

obecně předpokládalo. Tento objev vyrazil fyzikům dech víc než cokoli jiného. Kosmologická konstanta představuje dodatečné gravitační odpuzování, jistý typ antigravitace, o níž jsme si mysleli, že v našem světě nemá místo. Skutečnost, že kosmologická konstanta má malou nenulovou hodnotu, je pro fyziky pohromou. A problém kosmologické konstanty můžeme přitom vysvětlit jen v rámci zatracovaného antropického principu, kterého se mnozí fyzici tak štítí. Nemám tušení, jak podivné a nepředstavitelné zvraty na nás ještě čekají při prozkoumávání rozsáhlých končin krajiny. Ale vsadil bych se, že na sklonku 21. století se filozofové a fyzici ohlédnou a budou na naši éru nahlížet jako na období, kdy představa vesmíru 20. století ustoupila myšlence megavesmíru sídlícího v krajině neuvěřitelných proporcí.

### NERVÓZNÍ PŘÍRODA ANEB KVANTOVÉ CHVĚNÍ

„Koho kvantová teorie nešokuje, ten jí neporozuměl.“

Niels Bohr

Představa, že se fyzikální zákony mohou měnit napříč vesmírem, je stejně nesmyslná jako představa, že může existovat více než jeden vesmír. Vesmír je vše, co existuje; mělo by to být jediné slovo, jež by z logického hlediska nemělo mít ani množné číslo. Zákony, jimiž se řídí vesmír jako celek, se nemohou měnit. Vždyť jaké zákony by řídily tyto změny? Nejsou snad i ony součástí fyzikálních zákonů?

Fyzikálními zákony však myslím něco mnohem skromnějšího než ty grandiózní, všeobjímající zákony regulující všechny aspekty megavesmíru. Na mysl mám totéž, na co myslel obyčejný fyzik z 20. století, který se zajímal spíše o laboratoř než o vesmír, tedy zákony vládnoucí stavebním kamenům obyčejné hmoty.

O těchto zákonech fyziky je naše kniha - ne o tom, *co* jsou zač, ale *proč* jsou takové, jaké jsou. Avšak dříve, než se budeme moci zajímat o otázku „Proč jsou takové, jaké jsou?“, je potřeba zjistit, co jsou zač. Co to je za zákony? Co říkají a jak jsou vyjádřeny? Úkolem této kapitoly je poučit se o zákonech fyziky v tom smyslu, v jakém jsme je chápali někdy kolem roku 2000.

\*

Isaac Newton a všichni jeho následovníci nahlíželi na fyzikální svět jako na přesný deterministický stroj, jehož minulost předurčuje budoucnost se stejnou jistotou, „jako že ráno vyjde Slunce“. Přírodní zákony měly podobu pravidel (rovníc), jež vyjadřovaly tento determinismus v přesném matematickém jazyce. Kupříkladu člověk mohl určit pohyb objektů po přesných

## 1. SVĚT PODLE FEYNMANA

trajektoriích na základě počátečních bodů a jejich rychlostí. Slavný francouzský fyzik a matematik 18. století Pierre-Simon de Laplace tento princip vyjádřil následovně:

Současný stav vesmíru můžeme považovat za následek jeho minulosti a příčinu jeho budoucnosti. Intelkt, který by v daný okamžik znal všechny síly, jež uvedly přírodu do pohybu, a všechny polohy všech součástí, z nichž je příroda složená, tak pokud by byl dostatečně výkonný, aby tyto údaje podrobil analýze, v jediném vzorci by byly obsaženy pohyby největších těles vesmíru i toho nejmenšího atomu; pro takový intelekt by nebylo nic nejisté a budoucnost stejně jako minulost by byly přístupné jeho pohledu.

Jen pro případ, že přežvýkaný překlad z francouzštiny do angličtiny a z angličtiny do češtiny ztratil jiskru jako při tiché poště, si jej dovysvětlíme. Laplace tvrdil, že kdybyste (vy nebo nějaký nadintelekt) v určitý okamžik znali polohu a rychlost každé částice ve vesmíru, mohli byste neustále předpovídat přesnou budoucnost celého vesmíru. Tento ultradeterministický pohled na povahu přírody byl převažujícím paradigmatickým, dokud na prahu 20. století do dveří nevěšel rozvratný myslitel Albert Einstein, jenž všechno změnil. Ačkoli je Einstein známý především díky své proslulé teorii relativity, jeho nejtroufalejší a nejradikálnější tah – jeho nejrozvratnější tah – souvisel s podivným světem kvantové mechaniky, nikoli s teorií relativity. Od té doby začali fyzici rozumět tomu, že zákony fyziky jsou kvantovými zákony. Z tohoto důvodu otevřeme první kapitulu krátkým kurzem „Jak přemýšlet kvantověmechanicky?“.

Vstupujeme do bizarního Alenčina světa za zrcadlem, světa moderní fyziky, kde nic není takové, jak se zdá, kde vše fluktuuje a tetelí se a kde je nejvyšší vládnoucí silou nejistota. Zapomeňte na vesmír newtonovské fyziky, vesmír, který se chová jako hodinový stroj. Svět kvantové mechaniky může být leda jaký, ale určitě není předvídatelný. Revoluce, jež propukly na počátku 20. století, nebyly „sametové“. Nejenže změnilly rovnice fyzikálních zákonů, ale naprosto zničily epistemologické základy velké části klasické vědy a filozofie. Řada fyziků nebyla s to přijmout tento nový přístup, a tak zůstali mimo hru. Mladší a přizpůsobivější generace fyziků si přímo libovala v bizarních moderních myšlenkách a vypěstovala si intuici a schopnost novou fyziku si dobře představit. Změna to byla natolik velká, že pro řadu teoretických fyziků mé generace je už snadnější přemýšlet kvantověmechanickým nebo relativistickým způsobem než klasickou cestou.

Kvantová mechanika byla tím největším překvapením. Na kvantové úrovni je svět celý rozechvělý, je fluktuující říší pravděpodobností a neurčitostí. Ale není to tím, že by se elektron potácel jako opilý námořník. V nahodilosti jeho

pohybu je daleko rafinovanější vzor, který se dá popsat nejlépe ezoterickou symbolikou abstraktní matematiky. Nicméně s trochou námahy a trpělivosti je možné ty nejdůležitější aspekty kvantového světa přeložit do běžného jazyka.

Od 19. století používají fyzici kulečnickový stůl jako metaforu pro představu fyzikálního světa interagujících, kolidujících částic. Tuto analogii rád používal James Clerk Maxwell i Ludwig Boltzmann a dodnes ji používá nespočet fyziků k vysvětlení kvantového světa. Poprvé jsem o ní slyšel od Richarda Feynmana:

Představte si kulečnickový stůl, který je tak skvěle zkonstruován, že na něm nedochází ke tření. Koule a mantinely jsou elastické do takové míry, že když do nich narazí koule, vždy se odrazí bez sebemenší ztráty kinetické energie. Stůl nemá kapsy, takže když uvedeme koule do pohybu, budou se po něm pohybovat neustále dokola, budou se srážet, odrážet od mantinelů a tak dále. Na počátku hry máme patnáct koulí srovnaných do trojúhelníkové dvourozměrné verze haldy dělových koulí. Bílou kouli pošleme směrem k ostatním koulím, aby haldu rozrazila.

Je složité a nepředvídatelné říct, co bude následovat. Ale proč je to nepředvídatelné? Je to proto, že každá srážka znásobuje nepatrné rozdíly v počátečních polohách a rychlostech koulí, tudíž i nejmenší odchylka nakonec povede k naprosto jinému výsledku. (Tato přecitlivělost k počátečním podmínkám se nazývá chaos a je neodmyslitelným rysem přírody.) Snaha zopakovat kulečnickovou hru není totéž, jako když chceme napodobit partii šachu. Potřebovali bychom k tomu totiž takřka nekonečnou přesnost. Nicméně v klasické fyzice se koule pohybují po přesných trajektoriích a pohyb koulí je zcela předvídatelný - za podmínky, že s nekonečnou přesností známe počáteční polohy a rychlosti koulí. Samozřejmě že čím delší předpověď chceme učinit, tím přesnější počáteční data potřebujeme. Avšak neexistuje mez pro přesnost těchto dat a neexistuje ani žádná mez pro naši schopnost předpovídat budoucnost na základě minulosti.

Oproti tomu je kvantová kulečnicková hra nepředvídatelná, ať už se hráči snaží být sebepřesnější. Žádná míra přesnosti by nedovolila víc než jen statistickou předpověď výsledků. Hráč klasického kulečnicku sice může sáhnout po statistickém přístupu, ale učiní tak jen z toho důvodu, že buď přesně nezná počáteční údaje, nebo protože bylo velmi obtížné přesně vyřešit příslušné pohybové rovnice. Avšak hráč kvantového kulečnicku nemá na výběr. V srdci zákonů kvantové mechaniky spočívá neoddělitelný prvek nahodilosti, který nelze nikdy odstranit. Proč jej nejde odstranit? Proč nelze předpovědět budoucnost na základě našich znalostí počátečních poloh a rychlostí? Odpověď spočívá v proslulém Heisenbergově principu neurčitosti.

## 1. SVĚT PODLE FEYNMANA

Princip neurčitosti popisuje fundamentální omezení toho, jak přesně můžeme současně určovat polohy a rychlosti objektů.\* Je to nejzazší verze Hlavy 22. Když budeme přesněji a přesněji zjišťovat polohu koule (abychom vylepšili naše předpovědi), nevyhnutelně tím ztratíme přesnost ve znalosti polohy koule v dalším okamžiku. Princip neurčitosti není jen kvalitativním faktem o chování těles. Má i svou velmi přesnou kvantitativní formulaci – součin neurčitosti v poloze objektu a nejistoty v jeho hybnosti je vždy větší než jisté (velice malé) číslo přezdívané Planckova konstanta.\*\* Heisenberg i všichni po něm se snažili přijít na způsoby, jak princip neurčitosti porazit. Například Heisenberg si vzal na pomoc elektrony, ale stejně dobře to mohl provést i s kulečnickovými koulemi. Na kulečnickovou kouli posvíte paprskem světla. Světlo, které se odrazí od koule, můžeme zaměřit na fotografický film a poté ze snímku zjistit polohu koule. A co rychlost koule? Jak tu měřit? Nejjednodušší a nejpřímočařejší bude během krátké doby provést druhé měření polohy. Jakmile známe polohu tělesa ve dvou po sobě jdoucích okamžicích, vypočítat rychlost je už hračka.

Proč není tento typ pokusu možný? Důvod se skrývá v jednom z největších Einsteinových objevů. Newton věřil, že světlo je složeno z částic, avšak na začátku 20. století částicové teorii světla nevěřil snad už nikdo. Mnoho optických jevů, jako je třeba interference světla, totiž můžeme vysvětlit jen za předpokladu, že světlo je projevem vln, že se podobá vlnkám na hladině vody. V polovině 19. století publikoval James Clerk Maxwell velmi zdařilou teorii, v níž světlo vystupovalo jako elektromagnetické vlnění, jež se prostorem šíří docela podobně, jako se zvuk šíří vzduchem. Čili byl pořádný šok, když roku 1905 přišel Albert Einstein s tím, že světlo (a veškeré elektromagnetické záření) je tvořeno z malinkých projektilů zvaných kvanta neboli fotony.\*\*\* Einstein tvrdil, že světlo má z nějakého důvodu vlnové vlastnosti – vlnovou délku, frekvenci apod. – ale i „zrnitost“, jako by bylo složeno z diskrétních kousíčků. Tato kvanta jsou nedělitelnými balíčky energie, což má za následek existenci jistých omezení, která nám svazují ruce, když chceme vytvořit co nejpřesnější snímky malých objektů.

Začněme s určováním polohy. Abychom získali dobrý a ostrý snímek koule, vlnová délka použitého světla nesmí být moc velká. Pravidlo je

---

\* Přesněji řečeno nejde o polohu a rychlost, ale o polohu a hybnost, ale tento detail teď ani později pro nás nebude hrát podstatnou roli. Možná víte, že (v klasické, Newtonově mechanice) je hybnost definována jako součin hmotnosti a rychlosti objektu, takže rozdíl mezi rychlostí a hybností můžeme pro zjednodušení ignorovat, a to i přesto, že v kvantové mechanice se už pracuje s čímsi trošku složitějším (takzvaným operátorem hybnosti). [Pozn. překl.]

\*\* Planckova konstanta se značí písmenkem  $h$  a její číselná hodnota je přibližně  $6,62608 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$ , kde písmena  $m$ ,  $kg$  a  $s$  označují metr, kilogram a sekundu.

\*\*\* Termín *kvantum* je poněkud obecnější než *foton*. Slovem *kvantum* se označuje libovolný diskrétní balíček energie, kdežto *foton* je konkrétní termín pro elektromagnetickou energii. Čili můžeme říct, že foton je kvantem elektromagnetického záření.

jednoduché – chcete-li s danou přesností zjistit polohu objektu, musíte použít vlnění, jehož vlnová délka není větší než povolená chyba. Do určité míry jsou rozmazané všechny snímky a chceme-li stupeň rozmazanosti snížit, musíme použít světlo s kratší vlnovou délkou. V klasické fyzice tohle nepředstavuje žádný problém, protože z pohledu klasické fyziky může být energie světelného paprsku libovolně nízká. Avšak jak tvrdil Einstein, světlo se skládá z nedělitelných fotonů. Kromě toho, jak uvidíme později, čím kratší je vlnová délka světelného paprsku, tím vyšší je energie fotonů.

To vše znamená, že k získání ostrého snímku na přesné určení polohy koule musíte kouli trefit fotony, které nesou vysokou energii. Tím se však omezujeme ohledně následného měření rychlosti. Potíž je v tom, že když se vysokoenergetický foton srazí s koulí, docela prudce do ní strčí, a tím změní rychlost, kterou jsme chtěli změřit. Tohle je příklad, jaký pocit marnosti zažijeme, když se pokusíme o změření polohy a rychlosti s nekonečnou přesností.

Souvislost mezi vlnovou délkou elektromagnetického záření a energií fotonu – čím kratší je vlnová délka, tím vyšší je energie – byla jedním z nejdůležitějších objevů, které Einstein učinil v roce 1905. Když si elektromagnetické vlnění seřadíme od nejkratších vlnových délek, dostaneme spektrum složené z gama záření, rentgenového záření, ultrafialového záření, viditelného světla, infračerveného záření, mikrovln a rádiových vln. Rádiové vlny mají největší vlnovou délku, ta se pohybuje od několika metrů až po kosmické proporce. Rádiové vlny jsou špatnou volbou, chceme-li jejich pomocí pořizovat snímky obyčejných objektů, jelikož rozlišení fotografií nebude vyšší, než je vlnová délka použitých rádiových vln. Na obrázku získaném pomocí rádiových vln byste nerozeznali člověka od kupy špinavého prádla. Vlastně byste nemohli odlišit ani jednoho člověka od dvou lidí, nebyla-li by mezi nimi vzdálenost větší než vlnová délka rádiové vlny. Na všech takto získaných fotografiích byste viděli jen rozmazané koule. To však neznamená, že rádiové vlny by se nikdy nehodily k pořizování snímků: prostě se nehodí k fotografování malých předmětů. Vždyť radioastronomie je velice užitečnou metodou ke studiu astronomických objektů. Na straně druhé jsou gama paprsky nejlepší pro získávání informací o skutečně malých věcech, třeba jádrech. Mají ty nejkratší vlnové délky, o dost kratší, než je velikost jednoho atomu.

Energie jednoho fotonu se zvyšuje s klesající vlnovou délkou. Jednotlivé rádiové fotony jsou příliš slabé, než aby je šlo detekovat. Daleko více energie nesou fotony viditelného světla, jen jeden takový foton umí rozlousknout molekulu. I oko, které se přizpůsobilo tmavým podmínkám, však jen sotva zaznamená, že na tyčinku sítnice dopadl jediný foton viditelného záření. Ultrafialové i rentgenové záření má dost energie na to, aby odtrhlo elektrony od atomů, a paprsky gama mohou rozbít nejen jádro, ale dokonce i protony a neutrony.

## 1. SVĚT PODLE FEYNMANA

Obrácený vztah mezi vlnovou délkou a energií je vysvětlením jednoho ze vsudypřítomných trendů fyziky 20. století, totiž touhy po co největších urychlovačích částic. Fyzici, kteří usilují o odhalení nejmenších stavebních kamínek hmoty (molekul, atomů, jader, kvarků a podobně), byli přirozeně vedeni ke stále kratším a kratším vlnovým délkám, které jsou nutné pro sestavení ostrých snímků těchto objektů, avšak kratší vlnové délky nevyhnutelně znamenaly nutnost disponovat co nejenergičtějšími kvanty. K získání takovýchto vysokoenergetických kvant museli fyzici urychlit částice na enormně vysoké rychlosti, tedy kinetické energie. Kupříkladu elektrony lze sice urychlit na závratné rychlosti, ale pouze tehdy, když použijeme ještě větší a výkonnější zařízení. Ve Stanfordském centru lineárního urychlovače (SLAC), kousek od místa, kde bydlím, mohou fyzici urychlovat elektrony na energie 200 000krát vyšší, než je jejich hmotnost.\* K tomu je ale nutné mít zařízení s délkou kolem tří kilometrů. SLAC je v podstatě 3,2 kilometru dlouhý mikroskop, který umí rozlišit objekty tisíckrát menší než proton.

Po celé 20. století se objevovaly nové a nečekané věci, neboť fyzici zkoumali stále menší a menší vzdálenosti. Jedním z takových překvapivých zjištění bylo, že protony a neutrony nejsou elementární částice. Když je fyzici sráželi s částicemi s velmi vysokou energií, podařilo se jim rozlišit malinkaté složky - kvarky - ze kterých se protony a neutrony skládají. Přestože používali a používají sondy s nejvyšší možnou dosažitelnou energií (nejkratší vlnovou délkou), elektron, foton i kvark zůstávají, pokud víme, stále bodovými objekty. To znamená, že nejsme s to odhalit jejich vnitřní strukturu, velikost ani žádné další součástky. Mohou to být klidně i nekonečně malé body v prostoru.

Vraťme se k Heisenbergově principu neurčitosti a jeho důsledkům. Představte si, že na kulečnickovém stole leží jen jedna koule. Protože je koule omezena na plochu stolu okolními mantinely, o její poloze v prostoru cosi automaticky víme, totiž že nejistota v poloze není větší než rozměry stolu. Čím menší je stůl, tím přesněji známe polohu koule, a proto tím méně víme o její hybnosti. Takže kdybychom začali měřit rychlost koule vázané na stůl, koule by jaksi náhodně uskakovala a fluktovala. Reziduální pohybová fluktuace by nezmizela, ani kdybychom kouli zbavili co možná nejvíce její pohybové energie. Brian Greene k popisu tohoto pohybu použil spojení *kvantové chvění* a já půjdu v jeho stopách.

---

\* Myslí se tím „než jaká je jejich klidová hmotnost“, protože po urychlení už mají elektrony hmotnost 200 000krát vyšší než v klidovém stavu. Klíč leží v relativistické hmotnosti - Einstein ve speciální teorii relativity ukázal, že hmotnost objektu závisí na pohybovém stavu objektu a pozorovatele. Jelikož se elektron vzhledem k nám pohybuje vysokou rychlostí, úměrně tomu roste i jeho hmotnost. V částicové fyzice se hmotnost a energie zaměňují běžně - tím druhým klíčem (který se odvíjí od prvního) je proslulá Einsteinova rovnice  $E = mc^2$ , což je vztah pro ekvivalenci hmotnosti ( $m$ ) a energie ( $E$ ). Symbol  $c^2$  označuje druhou mocninu rychlosti světla. [Pozn. překl.]

Kinetické energii spojené s kvantovým chvěním se říká *energie základního stavu* a nelze se jí zbavit.\*

Kvantové chvění vyplývající z Heisenbergova principu neurčitosti má zajímavý následek pro obyčejnou hmotu, kterou chceme ochladit na nulovou teplotu.\*\* Teplo je samozřejmě energií náhodného molekulárního pohybu. Když z hlediska klasické fyziky ochlazujete nějaký objekt, tak při dosažení absolutní nuly veškerý pohyb molekul ustane. Výsledkem pak je, že při absolutní nule z molekul vymizí všechna kinetická energie.

V pevných látkách však má každá molekula dobře definovanou polohu. Molekulu na místě drží ostatní molekuly – nikoli mantinely kulečnickového stolu. Nevyhnutelným důsledkem je, že molekuly mají flukтуаční rychlost. Z reálné látky, jež se chová podle zákonů kvantové mechaniky, nelze nikdy odstranit všechnu pohybovou energii ani při absolutní nule!

Poloha a rychlost nejsou v žádném případě jedinými veličinami, které podléhají principu neurčitosti. Existuje celá řada párů tzv. konjugovaných (sdružených) veličin, jejichž hodnoty není možné určovat souběžně, protože čím lépe určíme jednu z nich, tím víc ta druhá fluktuuje. Velmi významným příkladem je princip neurčitosti aplikovaný na dvojici veličin energie–čas, podle kterého nelze určit přesnou dobu, po jakou probíhala událost (či čas události), a současně energii objektů, které se události účastnily. Představte si, že experimentální fyzik chce, aby se v určitý okamžik srazily dvě částice. Princip neurčitosti energie a času omezuje přesnost, s jakou může experimentátor kontrolovat energii částic a také čas, v jakém se částice mají srazit. Když bude s rostoucí přesností kontrolovat hodnotu energie srážky, zákonitě to povede ke zvýšení nahodilosti v času srážky – a platí to i opačně.

Dalším důležitým příkladem, ke kterému se dostaneme ve 2. kapitole, jsou elektrická a magnetická pole v bodě prostoru. Tato pole, jež hrají klíčovou úlohu v následujících kapitolách, jsou neviditelná, vyplňují prostor a řídí síly, kterými na sebe působí elektricky nabitě částice. Ani hodnoty magnetického a elektrického pole nemohou být zjišťovány souběžně, podobně jako poloha a rychlost. Je-li v bodě prostoru známa hodnota jednoho z nich, hodnota druhého pole je zákonitě neurčitá. Z tohoto důvodu se tato pole nacházejí v neustálé rozechvělé fluktuaci, které se nelze zbavit. A jak asi tušíte, toto chvění vede ke vzniku jistého

---

\* Brian Greene, *Elegantní vesmír: Superstruny, skryté rozměry a hledání teorie všeho* (New York: Norton, 1999, 2003, vyšlo v českém překladu Luboše Motla, Mladá fronta, 2000.) [Doslovný překlad anglického spojení *zero point energy* by zněl *energie nulového bodu* nebo *energie v nulovém bodě*, ale česká fyzika takové sousloví nezná. Původně do fyziky tento termín zavedli Albert Einstein a Otto Stern v roce 1913 jako *Nullpunktenergie*. - Pozn. překl.]

\*\* „Nulovou“ na Kelvinově stupnici. Zápisem „0 K“ se označuje absolutní nula a odpovídá zhruba  $-273,15$  °C. [Pozn. překl.]

## 1. SVĚT PODLE FEYNMANA

množství energie třeba i v naprosto prázdném prostoru. Tato *energie vakua* vedla k jednomu z největších paradoxů moderní fyziky a kosmologie. Už od příští kapitoly se budeme s energií vakua pravidelně setkávat.

Nejistota a chvění nejsou celou výzbrojí kvantové mechaniky. Ta má totiž ještě jednu stránku, a to kvantovou. Z přívlastku „kvantová“ plyne jistá míra diskrétnosti (ve smyslu nespojitosti) či zrnitosti. Fotony, z nichž se skládají světelné vlny, jsou jen jedním příkladem kvant. Elektromagnetické záření je projevem oscilace; jinými slovy jde o kmitání, vibrace. Dítě na houpačce, kmitající pružina, rozkmitaná houslová struna, zvuková vlna, to všechno jsou oscilační jevy, a pro všechny je typická diskrétnost. Ve všech případech existuje energie ve formě diskrétních kvantových jednotek, které nelze rozdělit na menší balíčky. V makroskopickém světě strun a houpaček je kvantová jednotka energie natolik nepatrná, až se zdá, že energie by mohla nabývat libovolné hodnoty, ve skutečnosti však energie oscilací může existovat pouze ve formě nedělitelných jednotek rovnajících se frekvenci oscilací (počet oscilací za sekundu) vynásobené malinkou Planckovou konstantou.

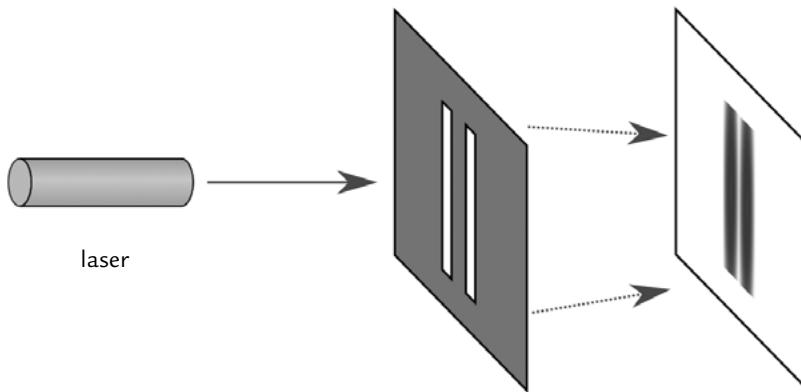
Oscilují i elektrony kroužící kolem atomového jádra. V tomto případě popisujeme kvantování energie pomocí diskrétních oběžných drah. Otcem kvantovaného atomu je Niels Bohr, který si představoval, že elektrony obíhají jádro tak, jako kdyby jejich pohyb byl omezen vzájemně oddělenými dráhami podobnými běžecké trati. Dráha, ve které se elektron nachází, určuje energii elektronu.

Rozechvělé chování a diskrétnost jsou sice dostatečně podivné rysy kvantového světa, ale jeho opravdová prapodivnost spočívá v „interferenci“, kterou dobře ilustruje například slavný „dvoušťěrbinový experiment“. Představte si malý zdroj světla - velmi intenzivní miniaturní žárovku - v jinak tmavé místnosti. Vhodný by byl třeba i laser. Do určité vzdálenosti od zdroje světla postavte fotografický film. Když světlo dopadne na film, film zčerná. Je to stejné, jako když vzniká obyčejný negativ. Když postavíme mezi zdroj světla a film překážku v podobě kovové desky, je zřejmé, že film nebude exponován. Ale teď do překážky vyřízněte dvě rovnoběžné šťěrbin, aby jimi mohlo světlo projít a osvětlit film. Náš první pokus je velice jednoduchý a spočívá v tom, že zakryjeme jednu šťěrbinu (třeba levou) a zapneme zdroj světla.

Po určité době se objeví na filmu svislý tmavý proužek: rozmazaný obraz pravé šťěrbin. V dalším kroku zakryjeme pravou šťěrbinu a odkryjeme tu levou. Objeví se druhý široký pásek částečně překrývající první.

Teď experiment provedeme jinak. Použijeme nový fotografický film a obě šťěrbin necháme průchodné. Nevíte-li dopředu, co vznikne, výsledek vás překvapí. Výsledný obrazec není jen pouhým součtem předchozích dvou zčernalých oblastí. Místo toho spatříme řadu tmavých a světlých úzkých proužků podobných

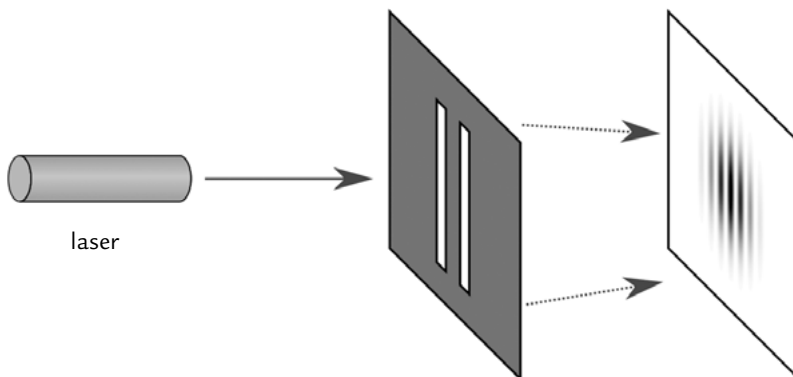




Osvit nejdříve jednou a pak druhou štěrbinou.

pruhům zebry. Na některých místech, kde se předtím překrývaly dva tmavé proužky, máme nezčernalé proužky. Světelné vlny procházející levým a pravým otvorem se v těchto místech z nějakého důvodu vyrušily. Fyzikální pojem pro tento jev je *destruktivní (záporná) interference* a je to velice známá vlastnost vln. Dalším příkladem interference jsou záněje (rázy), jež uslyšíte, když zahrajete dva téměř stejné tóny.

Zkusíte-li provést tento pokus doma, zjistíte, že to není tak snadné, jak zde popisují. Vaši snahu hatí dvě věci. Interferenční obrazec je viditelný jen v tom případě, když štěrbininy v překážce jsou velice úzké a sobě velmi blízké. Nečekejte, že se vám jej povede vytvořit, když do překážky vyříznete dvě díry otvírákem na konzervy. Zadruhé, zdroj světla musí být velice malý. Stará fousatá metoda pro



Osvit oběma štěrbinami současně.

## 1. SVĚT PODLE FEYNMANA

přípravu světelného zdroje spočívá v tom, že než světlo necháme dopadnout na překážku s otvory, necháme je ještě projít jinou překážkou s miniaturní dírkou. Daleko vhodnější však je použít moderní laser. Laserové ukazovátko je ideální. Laserový paprsek procházející přes velice pečlivě vytvořené štěrbinu vytvoří excelentní interferenční obrazce. Hlavní problém v experimentu však je udržet všechny jeho součástky v klidu.

Teď provedeme celé to optické cvičení znovu, tentokrát však snížíme intenzitu světla do takové míry, že k přepážce budou fotony putovat jeden po druhém. Když film osvíte jen na malou chvíli, v místech, kam fotony dopadly, se objeví jen pár tmavých teček. Zase jej osvíte, nyní bude hustota teček vyšší. Nakonec získáme obrazec, který vznikl při prvním experimentu. Kromě jiných skutečností potvrzuje tento pokus Einsteinovu představu, že světlo se skládá z diskretních fotonů. Nadto částice dopadávají na film náhodně a obrazec se objeví jen tehdy, když se jich na filmu nashromáždí dostatečný počet.

Tyto částicím podobné fotony se však chovají tím nejnevypytatelnějším způsobem. Jsou-li otevřeny obě štěrbinu, ani jeden z fotonů nedopadne do míst, kde dochází k záporné interferenci. A to i navzdory skutečnosti, že tam fotony dopadnou, když je průchozí jen jeden otvor. Zdá se, že když otevřeme levou štěrbinu, zabráníme tím fotonům procházet pravou štěrbinou, a naopak. Vyjádříme to trošku jinak: předpokládejme, že bod X na filmu je takový bod, v němž dochází k záporné interferenci. Foton může dopadnout do místa X, je-li otevřena levá štěrbinu. Může dopadnout do X, pokud je otevřena pravá štěrbinu. Rozumný člověk by očekával, že foton dopadne do místa X s ještě větší pravděpodobností, jsou-li otevřené obě štěrbinu. Jenže tak tomu není - v místě X se neobjeví ani jeden foton, ať čekáte, jak čekáte. Jak foton, který co nevidět projde levou štěrbinou, ví, že je otevřená i pravá štěrbinu? Tento zvláštní jev fyzici často popisují slovy, že foton neprochází jedním či druhým otvorem, ale že „vycítí“ obě možné cesty a v určitých místech se tento příspěvek obou cest vruší. Ať vám tohle pomáhá chápat interferenci nebo ne, jde o velice zvláštní jev. Když pracujete s kvantovou mechanikou čtyřicet let, na její podivnosti si zvyknete. Ale když se člověk nad ní zamyslí, je divná!

### ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICE

Zdá se, že příroda je uspořádaná hierarchicky: velké objekty se skládají z menších objektů, jež jsou sestaveny z ještě menších, až nakonec narazíme na součástky, které už rozložit nejdou. Obyčejný svět je plný takových hierarchií. Automobil není nic víc než soubor součástek: kol, volantu, motoru a tak dále. Motor je zase složen z menších součástek, jako jsou šrouby, písty, ojnice a pružiny. Pokud lze soudit, vlastnosti menších věcí určují chování těch větších. Tento pohled, že