

8. Strach z prázdnoty

*Tam prázdno pouhé – nade mnou,
a kolem mne i pode mnou
pouhé tam prázdno zpívá.*

Karel Hynek Mácha, český básník

Na fakultě máme takový letitý cyklus přednášek pro veřejnost, říká se tomu Fyzikální čtvrtky. Jednou byla na programu přednáška o kvantové teorii. Téma mě zlávalo a natěšeně jsem usedl do posluchárny. Přednášející předváděl jakýsi software na řešení rovnic kvantové mechaniky, bylo na první pohled vidět, že je jím fascinován jak malé děcko novou hračkou. Jenže kvantová teorie je postavená tak, že rovnice se řeší ve dvou krocích. V prvním se naleznou všechna možná řešení (těch je nekonečně mnoho) a v druhém se z nich přesně daným algoritmem vybírají jen některá. Právě výběrem řešení, která odpovídají dějům v přírodě, dojde ke kvantování. Dotyčný přednášející o druhém kroku zjevně netušil. Nedalo mně to a upozornil jsem ho, že řešení, která prezentuje, nejsou řešeními, která by popisovala děje v mikrosvětě. Reakce byla poněkud agresivní: odpověděl, abych se staral o sebe a nestrkal nos do věcí, kterým nerozumím; že ten software je naprosto úžasný a řešení jsou přece správná, když je počítač spočítal. Dál jsem se nehádal, pochopil jsem, že by to byla ztráta času.

Zhruba rok poté jsem dostal za úkol napsat oponentský posudek na diplomovou práci jakési dívenky. Práce byla věnována kvantové mechanice a světe div se, jejím vedoucím byl onen přednášející. Práce využívala jím předváděný software, chyběl tam opět druhý krok: tedy výběr skutečných řešení z nabídnutých. Velmi nerad jsem napsal, že je práce nevyhovující, neboť v ní není správně ani jedno řešení a v posudku dodal, že za neúspěch rozhodně nemůže diplomantka, ale chybné vedení práce.

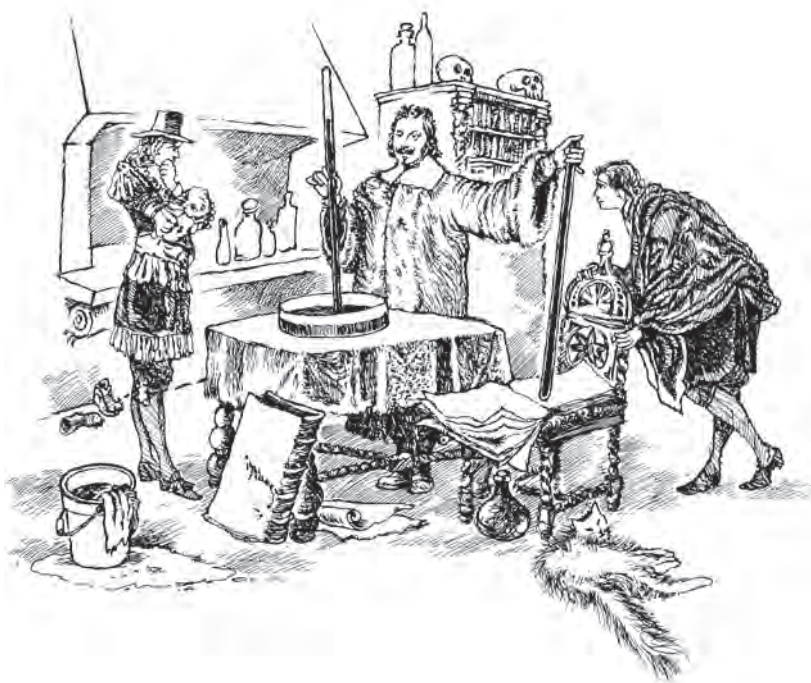
Uplynuly další dva roky a na věc jsem dávno zapomněl. V nějakých tabulkách z děkanátu, věnovaných diplomovým pracím, jsem si všiml jména, které mně bylo povědomé. Ano, byla to ona dívka a práci měla ohodnocenou jako výbornou. Nejprve mně napadlo, že ji tedy předělala a obhájila konečně s úspěchem. Práci s posudkem jsem si se zájmem vypůjčil a nestačil se divit. Můj posudek u ní vůbec nebyl a byl nahrazen jiným posudkem, který práci vychválil do nebes. Věc jsem tenkrát nechal být. Nerad bych škodil holce, která za to vlastně nemohla. Ale dospěl jsem k jasnému závěru: vedoucí práce nemá žádnou sebereflexi a v hlavě se rozprostírá pustina kvantovou teorií nepolíbená. Snad se v oné prázdnotě alespoň prohánějí všudypřítomné vakuové fluktuace polí, o nichž v této kapitole bude řeč. Přece jen mám ale na závěr pozitivní zprávu. Dotyčný je sice na fakultě stále, dokonce se stal profesorem, ale naštěstí ve zcela jiném oboru, kterému snad opravdu rozumí.

Horror vacui

Původní koncept „strachu z prázdnoty“, kterému se začalo říkat *horror vacui*, pochází od Aristotela ze Stageiry (384–322 př. n. l.). Aristotelés předpokládal, že v přírodě nemůže být nikde prázdnota, neboť by byla okamžitě zaplněna okolní látkou. V 16. a 17. století, kdy se rodil současný přístup k vědeckému poznání, přivedla tuto teorii opětovně na výsluní řada autorů. Mezi nimi byl například i Galileo Galilei (1564–1642). Paradoxně této teorii zasadil největší ránu jeden z Galileových žáků, italský matematik a fyzik Evangelista Torricelli (1608–1647), mj. vynálezce barometru.

Torricelli předvedl v roce 1643 v italské Pise velmi zajímavý experiment. Metrovou skleněnou trubici, která byla na jednom konci uzavřená, naplnil až po okraj rtutí. Poté trubici otočil a otevřený konec ponořil do nádoby se rtutí. V horní části trubice se mezi hladinou a uzavřeným koncem trubice objevil prázdný prostor neboli v tehdejší fyzikální hantýrce vakuum. Rtuť sahala do 76 centimetrů nad hladinu nádoby. Proč tomu tak bylo? Atmosféra tlačí atmosférickým tlakem na hladinu rtuti v nádobce. Tlaková síla se ve rtuti

rovnoměrně přenáší a v dolní části trubice je přesně kompenzována tíží 76 centimetrů rtuťového sloupce. Vzniklý prostor nad sloupcem není ve skutečnosti úplně prázdný, ale jsou v něm páry rtuti, jejichž tlak je oproti atmosférickému zanedbatelný. Celá atmosféra tlačí na povrchu Země na cokoli (i na nás) tlakem zhruba 10^5 pascalu. Stejný tlak vyvine 76 centimetrů rtuťového sloupce nebo 10 metrů vodního sloupce. Ponoříte-li se do hloubky deseti metrů, pocítíte tlak dvou atmosfér. Za jednu atmosféru může veškerý vzduch nad vámi, za druhou tlak způsobený deseti metry vody, pod níž se nacházíte. Pokud by Torricelli ke svému pokusu použil vodu, musela by jeho trubice mít výšku větší než deset metrů. Torricelliho pokus ukázal současníkům, že se příroda nebojí prázdnoty a že existují dutiny, které látka nedokáže zaplnit. To se líbilo tehdejším atomistům, kteří potřebovali, aby se atomy, jakožto základní částice látky, mohly pohybovat prázdným prostorem.



Nejslavnější experiment prokazující existenci vakua proběhl pouze o 11 let později. V německém Magdeburku byl tehdy starostou Otto von Guericke, vědec a vynálezce. Magdeburk byl zdevastován třicetiletou válkou, při níž bylo zmasakrováno 20 000 obyvatel, a jen 4 000 jich přežilo. Otto von Guericke dělal vše pro obnovu slávy svého města. Vynalezl vývěvu a napadlo ho, že by ji mohl předvést současně s demonstrací vakua a využít takovou veřejnou podívanou k tomu, aby ukázal, že Magdeburk stále existuje. Dnes bychom řekli, že uspořádal velkolepou veřejnou show. Poprvé experiment předvedl v roce 1654 (šest let po ukončení třicetileté války) před Říšským sněmem v německém Řezně (Regensburg). K nejvýznamnějším hostům patřil sám císař římský, král český, uherský a chorvatský, markrabě moravský a arcivévoda rakouský Ferdinand III. Guericke připravil dvě měděné polokoule o průměru přibližně 50 centimetrů opatřené vzduchotěsným lemem. Polokoule přiložil k sobě a vyčerpал z nich vzduch. Samozřejmě, že k tomu použil jím vynalezenou vývěvu. Na koule z vnějšku působí atmosférický tlak, uvnitř ve vyčerpaném prostoru (téměř vakuu) je tlak zanedbatelný. K odtržení polokoulí od sebe je proto zapotřebí značné síly (orientační výpočet dává hodnotu 20 000 newtonů). Guericke připevnil na polokoule lana, za která táhla dvě koňská spřežení. Každé z nich čítalo 15 koní. Ani třiceti koním se nepodařilo polokoule od sebe odtrhnout. Tak obrovský je atmosférický tlak, který působí všude kolem nás!

O dva roky později, v roce 1656, zopakoval Guericke experiment přímo v Magdeburku. Opět tu s vakuem soupeřila dvě koňská spřežení, tentokrát mělo každé s nich „jen“ osm koňů. Původní polokoule i s Guerickeovou vývěvou jsou nyní v Německém muzeu v Mnichově (viz obr. 15 barevné přílohy). V Magdeburku je dnes socha připomínající slavný experiment. Jezdci na koních se od sebe pokoušejí odtrhnout magdeburské polokoule. Sousoší ale díky umělecké zkratce zobrazuje namísto šestnácti koňů pouze dva.

Na následující dvojstraně naleznete rytinu německého vědce a jezuitu Gaspara Schotta z roku 1672, na níž je slavný magdeburský experiment detailně vyobrazen včetně nákresů polokoulí.

Éter

Zvukové vlny se šíří látkovým prostředím, například ve vzduchu dochází k rozkmitání jednotlivých atomů a molekul, které zvukovou vlnu postupně přenášejí od zdroje k posluchači. Čím se ale šíří světlo? Na tuto otázku hledala odpověď řada filosofů a fyziků. Mnoho z nich se přiklánělo k názoru, že se světlo nemůže šířit prázdnotou, ale existuje jakési pružné médium zajišťující pohyb světla, pro které se ujal název *éter*. Toto slovo není novodobé, pochází už od Aristotela, který tak označoval nevažitelné, pružné a nezničitelné prostředí v oblastech vzdálenějších než Měsíc.

V 17. století použil slovo *éter* anglicko-irský učenec Robert Boyle k vysvětlení magnetického působení a posléze rozšířil svou představu a začal *éter* považovat za *cosi*, co je odpovědné za vzájemné interakce všech těles včetně gravitace. Na konci 17. století holandský fyzik Christiaan Huygens vyslovil myšlenku, že právě *éter* je prostředí, kterým se šíří světlo. Koncept *éteru* byl silně poznamenán soubojem zastánců vlnové a částicové povahy světla. Ti, kteří věřili ve vlnovou povahu světla, *éter* ke svým představám potřebovali více, neboť už od Aristotela byly nejznámějším vlněním vlny zvukové a ty jednoznačně ke svému šíření nějakou látku potřebují. Naopak fyzikové razící představu částicové povahy světla ke svému životu *éter* až zase tolik nepotřebovali.

V roce 1720 objevil anglický astronom a kněz James Bradley aberaci hvězd. Při pozorování dalekohledem vidíme hvězdu v nepatrně jiném směru, než ve skutečnosti je. Tento efekt je způsobený pohybem Země kolem Slunce. Jde o podobný jev, jako je dopad dešťových kapek na kapotu jedoucího vozu – kapičky také dopadnou poněkud jinam, než kdyby automobil stál. Představa světla jakožto padajících kapiček vody byla jedním z argumentů ve prospěch částicové povahy světla. A padající kapičky ke svému pádu žádné prostředí nepotřebují, světlo by tedy nemuselo ke svému šíření potřebovat ani žádný *éter*. I přesto jeden z největších zastánců a současně tvůrců částicové povahy světla, anglický učenec Isaac Newton, *éter* neztracoval. Toto podivné fluidum použil v monumentálním





Fig. IV.



Fig. V.

Fig. II.

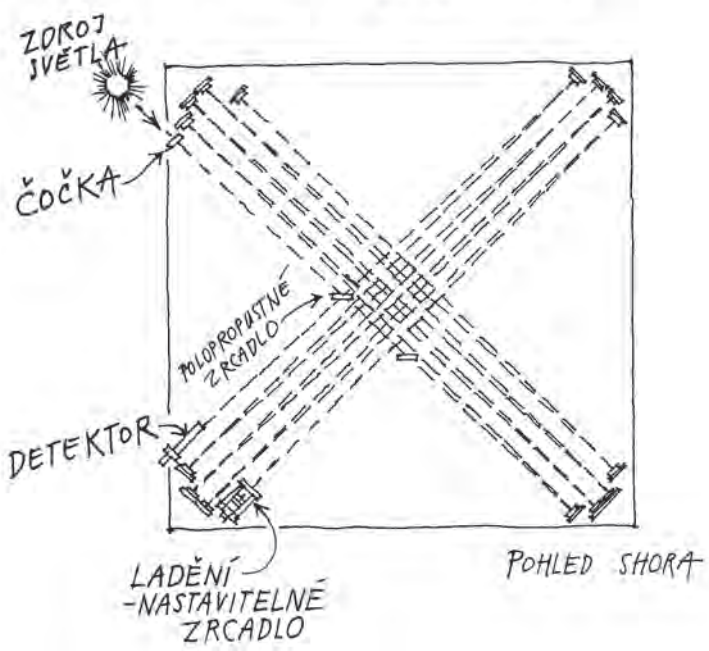
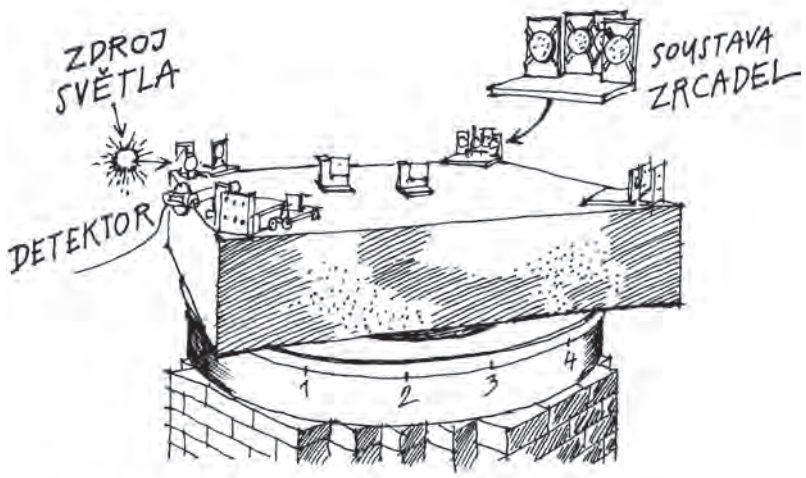


třísvazkovém díle *Optika* z roku 1704: ve třetím svazku uvažuje Newton o éteru jakožto vibrujícím prostředí, které je odpovědné za lom a ohyb světla.

Přenesme se nyní do století devatenáctého, které znamenalo největší rozkvet éterové hypotézy, ale nakonec přispělo i k jejímu pádu na počátku století dvacátého. Vynikající anglický experimentátor Michael Faraday zavedl jako první pro popis elektromagnetických dějů polní koncept, v němž se to hemžilo siločarami ne nepodobnými pružným provazcům, které přenášely vzruchy od jednoho tělesa k druhému. Tento popis použil další anglický učenec James Clerk Maxwell v roce 1861 a v článku *On Physical Lines of Force* (o fyzikálních liniích síly) představuje siločáry jako pružné prostředí neboli éter složený z moře molekulárních vírů. Světlo by mělo podle Maxwella být vlněním takto pojatého éteru. Maxwell veškeré dosavadní znalosti o elektřině a magnetizmu popsal v monumentálním díle *Treatise on Electricity and Magnetism* (traktát o elektřině a magnetizmu) vydaném v roce 1873. Jedná se o dva svazky, z nichž každý má přes tisíc stran. Maxwell ukázal, že elektrické a magnetické děje mají stejnou podstatu a vytvořil základy elektromagnetizmu. Měnící se elektrická pole dávají vzniknout polím magnetickým a naopak. Z jeho díla vyplynulo několik závažných faktů. Za prvé: rovnice elektromagnetizmu připouštějí vlnová řešení a světlo není ničím jiným než elektromagnetickým vlněním. Za druhé: měly by existovat i elektromagnetické vlny kratších a delších vlnových délek, než má viditelné světlo. Za třetí: světlo se ve všech souřadnicových soustavách pohybuje stejnou rychlostí nezávisle na volbě soustavy.

Právě nezávislost rychlosti světla¹ na volbě souřadnicové soustavy byla klasickému pojetí éteru osudná. Z Maxwellových rovnic totiž plyne jiné skládání rychlostí, než je pouhé sčítání, které používá klasická mechanika. A dávají-li dvě teorie různé výsledky, nemůžeme o nich rozhodnout jinak než experimentem. Prvním z nich byl slavný Michelsonův-Morleyův experiment z roku 1887. Z něho jednoznačně vyplynulo, že se rychlost světla nescítá s rychlostí

1 Jedná se o rychlost světla v prostředí bez látky, v materiálním prostředí je šíření světla látkou výrazně ovlivněno.



Michelsonův-Morleyův experiment, v němž se interferometricky zjišťovalo, zda je rychlost světla rozdílná ve směru pohybu Země kolem Slunce a ve směru na tento pohyb kolmém. Žádný posuv interferenčního obrazce nebyl pozorován.

pohybu Země kolem Slunce a správně je Maxwellova elektrodynamika, nikoli klasická mechanika. V roce 1905 představil Albert Einstein speciální relativitu. Nejde o nic jiného než o úpravu klasické mechaniky do podoby, která je v souladu s elektrodynamikou. Z Einsteinovy speciální relativity plyne stejné skládání rychlosti, jako z Maxwellovy elektrodynamiky. Cena za to je vysoká. Začíná se bortit vize absolutního času a prostoru. Časové intervaly pozorované z různých soustav jsou různé a stejně tak rozměry předmětů. Z Einsteinovy relativity plyne, že všechny inerciální soustavy² souřadnic jsou rovnocenné. Neexistuje žádná preferovaná neboli absolutní soustava. Mechanické děje dopadnou ve všech soustavách stejně. Je jedno, zda si hážete s míčem na perónu, nebo v jedoucím vlaku (musí to být samozřejmě ideální vlak, který se neklepe od nárazů do kolejnic a pohybuje se konstantní rychlostí po rovné dráze). Pokud by éter existoval, byl by právě onou absolutní soustavou, vůči níž musíme veškeré děje vztahovat. Neexistence absolutní soustavy plynoucí ze speciální relativity vede na neexistenci éteru. Existenci éteru neobhájily ani zoufalé pokusy předpokládající, že pohybující se soustava, například Země letící kolem Slunce, si éter strhává a unáší ho s sebou. I takovéto teorie byly postupně experimentálně vyvráceny. Éter neexistuje, byl pouhou chimérou a elektromagnetické vlnění se může šířit prázdňým prostředím. Pojem prázdnoty se tak do fyziky obloukem navrátil. Alespoň na chvíli.

Dynamické vakuum

V předchozích kapitolách jsme se již zmínili o tom, že objekty světa malých rozměrů nejsou zcela poznatelné. Vyjádřením tohoto faktu jsou Heisenbergovy relace neurčitosti, které nám ukazují, že nikdy nemůžeme zcela přesně změřit polohu a jí odpovídající hybnost. Přesnější informace o poloze vede k méně přesné informaci o hybnosti a naopak. Důsledkem relací neurčitosti jsou tzv. *nulové kmity*, které vykonávají krystaly ochlazené na teplotu blízkou absolutní nule. Pokud by se pohyb totiž zcela zastavil, znali bychom jak

2 **Inerciální soustava** je taková soustava, v níž platí zákon setrvačnosti, tj. tělesa jsou buď v klidu, nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud na ně nepůsobí síla.

přesnou polohu iontů (ve vrcholech krystalové mříže), tak jejich hybnost (ta by byla nulová). Jakýsi základní nekolid je přírodě vlastní a pohyb nelze nikdy zastavit úplně.

Relace neurčitosti neplatí jen pro polohu a hybnost, ale i pro jakékoli parametry popisující pozorovaný systém a jim přidružené proměnné, které hrají roli tzv. zobecněných hybností. Příkladem může být elektromagnetické pole, které nemůže mít nikdy současně nulovou hodnotu pole a nulovou hybnost. Výsledkem jsou jakési základní fluktuace polí, které jsou vždy ve vakuu přítomny. Heisenbergovy relace neurčitosti lze také přeformulovat tak, že je nemožné současně změřit energii objektu a dobu jeho existence. Pokud budeme sledovat nějakou oblast prázdného prostoru po velmi krátkou dobu, může zde jakoby z ničeho na chvíli vzniknout energie. Ta se projeví například jako pár částice a antičástice, který v krátkém čase zase zanikne. Pozorovacími přístroji nikdy nemůžeme pozorovat ani fluktuace polí, ani vznikající a zanikající páry částice s antičásticí, proto jim říkáme virtuální páry. Žádný člen páru totiž nemůže skončit v našem přístroji, protože by druhý člen páru už nemohl zaniknout a porušil by zákon zachování energie trvale, nikoli jen na chvíli, kterou umožňují relace neurčitosti.

Pokud hovoříme o dějích ve vakuu, které nelze žádným způsobem měřit, vypadá to na první pohled jako nereálná pohádka pro malé fakany. Opak je ale pravdou. Pokud vakuum nemůže být prázdné a musí v něm být nějaké základní množství polí a částic, je to měřitelné nepřímou. Například přítomnost párů elektronů a pozitronů stíní na malých vzdálenostech náboje ostatních částic, což už měřitelné je. Netriviální, tzv. *dynamické vakuum* je polarizovatelné – jeho vlastnosti se mění v přítomnosti skutečného elektrického pole a dochází k celé řadě dalších jevů, z nichž jako ukázkou popíšeme stručně dva z nich: Lambův posuv a Casimirův jev.

V atomárních obalech je možné některé energetické hladiny vytvořit více způsoby. Výsledná energie se totiž skládá jak z rotační, tak z elektrostatické části, což vede k tomu, že kombinace různých kvantových čísel mohou ve výsledku dát stejnou energii, tedy jednu

energetickou hladinu. Kvantové fluktuace vakua dokáží ale takovou kombinovanou energetickou hladinu rozštěpit na dvě velmi blízké podhladiny různých energií, což se projeví jako velmi jemná struktura spektrálních čar. Pro vodík byl tento jev potvrzen experimentálně v roce 1947, kdy odpovídající posun spektrálních čar u jedné z energetických hladin v atomu vodíku naměřil americký fyzik Willis Lamb se svým doktorským studentem Robertem Retherfordem. Tento tzv. *Lambův posuv* je sice jen nepřímým důsledkem existence vakuových fluktuací, ale dostatečně průkazným. Willis Lamb získal za objev velmi jemné struktury spektrálních čar vodíku Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1955.

Pokud budeme mít ve vakuu velmi blízko u sebe dvě rovnoběžné destičky, budou mezi nimi vznikat vakuové fluktuace s maximální vlnovou délkou rovnou vzdálenosti desek (větší se tam prostě nevejdou). Vně desek mohou mít fluktuace polí libovolné rozměry. Tato nesymetrie fluktuací uvnitř desek a vně nich vede na velmi malou sílu působící na desky (klesá se čtvrtou mocninou jejich vzdálenosti). Existenci tohoto velmi subtilního jevu navrhl pro elektromagnetické pole holandský fyzik Hendrik Casimir v roce 1948 a hned téhož roku spolu s Dirkem Polderem změřili obdobný jev – sílu působící na neutrální atom v blízkosti makroskopického rozhraní. Přesné a průkazné měření Casimirova jevu v jeho původní podobě ale pochází až z roku 1997. Vzdálenost vodivých desek v experimentu provedeném americkým fyzikem Stevenem Lamoreauxem z Washingtonské univerzity se pohybovala od 0,6 do 6 mikrometrů. U vodivých desek se projevuje i tzv. tepelný Casimirův jev. Souvisí s chaotickým pohybem elektronů v deskách, který vede na tepelné fluktuace elektromagnetického pole, díky nimž vznikne další přitažlivá síla působící na desky, tentokrát ale závislá na teplotě.

Světlo se nakonec přece jen nešíří naprostou prázdnotou, ale dynamickým vakuem plným fluktuací polí a neustále vznikajících a zánikajících virtuálních párů složených z částice a antičástice. Nejde sice o éter, jak si ho představovali naši předchůdci, ale do jisté míry se nám víze vakua, vyplněného jakousi podivnou tekutinou, nakonec do fyziky přece jen navrátila.

Zrychlená expanze vesmíru

V roce 1998 zjistili nezávisle na sobě dvě experimentální skupiny³, že se vesmír zhruba od poloviny svého stáří rozpíná zrychlenou expanzí. Za takovou expanzi nemůže být zodpovědná gravitace, ta je silou přitažlivou. Na počátku velkého třesku vznikl jakýsi impulz (jeho původ je nejasný), který způsobil prvopočáteční rozpínání vesmíru. Expanze vesmíru by se od té doby měla brzdit obdobně, jako klesá rychlost tenisového míčku vyhozeného směrem vzhůru. Objev zrychlené expanze znamená, že buď gravitačnímu působení ne zcela rozumíme, nebo že expanze není v současnosti řízena gravitací. Většina fyziků se přiklání k existenci jakési podivné temné energie, která je za zrychlující se expanzi zodpovědná.

V průběhu čtvrt století se objevila řada pokusů, jak problém zrychlené expanze řešit. Některé z nich modifikují Newtonův gravitační zákon, jiné zpochybňují platnost obecné relativity na velkých škálách, další uvažují o nové interakci, kterou nazývají *kvintesencí* (pátou přírodní esencí). Velká část teoretických prací uvažuje o tom, že za temnou energii by mohly být zodpovědné kvantové fluktuace vakua. Pokračující měření tuto myšlenku velmi silně podporují. Temná energie a fluktuace vakua by mohly být jednou a toutéž entitou. Výpočty i měření ukazují, že jsme snad na správné stopě. Kvantové jevy sehrály nepochybně zcela dominantní roli při vzniku vesmíru, kdy v extrémně horkém a hustém prostředí platily kvantové zákony. Chladnoucí vesmír vedl k postupnému spojování kvantových objektů do větších celků, opět za účasti všude přítomných kvantových procesů. A dnes, ve vesmíru starém 14 miliard roků, probíhá zrychlená expanze, jejíž příčinou by mohly být kvantové procesy ve vakuu. Pokud tomu tak opravdu je, kvantové jevy ovládají vesmír od jeho prvopočátku až do současné éry. Strach z prázdnoty má druhé dějství. Příroda nezná dokonalou prázdnotu, vyplňuje ji vakuovými fluktuacemi, které mají tak obrovskou moc, že pravděpodobně řídí expanzi celého vesmíru.

3 Jedna skupina byla vedená Saulem Perlmutterem (Lawrencova národní laboratoř v Berkeley) a druhá Adamem Riessellem (Space Telescope Science Institute v Baltimoru). Detaily objevu jsou popsány v natolik velkém množství publikací, že je zde vynecháme.

Víte, že?

- Víte, že Evangelista Torricelli zemřel na břišní tyfus v pouhých 39 letech? I přes krátkou dobu života se svými vynálezy a experimenty zařadil do zlatého fondu novodobé fyziky.
- Víte, že slovo éter také označuje chemickou sloučeninu? Jde o látky obsahující kyslík a na něho navázané dva uhlovodíkové zbytky. Étery mohou být plyny, kapaliny (tzv. éterické oleje) a v některých případech i pevné látky.
- Víte, že při objevu zrychlené expanze byly používány pro měření vzdáleností supernovy? Šlo o supernovy typu Ia, které uvolní při explozi vždy podobné množství energie, a proto lze z jejich jasnosti odhadnout vzdálenost mateřské galaxie.
- Víte, že princip konstantní rychlosti světla ve vakuu platí přesně jen pro rovinné vlnoplochy? U prostorově omezených svazků světla, například laserových impulzů, se fotony z různých částí svazku pohybují různou rychlostí.

Poučení na závěr: Až budete někdy mít pocit hluboké prázdnoty a nebudete vědět kudy kam, nezoufejte. Skutečná prázdnota neexistuje a vždy se nakonec vynoří nějaká zcela náhodná a možná i spásná fluktuace.

