vesmír by mohl být jednou takovou bránou v mnohorozměrném multiverzu složeném z mnoha vesmírů menších dimenzí. Tyto brány by spolu mohly komu-

nikovat prostřednictvím další makroskopické dimenze, v případě nejjednodušší varianty jedenácté. Představte si to jako knihu, která je sama o sobě mnohorozměrným celkem a každá její stránka je méněrozměrnou bránou představující jeden z mnoha vesmírů.

Připadá vám to šílené? Pokud nemají naše představy možnost experimentálního ověření, nejde ani o teorie, ani o hypotézy, ale o vize. Rozměr hypotézy dal představě brán jakožto pravesmírů jihoafrický fyzik Neil Turok spolu s trojicí amerických teoretiků Paulem Steinhardtem, Burtem Ovrutem a Justinem Khourym. V roce 2001 světu předložili svou představu vzniku vesmíru, které se začalo říkat *ekpyrotický model*. Slovní základ poněkud připomíná českého pyromana, člověka, který miluje oheň. Slovo *ekpyrotický* znamená doslova „z ohně pocházející“ a má evokovat model starořeckých stoiků, kteří věřili ve zrod vesmíru z ohně, jeho následné ochlazení a další znovuzrození. Turok, Steinhardt, Ovrut a Khoury ztotožnili vznik vesmíru s dotykem dvou brán. Podobně jako se dva listy v knize dotýkají v nerovnostech na povrchu, mohly se dva pravesmíry – dvě brány – dotknout v nějaké kvantové fluktuaci, což mělo za následek strukturální změny v obou bránách. V jedné, která reprezentuje náš vesmír, to vedlo k jevům, kterým říkáme Velký třesk, tedy k expanzi a vzniku látky. Čtveřice autorů ale nepředložila tento model jako nic neříkající vizi, ale spočetla spektrum gravitačních vln, které by při takovém doteku prabrán musely vzniknout. V tu chvíli už nejde o další šílenou představu vzniku vesmíru, ale o experimentálně vyvratitelnou konstrukci. Pokud jednou zachytíme reliktní gravitační vlny a jejich spektrum nebude ve shodě s předpovědí ekpyrotického modelu, znamená to automaticky, že šlo o zcela mylnou konstrukci.

Není bez zajímavosti, že jeden z otců ekpyrotického modelu, Paul Steinhardt, stál u i zrodu tzv. nového inflačního scénáře. Tento americký kosmolog z Princetonu dal světu hned dva konkurenční modely vzniku vesmíru.

Ekpyrotický model v sobě má i cykličnost původního modelu stoiků. Obě brány se po doteku, který měl za následek vznik našeho



vesmíru v jedné z nich, od sebe vzdalují. Naše brána se rozpíná a struktury v ní postupně řídnu, až vesmír našeho typu zanikne. Mezi oběma bránami ale může působit slabá gravitační síla. Původně se vzdalující brány budou v daleké budoucnosti opět přitaženy k sobě, dojde k dalšímu doteku a cyklus zrodu a zániku vesmíru se bude opakovat (viz obrázek nalevo). Tento konkurenční model k inflační hypotéze je jen jednou z mnoha našich představ, jak mohl vzniknout vesmír. Berme ho spíše jako fantazii, ale bez fantazie by věda postrádala smyslu. Stále musíme mít na mysli, že z mnoha vizí může být některá správná, ale také se může stát, že skutečnost je mnohem fantastičtější, než si dokážeme představit.

Za všechno může černá díra

Velmi často se objevuje tvrzení, že vesmír je vlastně obří černou dírou a my žijeme uvnitř ní. Tady nejde o nic jiného, než zmatení pojmů. Když v roce 1915 představil Albert Einstein světu obecnou relativitu, která je postavena na zakřivení času a prostoru v okolí hmotných těles, snažili se vědci nejprve nalézt pokřivení kolem obyčejné kuličky. Jako prvním se to podařilo Karlu Schwarzschildovi už v roce 1916. Časoprostor v okolí kuličky je zakřivený tak, že se tělesa v okolí většinou pohybují po podobných drahách jako v newtonovské teorii. Z řešení ale vyplývá, že pokud by centrální těleso při dané hmotnosti bylo extrémně malé (Slunce by muselo mít poloměr tři kilometry a Země devět milimetrů), začnou se dít zajímavé věci. Zakřivení bude natolik veliké, že z objektu nemůže uniknout vůbec nic, dokonce ani světlo. A právě takový objekt se nazývá černou dírou.

Docela zajímavé je formálně vypočítat hustotu černé díry, tj. vydělit její hmotnost objemem koule o Schwarzschildově poloměru. Takto vypočtená hustota černých děr hvězdných hmotností je v souladu s obecnou představou – vychází extrémně vysoká hodnota. Čím hmotnější černá díra, tím nižší hustota ale vyjde. Pro obří černé díry, jejichž hmotnost je srovnatelná s hmotností galaktického jádra, vychází hustota řádově shodná s hustotou vody a pro černé díry o hmotnosti celé galaxie vychází dokonce výrazně nižší hodnota,

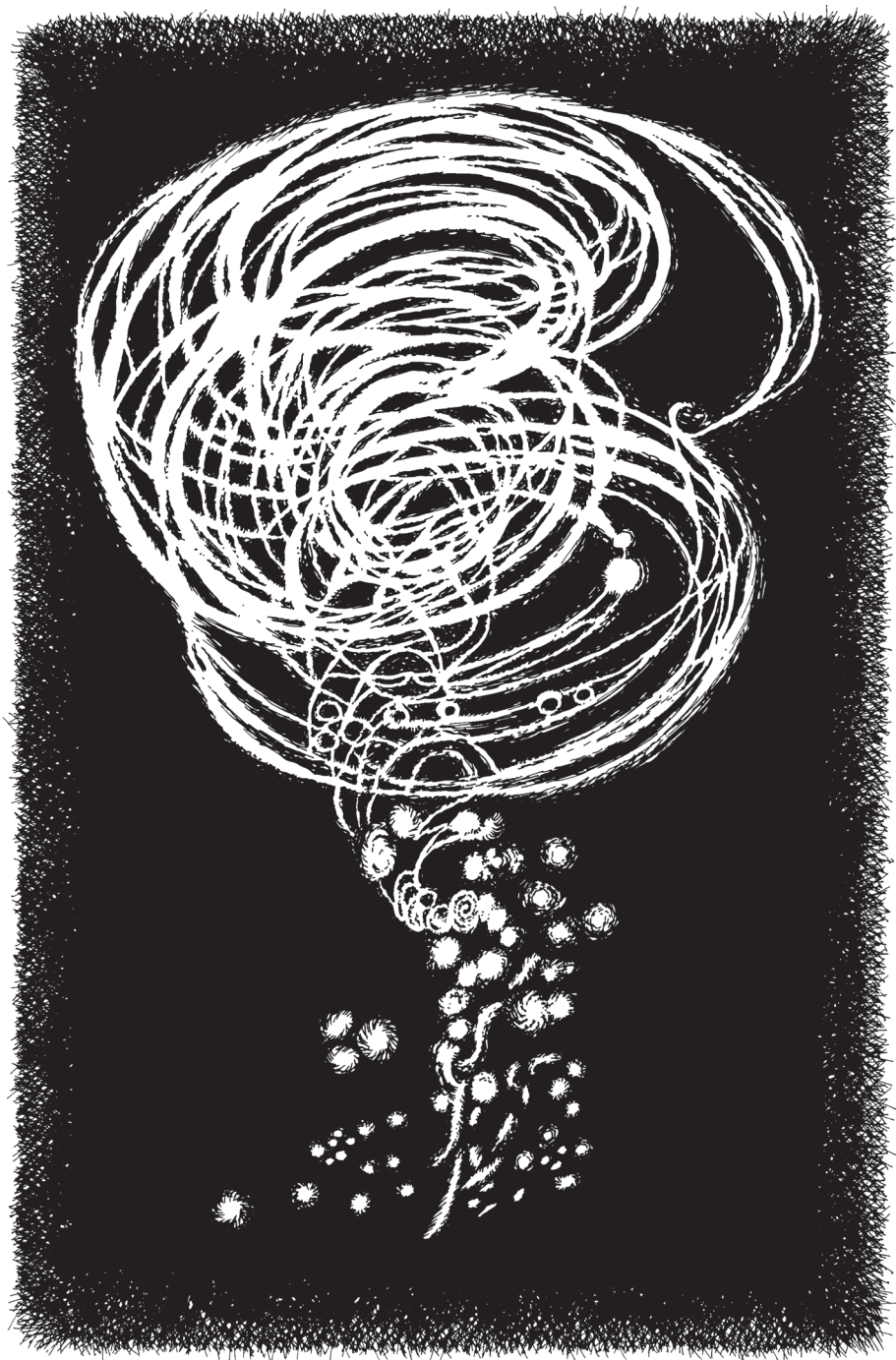
než má hustota vzduchu na Zemi. Snad právě tento fakt přispěl k rozšíření obecného mýtu, že je celý vesmír vnitřkem černé díry, v němž žijeme své životy a pozorujeme okolní hvězdy a galaxie.

Schwarzschildovo řešení, včetně černé díry, popisuje zakřivení prostoru a času vně sféricky symetrického tělesa. Vesmír nemusí být sféricky symetrický a už vůbec se nenacházíme jako statický pozorovatel někde mimo vesmír, abychom toto řešení mohli použít. Naopak, jsme uvnitř vesmíru, jsme jeho nedílnou součástí a pohybujeme se spolu s jeho časoprostorem. Řešení rovnic obecné relativity v takovém případě (pro homogenní rozložení látky ve vesmíru) vede na tzv. Fridmanovo řešení, a to nemá s černými děrami ani za mák společného.

Černé díry nám ale před několika lety přece jen do kosmologie vstoupily. Niayesh Afshordi, Robert Mann a Razieh Pourhasan z Univerzity ve Waterloo a z Kanadského institutu pro teoretickou fyziku představili světu v roce 2014 zajímavou představu zrodu vesmíru. Celý vesmír by mohl vzniknout v důsledku interakce černé díry přilétající z extradimenzí (tedy dalších dimenzí, které nevnímáme) v mnohorozměrném vesmíru. Autoři konkrétně uvažovali o pětirozměrné černé díře, z níž se vynořila třírozměrná sférická brána, která je naším vesmírem. Životaschopnost modelu je těžko odhadnutelná, uvádíme ho spíše jako ukázkou obrazotvornosti současných teoretiků. Výpovědní hodnota takové vize je však bez ověřitelných předpovědí velmi nízká.

Na vlně fantazie

Když vynikající dánský fyzik Niels Bohr posuzoval nelineární polní teorii Wolfganga Pauliho a Wernera Heisenberga, komentoval ji slovy: „*Všichni souhlasíme s tím, že vaše teorie je šílená. Rozcházejme se jenom v tom, zda je dostatečně šílená, aby bylo pravděpodobné, že je pravdivá. Mám pocit, že tato teorie není dostatečně šílená.*“ Pokud by Niels Bohr žil v dnešní době, našel by dostatečně šílených teorií zcela jistě bezpočet, pravděpodobnost jejich pravdivosti je ale značně diskutabilní.



Smyčková gravitace připouští například jakousi pružnost základních elementů prostoru (smyček), proto může opakovaně docházet ke kolapsu vesmíru do extrémně husté fáze, následnému odrazu a znovuzrození. Taková představa vede k cyklicky se opakujícímu Velkému třesku. Velké množství vizí původu vesmíru je založeno na čistě matematické eleganci. Teorie vedou na různé formy multiverza a jejich výpovědi o předbigbangové fázi se značně rozcházející. Jednu z nejexotičtějších vizí navrhli Pawel Mazur z Jihokarolinské univerzity a George Chaplin z Lawrenceovy národní laboratoře v Livermoru. Samotný časoprostor chápou jako supratekutou kapalinu, která teče bez tření a otáčí se. Při otáčení vznikají víry, které jsou zárodky takových struktur, jakými jsou galaxie a jejich kupy. Jinou představou je, že při inflaci vzniklo velké množství vesmírů s různými přírodními konstantami a život se vyvinul jen v tom vesmíru, který měl pro život vhodné parametry. Velmi zajímavá je také teorie „rychlého světla“, která vysvětluje homogenitu a izotropii vesmíru tak, že dříve mělo světlo podstatně vyšší rychlost než dnes, a proto spolu mohly v minulosti komunikovat i oblasti, mezi nimiž by světlo dnešní rychlostí neprolétlo. Tato hypotéza tak vysvětluje problém horizontu bez nutnosti inflace. Bohužel ale nevysvětluje jiné jevy pozorované ve vesmíru. To je ostatně vlastní většině exotických teorií – soustředí se na vysvětlení jednoho jevu a u mnoha jiných jsou v rozporu s pozorováním. Autorům to ale většinou nikterak nevadí, jejich cílem často nebývá pochopení vesmíru, ale krásné snění.

Víte, že

■ Víte, že sonda Planck, která dosud nejlépe analyzovala fluktuační reliktního záření, měla ohnisko chlazené na teplotu 0,1 kelvinu? Bylo toho dosaženo čtyřstupňovým chlazením. První stupeň byl pasivní radiační chladič, následovaly tři aktivní chladiče, z nichž poslední, který byl vyroben v Institutu Néel v Grenoblu, protlačoval kapalně hélium soustavou kapilár.

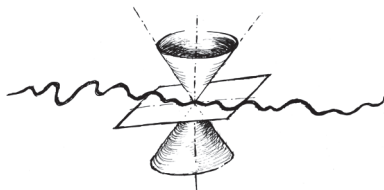
■ Víte, že Paul Steinhardt, autor nového inflačního scénáře a ekpyrotického modelu, se také zabýval kvazikrystaly, které mají symetrie nevyskytující se v přírodě? Steinhardt zorganizoval v roce

2011 expedici na Čukotku, kde našli meteorit, jehož úlomek s pětičetnou symetrií leží v Muzeu přírodních věd ve Florencii.

■ Víte, že švédský filozof Nick Bostrom považuje vesmír za počítačovou simulaci, v níž žijeme? Temnou hmotu a temnou energii chápe jako „záplaty“, kterými vyspělá civilizace opravuje dřívější nekonzistence v kódu simulace. Takové hypotézy jsou sice líbivé, ale nemají s fyzikou nic společného.

■ Víte, že některé strunové teorie využívají až 27 dimenzí? Čtyři odpovídají prostoru a času, šest svinutých dimenzí je zodpovědných za existenci částic látky (kvarky a leptony), šestnáct svinutých dimenzí zodpovídá za existenci polních částic a jedna dimenze zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými méněrozměrnými bránami.

Poučení na závěr: *Vymyslete si svůj vlastní vesmír a nebojte se přitom bohatě rozvinout fantazii. Čím méně uvěřitelný scénář vzniku vesmíru vás napadne, tím větší máte šanci, že se o vašem skvělém vesmíru začne učeně diskutovat.*



13. Osudová

„Přichází apokalypsa z vesmíru! Rychle popadni pivo!“

Rick Yancey, americký spisovatel

Hovořit o osudu vesmíru v okamžiku, kdy nevíme, co je to temná energie a zda je proton stabilní částicí, je velmi odvážné. Podle všeho se zdá, že zrychlená expanze vesmíru bude pokračovat na věky. Není ale vyloučeno, že jde o podobný proces, jakým mohla být inflace, jen na výrazně delší časové škále. V takovém případě by mohlo v daleké budoucnosti dojít k ukončení zrychlené expanze a vesmír by se dokonce mohl začít smršťovat a skončit tzv. Velkým křachem, který by byl jakousi obdobou Velkého třesku. Tento scénář by mohl vést k neustálému opakování zrodu a zániku vesmíru.

I v případě vesmíru, který by byl stacionární, tj. nikterak by se z dlouhodobého hlediska neměnil, by po určité době muselo dojít k utichnutí veškerých makroskopických toků a vytvoření stavu, z něhož už není možné čerpat energii pro další procesy. Slovy termodynamiky by se veškerá využitelná energie přeměnila na odpadní teplo, entropie by dosáhla svého maxima a vesmír by se ocitl ve stavu klidu a míru, kterému říkáme *termodynamická rovnováha*. Vesmír v termodynamické rovnováze je mrtvý a neslučitelný se životem, který nutně ke svému udržení potřebuje nějaké zdroje energie. Ve vesmíru blížícím se termodynamické rovnováze by se samozřejmě už nerodily hvězdy, jejich zbytky by se přeměnily na černé díry, ty se vypařily Hawkingovým mechanismem a veškeré procesy postupně utichly. Takový stav nazýváme tepelnou smrtí vesmíru. Teplota vesmíru by se ustálila na nějaké malé, ale nenulové hodnotě. Jde o nejpravděpodobnější scénář budoucnosti našeho vesmíru, proto se mu v závěrečné kapitole naší knížky budeme věnovat podrobněji. Vesmír nejspíše čeká ten nejčernější osud, černější než temnota i černé díry.

Tepelná smrt vesmíru

S představou tepelné smrti vesmíru přišel jako první francouzský astronom Jean Sylvain Bailly už v roce 1777. Správně odhadl, že by veškeré procesy ve vesmíru měly postupně utíchat a vesmír pomalu chladnout. Konkrétní představu podloženou termodynamickými zákony dal světu až William Thomson ve dvou článcích z let 1852 a 1862. Tento muž byl jako první britský vědec povýšen za své rozsáhlé práce z termodynamiky do šlechtického stavu. V roce 1892 získal titul prvního barona Kelvina a stal se členem Sněmovny lordů. Thomsonův titul byl odvozen od říčky Kelvin, která tekla v blízkosti jeho laboratoře na Glasgowské univerzitě. Podle lorda Kelvina byla nakonec pojmenována i jednotka absolutní teplotní stupnice.

Kelvin se opíral o první dva termodynamické zákony. První věta termodynamická není ničím jiným než zákonem zachování energie. Druhá věta termodynamická ukazuje, že v uzavřeném konečném systému postupně narůstá chaos a snižuje se využitelná energie. Vše směřuje ke stavu termodynamické rovnováhy, v níž je chaos (popisovaný entropií, viz pátá kapitola „*Tam, kde vládne temnota*“) maximální, ustanou veškeré makroskopické toky (částic, náboje, energie atd.) a není zde žádná využitelná energie pro jakékoli procesy. Kelvin uvažoval, že pokud bude mít vesmír dostatek času, musí vždy po určité době dojít do tohoto stavu. Samozřejmě, že v té době nic netušil o expanzi vesmíru, natož o jeho zrychlené expanzi. Tepelná smrt vesmíru se týká jakéhokoli vesmíru, energii nelze v jednom systému využívat neomezeně dlouho. Kelvinovy myšlenky detailněji rozpracovali skotský inženýr William Rankine a německý fyzik Hermann von Helmholtz. Oba dva zasáhli hluboce do mnoha odvětví vědy a nejsou známi jen z termodynamiky, kterou ale ovlivnili zcela zásadně.

Současná podoba představ o tepelné smrti vesmíru pochází od bangladéšského teoretika a kosmologa Jamala Nazrula Islama a britského teoretického fyzika Freemana Dysona. Oba si uvědomili, že tradiční dělení jednotlivých epoch ve vesmíru na éru záření, éru látky a éru temné energie neobstojí z hlediska dlouhodobého

výhledu osudu vesmíru. Život jakéhokoli vesmíru rozdělili celkem na pět období (ér), z nichž ne všechny se musí v průběhu existence vesmíru realizovat. Posloupnost ér může například ukončit výše zmíněný Velký křach. Pokud ale bude vesmír neustále expandovat, projde všemi érami, jejichž vlastnosti oba teoretici analyzovali.

První je tzv. *primordiální éra*, která zahrnuje celý Velký třesk a následující období až do tvorby prvních hvězd. Následuje *hvězdná éra*, pro kterou je charakteristická tvorba hvězd z mezihvězdných mlhovin a jejich seskupování do galaxií a kup galaxií. Jednou ale dojde vodík potřebný pro tvorbu hvězd a všechny lehké prvky budou přeměněny v hvězdných nitrech na prvky těžké. Tehdy nastane *éra degenerace*. Tvorba hvězd utichne a postupně budou pohasínat hvězdné mrtvolky – bílí trpaslíci a neutronové hvězdy, v nichž už termojaderná syntéza neprobíhá. Následuje *éra černých děr*, jediných dlouhodobě žijících objektů, které jsou schopny produkce energie Hawkingovým zářením i v daleké budoucnosti. Až se látka černých děr vyzáří do okolí, nastane poslední *temná éra* a vesmír dospěje do stavu tepelné smrti.

Hvězdná éra

Hvězdy jsou nejtypičtějšími objekty v současném vesmíru. Jejich tvorba započala v čase 180 milionů roků po vzniku vesmíru. Od té doby vytrvale vznikají z vodíkových oblaků a ve svých nitrech přeměňují vodík na helium a těžší prvky až po železo, jehož jádra jsou vázána neefektivněji. Detaily jsme si popisovali v sedmé kapitole „*Co se skrývá ve hvězdách?*“ Podmínkou vzniku hvězd jsou samozřejmě zásoby lehkých jader, zejména vodíku, z něhož hvězdy získávají energii. Část materiálu hvězd je recyklována do okolí při odhazování obálek a explozích supernov, kdy hvězdy obohacují o těžší prvky okolní mlhoviny, ze kterých vznikají další generace hvězd. Část hvězdné látky je ale nevratně ztracena. Málo hmotné hvězdy se stávají po ukončení termojaderné syntézy postupně chladnoucími bílými trpaslíky, v nichž s gravitací bojuje tlaková síla vytvářená elektrony. Hmotnější hvězdy skončí jako neutronové hvězdy, v nichž se proti gravitaci postaví tlaková síla generovaná neutrony. Nejhmotnější hvězdy zkolabují do černých děr. Bílí trpaslíci,

neutronové hvězdy a černé díry jsou jen třemi různými variantami hvězdných rakví, jejichž látka se už nevrací do zatím neutuchajícího cyklu zrodu a zániku hvězd.

Současné stáří vesmíru je 14 miliard roků (14×10^9 let) a nacházíme se ve *hvězdné éře*. Co nás čeká v nejbližší budoucnosti z hlediska kosmologie? Za přibližně miliardu roků (čas 15×10^9 let) bude stále rostoucí výkon Slunce tak veliký, že Země ztratí veškerou vodu a bude neobyvatelná. Za 4 miliardy roků (čas 18×10^9 let) se naše Galaxie sloučí s galaxií v Andromedě. Při tomto procesu se spojí obě obří černé díry, které se nacházejí v centrech galaxií, zaniknou spirální ramena a vytvoří se jedna velká eliptická galaxie. Prolínání obou soustav s sebou přinese překotnou tvorbu hvězd, pravděpodobně už poslední v této oblasti. Ke srážce samozřejmě může dojít až o nějakou tu miliardu let později, dynamika vzájemného pohybu není známá natolik detailně, abychom přesně odhadli přibližování a průběh srážky obou galaxií.

Za přibližně 7 miliard roků (čas 21×10^9 let) v jádru Slunce dojde vodík, Slunce se stane červeným obrem, který bude produkovat energii ze slučování těžších prvků až po železo. Nakonec tento obr odhodí vnější vrstvy, vznikne planetární mlhovina a obnažené jádro se stane bílým trpaslíkem – hvězdnou rakví bez termojaderné syntézy. Tento pozůstatek bude mnoho miliard let postupně chladnout, až se stane nsvítícím černým trpaslíkem.

V dalších desítkách miliard let se budou spojovat další a další galaxie Místní skupiny, která je gravitačně natolik vázána, že odolá expanzi vesmíru. Vše bude směřovat k tomu, aby se ve velmi vzdálené budoucnosti celá Místní skupina stala jednou jedinou obří galaxií. Ten čas ale zatím ještě nenadešel.

Pokud bude zrychlená expanze probíhat stejným tempem jako dnes, dojde v čase 150×10^9 let k zvláštnímu jevu. V té době sice ještě uvidíme galaxie za hranicemi Místní skupiny, tj. světlo od nich stačilo dolétnout k nám, ale signál vyslaný v tomto čase už nikdy za hranici Místní skupiny díky zrychlené expanzi nedoletí. Hovo-

říme o tzv. *kosmologickém horizontu*. Stejně tak k nám nedole-
tí světlo z galaxií za hranicemi Místní skupiny, které bude vysláno
v časech pozdějších než 150×10^9 let. Naše Místní skupina přestane
být kauzálně svázána s okolím. Nebude mít žádnou možnost, jak
ovlivnit okolí a okolí přestane postupně ovlivňovat Místní skupinu.
Jakákoli komunikace s okolním světem bude znemožněna. Galaxie
Místní skupiny se budou dále spojovat, jejich svit v čase 800×10^9 let
začne výrazně slábnout, protože množství hvězd v produktivním
věku bude už velmi malé. Poroste počet bílých trpaslíků, neutrono-
vých hvězd a černých děr. V čase přibližně $1\,000 \times 10^9$ let (10^{12} let) by
se měla Místní skupina stát jednou jedinou galaxií. Světlo ze vzdále-
ných galaxií bude stále červenější a červenější, až jeho vlnová délka
přesáhne rozměr pozorovatelného vesmíru a my přestaneme galaxie
za hranicí Místní skupiny vidět. K tomu by mělo dojít v čase 2×10^{12}
let. Tvorba hvězd je v tomto období už zanedbatelná a zcela ustane
v čase 10^{14} let. Hvězdná éra v tomto čase končí. Uvedené časové
údaje vycházejí ze současného tempa zrychlené expanze.

Éra degenerace

Éra degenerace je obdobím postupného dohasínání a rozpadání
hvězdných zbytků, na jejímž konci by ve vesmíru měly být jen černé
díry, elektrony, pozitrony, neutrina a fotony. Z hlediska slabé inter-
akce je volný neutron nestabilní částicí se střední dobou života
15 minut (poločasem rozpadu 10 minut) – rozpadá se na proton, elek-
tron a elektronové antineutrino. Proton a vázaný neutron jsou stabil-
ní částice. Teorie velkého sjednocení (GUT, společná teorie všech
tří kvantových interakcí) ale umožňuje v dlouhodobém horizontu
 10^{34} let také rozpad všech protonů a neutronů na elektrony, pozit-
rony a neutrina. Protony a neutrony proto uvnitř hvězd po velmi
dlouhé době samovolně zmizí. Éra degenerace, na jejímž konci se
protony a neutrony ve hvězdných zbytcích rozpadnou, by měla trvat
od 10^{14} let do 10^{40} let. Pokud nejsou naše představy rozpadu protonu
správné, mohla by tato éra trvat podstatně déle, protože by k rozpa-
du protonu došlo jinými procesy v mnohem vzdálenější budouc-
nosti (například se uvažuje o poločasu rozpadu kolem 10^{200} let).

Pokud by byl proton a vázaný neutron stabilní částicí, mohla by situace být ještě složitější. V tomto textu budeme předpokládat, že rozpad protonu a neutronu probíhá podle teorie velkého sjednocení GUT a poločas rozpadu je řádově 10^{34} roků.

Pomineme-li prozatím černé díry a neutronové hvězdy, hemží se to na počátku éry degenerace neuvěřitelným množstvím různých trpaslíků. Pojdme si v nich udělat alespoň trochu pořádek. O *bílých trpaslících* jsme se zmínili již několikrát. Jde o pozůstatky hvězd malých hmotností o rozměrech přibližně naší Země. Gravitační odolává tlaková síla plynu elektronů. Tento tlak je kvantové povahy a původ má ve skutečnosti, že dva elektrony nejsou schopny obsadit stejný kvantový stav a tedy být i na stejném místě. Pokud u plynu převládají kvantové vlastnosti nad klasickými, hovoříme o *degenerovaném plynu*. V bílých trpaslících je degenerovaný plyn elektronů, v neutronových hvězdách degenerovaný plyn neutronů. Bílí trpaslíci postupně chladnou, až se stanou nesvítícími *černými trpaslíky*. Tělesa, která měla hmotnost pod hranicí zapálení termojaderné syntézy, nazýváme *hnědými trpaslíky*. Jejich hmotnost je vyšší než 13 Jupiterů (menší tělesa považujeme za planety) a nižší než 80 Jupiterů (větší tělesa už jsou hvězdami). Hnědí trpaslíci svítí ve viditelném spektru několik miliard let, zdrojem energie není termojaderná syntéza, ale gravitační kontrakce. Tyto hvězdy byly objeveny až v roce 1995, kdy to umožnila stále se zlepšující pozorovací technika. Po fázi kontrakce hnědí trpaslíci vychladnou a stanou se tělesy podobnými obřím planetám.

U hvězd s extrémně malou hmotností sice dojde k zažehnutí vodíkových jaderných reakcí, ale nedojde už k uskutečnění heliových reakcí. Takové hvězdy se po aktivní fázi života nazývají hasnoucimi *heliovými trpaslíky*. Čtenář je už určitě netrpělivý, protože z televizního seriálu zná červeného trpaslíka, o kterém zatím ještě řeč nebyla. I těmi se to v éře degenerace pěkně hemží. *Červení trpaslíci* jsou hvězdy výrazně menších hmotností, než má naše Slunce. Proběhne u nich jak slučování vodíku na helium, tak pozdější slučování helia na těžší prvky, ale vše se odehrává extrémně pomalu. Tyto hvězdy mají dobu života kolem 10^{13} (deset bilionů) roků, tedy mnohem

déle, než je doba existence dnešního vesmíru. Po vyhoření červení trpaslíci postupně zchladnou na černé trpaslíky.

V éře degenerace jsou extrémně málo svítící červení trpaslíci jedinými regulárními hvězdami. Světla je v tomto období ve vesmíru velmi málo, protože běžné hvězdy už neexistují a nové se nemají z čeho tvořit. Přesto se v tomto podivném vesmíru ve vzdálené budoucnosti občas rozsvítí. Hvězdné zbytky a nepodařené hvězdy totiž nezřídka obíhají ve dvojicích kolem společného těžiště. I malé systémy vyzařují slabé gravitační vlny, ztrácejí energii a jejich složky se k sobě po spirále blíží. Pokud se sloučí dvě neutronové hvězdy, dojde k efektu *kilonovy* – obřímú záblesku tisíckrát většímu, než je nova. Jde o záblesk gravitačních i elektromagnetických vln. Při sloučení dojde k natlačování neutronů do už vzniklých jader. Objeví se obří nestabilní jádra krátké životnosti. Při jejich rozpadu (gama rozpad) následuje intenzivní gama záblesk. Obdobný proces u dvou bílých trpaslíků vede k explozi supernovy typu Ia. Bílý trpaslík se totiž absorpcí další látky dostane do oblastí nestability a dojde k explozivnímu termojadernému slučování menších jader v celém objemu trpaslíka. Zajímavé je také sloučení dvou heliových trpaslíků – jejich látka je bohatá na helium, a proto vznikne heliová hvězda, jejíž životní kariéra je velmi krátká. Nejzajímavější jsou hnědí trpaslíci. Při jejich sloučení vznikne červený trpaslík, regulární hvězda, která bude v umírajícím vesmíru ještě dalších 10^{13} let.

Postupně utichne i slučování dvojic objektů. V čase 10^{15} let zmizí planety z oběžných drah kolem hvězdných zbytků. Část z nich spadne díky vyzařování gravitačních vln do centrálního objektu a část se dostane na nestabilní dráhu a mateřský objekt definitivně opustí. V čase 10^{19} až 10^{20} let dojde k podobné situaci u hvězdných zbytků v galaxiích. Deset procent z nich popadá do černých děr a devadesát procent se nestabilitami dostane na samostatné dráhy mimo své mateřské galaxie.

Pokud se protony skutečně rozpadají, dojde v časech pozdějších než 10^{34} let k postupné degradaci látky přímo uvnitř hvězdných zbytků. Protony i neutrony se rozpadnou na elektrony, pozitrony, neutrina



ÉRA DEGENERACE

a fotony. Kompaktní zbytky se změny v obláčky expandujících elementárních částic. Tento proces bude dokonán v čase 10^{40} let, kdy ve vesmíru zůstanou jen černé díry, elektrony, pozitrony, neutrina a fotony.

Éra černých děr

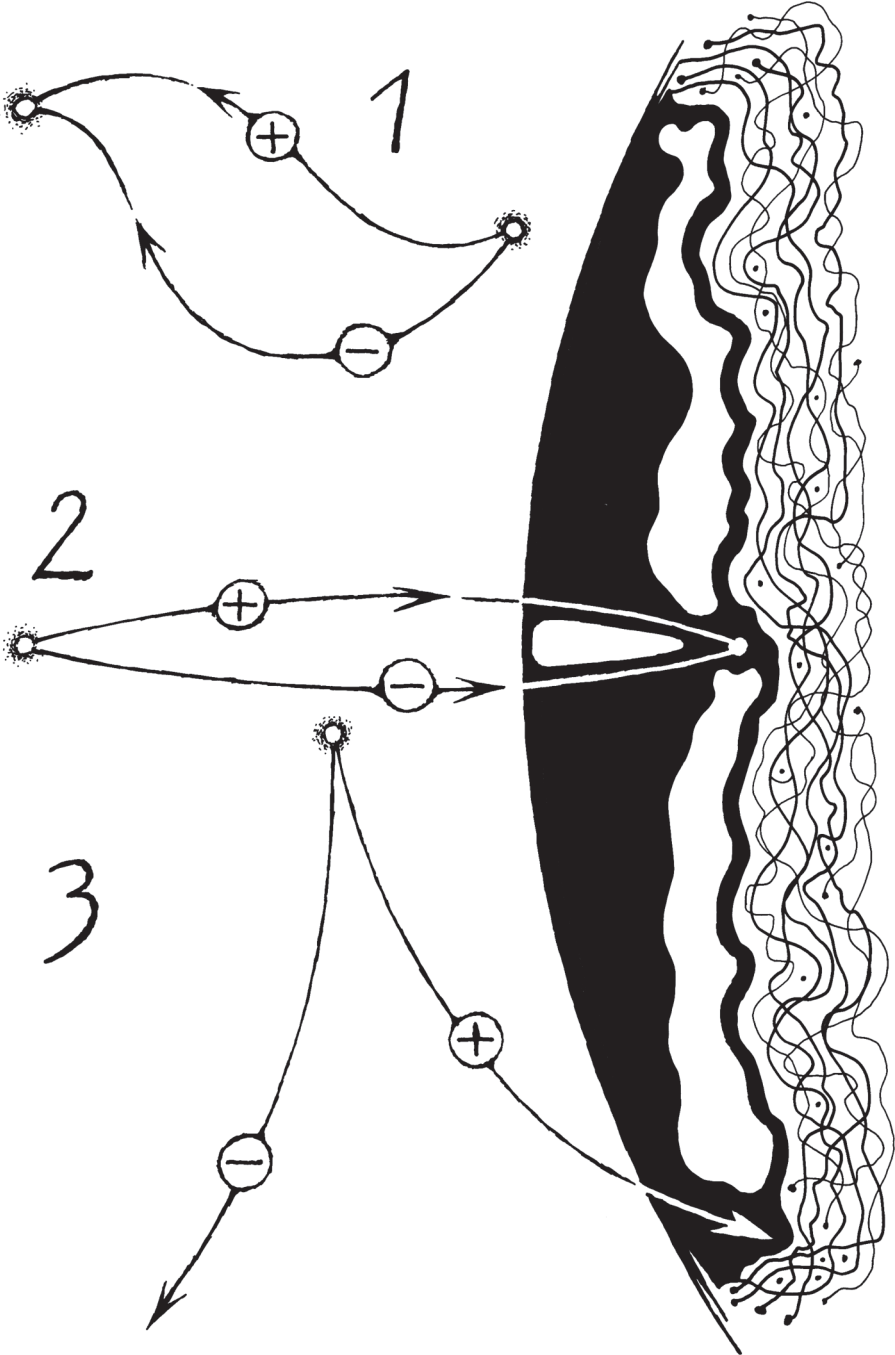
Izraelský teoretický fyzik Jacob Beckenstein ukázal v roce 1973, že by černé díry mohly mít některé termodynamické vlastnosti. Jedním z výsledků jeho úvah bylo přiřazení velmi nízké teploty povrchu černé díry. Této teplotě říkáme Beckensteinova teplota. Šlo víceméně pouze o nadhozený koncept. Detailně ho propočítal z kvantové teorie pole anglický teoretik Stephen Hawking. V roce 1975 ho to přivedlo k myšlence kvantového vyzařování černých děr. Podle kvantové teorie musí ve vakuu vznikat fluktuace elektromagnetického pole. Plyne to z relací neurčitosti, které neumožňují, aby byla současně nulová jak hodnota pole, tak jeho hybnost (o tomto faktu jsme se už zmínili v úvahách o kvantové pění). Tyto fluktuace vedou ke vzniku virtuálních (nezachytitelných) elektronových-pozitronových párů. Jakoby z ničeho se vynoří dvojice částic – elektron a pozitron, aby po krátké chvíli zase zanikly. Jejich energie nás nemusí trápit, tyto částice nikdy nemohou skončit v registračním přístroji, tj. jejich energii nemůžeme žádným způsobem měřit a otázka je jen akademická. Zákon zachování energie nebyl narušen. Virtuální páry samotné polapit sice nemůžeme, ale projevy jejich existence jsou dnes dobře měřitelné – Lambův posuv spektrálních čar, polarizace vakua, stínění nábojů částic na malých vzdálenostech, Casimirova síla atd.

Jiná situace je ale v blízkosti horizontu černé díry, kde tyto páry vznikají v energeticky příznivých podmínkách velmi hojně. Co se stane, pokud jeden člen páru, ať už elektron či pozitron, skončí pod horizontem? Pokud k tomu dojde, přestává být částice vně černé díry částicí virtuální. Může totiž odlétnout k vnějšímu pozorovateli a ten může změřit její energii. Z virtuální částice se stala reálná částice s určitelnými vlastnostmi. Její energie je nepochybně kladná, a protože musí platit zákon zachování energie pro celý pár, prostým

dopočtem zjistíme, že její virtuální partner, který skončil v černé díře, musel mít zápornou energii a hmotnost (vzhledem ke vzdálenému pozorovateli). Kdykoli se v okolí černé díry vynoří reálný pozitron nebo elektron, skončí v černé díře jeho bývalý partner se zápornou energií a hmotností a černá díra přijde právě o tu energii resp. hmotnost, kterou si odlétávající částice odnáší. Z bezprostředního okolí horizontu černé díry tak odlétá množství elektronů a pozitronů (někdy hovoříme o vypařování). Tyto částice spolu mohou anihilovat a dát vzniknout elektromagnetickému záření (pak už hovoříme o vyzařování). Hawking ukázal, že toto elektromagnetické záření opouštějící černou díru má charakter záření černého tělesa o Beckensteinově teplotě. Černá díra by tedy neměla do sebe uzavřít hmotu a energii navěky, Hawkingovým mechanismem by se černé díry měly postupně vypařovat a nakonec zcela zmizet. Jak pro hvězdné, tak pro galaktické černé díry jde ale o extrémní časy. Černá díra o hmotnosti Slunce se zcela odpaří za 10^{62} let, černá díra o hmotnosti galaxie (10^{11} Sluncí) se odpaří za 10^{95} let. V té době by ve vesmíru mohly výjimečně existovat i obří černé díry o hmotnosti 10^{14} Sluncí, ty se odpaří za 10^{106} roků. Při odpařování černých děr mohou také vznikat protony a antiprotony, jejichž život skončí opět rozpadem na elektrony, pozitrony, neutrina a fotony. V čase zhruba 10^{100} let končí éra černých děr a začíná temná éra vesmíru.

Temná éra

Finálním stavem po tepelné smrti vesmíru by měl být silně zředěný a mimořádně chladný nesvítící plyn elektronů, pozitronů, neutrin a fotonů. Popsaný scénář je závislý na mnoha faktorech, jež neznáme. Na prvním místě je podstata temné energie a jí odpovídající zrychlené expanze vesmíru. Pokud by zrychlená expanze nepokračovala a přešla v éru kontrakce, bude proces tepelné smrti vesmíru v některé z popsaných fází přerušen. Další velkou neznámou je rozpad protonu (a neutronu). Naše představy jsou jednou věcí, skutečnost může být ale zcela jiná. Dále netušíme, zda ve vesmíru nebudou v daleké budoucnosti existovat nějaké procesy, které by dokázaly opětovně vytvářet vodík z temné hmoty, temné energie, elektronů, pozitronů,



neutrin a fotonů. Pokud by něco takového bylo možné, mohl by z mrtvého vesmíru po velmi dlouhé době povstat plynule vesmír nový. Berme úvahy poslední kapitoly pouze jako snění o budoucnosti vesmíru, které je založené na našich současných znalostech. Naše představy se mohou naplnit, ale je možné, že osud vesmíru bude zcela jiný. To se ale už my nedozvíme.

Víte, že

■ Víte, že změření Hawkingova záření je zatím mimo technologické možnosti lidstva? Existují ale podobné jevy, například Unruhův jev, při němž by silně urychlený pozorovatel měl spatřit v blízkosti svého horizontu Unruhovo záření vakua, jev analogický Hawkingovu vypařování. Za „pozorovatele“ by mohl posloužit extrémně urychlený elektron.

■ Víte, že scénář tepelné smrti vesmíru má problém s definicí entropie? Není jasné, jak by měla být entropie definována v systému daleko od termodynamické rovnováhy, který může být navíc nekonečný. Jde o jednu z nejčastějších námitek odpůrců hypotézy tepelné smrti vesmíru.

■ Víte, že gravitačně vázaný systém má zápornou tepelnou kapacitu? Při snížení celkové energie se totiž rychlost jedinců zvýší. Význam tohoto faktu pro představu tepelné smrti vesmíru není zcela jasný.

■ Víte, že se v průběhu tepelné smrti vesmíru budou veškeré procesy zpomalovat? V daleké budoucnosti určitě nebude možný život našeho typu. Ale není vyloučena existence organizovaných struktur, jejichž reakce na vnější podněty bude v řádu miliard roků.

Poučení na závěr: Není vyloučeno, že se od nás galaxie vzdalují jen proto, že se nás bojí. V takovém případě by zrychlená expanze měla zcela jiné příčiny a my jsme se v celé této knížce hluboce mylili.

Jednotky

Astronomové využívají k měření vzdálenosti jiné jednotky než běžná populace. Metr je přece jen pro astronomická měřítka příliš malou vzdáleností. Pro měření ve Sluneční soustavě se používá *astronomická jednotka* (průměrná vzdálenost Země od Slunce), pro měření galaktických a mezigalaktických vzdáleností se využívají *světelné roky* (zejména v populární literatuře) a *parseky* (většinou v odborné literatuře). Definice těchto jednotek nejsou ale tak jednoduché, jak by se na první pohled zdálo, a mají své problémy. Pro měření energie částic, například v kosmickém záření, převzali astronomové elektronvolty a jejich násobky, které se běžně užívají v částicové fyzice. V následujícím stručném přehledu se můžeme s těmito jednotkami seznámit.

Astronomická jednotka

Astronomická jednotka byla původně definována jako střední vzdálenost Země od Slunce se zkratkou AU (z anglického *Astronomical Unit*). Záhy se ale ukázalo, že taková definice je nestabilní, protože se Země od Slunce pomalu, ale vytrvale vzdaluje o přibližně 15 centimetrů za rok. Na vině je především výměna momentu hybnosti obou těles prostřednictvím slapových sil, na druhém místě je ztráta hmotnosti Slunce zářením a únikem slunečního větru. V každém případě šlo o neúnosnou situaci, a tak Mezinárodní astronomická unie v roce 1976 zavedla definici novou: „*Astronomická jednotka je poloměr kruhové dráhy infinitesimalně malého tělesa, které se kolem Slunce pohybuje s úhlovou rychlostí 0,017 202 098 95 radiánu za den.*“ Definice to byla zcela jistě hezká, ale i ta měla své problémy. Jednak ji část astronomů nerespektovala a astronomickou jednotku dále odvozovala od stále narůstající střední vzdálenosti Země od Slunce, a jednak je tato jednotka zjevně závislá na hmotnosti Slunce. Slunce ale ztrácí hmotnost vyzařováním a slunečním větrem. Zářivý výkon Slunce je $3,85 \times 10^{26}$ W, tomu odpovídá ztráta

hmotnosti 4 miliony tun za sekundu. Přibližně za 7 miliard let se ve Slunci zapálí heliové reakce, Slunce se stane červeným obrem a únik látky z něj bude ještě větší. Odhaduje se, že v té době bude mít Slunce přibližně 75 až 80 % současné hmotnosti. Tělesa, která jsou dnes na dráze v okolí Země, se budou pohybovat na drahách o 50 % větších než dnes. Z tohoto hlediska je nová definice astronomické jednotky opět nevhodná. V roce 2012 udělala Mezinárodní astronomická unie definitivní řez. Astronomickou jednotku definovala jako konkrétní číslo bez vztahu k Zemi či Slunci. A navíc změnila zkratku z AU na „au“, aby všechny jednotky vzdálenosti používané v astronomii byly zapisovány dvěma malými písmeny abecedy: astronomická jednotka (au), světelný rok (ly) a parsek (pc). Od roku 2012 tedy platí: $1 \text{ au} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$ přesně.

Světelný rok

Světelný rok je vzdálenost, kterou uletí světlo ve vakuu za rok. Na první pohled jednoduchá definice má ale také svá úskalí. Samozřejmě se především musíme vypořádat s oním rokem, neboť ani doba oběžné dráhy Země kolem Slunce není z dlouhodobého hlediska konstantní. Tady si astronomové pomohli tzv. *juliánským rokem*, který je dlouhý přesně 365,25 dne a den je definován jako 86 400 sekund. Sekunda je jako základní jednotka SI odvozena od frekvence přechodu hyperjemné struktury základního stavu cesia 133. Definice světelného roku tak už nesouvisí s oběžnou dobou Země kolem Slunce, ale s atomem cesia. Jenže je tu druhý problém. Co když budeme chtít jednotky větší, třeba 5 miliard světelných roků? Tady už nemůžeme říct, že to je vzdálenost, kterou světlo ulétlo za pět miliard let, protože se za tu dobu vesmír podstatnou měrou nafoukl a světlo uletělo mnohem větší vzdálenost. Odhaduje se, že za přibližně 14 miliard roků, po které existuje vesmír, světlo ulétlo něco kolem 42 miliard světelných roků. Světelný rok je tedy definován bez započtení expanze vesmíru, což v jeho původní definici chybí, ale pro astronomii je to docela podstatné. Korektní definice světelného roku by tedy měla být: *Světelný rok je vzdálenost, kterou uletí světlo ve vakuu za juliánský rok bez započtení expanze vesmíru,*

1 ly = 9 460 730 472 580 800 m přesně. V astronomii se hojně používají násobky kly (10^3 ly), Mly (10^6 ly) a Gly (10^9 ly). V mnohých textech o kosmologii se uvádí současně jak vzdálenost bez expanze, tak vzdálenost se započtením expanze.

Parsek

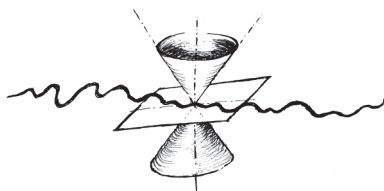
Slovo parsek je zkratkou z paralaktické sekundy. Původně šlo o vzdálenost, ze které bychom viděli poloměr dráhy Země kolem Slunce pod úhlem jedné úhlové vteřiny. Dnes je samozřejmě tato vzdálenost definována pomocí astronomické jednotky: *Jeden parsek je vzdálenost, z níž má 1 astronomická jednotka při kolmém pohledu úhlový rozměr jedné úhlové vteřiny, 1 pc = 648 000/π au.* Následující převodní tabulka s přesností na tři platné cifry snad čtenářům pomůže se v délkových jednotkách rychle zorientovat.

	m	au	ly	pc
m	1,00	$6,68 \times 10^{-12}$	$1,06 \times 10^{-16}$	$3,24 \times 10^{-17}$
au	$1,5 \times 10^{11}$	1,00	$1,58 \times 10^{-5}$	$4,85 \times 10^{-6}$
ly	$9,46 \times 10^{15}$	$6,32 \times 10^4$	1,00	0,307
pc	$3,09 \times 10^{16}$	$2,06 \times 10^5$	3,26	1,00

Elektronvolt

V částicové fyzice i astronomii se to přímo hemží elektronvolty. Jde o jednotku energie nebo hmotnosti (podle převodního vztahu $E = mc^2$). *Jeden elektronvolt je energie, kterou získá elektron při průchodu potenciálovým rozdílem jednoho voltu, 1 eV ≈ 1,602 × 10⁻¹⁹ J.* Většinou se používají i různé násobky: milielektronvolt (meV, 10^{-3} eV), kiloelektronvolt (keV, 10^3 eV), megaelektronvolt (MeV, 10^6 eV), gigaelektronvolt (GeV, 10^9 eV) a teraelektronvolt (TeV, 10^{12} eV). Klidová hmotnost elektronu je 511 keV, klidová hmotnost protonu je 938 MeV, hmotnost letícího komára je přibližně 1 TeV, nejvyšší

dosažená energie v urychlovači je 14 TeV (Velký hadronový kolider v CERN). Dne 15. října 1991 byla detektorem Muší oko v Utahu detekována v kosmickém záření dosud nejenergetičtější částice. Její energie byla $3,2 \times 10^{20}$ eV a vysloužila si název „*Oh My God Particle*“ (částice „*Ó můj bože*“). Nevíme, o jakou částici konkrétně šlo, protože v detektoru byla zachycena jen sekundární sprška z této částice. Její energie ale byla úctyhodná a odpovídá baseballovému míčku letícímu rychlostí 100 kilometrů za hodinu.



Elementární částice

Celou knížkou se prolínají nejrůznější názvy z oblasti elementárních částic. Tento text by měl čtenáři pomoci se v nich zorientovat. Vůbec první elementární částici – elektron – objevil Joseph Thomson v roce 1897 v katodovém záření. Druhou objevenou částicí byl foton – kvantum elektromagnetického záření. Kvantování energie poprvé zavedl Max Planck při pokusech o vysvětlení záření černého tělesa. Albert Einstein dal těmto kvantům reálný význam v roce 1905 při vysvětlení fotoelektrického jevu. Samotný název foton poprvé pro tuto částici použil až americký fyzikální chemik Gilbert Lewis v dopise časopisu Nature z roku 1926. Třetí částicí byl proton. Za objevitele protonu je považován Ernest Rutherford, který v roce 1911 detekoval atomové jádro při analýze rozptýlu částice alfa (jádro helia) pronikající tenkou zlatou fólií. Samotná jádra vodíku (protony) detekoval v roce 1918 při ostřelování dusíku částicemi alfa a v roce 1920 je pojmenoval protony. Tyto částice ale pozoroval již mnohem dříve – v roce 1886 – německý fyzik Eugen Goldstein v anodových paprscích. V roce 1932 objevil britský fyzik James Chadwick neutron a v následujících letech začalo množství elementárních částic neskutečně narůstat. Ukázalo se, že některé částice mají podobné vlastnosti a tvoří jakési rodiny elementárních částic. V šedesátých letech 20. století se zdálo, že některé částice nejsou elementární, ale jsou složeny z menších celků. Šlo zejména o proton a neutron, u nichž se při ostřelování urychlenými elektrony nakonec ukázalo, že jsou opravdu složeny z ještě menších částic, které dostaly název kvarky. Postupně začal vznikat tzv. standardní model elementárních částic, který byl završen v roce 2012, kdy byla objevena poslední jeho částice – Higgsov boson.

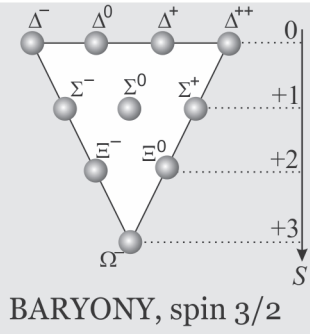
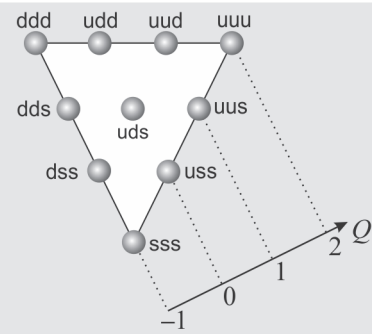
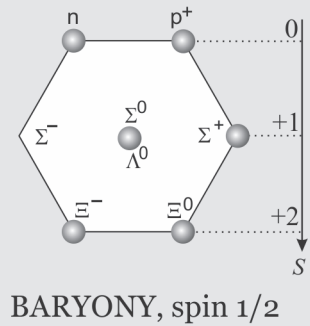
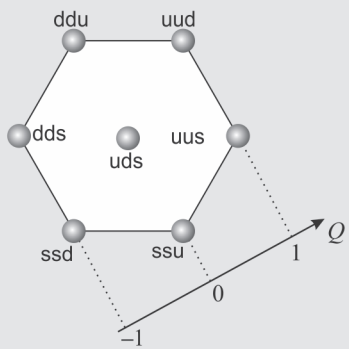
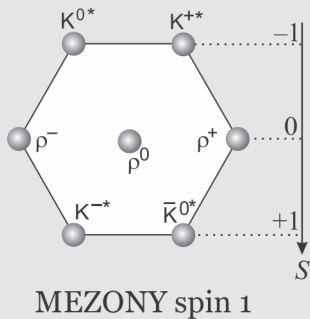
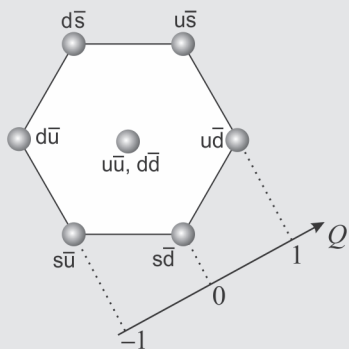
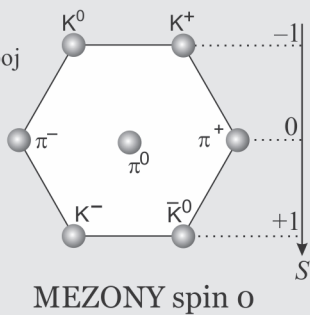
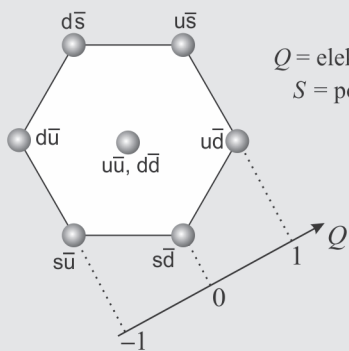
Dnes skutečné elementární částice dělíme do dvou velkých skupin. První jsou *částice látky*, základní stavební kameny, z nichž jsou tvořeny objekty kolem nás. Tyto částice spojují dohromady polní částice, kterým někdy říkáme *nosiče sil*. Do první skupiny – částic

látky – patří *kvarky*, z nichž jsou vybudovány těžší částice (například neutrony a protony). Obecně částicím, které jsou složené z kvarků, říkáme *hadrony*. Pokud jsou hadrony tvořeny trojicí kvarků, hovoříme o *baryonech*, pokud dvojicí kvarku a antikvarku, hovoříme o *mezonech*. K látkovým částicím patří kromě kvarků ještě *leptony*, ty dělíme dále na *elektrony* (jsou tři: elektron, mion a tauon) a *neutrino* (ta jsou také tři). A to je z částic látky vše: šestice kvarků, a šestice leptonů (tři elektrony a tři neutrino). K polním částicím patří *fotony* (částice elektromagnetické interakce), částice W^+ , W^- a Z^0 (polní částice slabé interakce), *gluony* (polní částice silné interakce) a *Higgsova částice*, která umožňuje ostatním částicím získat hmotnost. Samozřejmě, že ke každé částici může existovat ještě antičástice a možná za vysokých energií i supersymetričtí partneři, pokud je teorie supersymetrie pravdivá a nejde o slepou uličku. V následujícím textu naleznete některé užitečné pojmy z oblasti elementárních částic:

Leptony – skupina částic, mezi které patří elektron, těžký elektron (mion) a supertěžký elektron (tauon) a jejich neutrino (elektronové, mionové a tauonové). Tyto částice nepodléhají silné interakci, ale jen slabé, a pokud jsou nabité, působí na sebe ještě elektromagneticky. Název je odvozeninou z řeckého „leptos“ (lehký). Jde o historický název, některé tyto částice nelze považovat za lehké, například tauon je přibližně dvakrát hmotnější než proton.

Hadrony – částice složené z kvarků. Podléhají silné interakci. Kvarky jsou do větších celků spojovány gluony – polními částicemi silné interakce. Hadrony dělíme na *mezony* složené z kvarku a antikvarku a *baryony* složené ze tří kvarků různých barev. Název je odvozeninou z řeckého „hadros“ (silný, těžký). K nejnámějším mezonům patří piony, k nejnámějším baryonům neutron a proton.

Baryony – částice složené ze tří kvarků s různým barevným nábojem. Výsledná barva je „bílá“. Baryony podléhají silné interakci a patří proto mezi *hadrony*. Baryony složené z kvarků první generace (d, u) dělíme na nukleony se spinem rovným $1/2$ (proton a neutron) a delta baryony se spinem rovným $3/2$ (4 částice s různým nábojem). Baryony obsahující s kvark nazýváme *hyperony*.



Hyperony – částice složené ze tří kvarků (baryony). Obsahují podivný kvark „s“. Příkladem je lambda hyperon ($\Lambda^0 = uds$) nebo sigma baryony (například $\Sigma^+ = uus$). Hyperony byly hojně zastoupené v raném vesmíru.

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

Kaony – mezony K, částice složené z jednoho kvarku a jednoho antikvarku, z nichž je jeden z první generace („d“ nebo „u“) a druhým je „s“ kvark (nebo antikvark). Kaony v hojně míře vznikají v horních vrstvách atmosféry při její interakci s kosmickým zářením. Díky kaonům bylo objeveno narušení levoprávé symetrie (P symetrie) a narušení CP symetrie.

Fermiony – souhrnný název pro všechny částice, které mají poločíselný spin. Splňují Pauliho vylučovací princip (dvě takové částice nemohou být ve stejném kvantovém stavu). Při nízkých teplotách postupně obsazují jednotlivé kvantové stavy od nejnižšího až po tzv. *Fermiho mez*. Mezi fermiony patří všechny leptony, kvarky a baryony – například elektron, neutrino, proton a neutron. Fermiony se nazývají podle italského teoretika Enrica Fermiho.

Bosony – souhrnný název pro všechny částice, které mají celočíselný spin. Nesplňují Pauliho vylučovací princip a podléhají Boseho-Einsteinově statistickému rozdělení. Při nízkých teplotách ochotně zaplňují základní energetický stav, v němž se chovají jako jedna jediná částice. Hovoříme o tzv. Boseho-Einsteinově kondenzátu. K jeho typickým projevům patří například supravodivost a suprařekutost. K bosonům patří například všechny skalární i vektorové mezony, fotony a gluony. Bosony se nazývají podle indického fyzika Satyendry Natha Boseho.

částice

kvarky



nahoru



půvabný



svrchní



dolů



podivný

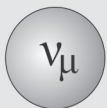


spodní

leptony



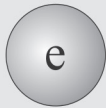
e neutrino



μ neutrino



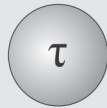
τ neutrino



elektron



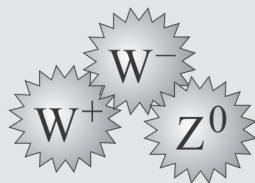
mion



tauon



foton



W, Z částice



gluon



higgs

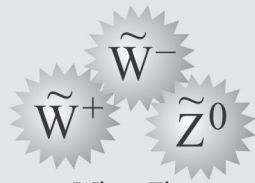
polní částice

superpartneři

skvarky



fotino



Wino, Zino



gluino



higgsino

s-polní částice

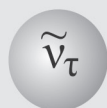
sleptony



e sneutrino



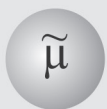
μ sneutrino



τ sneutrino



selektron



smion



stauon

Časová osa dějů ve vesmíru

10^{-43} s	snad začíná fungovat gravitační interakce, jak ji známe
10^{-35} s	snad oddělení silné interakce a inflační fáze
10^{-30} s	snad končí éra X a Y částic a naruší se CP symetrie
10^{-10} s	dochází k oddělení elektromagnetické a slabé interakce
1 až 10 μ s	hadronizace látky, vznik neutronů a protonů
0,1 až 2 s	oddělení neutrin od látky
sekundy	anihilace baryonů a antibaryonů
10 s	anihilace elektronů a pozitronů
minuty	tvorba lehkých jader
400 000 y	konec Velkého třesku
180 My	tvorba prvních hvězd, excitují neutrální vodík
550 My	reionizace vesmíru intenzivním svitem prvních hvězd
5 až 7 Gy	nástup zrychlené expanze
14 Gy	píši tuto knihu
15 Gy	konec obyvatelnosti Země
21 Gy	Slunce se stane obrem a pak bílým trpaslíkem
150 Gy	Místní skupina přestane komunikovat s okolím
800 Gy	slábnutí světla galaxií
1×10^{12} let	splynutí Místní skupiny do jediné galaxie
2×10^{12} let	přestaneme vidět za hranici Místní skupiny
10^{14} let	konec tvorby hvězd, počátek éry degenerace
10^{15} let	konec planet na oběžných drahách
10^{20} let	konec hvězdných zbytků na drahách v galaxiích
10^{34} let	snad rozpad neutronů a protonů, počátek degradace hvězdných zbytků
10^{40} let	snad konec éry degenerace, zůstávají černé díry, elektrony, neutrina a fotony
10^{100} let	snad vypaření posledních černých děr, vstup vesmíru do temné éry

Historie poznání (od 20. století)

- 1912 Vesto Slipher měří modrý posuv Velké „mlhoviny“ v Andromedě. Do roku 1915 nalézá řadu červených posuvů extragalaktických mlhovin.
- 1915 Vzniká Einsteinova obecná relativita.
- 1917 Einstein zavádí kosmologickou konstantu.
- 1920 Harlow Shapley a Heber Doust Curtis: Velká debata o povaze spirálních mlhovin.
- 1921 Theodor Kaluza přidává do obecné relativity pátou dimenzi.
- 1922 Alexandr Fridman analyzuje expanzi homogenního izotropního vesmíru.
- 1924 Edwin Hubble ukazuje, že Andromeda je galaxie.
- 1925 Georges Lemaître se setkává s Vesto Slipherem a Edwinem Hubblem v USA.
- 1927 Georges Lemaître správně interpretuje červené posuvy galaxií jako expanzi vesmíru a objevuje lineární vztah mezi rychlostí expanze a vzdáleností.
- 1927 Euger Wigner nachází zákon zachování levopravé symetrie.
- 1929 Edwin Hubble vydává článek konstatující lineární závislost mezi rychlostí expanze a vzdáleností.
- 1931 Georges Lemaître publikuje svou teorii prvotního atomu.
- 1933 Fritz Zwicky detekuje nadbytek pohybu v kupě galaxií Vlasy Bereniky a nastoluje problém chybějící hmoty v kupě.
- 1939 Hans Bethe ukazuje, že termojaderná syntéza je hlavním zdrojem energie hvězd.
- 1944 Walter Baade rozděluje hvězdy podle zastoupení těžkých prvků na populace.
- 1948 Ralph Alpher, George Gamow a Robert Herman předpovídají existenci reliktního záření a navrhují první model primordiální tvorby lehkých jader.

- 1956 První pozorování narušení CP symetrie v přírodě.
- 1957 Chein Wu prokazuje narušení CP symetrie v laboratoři.
- 1959 Steven Weinberg, Abdus Salam, Sheldon Glashow představují první variantu elektroslabého sjednocení. A také se narodil autor této publikace.
- 1961 Start družice ECHO. Jedna z používaných antén pro spojení objevila v roce 1965 reliktní záření.
- 1964 James Cronin a Val Fitch pozorují narušení CP symetrie.
- 1965 Robert Woodrow Wilson a Arno Penzias objevují reliktní mikrovlnné záření pozadí.
- 1967 Andrej Sacharov dává do souvislosti baryonovou asymetrii s narušením CP symetrie.
- 1968 Vera Rubinová nalézá ploché rotační křivky spirálních galaxií a nezávisle potvrzuje existenci temné hmoty.
- 1979 Dennis Walsch objevuje první gravitační čočku.
- 1979 Alan Guth navrhuje první inflační scénář vývoje raného vesmíru, který řeší problémy standardního modelu.
- 1981 Robert Kirschner objevuje Velkou prázdnotu neboli Velké nic v souhvězdí Pastýře.
- 1982 Andrej Linde, Andreas Albrecht a Paul Steinhardt navrhují nový inflační scénář.
- 1983 V CERN byly objeveny polní částice slabé interakce: nabité v prosinci 1983, neutrální v lednu 1984.
- 1985 Valérie de Lapparent, Margaret Gellerová a John Huchra objevují Velkou stěnu.
- 1989 Startuje americká družice COBE pro výzkum reliktního mikrovlnného záření pozadí.
- 1992 Družice COBE objevuje anizotropii reliktního záření.
- 1992 Objev první exoplanety u pulzaru.
- 1994 V CERNu je odstartován program, jehož cílem je příprava pralátky, z níž vznikal vesmír.
- 1995 Objev hnědých trpaslíků. Objev první exoplanety obíhající okolo hvězdy hlavní posloupnosti.
- 1996 Detektor DAMA má pozitivní signál částic temné hmoty.
- 1998 Týmy Adama Riese a Saula Perlmuttera objevují zrychlenou expanzi vesmíru.

- 2000 V CERNu je poprvé připravena zárodečná polévka Velkého třesku – kvarkové gluonové plazma.
- 2000 Z gravitačního působení na světlo se daří rekonstruovat rozložení temné hmoty, nacházet vlákna mezi kupami galaxií a pořizovat mapy temné hmoty.
- 2001 Startuje americká sonda MAP pro výzkum reliktního mikrovlnného záření pozadí.
- 2001 Neil Turok, Paul Steinhardt, Burt Ovrut a Justin Khoury formulují ekpyrotický model vzniku vesmíru.
- 2003 Z dat sondy WMAP byla provedena první frekvenční analýza fluktuací reliktního záření.
- 2005 Zveřejněny výsledky ze simulace Millenium Simulation.
- 2008 Detektor PAMELA nachází nadbytek pozitronů v kosmickém záření.
- 2009 Startuje evropská sonda Planck pro výzkum reliktního mikrovlnného záření pozadí.
- 2010 Erik Verlinde publikuje první variantu entropické gravitace.
- 2013 Detektor AMS 02 potvrzuje nadbytek pozitronů v kosmickém záření.
- 2013 Zveřejněn největší balíček výsledků ze sondy Planck.
- 2014 Zveřejněny první výsledky kosmografického projektu Cosmicflows, v němž je popsán blízký vesmír jako rychlostní pole galaktických toků.
- 2015 Na detektoru LIGO byly objeveny gravitační vlny.
- 2015 Zveřejněny výsledky ze simulace Illustris.
- 2016 Erik Verlinde do své teorie přidává objemový zdroj entropie, a tím ji odlišuje od obecné relativity.
- 2017 Velkorozměrové struktury v našem okolí jsou zmapovány až do vzdálenosti, v níž se od nás galaxie vzdalují rychlostí desetin rychlosti světla.
- 2018 Z dat sondy Planck jsou zpracovány dosud nejpodrobnější mapy fluktuací a polarizace reliktního záření.
- 2018 Alan Rodgers nachází v rámci projektu EDGES absorpční čáru odpovídající prvním hvězdám, datuje jejich vznik do doby 180 milionů roků.
- 2019 Zveřejněny výsledky ze simulace IllustrisTNG.

Rejstřík

- absolutní
 - horko 136, 175, 186
 - nula 186
- Agartha 11
- ALICE 93, 146
- AMS 75–77, 148–149
- Andromeda 69
- anihilace
 - baryonů 100, 221
 - elektronů 95, 100, 179, 221
 - wimpů 76
- Arecibo 169
- astronomická jednotka 213–214
- axion 73, 85
- baryonová látka 92, 129
- baryonové akustické oscilace 129
- baryony 92, 217
- bastard 69
 - sférický 69
- BBO 143, 166, 171, 192
- Beckensteinova teplota 209–210
- beta rozpad 23, 88, 96–97,
179–180
- brána 193–196, 199
- Brookhavenská národní laboratoř
93, 146
- Casimirova síla 81, 209
- CAST 73
- cefeidy 78
- centrální výduť 126
- CERN 24, 73, 75, 87, 92–93, 138,
146, 216
- COBE 44, 46, 49, 224
- CoGEnT 73
- Cosmicflows 121, 225
- Crawfordova anténa 43–44
- CRESST 73
- částice X, Y 183
- černá díra 21, 25, 114, 166,
173, 195–196, 201, 204–206,
209–211, 221
- DAMA/Libra 72, 224
- decelerační parametr 79
- degenerovaný plyn 206
- dilatace času 21
- dipólový repeler 129
- Discovery 75
- doménové stěny 140
- dutozemě 13, 190
- EDGES 106, 225
- Effelsberg 169
- EHT 173
- ECHO 43, 45, 224
- Einsteinův teleskop 163–164
- ekpyrotický model 192–193, 198
- elektrolýza 26
- elektronvolt 215–216
- entropická síla 190
- entropická gravitace 225
- entropie 82–83, 142, 201–202,
212, 225
- extradimenze 25, 196
- extragalaktická mlhovina
28–30, 223
- éry (klasické dělení)
 - éra látky 202
 - éra temné energie 202
 - éra záření 202
- éry (tepelná smrt)
 - éra černých děr 209
 - éra degenerace 205
 - éra hvězdná 203
 - éra primordiální 203
 - éra temná 210
- fázový přechod 40, 88, 140–142
druhého druhu 140

Fénix 93, 115, 146
 Fermilab 75
 feromagnetikum 140
 Firefox 11
 fluktuace
 reliktního záření 46–50, 72,
 81–82, 87, 129, 142, 145, 172,
 198, 225
 skalární 191
 tenzorová 191–192
 vakua 83
 fonon 75
 galaktické halo 126
 galaxie
 eliptická 109, 120, 126, 127,
 132, 157, 204
 spirální 28, 69–70, 83, 127, 132,
 223, 224
 spirální s příčkou 126–127
 trpasličí 120, 126
 generace hvězd 47, 104, 108,
 115, 117
 geodetika 20
 globule 108, 111
 gluony 23, 88, 91, 217
 GOODS 79, 123
 gravitace
 Einsteinova (obecná relativita)
 20–21, 133, 135, 161, 163, 176,
 189, 196, 223
 entropická 225
 Newtonova 11, 13, 16
 smyčková 25, 190, 198
 gravitační kontrakce 109,
 111–112, 206
 Green Bank 169
 hadronizace látky 92, 100, 221
 hadrony 92, 217
 Hawkingův mechanismus 201, 203,
 210, 212
 HDF 122
 HDF-S 122
 Higgsovo pole 91, 138
 horizont
 černé díry 25
 kosmologický 205
 pozorovatelného vesmíru 10,
 55–56, 59, 62, 64, 121, 135
 hranice
 časová 54–56
 vesmíru 53, 59
 Hubblovo hluboké pole 122
 HUDF 123, 158
 hustotní vlny 126
 hvězdy
 bílé trpaslíci 78, 114, 116, 166,
 203–207, 221
 černí trpaslíci 204, 206–207
 červení trpaslíci 119, 206–207
 helioví trpaslíci 206–207
 hlavní posloupnosti 112, 224
 hnědí trpaslíci 111, 206–207, 224
 neutronové 69, 76, 114, 117,
 168, 177, 179, 203–207
 obří a veleobří 78, 112, 117, 204,
 214, 221
 porodnice 108–111, 113, 119,
 151, 152
 první 104–108
 chameleon 73
 Illustris 131, 160, 225
 IllustrisTNG 131, 225
 inflace 133–143, 163, 176,
 190–192
 inflatonové pole 138, 190
 interakce
 elektroslabá 24, 88, 91, 224
 gravitační 20, 71, 81–82, 88,
 130, 135, 138, 182, 184, 221
 silná 20, 23–24, 40, 71, 88, 141,
 179, 182–183, 221
 slabá 20, 23–24, 40, 71–72, 88,
 91, 96, 100, 179–180, 182–183,
 205, 221, 224
 jasnost objektu 78, 124
 Jeansovo kritérium 108

Jihokarolinská univerzita 198
 Jodrell Bank 169
 juliánský rok 214
 KAGRA 163
 Kaluzův-Kleinův model 24, 223
 kauzálně nsvázané oblasti
 135–136, 205
 kilonova 207
 kosmické struny 140–141
 kosmické záření 76, 85, 96,
 176–177, 180, 213, 216, 225
 kosmos 11
 kritická hustota 35, 136, 189, 191
 křivost vesmíru 35–37, 136, 190
 globální 35
 kvantová teorie pole
 kvarky 40, 88, 91–92, 100–101,
 129, 133, 183, 199, 217
 kvazikrystal 198
 kvintesence 81–82
 Lawrenceova národní laboratoř
 v Berkeley 75, 78, 92
 v Livermoru 198
 Leidenfrostův jev 177, 192
 leptony 40, 88, 91, 133, 183,
 199, 217
 LEP 92
 LHC 75, 93, 100
 LIGO 163, 225
 LISA 143, 147, 165–167, 171
 LISA Pathfinder 165
 Lovellův radioteleskop 169
 LSST 124
 malý třesk 93, 146
 MeerKAT 173
 mezony 92, 217
 MOND 82
 Mt. Wilson 29–30, 37, 69
 multiverzum 143, 192, 198
 nadkupa galaxií 120–121, 126
 Nançay 169
 Národní laboratoř Gran Sasso
 72–73, 85
 neutrina 72, 88, 112, 114, 180,
 183, 205, 207, 209–210, 212,
 217, 221
 atmosférická 96
 geoneutrina 96
 reaktorová 96
 reliktní 50, 55, 87, 95–97, 101
 sluneční 96, 101
 ze supernov 96, 114
 neutron 73, 88, 91–95, 129, 183,
 205–207, 210, 217, 221
 nový inflační scénář 139–142
 obecná relativita 20–21, 133, 135,
 161, 163, 176, 189, 196, 223
 Oh My God 216
 Orlí mlhovina 111, 150
 PAMELA 76, 225
 paradox fotometrický (noční tmy,
 Olbersův) 56–59
 paralaxa 78
 Parkes 169
 parsek 215
 pekle 92, 176
 pěna
 kvantová 40, 134, 176, 184, 209
 spinová 25
 placatky 54, 58, 60–64
 Planck (sonda) 103–104, 145, 172,
 191–192, 198, 225
 Planckovy škály 184, 186, 192
 délka 184
 čas 136
 energie 186
 hmotnost 184, 186
 teplota 186
 planetární mlhovina 114, 154, 204
 plazma 10, 40–41, 49, 55, 87, 100,
 103–104, 175
 kvarkové-gluonové 92–93, 225
 plochý disk 126
 počítačová simulace 129–132, 160,
 199, 225
 pohybové zákony 15–18
 polarizace
 reliktního záření 47–49, 104,

106, 145, 171–172,
 191–192, 225
 vakua 81, 209
 poměr tenzorových a skalárních
 fluktuací 191–192
 populace hvězd 117, 223
 posuv
 červený galaxií 29–30, 34,
 78, 223
 červený gravitační 21
 červený kosmologický 21, 32–33,
 59, 79, 122
 Lambův 81, 209
 Prázdnota v Pastýři 127
 princip
 kosmologický 27, 31–32, 53
 supersymetrie 24, 72
 problém
 baryonové asymetrie 95, 137,
 182, 224
 horizontu 135–136, 190, 198
 magnetických monopolů 137,
 143, 191
 plochosti 136
 počáteční singularity 135
 síly 18–20
 protohvězda 109, 111
 protoplanetární disk 111
 proton 91–95, 201, 205–207, 215,
 217, 221
 první hvězdy 104–108
 prvotní atom 39, 223
 předinflační fáze 121, 134, 136, 176
 PTA 169–171
 pulci
 galaktičtí 123
 hvězdní 110
 regelace 26
 reliktní
 gravitační vlny 87, 142, 161–174
 neutrino 87, 95–98
 záření 39–51, 54, 72, 104, 106,
 129, 142, 145, 223–225
 RHIC 93, 146,

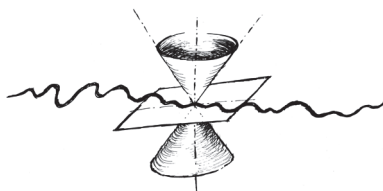
Rozeta (Rosette) 151
 roton 75
 SDSS 124–125
 sekundární spršky 176, 180, 216
 Shapleyho koncentrace 121,
 128–129, 160
 Simulace tisíciletí 130–132
 síla
 Casimirova vakuová 81, 209
 elektromagnetická 40, 88,
 91, 183
 entropická 190
 gravitační 20, 71, 81–82, 88,
 130, 135, 138, 182, 184, 221
 osmotická 82
 silná 20, 23–24, 40, 71, 88, 141,
 179, 182–183, 221
 slabá 20, 23–24, 40, 71–72, 88,
 91, 96, 100, 179–180, 182–183,
 205, 221, 224
 SKA 143, 169, 171, 173, 192
 Skipper CCD 75
 Sloanova nadace 124
 Sloupy stvoření 111, 150
 SPS 92–93
 standardní svíčka 78
 STAR 93
 stínění nábojů 209
 struny 24–25, 183–184, 190,
 192, 199
 superpartner 72
 supernova 69, 84, 96, 100,
 108–109, 113–117, 124, 203
 typu Ia 78–79, 123, 207
 supersymetrie 24, 72
 supratekutá kapalina 198
 světelný rok 214–215
 symetrie
 C 182
 CP 182–183, 221
 CPT 186
 P 180, 223
 temná energie 76–80, 83–84
 temná hmota 69–76, 83–84

chladná CDM 72
 horká HDM 72
 most 85
 teorie
 GUT 183, 205–206
 relativity 20–21, 133, 135, 161, 163, 176, 189, 196, 223
 rychlého světla 198
 strun 24–25, 183–184, 190, 192, 199
 všeho (TOE) 23, 183
 tepelná smrt 201–212
 termodynamická
 druhá věta 202
 první věta 202
 rovnováha 59, 201, 212
 tokamak 182
 topologické defekty 140
 trpaslík
 bílý 78, 114, 116, 166, 203–207, 221
 černý 204, 206–207
 červený 119, 206–207
 heliový 206–207
 hnědý 111, 206–207, 224
 v-web 127
 Velká debata 28–29, 46, 223
 Velká stěna 127
 Velká stěna BOSS 127
 Velké a Malé Magellanovo mračno 126
 Velké nic 127, 132, 224
 Velký atraktor 129, 160
 Velký křach 201, 203
 Velký třesk 10, 32, 34, 40–51, 54–56, 64, 87, 92, 95, 100, 103, 106, 114, 117, 129, 142, 171, 175–176, 190, 193, 198, 201, 203, 225
 vesmír
 anti de Sitterův (AdS) 37
 de Sitterův 37
 ekpyrotický 192
 hranice 53
 hranice časová 54
 konečný a nekonečný 53–56
 stacionární 39, 201
 Vědecký institut Vesmírného dalekohledu v Baltimore 78
 věta termodynamická
 druhá 202
 první 202
 Virgo (detektor) 163
 VIRGO (konsorcium) 130
 vypařování černých děr 210–211
 Weberovy válce 42, 162
 Weissovy domény 140
 Westerbork 169
 wimp 72–73, 75–76
 WMAP 47, 49, 225
 XENONnT 73
 XMM Newton 85, 123
 Z sprška 96
 zákon
 gravitační 11, 16, 70, 82
 HLS 31
 Hubblův 31
 Hubblův-Lemaîtreův 31
 Hubblův-Lemaîtreův-Slipherův 31, 34, 70
 setrvačnosti 15, 18
 zachování energie 21, 202, 209
 zachování hybnosti 186
 zachování levoprávé symetrie 223
 zákony
 elektrolýzy 26
 eukleidovské geometrie 60
 kvantové 75, 81, 134–135, 176
 pohybové 15–16, 18
 termodynamické 202
 zářivý výkon 78, 213
 zastavení světla 64
 zrychlená expanze 76–81
 Λ -CDM 84

Rejstřík osob

- Afshordi, Niayesh 196
Albrecht, Andreas (*1957) 140
Alfvén, Hannes (1908–1995) 177, 179
Alpher, Ralph (1921–2007) 41–42, 99
Augustin z Hippony (354–430) 176
Aurelius, Marcus (121–180) 119
Baade, Walter (1893–1960) 69, 117
Bailly, Jean Sylvain (1736–1793) 202
Beckenstein, Jacob (1947–2015)
209–210
Bell-Burnellová, Jocelyn (*1943) 168
Bethe, Hans (1906–2005) 42, 113
Bohr, Niels (1885–1962) 196
Bostrom, Nick (*1973) 199
Campbell, Joseph John (1904–1987) 87
Courtois, Héléne (*1970) 121
Crawford, Arthur (1907–1990) 43–44
Cronin, James (1931–2016) 182
Curtis, Heber Doust (1872–1942)
28–29
Dicke, Robert Henry (1916–1997) 44
Dyson, Freeman (*1923) 202
Eckhart, mistr (1260–1327) 175
Einstein, Albert (1879–1955) 20,
23–25, 27–30, 53, 79, 161, 163, 195
Ewen, Harold Irving (1922–2015) 106
Faraday, Michael (1791–1867) 15,
17, 26
Fitch, Val (1923–2015) 182
Gaarder, Jostein (*1952) 189
Galilei, Galileo (1564–1642) 25
Gamow, George (1904–1968) 39–42,
44, 99, 113
Gellerová, Margaret (*1947) 127
Glashow, Sheldon (*1932) 24
Greenstein, Jesse Leonard (1909–2002)
38
Guth, Alan (*1946) 137, 139,
142–143, 191
Haldane, John Burdon Sanderson
(1892–1964) 39
Halley, Edmond (1556–1742) 11
Hauová, Lene (*1959) 64
Hawking, Stephen (1942–2018) 176,
201, 203, 209–210, 212
Heisenberg, Werner (1901–1976) 196
Helmholtz, Hermann von (1821–1894)
202
Herman, Robert (1914–1997) 41, 99
Hewish, Anthony (*1924) 168
Heyrovský, David (*1970) 71, 85
Heyrovský, Jaroslav (1890–1967) 85
Hitler, Adolf (1889–1945) 13, 187
Hobland, Martin (*1968) 133
Hoffman, Yehuda 121
Hoyle, Fred (1915–2001) 39, 113
Hubble, Edwin (1889–1953) 13, 28–31,
37–38, 69, 132
Huchra, John Peter (1948–2010) 127
Hulst, Hendrik Christoffel van de
(1918–2000) 104
Humason, Milton (1891–1972) 29–30
Chandrasekhar, Subrahmanyan
(1910–1995) 78
Chaplin, George 198
Chaseaux, Jean Phillipe Loys
(1717–1751) 58
Infeld, Leopold (1898–1968) 24
Islam, Jamal Nazrul
(1939–2013) 202
Jeans, James (1877–1946) 108
Kaluzza, Theodor (1885–1945) 23, 26
Kepler, Jan (1571–1630) 58
Khoury, Justin 193
Kirschner, Robert (*1949) 127
Klein, Oskar Benjamin (1894–1977) 24
Lapparent, Valérie de (*1962) 127
Lec, Stanisław Jerzy (1909–1966) 103

- Leidenfrost, Johann Gottlob
(1715–1794) 177
- Lemaître, Georges (1894–1966)
29–30, 39
- Lenin, Vladimír Iljič (1870–1924) 113
- Linde, Andrej (*1948) 138, 140, 142
- Lowell, Percival (1855–1916) 28–29
- Lundmark, Knut (1889–1958) 132
- Mann, Robert 196
- Mather, John (*1946) 46
- Maxwell, James Clerk (1831–1879)
23–24, 161
- Mazur, Pawel 198
- Michelson, Albert (1852–1931) 37
- Möbius, August Ferdinand
(1790–1868) 60
- Newton, Isaac (1642–1727) 15–19
- Nicholson, Seth Barnes (1891–1963) 37
- Olbers, Heinrich Wilhelm
(1758–1840) 58
- Oort, Jan Hendrik (1900–1992) 104
- Ovrvut, Burt 193
- Pauli, Wolfgang (1900–1958) 196
- Peebles, Phillip James Edwin (*1935) 44
- Pechov, Alexej (*1978) 67
- Penzias, Arno (*1933) 44
- Perlmutter, Saul (*1969) 78–79
- Poe, Edgar Allan (1809–1849) 58
- Pomarede, Daniel 121
- Pourhasan, Razieh 196
- Purcell, Edward Mills (1912–1997)
106, 117
- Rankine, William (1820–1872) 202
- Riess, Adam (*1969) 78–79
- Robertson, Howard Percy
(1903–1961) 30
- Rogers, Alan (*1941) 106, 108
- Rubinová, Vera Cooper
(1928–2016) 69–70
- Sagan, Carl (1934–1996) 27, 161
- Sacharov, Andrej (1921–1989) 182, 186
- Salam, Abdus (1926–1996) 24
- Shapley, Harlow (1885–1972) 28–29
- Schwarzschild, Karl (1873–1916)
195–196
- Sitter, Willem de (1872–1934) 37
- Slipher, Vesto (1875–1969) 29–31, 34
- Sloan, Alfred Pritchard
(1875–1976) 124
- Smoot, George (*1945) 46
- Starobinskij, Alexej (*1948) 138, 143
- Steinhardt, Paul (*1952) 140, 142–143,
193, 198
- Thomson, William (lord Kelvin)
(1824–1907) 202
- Tolstoj, Lev Nikolajevič (1828–1910) 15
- Tombaugh, Clyde (1906–1997) 28
- Tully, Richard Brent (*1943) 121
- Turok, Neil (*1958) 193
- Verlinde, Erik (*1962) 25, 82–83, 183
- Walsch, Dennis (1933–2005) 84
- Weber, Joseph (1919–2000)
42, 162, 173
- Weinberg, Steven (*1933) 24, 97
- Wigner, Eugen (1902–1995) 180
- Wilkinson, David Todd (1935–2002)
44, 47
- Wilson, Robert Woodrow (1936) 44
- Wu, Chien (1912–1997) 180
- Zamarovský, Peter (*1952) 64
- Zwicky, Fritz (1898–1974) 37,
69–70, 84



planetarium

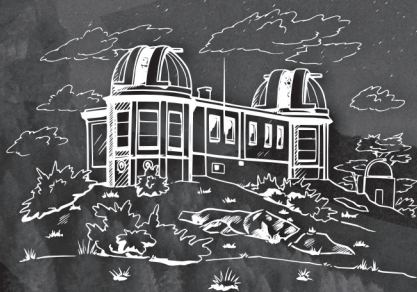
Planetárium Praha



Štefánikova hvězdárna



Hvězdárna Ďáblice



Planetárium Praha, Štefánikova hvězdárna a Hvězdárna Ďáblice – tři střediska, která jsou součástí jediné platformy jménem Planetum.

V naší nabídce najdete astronomické filmy a pořady, odborné přednášky, kurzy a kroužky, výstavy, koncerty a divadelní představení, astronomická pozorování, Astrobus pro školy nebo pronájem našich unikátních prostor.

PROJEKCE

Projekci oblohy a unikátní prostorové zobrazení vesmíru lze sledovat v pražském planetáriu, které patří k největším na světě a jeho kopule je největší promítací plochou v ČR, což každému pořadu dodává neobyčejný zážitek. Projekce uvádíme denně.

PŘEDNÁŠKY

Ve všech třech našich střediscích pravidelně pořádáme přednášky a interaktivní fyzikální show. Přednášejícími jsou odborníci z oboru astronomie a přírodních věd.

KURZY A KROUŽKY

Organizujeme řadu kroužků a kurzů jak pro děti, tak pro dospělé. Také pořádáme příměstské tábory nebo si u nás můžete objednat mobilní hvězdárnu – Astrobus.

POZOROVÁNÍ OBLOHY

Celoročně naše hvězdárny nabízejí pozorování objektů denní i noční oblohy velkými dalekohledy.

Když jde o vesmír, není tu nikdo lepší!

www.planetum.cz

Hvězdárna a planetárium
hl. m. Prahy, p. o

Zřizovatel: hlavní město Praha

PRA	HA
PRA	GUE
PRA	GA
PRA	G

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ (FEL) byla založena roku 1950 a je součástí nejstarší a nejprestižnější technické univerzity v České republice – ČESKÉHO VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V PRAZE.

V současné době má fakulta 17 kateder v nově zrekonstruované budově v Dejvicích a v historickém komplexu na Karlově náměstí. FEL poskytuje prvotřídní vzdělání v oblasti elektrotechniky a informatiky, energetiky, elektroniky, telekomunikací, automatického řízení, kybernetiky, robotiky a počítačového a softwarového inženýrství.

Studovat lze i v anglickém jazyce. Část studia lze strávit v zahraničí, například v rámci programu Erasmus+. Lze i získat praktické zkušenosti při spolupráci s mnohými průmyslovými partnery či ve výzkumných týmech FEL.



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ČVUT V PRAZE**

TADY JSTE SPRÁV
FEL ČVUT



fel.cvut.cz
facebook.com/cvutfel
twitter.com/cvutfel
instagram.com/cvutfelpraha
youtube.com/cvutfel

Výhodou studia na FEL ČVUT je nízký počet studentů na pedagoga, což zajišťuje posluchačům individuální přístup, a rovněž velký počet špičkově zařízených laboratoří. Absolventi mají tradičně široké uplatnění na trhu práce a stávají se uznávanými odborníky.

FEL ČVUT nabízí široké spektrum studijních programů:

Bakalářské a magisterské studium:

- Elektrotechnika, energetika a management (Bc., Ing.)
- Elektronika a komunikace (Bc., Ing.)
- Otevřené elektronické systémy (Bc., Ing.)
- Kybernetika a robotika (Bc., Ing.)
- Otevřená informatika (Bc., Ing.)
- Lékařská elektronika a bioinformatika (Bc., Ing.)
- Softwarové inženýrství a technologie (Bc.)
- Inteligentní budovy (Ing.)
- Letectví a kosmonautika (Ing.)
- Elektrotechnika, elektronika a komunikační technika (Bc.)

Doktorské studium:

- Akustika
- Aplikovaná fyzika
- Bioinženýrství
- Ekonomika energetiky a elektrotechniky
- Elektrotechnika a komunikace
- Informatika
- Kybernetika a robotika
- Letecká a kosmická technika

Soustředění

každým rokem pořádáme pro
studenty Astrosoustředění
s přednáškami
a pozorováním

Server Aldebaran

19 let kvalitních
informací a novinek
z astronomie
a fyziky

Nakladatelství AGA (Aldebaran Group for Astrophysics)

recenzované publikace
a materiály
z astronomie
a fyziky

www.aldebaran.cz

Výuka

členové sdružení Aldebaran se podílejí na výuce na středních i vysokých školách

Expedice

sdružení Aldebaran pořádá pravidelně expedice za zatměními Slunce, polárními zářemi a do zajímavých vědeckých pracovišť



PETR KULHÁNEK

JAK VZNIKAL SVĚT

ANEB TŘINÁCTERO PŘÍBĚHŮ O KOSMOLOGII

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

Autor: prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.

Sazba: Ing. Radek Beňo, Ph.D.

Grafika a obálka: Ing. arch. Ivan Havlíček

Jazyková korektura: Ing. Rudolf Mentzl

Layout: Ing. Martin Batelka

Předsádky:

Vznik prvních hvězd (ESA, Christophe Carreau).

Polarizace reliktního záření (ESA, Planck Collaboration).

Formát: 13×20 cm, 240 stran

Obrázky: 48 černobílých, 18 barevných

Nakladatelství: AGA (Aldebaran Group for Astrophysics)

Vydání: první, Praha 2019

Tisk: EUROPRINT a.s.

www.aldebaran.cz

ISBN 978-80-906638-1-7