

marcus chown

musíme si promluvit o kelvinovi

VESMÍR A CO O NĚM PROZRAZUJÍ VŠEDNÍ VĚCI

Copyright © Marcus Chown, 2010
Translation © Lucie Kudlejová, 2010
Cover and layout © Lucie Mrázová, 2010

ISBN 978-80-87162-80-4

Tvář v okně

O TOM, PROČ VÁM, STOJÍTE-LI PŘED OKNEM, DOSLOVA ZÍRÁ DO TVÁŘE NEJSKANDÁLNĚJŠÍ OBJEV V HISTORII VĚDY, A SICE ŽE SE VĚCI DĚJÍ ZCELA BEZDŮVODNĚ.

Složitost je světlem. Nezdolná složitost je sluncem.

Paul Valéry

Není pokroku bez paradoxu.

John Wheeler (1985)

Je noc, prší. Zasněně hledíte z okna na světla města. Vidíte auta jedoucí po ulici, ale zároveň vidíte i slabý odraz své tváře mezi pramínky vody stékajícími po okenní tabuli. Věřte nebo ne, tento jednoduchý postřeh sděluje o základní realitě cosi hlubokého a šokujícího. Prozrazuje, že vesmír je na své nejhlubší úrovni založen na nahodilosti a nepředvídatelnosti, na nevypočitatelném hodu kostkou, prozrazuje, že se věci dějí vlastně úplně bez důvodu.

Důvodem, proč jste schopni vidět zároveň světla města i slabý odraz své tváře, která na vás upřeně hledí z tabulky skla, je to, že sklo v okně propustí asi 95 procent dopadajícího světla, zatímco okolo pěti procent paprsků je odraženo zpět. Jestliže přijmeme obecný názor, že světlo je vlnění podobné vlnám na vodě, je to snadno pochopitelné. Představme si člun plující po jezeře, který vytvoří vlnu a ta narazí do kusu částečně ponořeného naplaveného dřeva. Větší část vlny prostě pokračuje dál, nezasažena překážkou, zatímco její malá část se vrátí zpět. Když světelná vlna narazí na překážku okna, je zrovna tak většína vlny propuštěna skrz okno, zatímco její malá část se odrazí.

Takové vysvětlení toho, proč vidíte svou tvář v okně, je zřejmé. Určitě vás ani nenapadne, že by mohlo mít zásadní souvislost s povahou

základní reality. To je však iluze. Světlo není tím, čím se zdá být. Má v rukávu trumf, kterým tento jednoduchý obrázek podkopává, a všechno tím mění. Ve dvacátém století byla popsána spousta jevů, díky nimž se ukázalo, že světlo se nechová jako vlna, jako vlnění rozprostírající se na jezeře, nýbrž jako proud částic podobných malým kuličkám. Na velmi zvláštní způsob, jakým světlo odráží elektron a odklání jej z jeho původní dráhy, poukázal kupříkladu Comptonův jev. V roce 1897 objevil britský fyzik J. J. Thomson, že elektron je částice menší než atom. Že je ve skutečnosti jednou z jeho klíčových součástí.

V roce 1920 se americký fyzik Arthur Compton rozhodl prostudovat, co se stane se světlem, když bude namířeno na elektrony. Domníval se, že světelné vlnění nadnáší elektrony asi jako vodní vlna bójku. Pokud jste takovou věc někdy viděli, víte, že velikost vlny neboli „vlnová délka“ zůstane nezměněna. Jinými slovy, vzdálenost mezi po sobě jdoucími vrcholy vlnek je stejná pro odcházející i přicházející vlnu. Při Comptonově experimentu se však stalo něco úplně jiného. Poté, co světelné vlny odrazily elektron, jejich vlnová délka se prodloužila. A čím více se směr světla při strážce s elektronem změnil, tím větší změna vlnové délky nastala. Atomy jako by pouhým odražením elektronu magicky změnilly modré světlo, charakteristické svou krátkou vlnovou délkou, na červené, které má vlnovou délku větší.¹ Čím delší, pomalejší vlna je, tím méně je ve srovnání s krátkou, rychlou vlnkou energická. Výsledkem Comptonových experimentů tedy bylo, že když světlo odráží elektron, jako by ztratilo část energie.

Comptonův původní předpoklad toho, co se se světlem děje, byl vyvrácen. Světlo se v jeho experimentech ani v nejmenším nechovalo jako vodní vlna nadnášející bójku. Čím více o tom přemýšlel, tím jasněji si uvědomoval, že světlo se ve skutečnosti chová spíše jako kulečnickové koule narážející jedna do druhé. Když se udeří do koule tágem, ta vyrazí vpřed a nese s sebou část energie z tága. Tágo tak nevyhnutelně energii ztrácí. O elektronech se již vědělo, že jsou jako malé kulečnickové koule, ale o světle existovala domněnka, že se šíří

prostorem ve formě vlnění. Comptonovy experimenty však byly nepochybnitelné. Navzdory staletím, kdy vládlo přesvědčení o opaku, světlo také určitě sestává z částic podobných malým kulečnickovým koulím. Za svou průkopnickou práci, která potvrdila, že světlo existuje ve formě částic, byl Compton oceněn v roce 1927 Nobelovou cenou za fyziku.

Další důkaz o tom, že se světlo chová jako proud částic, se dostal díky objevu fotoelektrického jevu. Důvěrně jej všichni známe ze supermarketu, když se blížíme ke vstupním dveřím a vidíme, jak se samy rozevírají, podobně jako když se před Mojžíšem rozestoupilo Rudé moře. Spouštěcím mechanismem rozevírání dveří je porušení světelného paprsku například nohou. Paprsek ozařuje „fotobuňku“, zařízení, které obsahuje kov emitující elektrony, kdykoliv na něj dopadne světlo. To je možné proto, že elektrony jsou na své mateřské atomy vázány jen velmi volně, čili je energie dodaná světlem dostatečná pro jejich snadné odloučení. Pokud někdo světelný paprsek dopadající na fotobuňku přeruší, ta je zastíněna, a vyzařování elektronů se tím zastaví. Elektronika v zařízení je nastavena tak, aby se dveře otevřely v okamžiku, kdy se zastaví proud elektronů.

Jaká je tedy souvislost mezi fotoelektrickým jevem a částicovou povahou světla? Pokud by světlo bylo skutečně vlněním, je téměř nemožné vysvětlit, jak by mohlo být schopno předávat energii malému lokalizovanému elektronu. Jestliže by bylo rozptýleno, typická světelná vlna by působila na velké množství elektronů rozprostřených na kovovém povrchu. Nevyhnutelně by některé z nich byly odlučovány později než jiné. Z výpočtů vyplývá, že některé elektrony jsou ve skutečnosti odmrštěny dokonce až deset minut po ostatních. Představme si tedy, že by proudu elektronů trvalo deset minut, než by zaplnil fotobuňku, a zákazníci supermarketu by si tak museli na otevření dveří deset minut počkat.

Připustíme-li však, že světlo je složeno z malých částic a každá z nich reaguje s jedním elektronem v kovu, vše začíná dávat smysl. Světlo působí spíše ve formě fotonů, než že by přenášelo rozptýlenou

energii na velké množství elektronů. Nejenže každý foton emituje jediný elektron, ale emituje jej rychle, ne s desetiminutovou prodlevou. Částicové povaze světla patří náš dík za rychlý vstup do supermarketu.

Tolik k vysvětlení fotoelektrického jevu coby malých porcí neboli kvant světla, za který byla v roce 1921 Einsteinovi udělena Nobelova cena za fyziku. Mnohým to připadá překvapivé. Podivují se nad tím, proč Einstein nedostal cenu za relativitu, teorii, která jej proslavila a která již navždy změnila náš pohled na prostor a čas. Einstein samotný však vždy viděl relativitu jako přirozený, nikoli překvapivý důsledek fyziky 19. století.² Naproti tomu kvanta považoval mezi všemi svými životními objevy za jedinou doopravdy revoluční myšlenku.

Einstein publikoval svůj článek o existenci kvant v onom zázračném roce, ve kterém zveřejnil i teorii relativity. Pět let před tím, tedy v roce 1900, našel německý fyzik Max Planck způsob, jak vysvětlit nejasnou povahu tepla vycházejícího z ohně. Předpokládal, že atomy mohou vibrovat pouze na určitých energetických hladinách a tyto energie že jsou vždy násobky jakýchsi základních množství neboli kvant energie. Planck se domníval, že tato kvanta nejsou nic víc než matematický trik bez jakékoli fyzikální významnosti. Einstein byl první, kdo je spatřil jako skutečně reálná – poletující prostorem jako proud fotonů v paprsku světla.

Krabička zápalek, která spolkla čtyřicetitunový nákladák

Skutečnost, že se světlo v některých situacích chová jako drobné lokalizované částice, je zřejmá i díky jednomu z nejdůvěrněji známých všedních jevů – světlu vycházejícího z vlákna žárovky a tomu, že jej naše oko absorbuje. Důvod má co dělat s konstrukcí vlákna a sítnicí našeho oka. Jako veškerá hmota jsou i tyto tvořeny atomy.

Názor, že vše je složeno z atomů, původně pochází od řeckého filozofa Démokrita, který kolem roku 440 před našim letopočtem zdvihl kámen či větev, možná to byl i kousek keramiky, a položil si otázku:

„Pokud tento předmět rozpúlím, potom obě poloviny rozříznu opět na poloviny, mohu pokračovat v tomto dělení donekonečna?“ Démokritos si sám i odpověděl. Bylo pro něj nepředstavitelné, že by hmota mohla být tímto způsobem dělena donekonečna. Dříve nebo později, pomyslel si, musím dojít k malinkému zrnku hmoty, která již napúl rozdělít nepůjde. A jelikož nedělitelný se řecky řekne *a-tomos*, Démokritova elementární zrnka hmoty vešla ve známost jako atomy.

Démokritos šel ve svých myšlenkách dokonce ještě dál a odhadoval, že existuje celá řada různých druhů atomů podobných mikroskopickým kostičkám Lega a jejich různým skládáním že lze vytvořit například růži, obláček nebo zářivou hvězdu. Klíčovou myšlenkou však zůstává to, že realita je skutečně částicové povahy, složená z drobných, pevných zrníček hmoty. To je myšlenka prověřená staletími.³

Ukázalo se, že atomy jsou velmi malé. K řetězci napříč špendlíkovou hlavičkou by jich bylo zapotřebí více než milion. Ověřování jejich existence bylo tudíž velmi těžké. Za celou dobu trvání vědy byla o jejich existenci nastřádána celá řada nepřímých důkazů, až do roku 1980 však atom nikdo neviděl. V tomto roce sestrojili dva fyzikové z IBM geniální zařízení zvané řádkovací tunelový mikroskop (Scanning Tunneling Microscope, STM).

Vědci Gerd Binnig a Heinrich Rohrer získali za sestrojení STM v roce 1986 Nobelovu cenu. V zásadě toto zařízení posunuje po povrchu materiálu mikroskopický prst a pohyby nahoru a dolů snímá přechody přes atomy, velmi podobně jako je slepý člověk schopen prstem cítit nerovnosti něčí tváře. A stejně jako si slepec vytvoří obrázek tváře, kterou cítí, STM vytvoří počítačové zobrazení povrchu, po kterém se pohybuje.

Vyvinutím STM se Binnig a Rohrer stali prvními lidmi v historii, kteří jako bohové shlédli mikroskopický svět atomů. A to, co viděli na obrazovce počítače, bylo přesně to, co si před 2500 tisíci let představoval Démokritos. Atomy vypadaly jako malé tenisové míčky. Jako jablka vyrovnaná v bedýnkách. Dosud nikdy v historii vědy nikdo nic nepředpověděl v takovém předstihu před experimentálním důkazem.

Kdyby Binning a Rohrer měli stroj času, mohli by přenést Démokrita do své curyšské laboratoře, postavit ho před ten jedinečný obrázek a říct: „Podívejte. Měl jste pravdu.“ Stejně jako umělci často umírají nedocení a v zapomnění, a přitom se jejich obrazy dnes prodávají za desítky milionů, i vědci se někdy nedočkají toho, aby spatřili velkolepý úspěch svých nápadů. Ukazuje se, že atomy nejsou konečnými zrnky hmoty. Jsou tvořeny menšími částicemi. Přetrvává nicméně Démokritův názor, že hmota je ve svém základu povahy zrnité, nikoli spojitá. Za nedělitelná zrnka, elementární částice hmoty, jsou dnes považovány takzvané kvarky a leptony. Zdá se však, že kvarky nejsou z pohledu styku světla a hmoty v našem oku nebo ve vláknu žárovky důležité. Když je světlo absorbováno nebo uvolňováno, způsobují tuto absorpci a uvolňování atomy. A v tom je ten problém.

Podle naší teorie hmoty je tedy atom malá lokalizovaná věc, podobná mikroskopické kulečnickové kouli. Oproti tomu světlo je rozptýlené, rozprostírá se jako vlnění na jezeře. Vezměme kupříkladu viditelné světlo. Příhodnou mírou jeho diferenciací je vlnová délka – vzdálenost, kterou vlna urazí během kompletního kmitu nahoru a dolů neboli také odstup mezi dvěma po sobě jdoucími vlnovými maximy. Vlnová délka viditelného světla je přibližně 5000krát větší než velikost atomu. Představme si nyní krabičku zápalek, ze které po jejím otevření vyjede čtyřicetitunový nákladák. Anebo řekněme, že proti vám jede čtyřicetitunový nákladák, vy otevřete krabičku zápalek a on zmizí uvnitř. Absurdní? Přesně to je ten paradox, který existuje na rozhraní mezi světlem a hmotou.

Jak je možné, že atom ve vašem oku pohltní něco 5000krát většího? Jak může atom vlákna žárovky vyloučit něco, co je 5000krát rozptýlenější? Britský expert na přežití Ray Mears během jednoho ze svých televizních programů řekl: „Nic se nevejde do hada lépe než jiný had.“ Aplikujme nyní tuto logiku na ono rozhraní mezi světlem a hmotou. Pokud se má světlo vmáchnout do atomu, který je malý a lokalizovaný, musí být také malé a lokalizované. Problém je v tom, že existuje tisíc experimentů s opačným výsledkem, z nichž nejvýznamnější je

Youngův dvojštěrbinový experiment, ve kterém se světlo chová jako rozprostřená vlna.

V prvních desetiletích dvacátého století se také fyzikové neustále pohybovali v kruzích a snažili se o intenzivní vyřešení paradoxů tohoto typu. Německý fyzik Werner Heisenberg napsal: „Pamatuji si diskuse, které trvaly bez přestávky až do pozdních nočních hodin a končily téměř zoufalstvím. A když jsem se po skončení debaty šel sám projít do sousedního parku, znovu a znovu jsem si opakoval otázku – je možné, že by příroda mohla být tak absurdní, jak je patrné z těchto atomárních experimentů?“

Paradox, kdy jedna teorie tvrdí za určitých okolností jednu věc a jiná teorie něco zcela jiného, bývá často mimořádně plodný. Říká nám, že alespoň jedna z teorií je špatná. A čím větší a všeobecněji uznávané jsou protikladné teorie, tím revolučnější bývají důsledky. V případě světla vydávaného žárovkou nebo světla absorbovaného naším okem jsou těmito dvěma protichůdnými teoriemi vlnová teorie světla a atomární teorie hmoty. A to tyto dvě teorie patří k největším a všeobecně nejuznávanějším teoriím vůbec.

Která z těchto teorií je tedy mylná? Pozoruhodná odpověď přijatá fyziky je, že obě. Anebo žádná z nich. Světlo je jak vlna, tak částice. Řekněme spíše, že je to něco, pro co nemáme v našem slovníku výraz a nedá se to přirovnat k ničemu ve všedním světě. Je to v zásadě nepochopitelné, podobně jako když přenášíme trojrozměrný předmět do dvojrozměrného světa papíru, kde neexistuje prostor nad předmětem ani pod ním. Vše, co můžeme zahlédnout, jsou stíny objektů, nikdy objekty samotné. A podobně světlo není ani vlna ani částice, ale něco jiného, co nikdy zcela nepochopíme. Vše, co můžeme zahlédnout, jsou jeho stíny – za určitých okolností vlnová tvář, za jiných tvář částicová.

Atomy světlo bezpochyby emitují. Ale stejně tak nepochybně je viditelné světlo mnohonásobně větší než atom, který jej vysílá. Oba fakty jsou nesporné. Proto jediným způsobem, jak vyřešit tento paradox, je akceptovat něco, co zní jako čiré bláznovství, a sice to, že světlo je obojí, tisíckrát větší i tisíckrát menší než atom. Rozptylené

i lokalizované. Vlna i částice. Když světlo putuje prostorem, je jako vlnění na jezeře. Pokud je však absorbováno anebo vyzařováno atomem, chová se jako proud malých kulometných nábojů. Představte si, že stojíte u požárního hydrantu na newyorském Times Square a současně se rozprostíráte jako mlha po celém Manhattanu. Absurdní? Ano. Takové nicméně světlo je.

Popis světla jako vlny byl správný. Stejně tak popis světla jako částice. Světlo je totiž paradoxně jak vlna, tak částice.

Svět, který popírá zdravý rozum

Měli bychom být překvapeni tím, že se světlo zásadně liší od čehokoli běžného? Že je ve své celistvosti nepochopitelné, že jsou jeho vlastnosti jiné, než bychom intuitivně čekali, a že se přičí zdravému rozumu? Možná by nám pomohlo, kdybychom si objasnili, co myslíme pojmy intuice nebo zdravý rozum. Intuicí a zdravým rozumem získáváme základní informace o fungování světa kolem nás. V evolučních souvislostech jsme takovou informaci potřebovali k přežití na africké planině uprostřed spousty větších, rychlejších a dravějších tvorů, než jsme byli my. Přežití záviselo na tom, jestli máme představu o tom, jak relativně velké objekty jsou mezi námi a horizontem, jestli máme sluch, který nám umožní slyšet relativně hlasité zvuky, a tak dále. Při vývoji smyslů nevzniklo pro účely přežití nic, co by nás vzalo za hranici našeho tehdejšího nejbližšího prostředí – například oči, díky nimž bychom mohli vidět mikroskopickou sféru atomů. Z toho důvodu jsme si v této oblasti nevyvinuli vůbec žádnou intuici. A proto bychom se neměli divit, že když začneme zkoumat sféru, která je ve srovnání s naším všedním světem miniaturní, narazíme na věci, jež nedávají smysl. Atom je přibližně desetmiliardkrát menší než lidské tělo. Bylo by překvapující, kdyby se choval podobně jako fotbalový míč, židle, stůl nebo cokoli jiného ze světa našich smyslů.

Prvním člověkem, který si uvědomil, že základní realita, na níž je vystaven všední svět, je všednímu světu absolutně nepodobná, byl

skotský fyzik James Clerk Maxwell, pravděpodobně nejvýznamnější fyzik v době mezi Newtonem a Einsteinem (zemřel předčasně na rakovinu žaludku ve věku pouhých 48 let). Jeho velkým triumfem bylo v 60. letech 19. století shrnutí veškerých magnetických a elektrických jevů do prosté soustavy rovnic. Maxwellovy rovnice jsou tak superzhuštěné, že je možné je (pokud máte drobné písmo) vtěsnat na zadní stranu poštovní známky.

Až do dob Maxwella si fyzikové představovali svět na základě věcí, které viděli kolem sebe. Vesmír popisovali, tak jak to zavedl Newton, jako hodinový strojek. Maxwell nebyl jiný. Když například usiloval o pochopení toho, jak se magnet přitáhne a připojí ke kousku kovu, představoval si původně prostor mezi magnetem a kovem vyplněný neviditelnými ozubenými kolečky. Kolečko těsně přitažené magnetem otočí dalším kolečkem, to dalším a tak dále. Tímto způsobem byla podle něj předávána síla z magnetu na kov. Když tento obrázek nezapadal do jeho experimentálních pozorování magnetismu, Maxwell svůj předpoklad modifikoval: tato kolečka byla z pružného materiálu, který se jejich otáčením natahoval. A když se ani toto neosvědčilo, bezradně rozhodl ruce a s těmito mechanickými modely skoncoval. Přijal fakt, že příroda se prostě všednímu světu vůbec nepodobá.

Místo neviditelných otáčejících se koleček si Maxwell představil imaginární elektrická a magnetická silová pole pronikající prostorem bez jakékoli paralely s všedním světem. To byl zásadní průlom. V dlouhodobém kontextu to fyziku osvobodilo, umožnilo to Einsteinovi představit si gravitaci jako deformaci čtyřrozměrného časoprostoru a současným fyzikům to umožňuje předložit hypotézu, že základními stavebními kameny hmoty jsou malé řetězce energie hmoty vibrující v nepředstavitelném prostoru o deseti dimenzích.

Fyzikům chvíli trvalo, než strávili informaci, že se ve své snaze o pochopení základní reality budou muset obejít bez záchranné sítě běžné intuice. To se jim ale v prvních desetiletích dvacátého století, kdy došlo ke kolosálnímu střetu mezi teoriemi světla a hmoty a zrození vlnově-částicové teorie světla, ještě zcela nezdařilo.

Bůh hraje kostky

Jestliže se světlo chová jako proud částic, a to je smyslem celé diskuze, má to vážný dopad na pochopení možnosti vidět odraz své tváře v okně. Proč? Inu, co je perfektně a snadno vysvětlitelné, pokud je světlo vlna – vzpomeňme si na příklad vlny z člunu, která narazila na částečně ponořené dřevo a část se jí odrazila zpět – je zapeklitě obtížné vysvětlit, pokud je světlo proudem částic podobných nábojům. Fotony jsou přece identické. Pokud jsou však identické, jistě by se měly ve styku s tabulkou skla chovat totožně. Buď by měly být všechny propuštěny, nebo by měly být všechny odrazeny zpět. Jak je tedy možné, že 95 procent projde skrz a 5 procent se odrazí zpět?

Toto je klasický případ fyzikálního paradoxu – situace, ve které jedna teorie, částicová teorie světla, tvrdí jednu věc, zatímco naše zkušenost, založená na zdravém selském rozumu, tomu odporuje. Naše zkušenost je zcela zřejmě důvěryhodná – skutečně vidíme současně scénu za oknem i slabý odraz své tváře. Pak tedy však musí být něco v nepořádku s naší představou o fotonech.

Existuje pouze jedno logické vysvětlení: každý foton má 95procentní šanci být propuštěn a 5procentní šanci být odražen zpět. Může to vypadat jako neškodný fakt, ve skutečnosti je to však šokující zpráva, bomba shozená přímo do srdce fyziky. Protože pokud máme šanci znát pouze možnost nebo řekněme pravděpodobnost fotonu projít skrz okno nebo se vrátit zpět, pak jsme se mlčky vzdali veškeré naděje vědět jistě, co konkrétní foton udělá. Což byla, jak si uvědomil Einstein (ironií osudu první člověk, který právě s existencí fotonu přišel), pro fyziku katastrofální zpráva. Bylo to absolutně neslučitelné se vším, co bylo doposud známo. Fyzika dosud poskytovala návod na předvídaní budoucnosti s naprostou jistotou. Pokud se o půlnoci Měsíc na obloze nachází na konkrétním místě, lze podle Newtonova gravitačního zákona se stoprocentní jistotou odvodit, kde bude zítra ve stejnou dobu. Ale pokud jde o foton dopadající na okenní tabuli, nelze nikdy s určitostí předvídat, co se s ním stane. To, zda bude propuštěn nebo odražen, je naprosto nahodilé a rozhodují o tom jediné rozmáry náhody.

Tento druh náhody není tak důvěrně známý jako hod kostkou či zatočení ruletou. Je daleko zásadnější a zároveň záladnější. Pokud by byly známy veškeré nesčetné síly, které hrají roli při hodu kostkou, pak by fyzik s dostatečně výkonným počítačem a velkou měrou trpělivosti mohl k odhadu výsledku použít Newtonovy pohybové zákony. Problém je v tom, že existuje tolik faktorů, které mají na trajektorii kostky vliv – od prvotního impulsu hráče přes vzduchové proudy, které jí zmítají, po nerovnosti stolu, přes které se kutálí – že je za hranicí schopnosti kohokoli je všechny podchytit s přesností nutnou k zaručené předpovědi výsledku.

Klíčovou skutečností je však to, že naše neznalost faktorů ovlivňujících chování hosené kostky je pouze praktickým problémem. Není vyloučené, že by někdo s dostatkem houževnatosti, o dostatku času ani nemluvě, mohl být v budoucnu schopen určit s potřebným stupněm přesnosti všechny síly působící na kostku. Hod kostkou v podstatě není nepředvídatelný. Je jen prakticky nepředvídatelný.

Porovnejme to s fotonem. Je absolutně nepředvídatelné – nejen prakticky, ale i principiálně – co udělá foton, když narazí na tabulku skla. Není to věcí naší neznalosti všech faktorů, které ovlivňují, co se s ním stane. Neexistují faktory, které by nebyly známé. Foton spíše projde skrz sklo, než že se odrazí zpět, ale naprosto svévolně, zcela bez důvodu.

Ve všedním světě je každá událost určená předchozím dějem. Příčina vždy předchází důsledku. Kostka ukáže konkrétní číslo jako výsledek působení všech sil, které ji ovlivňují. Klopýtnete při procházce, protože jste zakopli o uvolněnou dlažební kostku. Ale to, jak se zachová foton při setkání s okenní tabulkou, není způsobeno žádným předchozím jevem. Je to důsledek bez příčiny. Ačkoli lze v principu určit pravděpodobnost, s jakou na kostce padne šestka, neexistuje žádná příčina, ze které by bylo lze určit pravděpodobnost, co udělá foton procházející okenní tabulkou, žádné skryté zařízení bzučící pod vnější slupkou reality. Je to základní princip přírody, nejnížší vrstva. Není nic hlubšího. Z jakéhosi tajemného důvodu je vesmír zkrátka takto zkonstruován.⁴

Typ nepředvídatelnosti charakterizující chování fotonů ve styku s okenní tabulí ve skutečnosti charakterizuje jejich chování ve všech myslitelných situacích. Je to vlastně typická reakce nejen fotonů, ale všech obyvatel mikroskopického světa atomů a jejich složek – základních stavebních kamenů reality. Atom radia je schopen se rozpadnout, rozložit se, přičemž jeho jádro prudce exploduje jako malý granát. A není vůbec žádná šance přesně odhadnout, kdy které radiové jádro podlehne sebedestrukci, existuje pouze určitá pravděpodobnost, že se to stane během konkrétního časového intervalu.

Nepředvídatelnost mikroskopického světa není podobná ničemu, na co kdy lidé narazili. Je to něco zcela nového pod sluncem. To je důvod, proč Einstein obdržel Nobelovu cenu nikoli za teorii relativity, ale za odvození částicové povahy světla z fotoelektrického jevu. Jak on, tak i komise udělující Nobelovu cenu si uvědomili, že právě toto byl opravdu převratný objev.

Patrně tím nejskandálnějším objevem v historii vědy je pochopení, že mikroskopický svět je řízen nezjednodušitelnou náhodou. Ironií je, že Einstein tím byl natolik konsternován, že pronesl slavnou větu: „Bůh nehraje s vesmírem kostky.“ (Na což velký kvantový průkopník Niels Bohr odvětil: „Přestaňte říkat Bohu, co má se svými kostkami dělat.“) Neochvějně odmítal uvěřit, že se věci na základní úrovni ve vesmíru dějí bez důvodu. Trpkou ironií, která Einsteinovi nebyla lhostejná, bylo to, že to byl právě on, kdo stanovením existence fotonu nechtěně vpustil ducha nahodilosti do srdce fyziky.⁵

K Einsteinovu úžasu to ve dvacátých letech 20. století vypadalo, že ostatní fyzikové kvantovou představu, podle níž se věci dějí bez důvodu, přijali. Intuice však Einsteinovi napověděla něco důležitého. Pokud by fyzikové přijali prostou nahodilost úplně za svou, mělo by to nevyhnutelně ještě skandálnější důsledky, na jejichž základě by fyzikové byli nuceni se zříct celé kvantové představy. Trvalo až roku 1935, než Einstein konečně našel to, co hledal. Při práci se dvěma dalšími fyziky – Nathanem Rosenem a Borisem Podolským – zjistil, že pokud byl předpoklad kvantové teorie správný, nevyhnutelným

následkem pak bylo, že se dva atomy mohou navzájem ovlivňovat, i když se nacházejí na opačných stranách vesmíru.

Abychom pochopili, jak Einstein k takovému závěru došel, je nutné odbočit. Tato kapitola začala tvrzením, že odraz naší tváře v okenní tabulce se chápe snadno, pokud je světlo vlna podobná těm na jezeře. Chyběla zde však zmínka o tom, jak jsme vůbec přišli na podezření, že světlo je vlna. Koneckonců světlo jako vlna nevypadá.

Světlo je vlna

Člověkem, který dokázal, že světlo je vlna, byl Angličan Thomas Young. Byl to všestranný vědec, který nejenže způsobil první průlom v luštění egyptských hieroglyfů na Rosettské desce, ale také si uvědomil, že oko musí obsahovat samostatné receptory pro modrou, zelenou a červenou barvu. Jeho největším úspěchem však zřejmě bylo odhalení vlnové podstaty světla.

Young měl silné podezření, že světlo je spíš vlna než proud tělísek podobných nábojům, jak se domníval Newton. V roce 1678 zjistil dánský vědec Christian Huygens, že pokud je světlo vlna šířící se prostorem, pak lze vysvětlit mnoho optických jevů, jako je například odraz světla v zrcadle a jeho ohyb neboli lom dráhy světla v hustém prostředí, jakým je například sklo. Huygensova vlnová teorie dokonce byla schopna i správně vyčíslit ohyb světla při pohybu ze vzduchu směrem do skleněného bloku, zatímco Newtonova teorie to nedokázala – alespoň ne bez trochy úprav. Ale jelikož Newton platil takřka za boha, byla Huygensova teorie prakticky úplně ignorována – až do doby Younga.

Ústřední charakteristikou vln jakéhokoli typu je, že když procházejí jedna druhou, navzájem se zesilují nebo ruší. Zesilují se neboli konstruktivně interferují tam, kde se vrchol jedné vlny setká s vrcholem vlny jiné; a ruší se navzájem neboli destruktivně interferují v případech, kdy se vrchol jedné vlny setká s minimem druhé. Sledovat při dešti v kaluži tyto interference bývá opravdu fascinující. Jak se

soustředné vlnky po dopadu kapek rozvinou jedna přes druhou a buď se navzájem zesílí, nebo vyruší.

Young o tomto úkazu věděl. Také věděl, že když se podobnýjev přihodí se světlem, skutečnost, že není viditelný pouhým okem, znamená pouze to, že maxima světelných vln musí být od sebe vzdálena v odstupu daleko menším, než je šířka lidského vlasu, což je jedna z nejmenších věcí rozeznatelných lidským okem. Udělat vzájemné působení tak maličkových vln viditelným je mírně řečeno výzvou. A Young ji přijal.

Uvědomil si, že nejdřív musí vytvořit dva podobné zdroje soustředného vlnění, přesně takového, jaké vznikne ze dvou kapek po dopadu na hladinu rybníka. Jak se vlny šíří jedna přes druhou, dochází k jejich vzájemnému ovlivňování. Na místech, kde se vlny potkají destruktivně, se vlny vyruší a nastane tma. V místech, kde se střetnou konstruktivně, posílí jedna druhou a tam se rozjasní. Tmavé a světlé oblasti by se měly střídat. Abychom je viděli, bylo podle Younga nutné pouze umístit bílou zástěnu do místa, kde se tyto soustředné vlny překrývají. V tu chvíli by se ukázala interference jako obrazec složený ze světlých a tmavých pruhů, které se podobají pruhům zebry nebo čarovým kódům na zboží v obchodě.

Zásadní pro úspěch Youngova experimentu byla podmínka, že světlo musí být úplně jednobarevné nebo alespoň natolik blízko jednobarevnému, jak jen bylo možné. Dnes již víme, že různé barvy světla odpovídají různým délkám vln neboli vlnovým délkám, vlnové vrcholy u červené barvy jsou od sebe vzdáleny zhruba dvakrát tolik než u barvy modré. Young to zřejmě tušil. Názorná ukázka interference světla vyžadovala co nejdokonalejší vyrušení nebo zesílení překrývajících se světelných vln, což bylo možné, pouze pokud šlo o světlo jedné barvy.

V roce 1801 Young tyto dva zdroje soustředného vlnění sestrojil tak, že nechal zářit světlo na jednu stranu neprůhledné desky se dvěma úzce oddělenými paralelními výřezy. Na druhé straně této přepážky světlo z každé štěrbinvy vyjde, rozprostře se a spojí se se světlem přicházejícím z druhého průřezu. Do místa, kde se vlnění překrývala,

Young umístil další bílou desku. A v tu chvíli vítězoslavně spatřil obraz světlých a tmavých pruhů – zcela zřejmou známku interference. Světlo tedy nepochybně vlnou bylo. Důvodem, proč tento jev není viditelný pouhým okem, je malá velikost vln: pouhá tisícina milimetru od maxima k maximu.⁶

Proč je důležité poznat pokus ze začátku devatenáctého století, který vlnovou povahu světla názorně dokázal? Protože toto nebyl konec příběhu Youngova dvojštěrbínového experimentu. Ani zdaleka ne. Ve dvacátém století se vrátil v nové podobě. A tentokrát jím pozoruhodně nebyl prokázán vlnový charakter světla, ale něco jiného – něco stěží uvěřitelného. Že je možné, aby se jeden mikroskopický objekt – foton nebo atom – nacházel na dvou místech současně.

Vlny informují částice

Znovu připomeňme Youngův experiment, při kterém byly do neprůhledné desky blízko od sebe paralelně vyříznuty dvě štěrbin. Young na ni vysílal záření jedné barvy neboli světlo o jedné vlnové délce. Každý průřez sloužil jako zdroj sekundárních světelných vln, stejně jako dva kameny společně vhozené do rybníka fungují jako zdroje soustředných vln. Vlny z těchto dvou kamenů překryjí jedna druhou a buď se navzájem posilují, nebo ruší, a to samé se děje se světelnými vlnami z oněch dvou štěrbin. Tam, kde se posílí, je jas světla zesílen; kde se navzájem vyruší, tam je světlo potlačeno a nastane tma. Young vsunul druhou desku do oblasti, kde se vlny překrývají. A zde se, jak mohli všichni vidět, skutečně střídaly světlé a tmavé pruhy. Světlo bylo bezpochyby vlna.

Světlo ale bezpochyby bylo také proudem částic. Arthur Compton dokázal, že odráží elektrony, jako by bylo tvořeno malými kulečnickovými koulemi, a dále zde byl fotoelektrický jev, podle kterého jednotlivé částice světla způsobují vyvázání jednotlivých elektronů z kovového povrchu. Klíčovou otázkou proto bylo: jak je to slučitelné s Youngovým experimentem?

Vraťme se k fotonům viditelného světla. Každý z nich přenáší velmi malé množství energie. Proto si nikdo před Einsteinem jejich existence nevšiml. Pokud by fotony přenášely velká množství energie, pak by ve chvíli, kdy někdo otočením vypínače rozsvítí světlo, rozjasnění nastávalo skokově, nejprve z nuly na minimální jasnost, pak by se jas zdvojnásobil, ztrojnásobil a tak dále. Takové rozjasňování zdroje světla však neznáme. Důvodem je právě to, že jednotlivé fotony nesou malá množství energie a že tyto skoky, přestože se dějí, jsou příliš nepatrné a pouhým okem nerozeznatelné.

Zdroj světla v Youngově experimentu také sestává z biliónů a biliónů drobných fotonů. Ačkoli se tím vysvětluje, proč není částicový charakter viditelný, neobjasňuje to, jak se fotony domlouvají ke zformování obrazu světlých a tmavých pruhů, tedy charakteristického znaku vlnění, nikoli částic. Jednou z možností je, že když se fotony vyskytují ve velkém množství, jejich částicová povaha je určitým způsobem potlačena ve prospěch charakteru vlnového, čímž ztratí svou individualitu, stejně jako ji ztrácí člověk uprostřed davu fanoušků na fotbalovém zápase. Co se však stane, když světlo donutíme ukázat jeho částicovou tvář? To lze uskutečnit, pokud se Youngův experiment provede s tak slabým zdrojem světla, že nebude obsahovat bilióny a bilióny fotonů, ale jen pár. Pokud bude zdroj tak slabý, že fotony dorazí ke štěrbíně v desce jeden po druhém, s dlouhým intervalem mezi sebou, nebude už vůbec pochyb, že se jedná o částice.

Lidské oko nemá schopnost registrovat jednotlivé fotony, dopad fotonů na druhou desku tedy nezaregistruje. To lze nicméně vyřešit překrytím desky sadou citlivých detektorů schopných zaznamenat jednotlivé světelné částice. Představme si je jako malé nádoby, které shromažďující fotony, stejně jako se do sudu chytají dešťové kapky. Pokud jsou tyto fotonové nádoby připojeny k počítači, je možné na monitoru zobrazit, co bylo nasbíráno, čímž se jev pro lidské oko zviditelní.

Co lze sestavením této hi-tech verze Youngova experimentu očekávat? Patří mezi základní podmínky interference, že pro prolínání neboli vzájemné ovlivňování je zapotřebí dvou vln. V případě Youngova

experimentu vyšly ze dvou štěrbin na neprůhledné desce dvě sady vln ve formě soustředných vlnění. Avšak v případě, že fotony dosáhnou přepážky jeden po druhém, s velkými časovými rozestupy, je logické, že v danou chvíli bude vycházet z jedné nebo druhé štěrbiny jen jediný foton. Takový samotný foton nebude mít k dispozici jiný foton pro přidružení, a k žádné interferenci tedy nemůže dojít. Po dostatečně dlouhé době experimentu, kdy dvěma štěrbinami prošla spousta fotonů, jež zasypaly druhou desku, byly předpokládaným výsledkem na počítačovém monitoru dva paralelní, jasné pruhy – obrázky ze dvou štěrbin.

To se však nestalo.

Na počátku monitor zobrazoval fotony, které se snažejí na druhou desku, jako když střílí ze samopalů. Jak experiment pokračoval, začalo se však dít cosi pozoruhodného. Pomalu, ale jistě začal obrázek vystupovat, jako fotografie na ozářeném fotopapíře ponořeném ve vývojce. A nebyl to jen tak ledajaký obrázek. Byl to obrazec střídajících se světlých a tmavých pruhů, přesně takových paralelních interferenčních pruhů, které viděl Young v roce 1801. Ale jak je to možné? Interference nastává promísením vln ze dvou zdrojů. Zde bylo světlo tak slabé, že bylo prokazatelně tvořeno jednotlivými částicemi – nádobkové detektor je ostatně zaznamenávají v daný moment jediným kliknutím – a jednotlivý foton tak neměl kolem sebe další foton, se kterým by se střetl.

Vítejte v podivném kvantovém světě. To, že se fotony chovají absolutně bez důvodu, je jen začátek tohoto bláznovství.

Vypadá to, že fotony i přesto, že jsou v tak malém množství, že jsou nepopíratelně jednotlivými částicemi, mají určité povědomí o své vlnové povaze. Dopadají na druhou desku přesně na ta místa, na kterých by se vlny vycházející ze dvou štěrbin navzájem posílily, kdežto místům, kde by se vlny z těchto dvou štěrbin vyrušily, se vyhýbají. Je to, jako by s jednímkaždým fotonem byla spjatá vlna a jakýmsi způsobem řídila, na které místo na desce má foton dopadnout.

A to je zhruba obrázek, který nosí v hlavě většina fyziků, ať už oprávněně, nebo neprávem. Vlna je asociována s fotonem. Informuje

jej, kam se má pohybovat a co má dělat. Má to ovšem háček. Vlna není reálnou, fyzickou vlnou, kterou můžeme spatřit nebo se jí dotknout jako vlny na rybníku. Namísto toho se jedná o abstraktní, matematickou věc. Fyzikové si tuto kvantovou vlnu, často nazývanou vlnovou funkcí, představují rozprostřenou v celém prostoru. Tam, kde je vlna velká, čili její maximum je vysoké, tam je možnost neboli pravděpodobnost výskytu fotonu; a kde je malá nebo relativně plochá, tam je pravděpodobnost výskytu fotonu nízká. Přesněji řečeno, možnost neboli pravděpodobnost výskytu částice na určitém místě v prostoru se rovná druhé mocnině výšky kvantové vlny v daném místě. Kvantové vlny se mohou prolínat a ovlivňovat, a pakliže k tomu dojde, vytvořený obrazec jejich vzájemného působení ukazuje, kde se fotony s největší pravděpodobností nalézají.

Je to složité, až z toho jde hlava kolem. Naznačuje to nicméně skutečnou duální podstatu přírody. Nejen že se světelné vlny mohou chovat jako částice – fotony – ale i fotony se naopak mohou chovat jako vlny, třebaže jde o abstraktní kvantové vlny.

Znovu podotkneme, že důsledek toho, že se světelné vlny chovají jako částice, je ohromující. Svět fotonů – a všeho ostatního – je skutečně řízen náhodou. A důsledek toho, že se fotony chovají jako vlny, je ohromující zrovna tak. Jednotlivý foton se může nacházet na dvou místech současně (či dělat dvě věci najednou), což je, jako bychom byli ve stejnou dobu v Londýně i v Paříži. Jak je to možné? Pokud se fotony mohou chovat jako vlny, vyplývá z toho, že jsou pak schopny dělat i veškeré ostatní věci, které vlny umí. Vlny totiž dokáží jednu věc, jež má obrovský význam pro mikroskopický svět, ačkoli v běžném životě je její význam zanedbatelný.

Na dvou místech najednou

Představme si rozbouřené moře. Velké vlny popoháněné větrem se valí po hladině. A nyní si představme den poté, kdy bouře již pomínila. Vodní hladina je klidná, až na malé vlnky způsobené lehkým

vánkem. Je zde však také možnost mohutných valících se vln, na nichž budou malé, větrem zčeřené vlnky. A to je obecným rysem vln všeho druhu. Pokud existuje možnost dvou různých vln, vždy je možná také jejich kombinace. V případě vln v oceánu má tento jev důsledky, které sotva stojí za zmínku. V případě kvantových vln přidružených k fotonům, jež fotony informují o tom, kde mají být a co dělat, jsou však důsledky ohromné.

Uvažujme vlnu, která maxima dosahuje na jedné straně okenní tabule, takže ji s nejvyšší pravděpodobností najdeme právě na této straně. Jiná kvantová vlna dosahuje vlnového vrcholu na druhé straně okenní tabulky. Nic neobvyklého. Jelikož obě vlny mohou existovat jednotlivě, může existovat i vlna, která je jejich kombinací neboli superpozicí. Ve skutečnosti je dokonce nutné, aby existovala. Což odpovídá fotonu, který se ve stejnou chvíli nachází na obou stranách onoho okna. Fotonu, který je současně přenesen i odražen. Je to skutečně nemožné?

Přeneseme se nyní zpět k Youngovu dvojštěrbinovému experimentu a vybavme si, že pro tvorbu interferenčního obrázku musí dojít ke smísení dvou věcí. Lze na to nahlížet dvojím způsobem. Jedním z nich je vlnová perspektiva. V takovém případě se kvantová vlna přidružená k jednotlivému fotonu rozšíří v soustředných kruzích směrem od štěrbin v neprůhledné desce. Dalším způsobem je nahlížení z pohledu částic. V takovém případě je každý foton, který k neprůhledné desce dorazí, současně na dvou místech. To mu umožňuje projít oběma štěrbinami současně a smísit se sám se sebou.

Schopnost fotonu dělat dvě věci najednou je přímým důsledkem faktu, že pokud existuje možnost dvou vln, existuje i možnost jejich kombinace. Ale příroda se nezastavila na pouhých dvou vlnách. Pokud existuje možnost jakéhokoli množství vln – tří, devadesáti devíti nebo 6 milionů – jsou možné i všechny jejich kombinace. Foton umí dělat nejen dvě věci najednou, je schopen dělat najednou spoustu věcí.

Zdá se, že existuje rovnice – návod, chcete-li – která přesně vypočítá, jak se kvantová vlna odpovídající fotonu anebo čemukoli jinému rozprostře prostorem. Tato rovnice byla navržena rakouským fyzikem

Erwinem Schrödingerem a přináší odpověď na kvantovou záhadu, a sice jak je možné, že pokud je vesmír obecně nepředvídatelný, vydaný na milost hodu kvantovou kostkou, je všední svět do značné míry předvídatelný? Jak je možné, že umíme s téměř naprostou jistotou předem určit, že pokud nás venku zastihne déšť, zmokneme? Anebo že zítra ráno vyjde Slunce?

Schrödingerova rovnice ukazuje, že co příroda jednou rukou bere, to jen nerada druhou vrací. Ano, vesmír je v principu nepředvídatelný. Avšak – a toto je klíčová věc – nepředvídatelnost je předvídatelná. Nelze s jistotou určit, co udělá foton nebo jiná mikroskopická částice. Ale s pomocí Schrödingerovy rovnice můžeme stanovit pravděpodobnost, s jakou udělá jednu věc, pravděpodobnost, s jakou udělá jinou, a tak dále. To musí stačit jako záruka, že žijeme v převážně předvídatelném světě.

A víc než to. Kvantová teorie je nejúspěšnější fyzikální teorií, jaká kdy byla navržena. Její kalkulace odpovídají experimentům s přesností na neskutečně mnoho desetinných míst. Kvantová teorie doslova umožnila moderní svět, a to nejen tím, že nám dala lasery, počítače a iPody, ale také nám dala možnost pochopit, proč svítí slunce a proč je půda pod našima nohama pevná. Tato úspěšná teorie je paradoxně na jednu stranu důležitým návodem k vytváření různých věcí a chápání světa, na druhou stranu ale i oknem do překvapivého světa Alenky v říši divů, světa, který je podivnější než všechno to, co jsme kdy vůbec mohli vytvořit.

Okamžitý účinek

Pokud vás však jímá pocit, že je divné, aby foton něco dělal absolutně bez důvodu nebo se nacházel na dvou místech současně, vězte, že se budou dít věci ještě podivnější. V tu chvíli do děje vstoupili Einstein, Rosen a Podolsky. Upozornili na důsledek kvantové teorie, který byl tak absurdní, že podle nich musel nutně přimět každého rozumného člověka, aby kvantovou teorii zatratil. Zamysleme se nad částicovou

povahou světelných vln, která vede k nepředvídatelnosti, a vlnovou povahou fotonů, jež jim umožňuje být na dvou místech současně. Co se stane, když tyto vlastnosti zkombinujeme? Einsteinův tým zjistil, že výsledkem je nový, dokonce ještě podivnější jev: okamžitá komunikace mezi oddělenými místy v prostoru, dokonce i v případě, že se nacházejí na opačných stranách vesmíru.

K vyčarování tohoto nového jevu je ve skutečnosti zapotřebí ještě třetí složky. Ta však svou elementárností přesahuje kvantovou teorii. Jedná se o zákon zachování. Fyzikové již objevili několik takových. Existuje například zákon zachování energie. Ten tvrdí, že energie nemůže vzniknout ani zaniknout, může se pouze přeměňovat z jedné formy na jinou. V žárovce například dochází k přeměně elektrické energie na energii světelnou a tepelnou. Chemická energie získávaná přímo z našeho jídla je v našich svazech přeměňována na mechanickou energii pohybu svalů.

V roce 1918 udělala jedna z výborných, bohužel však nedocenených hrdinek vědy, německá matematicka Emmy Noetherová, překvapující objev v oblasti fyzikálních zákonů zachování. Přišla na to, že jsou pouhými důsledky hlubokých symetrií přírody – věcí, které zůstávají stejné, i když se náš pohled na ně mění. Zachování energie kupříkladu vychází ze symetrie časového posunu: skutečnosti, že ať už provedeme experiment nyní, anebo za stejných podmínek s časovým odstupem – řekněme příští týden nebo příští rok – dojdeme k přesně stejnému výsledku. Jinou hlubokou symetrií v přírodě je rotační symetrie. Jestliže uskutečníme pokus s vybavením orientovaným severo-jihně či následně otočeným řekněme východo-západně, dobereme se stejného výsledku. Zákonem, který z této neškodné symetrie vychází, je zachování momentu hybnosti. Ten je veličinou míry tendence rotujícího tělesa v otáčení pokračovat. Moment hybnosti Země otáčející se kolem své osy je velmi veliký, je tedy pravděpodobné, že se bude otáčet ještě dlouhou dobu.

Bylo zjištěno, že mikroskopické částice jako například fotony mají kvantovou vlastnost zvanou spin. Ta nemá, stejně jako

nezjednodušitelná nahodilost, vůbec žádnou analogii s všedním světem. Pokud je nám známo, fotony se v prostoru ve skutečnosti neotáčejí tak jako Země kolem své osy. Jejich otáčení je intrinzičné – jejich vlastní. Nicméně to vypadá, jako by se otáčely. Foton má celkem dvě možnosti: z hlediska svého směru pohybu a určité úrovně spinu si může počínat, jako když se vývrtkou šroubuje po směru otáčení hodinových ručiček, nebo si může za stejných podmínek počínat opačně, proti směru hodinových ručiček.

Podstatné je, že se kvantový spin řídí zákonem zachování momentu hybnosti. A tento zákon, aplikovaný na fotony, říká, že pokud byly dva fotony vytvořeny najednou, jejich celkový spin se nikdy nemůže změnit. Řekněme, že se zrodily ve stejný čas a jeden se otáčí po směru a druhý proti směru hodinových ručiček. Jejich spiny se navzájem vyruší. Ve fyzikálním žargonu se říká, že jejich souhrnný spin je nulový. V takovém případě zachování momentu hybnosti vyžaduje, aby jejich souhrnný spin zůstal nulový navždy, případně až do chvíle, kdy budou nějakým procesem zničeny.

Na tom není nic podivného ani sporného.

Uvažujme však reálný proces, při kterém dojde k vytvoření dvou opačně se otáčejících fotonů. Elektron, malá částice, která krouží uvnitř atomů, má antičásticové dvojče zvané pozitron. Je obecnou charakteristikou všech částic a těchto antihmotných párů, že pokud se setkají, zničí se navzájem, anihilují. Elektron i pozitron mají, stejně jako foton, vnitřní spin. Jeho velikost je rozdílná, ale to v tuto chvíli nehraje roli. Důležité je, že ještě před tím, než anihilují, se elektron a pozitron otáčejí v opačných směrech, jejich spiny se tedy vyruší navzájem. Tím je zaručeno, že dva vytvořené fotony musí také mít spiny, které se vzájemně anulují. Jeden se musí točit po směru a druhý proti směru hodinových ručiček.

Nyní však přijde kvantový propletenec. Zachování momentu hybnosti vyžaduje pouze to, aby dva fotony, které podlehnou anihilaci, měly opačné spiny. Ale jsou dva možné způsoby, jak k tomu může dojít. První foton se může točit po směru a druhý proti směru hodinových

ručiček, nebo se první foton může točit proti směru a druhý po směru hodinových ručiček. Nezapomínejme však, že mluvíme o kvantovém světě. Každá možnost je reprezentována kvantovou vlnou. A pokud jsou možné dvě vlny, je možná, teda vlastně nezbytná, jak si jistě vzpomínáte, i jejich kombinace.

Když tedy vzniklé fotony odletí – a odletí v opačných směrech – existují v podivné kvantové superpozici. Stejně jako jednotlivý foton může být v jednu chvíli na obou stranách okenní tabule, tyto dva fotony se současně otáčejí oba v obou směrech hodinových ručiček. Zřejmě ještě netušíte onu číhající bombu. Nedělejte si s tím starosti. Nikdo ji netušil. I Einsteinovi to trvalo.

Kromě zachování momentu hybnosti jsme zatím použili jednu kvantovou složku – kvantovou superpozici. Zbývá už jen druhá kvantová ingredience – nepředvídatelnost. Řekněme, že jsme sestrojili detektor, který zachytí první foton a určí jeho spin. S jistotou spočítat, jakým směrem se foton bude otáčet, je nemožné – dokonce je to principiálně nemožné. Kvantový svět je charakterizován nezjednodušitelnou nahodilostí. Vše, co víme, je, že existuje 50procentní možnost, že pokud detekujeme foton, zjistíme, že se točí po směru, a 50procentní možnost, že se točí proti směru hodinových ručiček.

Řekněme, že nalezneme první foton a zjistíme, že se otáčí po směru hodinových ručiček. A nyní přichází ta bomba. Druhý foton se okamžitě musí začít točit proti směru hodinových ručiček. Fotony ostatně vznikly s opačným spinem a zachování momentu hybnosti vyžaduje, aby se v opačných směrech otáčely vždy. Pokud na druhou stranu objevíme první foton a zjistíme, že se otáčí proti směru hodinových ručiček, druhý foton se okamžitě musí začít točit po směru. Ohromující na tom je, že není žádné omezení toho, jak daleko od sebe fotony mohou být. Pokud je o jednom fotonu známo, že se točí jedním směrem, jeho dvojče musí okamžitě reagovat, otáčet se v opačném směru – i v případě, že se fotony nacházejí na opačných stranách vesmíru.

Einstein, Rosen a Podolsky velkolepě ukázali, že kvantová teorie bláznovství okamžitého účinku na dálku připouští. Předpokládá, že

částice, které vznikly společně, už navždy fungují spíše, jako by byly v určitém smyslu velmi těsně propojeny, než jako dvě oddělené částice. Navzájem o sobě vědí. Jejich vlastnosti jsou nerozluitelně propleteny neboli, řečeno kvantovým žargonem, tyto částice jsou spolu provázány. Okamžitý účinek je shodný s určitým druhem nadpřirozeného vlivu, cestujícího nekonečnou rychlostí mezi kvantovými částicemi. To však odporuje Einsteinově speciální teorii relativity, jež zastává názor, že žádný účinek nemůže být rychlejší než světlo – 300 000 kilometrů za sekundu.

To vše lze přičíst vzájemnému působení tří věcí: superpozici, nepředvídatelnosti a zachování momentu hybnosti. Jelikož jsou dva fotony v superpozici, stav těchto dvou částic – ať už se otáčí po-proti anebo proti-po směru hodinových ručiček – není s jistotou určen, dokud není vypořádan spin jedné z částic. Pokud je tento spin změřen, závěr je nepředvídatelný. Nicméně zachování hybnosti jaksí způsobí, že druhá částice se o partnerově spinu dozví, a může tak okamžitě převzít spin opačný.

To, co předvídá existenci okamžitého účinku, je důvtipná souhra těchto tří faktorů, technicky známá jako nelokalita. Zachování momentu hybnosti ve skutečnosti není podstatné. Neexistuje vůbec žádný důvod, proč by okamžitý účinek nemohl být demonstrován nahrazením zachování momentu hybnosti jiným zákonem zachování, například zákonem zachování energie. Byla by jednoduše zapotřebí trocha vynalézavosti pro vymyšlení situace, ve které je okamžitý účinek pozorovatelný.

Některé populární knihy podporují názor, že dvě provázané částice jsou jako pár rukavic. Představme si, že se zavřenýma očima vyndáme jednu rukavici ze šuplíku, dáme ji do tašky a ještě s ní před tím, než tuto tašku otevřeme a na rukavici se podíváme, odjedeme s ní někam daleko. Pokud tam zjistíme, že jsme s sebou vzali levou rukavici, samozřejmě okamžitě víme, že rukavice v šuplíku je pravá, a naopak. To je však nedorozumění (a banalizace) kouzla tohoto provázání. Dvě oddělené kvantové částice nejsou jako dvě rukavice. V případě

rukavic jedna rukavice padne na levou ruku a druhá na pravou a toto je pravda neustále, nebo alespoň dokud tyto dvě rukavice existují. Pokud se ukáže, že rukavice, kterou máme s sebou, je pravá, byla pravou rukavicí, ještě než jsme otevřeli tašku, to znamená, že rukavice, která zůstala doma, byla stále levá. Není zapotřebí žádného signálu vyslaného rukavici doma, který by jí řekl, aby byla levou rukavicí. Byla levou rukavicí celou dobu.

Pojďme to porovnat se dvěma fotony. Pokud je každý z nich jako rukavice, je to jakýsi podivný druh rukavice, která není ani levá, ani pravá, nebo spíše rukavice, u které není předem dáno, zda je levá či pravá. Tato její vlastnost je dána až ve chvíli, kdy ji vyndáte z tašky a podíváte se na ni, v té fázi se z ní stane, zcela náhodně, rukavice levá či pravá. A rukavice ponechaná v šuplíku, u které taktéž nebylo předem určeno, zda je pravá či levá, musí okamžitě zareagovat a stát se opačnou. Je to skutečnost, že rukavice (nebo foton) nemá žádný stav – a že tento stav je určen čistě náhodně – která způsobí, že existuje jakési přízračné spojení mezi rukavicí (fotonem) a jejím (jeho) partnerem ve chvíli, kdy je stav zjištěn.

Einstein byl přesvědčen, že v případě nelokality konečně přišel s tak jasně absurdním proroctvím, že to musí znamenat, že kvantovou teorií příroda ještě neřekla poslední slovo. Tento absurdní jev, který Einstein předvídal, byl už objeven – francouzským fyzikem Alainem Aspectem. V roce 1982, tedy čtvrt století po Einsteinově smrti, Aspect dokázal, že fotony na jedné straně jeho laboratoře na Pařížské univerzitě reagovaly na fotony na druhé straně, jako by mezi nimi fungovala jakási nadpřirozená komunikace probíhající významně rychleji, než je rychlost světla. Einstein se mýlil. Kvantová teorie uspěla v dalším přísném testu. Realita, kterou popisuje, se může zdát směšná, může být trpká, je však neoblomná. Tak to prostě je.

Bylo by báječné dokázat komunikovat nekonečně rychle, celkově zpochybnit Einsteinův limit kosmické rychlosti daný rychlostí světla. Avšak to, co příroda jednou rukou dává – přitažlivou možnost okamžité komunikace jako ve Star Treku – druhou bere. Znovu vše

ztroskotává na nahodilosti. Jedinou informací, která může být odeslána za použití okamžitého účinku, je stav spinu fotonu. Ale pokud by odesílatel chtěl využít nelokalitu, musel by poslat každý foton zprávy v superpozici spinu po anebo proti směru hodinových ručiček. Otáčení po směru může být například kódováno jako 0 a proti směru jako 1. Jestliže je však každý foton v superpozici stavů, má jen 50procentní šanci být 0 a 50procentní možnost být 1. Jedinou zprávou, kterou lze přenést, je náhodná sekvence nul a jedniček, což je stejně bezcenná zpráva, jako je série náhodných hodů mincí. Einsteinův limit rychlosti světla nebyl zpochybněn, protože se ukázalo, že je to horní limit rychlosti informace. Příroda nepředepisuje žádný rychlostní limit pro přenos nepoužitelného breptání. A to je vše, co připouští nelokalita, stále tak úžasná jako na první pohled.

Od odrazu vaší tváře v okně jsme urazili dlouhou cestu. Obraz, který na vás z okna kouká, říká, že mikroskopický svět fotonů musí řídit náhoda. Ale vezmeme-li v úvahu vlnovou povahu fotonů – ze které vyplývá možnost dělat dvě věci najednou – dospějeme k nelokalitě. Mnoho fyziků považuje tento okamžitý účinek za největší záhadu kvantové teorie. Nikdo ale netuší, co to znamená obecně pro vesmír. Je však jedna věc, kterou víme jistě. Nespočetné množství všech částic ve vesmíru vzniklo najednou před 13,7 miliardami let v jádru Velkého třesku. Následkem toho musí imaginární vazby, které poutají dva rotující fotony, svým způsobem, jemuž ještě zcela nerozumíme, vázat vás i mě k atomům nejvzdálenějších hvězd a galaxií.