

TEMA

marcus chown
musíme si promluvit o kelvinovi

VESMÍR A CO O NĚM PROZRAZUJÍ VŠEDNÍ VĚCI



TEMA

Marcus Chown

Musíme si promluvit o Kelvinovi

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

Věnováno Karen a Jo,
s láskou Marcus

*Celý svět v zrnku písku zhlédnout
a nebe v polní květině,
na dlani sevřít nekonečnost
a věčnost v pouhé hodině.*

William Blake – *Proroctví nevinnosti*

Nápad napsat tuto knihu byl jednoduchý: vzít běžné jevy všednodenního světa a ukázat, jaké hluboké pravdy nám ve světle současných vědeckých znalostí prozrazují o konečné povaze reality; čili číst kosmická znamení ve všedním světě. Anebo, slovy Williama Blakea, celý svět v zrnku písku zhlédnout, nebo v padajícím listu, v růži, v hvězdné noční obloze... Například:

– Odraz vaší tváře v okně sděluje šokující objev v historii vědy: a sice, že svět na jeho nejhlubší úrovni řídí náhody; že věci se nakonec dějí *zcela bez důvodu*.

– Skutečnost, že železo patří k běžným věcem – nachází se v oceli aut, která řídíme, v konstrukci budov, ve kterých pracujeme, dokonce i v krvi kolující v tuto chvíli v našich žilách – naznačuje, že kdesi v hlubinách vesmíru musí existovat rozžhavená pec o teplotě asi 4,5 miliard stupňů.

– Fakt, že na Zemi nejsou jiné bytosti – ať už lelkuující na rozích ulic, andělsky poletující oblohou nad námi anebo zjevující se a mizející jako členové posádky hvězdné lodi *Enterprise* – říká... vlastně nevíme, co nám prozrazuje. Může to znamenat, že jsme první inteligencí, která se vyskytla v naší Galaxii, možná vůbec v celém vesmíru, a která je odsouzena k nesmírně osamělému uvěznění na Zemi, bez možnosti promluvit s někým dalším. Také to může znamenat, že vesmír je natolik nebezpečné místo, že každý putující kosmický druh je zničen ještě před tím, než by se nám dostal do cesty. To je jen jeden ze všedních postřehů, u něhož je, upřímně řečeno, vaše vysvětlení stejně tak dobré jako to moje.

Nápad psát o tom, co nám prozrazuje všední svět o vesmíru, jsem dostal v době, kdy jsem propagoval svoji poslední knihu, tedy v době mezi dvěma knihami. Být spisovatelem znamená žít mezi dvěma extrémů. Spoustu času jsem zavřen sám doma a společnost mi dělají pouze rybičky karase zlatého, George a Reg (Laura bohužel během psaní této knihy zemřela). Na krátký čas, právě v době propagace nově vyšlé knihy, se dostanu mezi lidi, do víru společnosti. A dovednosti nutné ke zviditelnění knihy jsou zcela odlišné od těch, které jsou zapotřebí k jejímu napsání. V rozhovorech pro rozhlas mám na předvedení toho, co se má uložit do mysli posluchačů, nanejvýš několik minut. Při veřejných debatách navíc většina publika nemívá vědecké vzdělání. Takže ustavičně vymýšlím nové, názorné, trefné způsoby, jak vše vysvětlit. A přitom jsem si náhle uvědomil, že když mluvím k nevědcům, obvykle uvedu nejprve nějaký všednodenní postřeh a ten pak vztáhnou na pokročilou fyziku.

Na Mezinárodním vědeckém festivalu v Edinburghu v roce 2008 jsem například potřeboval zdůraznit základní paradox, který vede ke kvantové teorii, tedy dosud nejlepšímu popisu mikroskopického světa atomů a jejich složek. A tak jsem v úvodu přitáhl pozornost publika k žárovce v sále a poukázal na to, že světelné vlnění, které z ní vychází, je asi 5000krát větší než samotné atomy. Potom jsem vyndal z kapsy krabičku zápalek a řekl: „Představme si, že jsem otevřel tuto krabičku a vytlačil z ní čtyřicetitunový nákladák. Takové to je, když vychází světlo z té žárovky.“

A jednoho dne jsem si na žárovku vzpomněl. Najednou mě napadlo, proč vlastně nenapsat knihu, kde bych se v každé kapitole zaobíral postřehem z běžného života a demonstroval na něm základní zákonitosti reality? Jak jednoduché. Proč mě to nenapadlo dřív? Náhle jsem si uvědomil, jak moc spolu souvisejí různé věci, o nichž jsem chtěl psát. Byla to silná jednotící nit.

Byl jsem nadšen. Ale měl jsem také obavu, že bych se mohl opakovat. Doufám však, že ačkoli se vracím k věcem, o kterých jsem mluvil již dříve v knihách *Čarodějná pec* (*The Magic Furnace*) a *Kvantová teorie*

nikoho nezabije (*Quantum Theory Cannot Hurt You*), prohloubil jsem diskusi a ukázal věci v novém světle. Jako dobrý příklad poslouží 400 let stará záhada, proč je obloha v noci tmavá. Stejně jako 99 procent astronomů jsem byl toho názoru, že tma o půlnoci nám prozrazuje, že zde vesmír neexistoval vždy, ale že se narodil – že důkaz o Velkém třesku je na dosah již od počátku lidských dějin, jen mít schopnost jej rozeznat. Možná jsem to dokonce již vyslovil ve své knize *Afterglow of Creation* (v češtině dosud nevyšlo – pozn. překl.). Nyní si uvědomuji, že noční tma toto neznamená ani v nejmenším. Většina astronomů se mylí. A bizarní na tom je, že ze všech lidí to byl Edgar Allan Poe, kdo jako první zahlédl náznak pravdy.

Jiný příklad, ke kterému se sice vracím, ale rozvádím jej, je nekonečná rozmanitost světa, ve kterém žijeme, která je možná díky Pauliho vylučovacímu principu, jenž brání elektronům vršit se na sebe, a proto je tolik druhů atomů místo jediného. Byl jsem si vědom toho, že v knize *Kvantová teorie nikoho nezabije* jsem zdaleka nedosáhl úplného vysvětlení. Podařilo se mi ukázat, jak příroda umožňuje dvěma nerozeznatelným částicím chovat se různým způsobem: být buď společenská, nebo asociální. Pak jsem prohlásil, že příroda těží z obou těchto možností. Částice s konkrétním typem spinu se stanou asociálními – jako například elektrony – kdežto částice s jiným typem spinu – například fotony – jsou společenské. Co jsem však nevysvětlil, je to, co má spin kruci společného s tím, jak se částice nakonec projeví? Podal jsem jen poloviční vysvětlení. Na svou obhajobu mohu pouze říci, že Wolfgangu Paulimu to trvalo od roku 1926, kdy předložil vylučovací princip, do roku 1941, kdy přišel s vysvětlením vztahu ke spinu – takzvaným teorémem o spinové statistice částic. Proto se necítím tak špatně. Doufám však, že v této knize podávám vysvětlení úplné, takové, které, pokud vím, nenajdete v žádné jiné knize. Vše směřuje k tomu, abych ukázal, jak se neustále vyvíjí mé chápání a že se při psaní knih nesnažím jen sdělovat, co vím, ale také vyřešit různé záhady i ke své vlastní spokojenosti.

Kromě významu rozmanitosti světa a temné noční oblohy také vysvětluji, že složitost světa nám neprozrazuje pouze to, že Bůh hraje

s celým vesmírem kostky – nápad, který Einstein zamítl – ale že pokud by kostky nehrál, vůbec žádný vesmír by tu nebyl. Také polemizuji s tím, že se ukazuje, že směr času – důvod, proč nemládneme, ale stárneme – se zdá být nastaven z doby, kdy začala fungovat gravitace, tedy asi 380 tisíc let po Velkém třesku, což je objev, který Larry Schulman učinil v době, kdy jsem psal tuto knihu. A popisují také objev Stephena Hawkinga, učiněný ve stejné době, a sice že skutečnost, že žijeme v nekvantovém světě, ve kterém lidé nikdy neprojdou dvěma dveřmi současně, znamená, že vesmír musel v minulosti projít explozí super-rychlé expanze. To je nepochybně jeden z nejvíce udivujících závěrů učiněných na základě každodenní reality a podtrhuje tak Hawkingův jedinečný talent. Mohl bych uvést ještě spoustu dalších příkladů. Ale na úvod je to až moc dlouhé. Doufám, že si mou knihu užijete.

Marcus Chown
Londýn
V únoru 2009

PRVNÍ ČÁST

Co prozrazuje všední svět o atomech

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 nepředvídátnosti, 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 větší na 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 odrazí 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 filosofa Démokrita, který kolem roku 440 před naším letopočtem zdvihl kámen či větev, možná to byl i kousek keramiky, a položil si otázku:

„Pokud tento předmět rozpůlím, potom obě poloviny rozřizu 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 napůl rozdělit 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 nastrádána 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 nedocenění 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 diferenciace 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. A nebo 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 vmáčknout 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. Rozptýlené

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 vystavěn 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 diskuse, 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 rozmary 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 ji 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 hozené 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 určena 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, nejnižší 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 Podolskym – 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 případě, 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 podobný jev 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 maličkých 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 čárovým 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. Náznorná 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 šterbiny 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 dvojštěrbinového 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 y a 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 štěrbině 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