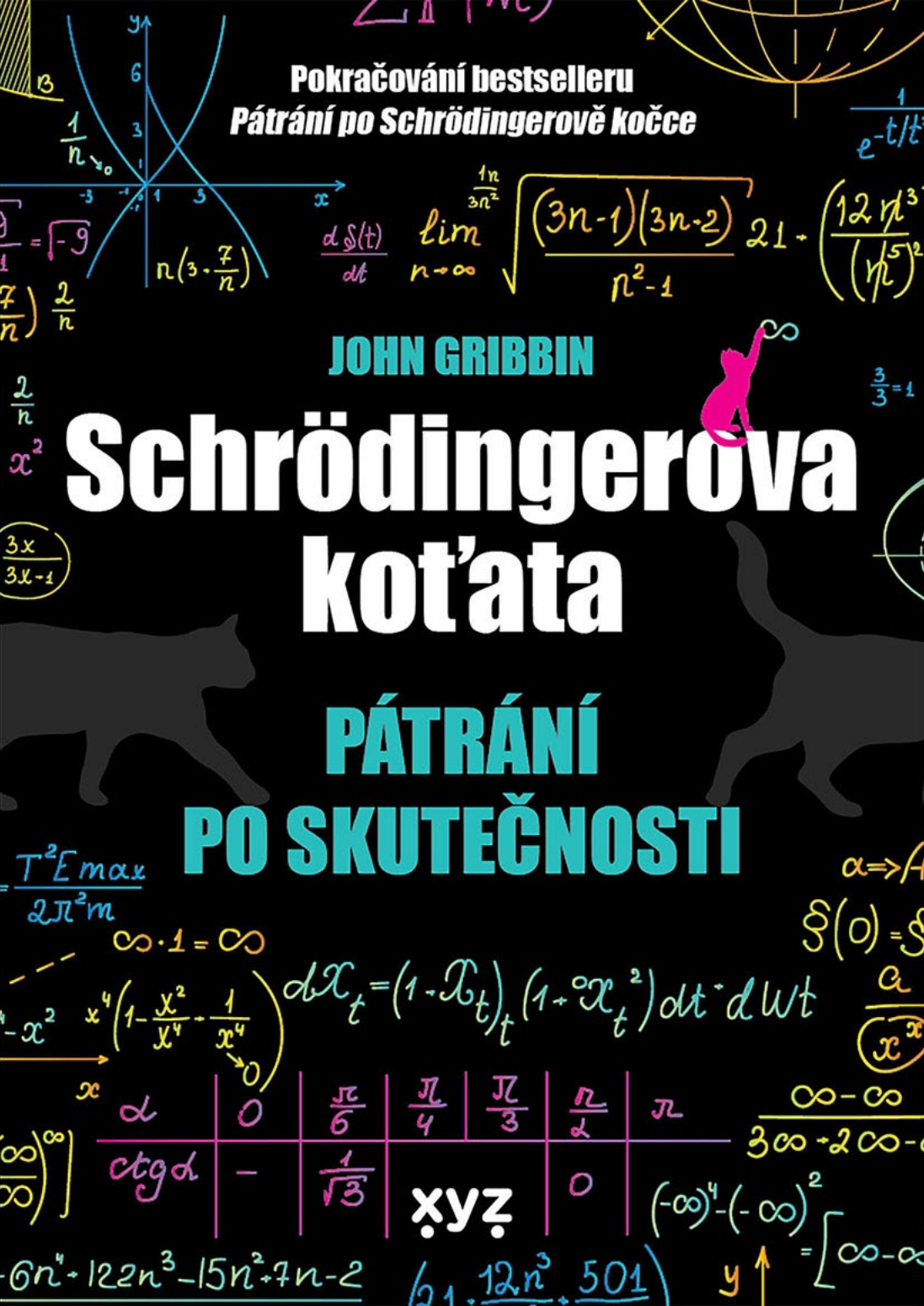


Pokračování bestselleru
Pátrání po Schrödingerově kočce

JOHN GRIBBIN

Schrödingerova koťata

PÁTRÁNÍ
PO SKUTEČNOSTI



Schrödingerova kořata

Vyšlo také v tištěné verzi

Objednat můžete na
www.xyz.cz
www.albatrosmedia.cz



John Gribbin
Schrödingerova kořata – e-kniha
Copyright © Albatros Media a. s., 2025

Všechna práva vyhrazena.
Žádná část této publikace nesmí být rozšiřována
bez písemného souhlasu majitelů práv.

ALBATROS  **MEDIA**



JONATHAN
GRIBBIN

SCHRÖDINGEROVA
KOŤATA

xyz

Celých těchto padesát let hlubokých úvah
mne nepřivedlo o nic blíž k odpovědi na otázku:
„Co jsou to světelná kvanta?“
Dnes si všichni myslí, že to vědí, ale mýlí se.

ALBERT EINSTEIN, dopis M. Bessovi, 1951

Mimo zdánlivě elementární smyslové vjemy,
jež podléhají působení mysli,
neexistuje žádný fyzikální svět.

GEORGE BERKELEY

Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge
(Pojednání o principech lidského poznání), 1710

Existuje devět a šedesát způsobů, jak postavit
kmenové ležení, a každý z nich je správný!

RUDYARD KIPLING

In the Neolithic Age (V mladší době kamenné), 1895

PODĚKOVÁNÍ

Možnost napsat knihu, jako je tato, závisela na dobré vůli velkého počtu vědců, kteří mi poskytli kopie svých vědeckých článků často ještě předtím, než byly oficiálně uveřejněny. Příslušné odkazy na odbornou literaturu jsou vesměs uvedeny v závěru textu. O některých svých konzultantech bych se však měl zmínit zvlášť, a to kvůli rozhodujícímu způsobu, jakým rozhovory a korespondence s nimi ovlivnily vývoj mých představ o kvantové skutečnosti. V abecedním pořadí bych takto osobně rád poděkoval: Brunovi Augensteinovi z instituce RAND v kalifornské Santa Monice, Su-jüan Chhuovi z Kalifornské univerzity v Riverside, Johnu Cramerovi z Washingtonské univerzity v Seattlu, Paulu Daviesovi z Adelaidské univerzity, Dipankaru Homeovi z Boseova ústavu v Kalkatě, Geoffu Jonesovi ze Sussexské univerzity, Martinu Kriegerovi z Jihokalifornské univerzity v Los Angeles a Thanu Padmanabhanovi z Tataova ústavu v Bombaji.

Při této příležitosti mi Sussexská univerzita pomohla ještě více, než tomu bylo u jiných mých knih. Přijala mne totiž jako hostujícího vědeckého pracovníka v oboru astronomie a poskytla mi z toho plynoucí lepší přístup k tamější skvělé vědecké knihovně a internetu. Sussexští astronomové navíc působili jako „zkušební posluchači“ pro některé mé méně konvenční myšlenky. Beze všech těchto lidí by kniha, kterou teď držíte v rukou, nikdy nevznikla.

ÚVOD

Když jsem napsal své vyličení historického vývoje kvantové teorie, jež poprvé vyšlo právě před deseti lety, nikdy jsem si nepředstavoval, že bych se k tématu kvantových záhad vrátil ještě v další knize. Při psaní svého *Pátrání po Schrödingerově kočce* (v roce 2021 vyšla v nakladatelství XYZ v češtině – pozn. red.) jsem se snažil čtenáři ukázat, jak podivný a záhadný je subatomový svět kvantové fyziky a jak nenapadnutelná je logika, jejíž zrod si vyžádaly bizarní experimentální výsledky, vedoucí k teoriím, jež jsou v rozporu se zdravým rozumem, jež zase byly potvrzeny dalšími experimenty, které fyziky přinutily, aby takové bizarní představy brali vážně. Základní linie panující v polovině 80. let vycházela z toho, že kvantová teorie přes veškerou svou podivnost funguje – je to teorie, která nám pomáhá chápat chování laserů, počítačových čipů, molekuly DNA a ještě mnoha jiných věcí. Starými představami, takzvanou „klasickou“ fyzikou, takové jevy vysvětlit prostě nelze. V *Pátrání po Schrödingerově kočce* jsem zdůraznil, že nad obtížnou pochopitelností kvantové teorie převážilo to, že opravdu fungovala. Díky faktu, že – slovy Richarda Feynmana – „kvantové teorii nerozumí *nikdo*“, jsem svou dřívější knihu na toto téma mohl uzavřít nestoudným výrokem: „Právě proto vás nyní bez větších výčitek svědomí zanechávám o samotě ve společnosti libovolně končících úvah a drásavých náznaků, s perspektivou dalších příběhů, které ještě bude třeba dovyprávět.“

Ale zatímco já jsem klidně nechával libovolně končící úvahy takřikajíc vlát ve větru, řada fyziků nebyla ochotna jen tak odpocívat na vavřínech. Neuspokojovala je teorie, kterou nešlo pochopit, ačkoli fungovala. A tak se i po roce 1984, kdy jsem si naposled udělal přehled o situaci, dál činorodě pokoušeli rozluštit kvantové záhady. Podařilo se jim při tom docílit, že některé z těchto záhad teď vypadají ještě záhadněji, jakož i odhalit nové zřetele podivností kvantového světa. Rozvinuli taková vysvětlení kvantových záhad, která se vnějšímu pozorovateli jeví jako stále bizarnější řešení, na jejichž zrodu se jaksi podepsalo zoufalství. Během několika posledních let však přišli také s takovými vysvětleními kvantových záhad, jež by dnes mohla, po více než šedesáti letech pokusů, poskytnout opravdový průnik do podstaty toho, co se děje – pochopení postižitelné nejen odborníky, nýbrž kýmkoli, kdo se zajímá o podstatu skutečnosti.

Toto nové pochopení spočívá nejen ve vhodné interpretaci kvantové teorie, nýbrž i ve vysvětlení chování světla v rámci teorie relativity, kterou vytvořil Albert Einstein. V této knize vás provedu příběhy obou teorií až do současnosti a ukážu vám, že nejlepší vysvětlení způsobu, jakým funguje vesmír, rozřešení všech tajemství kvant, vyžaduje, abychom kvantové představy sloučili s představami teorie relativity.

Nenajdete zde mnoho historického pozadí vývoje kvantové teorie; o něm jsem už dostatečně podrobně pojednal ve zmíněné své dřívější knize na toto téma. Začnu s kvantovou teorií jako se zavedenou úspěšnou oblastí fyziky, načež proberu některé nové záhady a některé nové způsoby pohledu na záhady staré, abych

nakonec prozradil, jak by šlo tyto hádanky vysvětlit. *Najdete zde* však všechno, co potřebujete vědět, abyste pochopili, o čem vůbec kvantová debata je, ať už jste si předtím o tom něco přečetli (třeba jen mé vlastní knihy), nebo nikoli. Dočtete se o tak zdánlivě paradoxních jevech, jako jsou fotony (částice světla), které mohou být na dvou místech najednou, o tom, jak se pro částice pohybující se rychlostí světla zastaví čas, a také o zcela vážně míněném poukazu na to, že kvantová teorie může nabízet způsob, jak dosáhnout teleportace po způsobu Star Treku.

Abych však vhodně navodil situaci na scéně, začnu víceméně tam, kde skončila kniha *Pátrání po Schrödingerově kočce*, totiž samotnou slavnou kočkou, a důkazem, který získal John Bell. Ten zjistil, že jakmile jsou jednou kvantové objekty součástmi jednoho systému, zůstávají propojeny, nějak o sobě vzájemně „vědí“, a to i když se nacházejí daleko od sebe. Einstein to nazval „strašidelným působením na dálku“; serióznějším označením pak je „nelokálnost“. Tyto pojmy mohou být pro vás zcela nové, klidně jste se však už s nimi mohli setkat. „Paradox“ Schrödingerovy kočky, současně živé i mrtvé, se totiž v posledních deseti letech stal téměř jakýmsi klišé. Chvilí však přece jen počkejte. I když si myslíte, že víte, o čem to všechno je, buďte připraveni zamyslet se nad tím znovu. Zatím jste ještě *nic* neviděli. Mám v zásobě větší a lepší paradoxy, podložené nezpochybnitelnými experimentálními testy, jimiž vás ohromím. Všechny však lze stručně shrnout do jedné věci. Jak *může* kupříkladu elektron v experimentu se dvěma otvory postupovat oběma cestami najednou? Jak v jediném časovém okamžiku „zná“ uspořádání celého experimentu?

Naprostou podivnost kvantového světa, problém, který máme řešit, lze nejjasněji pochopit tak, když nejprve budeme sledovat dobrodružství potomstva naší původní kočky – koťat z titulu této knihy. Nato se budeme muset znovu zamyslet nad tím, co vlastně víme o podstatě samotného světla, jevu, který je klíčovou složkou jak kvantové teorie, tak teorie relativity. A poté už ve svém výkladu dosáhnu bodu, odkud vás budu moct nasměrovat k novým představám, jež vysvětlují podstatu skutečnosti a řeší kvantová tajemství – *všechna* kvantová tajemství. Poprvé od doby, kdy se v polovině 20. let objevila kvantová teorie, lze s jistou spolehlivostí říct, co kvantová teorie vlastně *znamená*. A pokud toto není dostatečně dobrý důvod k napsání této knihy, pak nevím, co jiného by jí mohlo být!

John Gribbin, duben 1994

PROLOG

ZÁKLADNÍ PROBLÉM

Zhuštěným vyjádřením ústřední záhady kvantové teorie je experiment se dvěma otvory. A neříkám to jenom já: Richard Feynman, největší fyzik své generace, právě toto prohlásil na první stránce první kapitoly toho svazku svých slavných *Lectures on Physics* (Feynmanovy přednášky o fyzice), který byl věnován kvantové mechanice. Po zdůraznění kontrastu mezi kvantovou fyzikou a klasickými představami Isaaka Newtona, jakož i dalších vědců, kteří kráčeli v jeho šlépějích, Feynman uvedl, že tento jev „nelze, *absolutně* nelze vysvětlit jakýmkoli klasickým způsobem. Představuje jádro kvantové mechaniky. Ve skutečnosti obsahuje *jedinou* záhadu“. V jiné své knize, *The Character of Physical Law* (O povaze fyzikálních zákonů), napsal: „Ukazuje se, že kteroukoli jinou situaci v kvantové mechanice lze vždy vysvětlit tím, že řeknete: „Pamatujete si na případ experimentu se dvěma otvory? Je to tatáž věc.“¹ A tak, podobně jako Feynman, začnu experimentem se dvěma otvory, čímž odhaluji hned na startu ústřední záhadu v celé její slávě. Samotný experiment přitom člověku může připadat známý, ale toto je jeden z těch případů, kdy se ze sebeintimnější známosti nikdy nemůže zrodit nuda či opovržení. Čím více toho totiž o experimentu se dvěma otvory víte, tím záhadnějším se jeví.

Pokud jste se s tímto experimentem setkali ve školní laboratoři, pravděpodobně se vám vůbec nezdál záhadný. Je to proto, že se nikdo neobtěžoval (nebo neodvážil) vysvětlit vám jeho záhady. Téměř určitě vás místo toho všechny učili, že chování světla, procházejícího dvěma úzkými štěrbinami v desce a vytvářejícího vzorec světlých a tmavých pásů na stínítku, je prostě vcelku úhledným důkazem faktu, že světlo se šíří jako vlna.

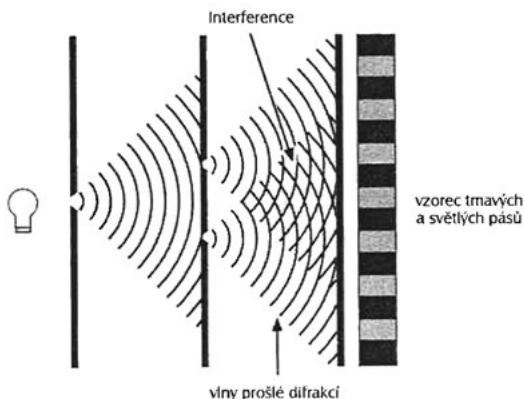
Tak jak je to podáno, je to pravda. Zdaleka to však není celá pravda.

FANTASTICKÉ SVĚTLO

Klasický příklad vlny spatříte na hladině klidného rybníka, když vhodíte do vody jeden oblázek. Vznikne série zčeření, jež se pohybují v kruhu směrem od bodu dopadu oblázku. Pokud podobné vlny dorazí k překážce, ve které jsou pouze dva otvory, z nichž každý je mnohem menší, než je vlnová délka zčeření, pak se vlny za překážkou budou dále šířit ve dvou polokruzích, z nichž každý má střed v jednom z oněch dvou otvorů. Vzorec, který vytvářejí, se podobá polovině vzorce zčeření, který byste dostali, kdybyste do klidného rybníka najednou vhodili oblázky dva.

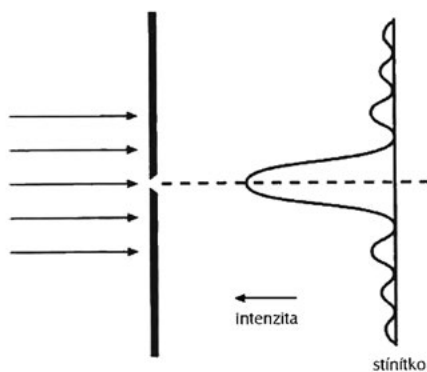
O jaký druh vzorce se jedná, to ví každý. Vhodte do rybníka dva oblázky a ve skutečnosti neuvidíte dva kruhové soubory zčeření, jež se navzájem prostupují, nýbrž složitější vzorec způsobený vzájemnou interferencí dvou kruhových vzorců. Na některých místech se dva soubory zčeření sčítají, aby vytvořily mimořádně velká zčeření; na jiných se naopak vzájemně ruší, zanechávající ve vodě jen malé, nebo vůbec žádné stopy vlnového pohybu.

Když skrze dva otvory v desce svítí světlo, aby vytvořilo vzorec na stínítku na druhé straně, děje se přesně totéž. Má-li se tento úkaz projevít nejjasněji, nejlepší je použít pouze jednu čistou barvu světla, která odpovídá jedné konkrétní vlnové délce. Dva soubory světelných vln se šíří ze dvou otvorů jako vlny na rybníce, a když světlo dorazí na stínítko, ukáže se na něm vzorec světlých a tmavých pásů (interferenčních proužků), jež odpovídají místům, kde se vlny sčítají (konstruktivní interference), a místům, kde se vlny vzájemně ruší (destruktivní interference). Všechno je to jednoduchá, přímočará školská věda, z níž lze celkem snadno odvodit vlnovou délku světla, nikoli pouze fakt, že světlo je vlna, a to změřením vzdálenosti, v níž od sebe leží jednotlivé interferenční proužky.



Obr. 1: Rovnoměrné světlo z prvního otvoru vytváří vlny, jež vystupují ve fázi z každého z otvorů ve druhém stínítku. Následně spolu interferují a na zobrazovacím stínítku vytvářejí význačný vzorec světla a stínu – přesvědčivý důkaz, že světlo se šíří jako vlna.

Ale dokonce už na této úrovni se projevují jisté rafinované záludnosti. Vzorec, který dostanete na stínítku, *není* vzorcem, který byste dostali, kdybyste světlo nechali projít nejprve jedním a poté druhým otvorem a pak sečetli jas dvou skvrn, které vrhlo na stínítko. Právě to je jedním z klíčových znaků interference. Při jednom otevřeném otvoru byste dostali skvrnu světla na stínítku hned za tímto otvorem, kdyby byl otevřený pouze druhý otvor, pak zase druhou skvrnu za ním. Sečtením obou skvrn by pak prostě vznikla větší světelná skvrna. Interference však obnáší fakt, že když světlo prochází oběma otvory souběžně, vzorec na stínítku je složitější. V neposlední řadě proto, že zjevně nejjasnější část vzorce má podobu skvrny ležící na stínítku v půli cesty mezi dvěma jasnými skvrnami, jež byste dostali, kdyby byly oba otvory otevřeny postupně po jednom, přesně tam, kde byste asi očekávali, že bude naopak tmavý stín.

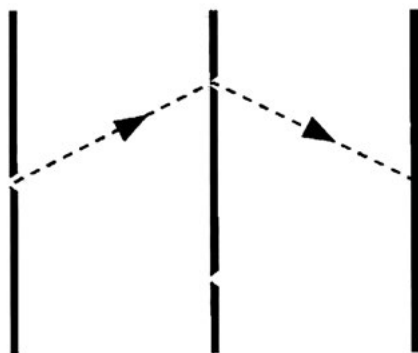


Obr. 2: Elektronový paprsek procházející jedním otvorem produkuje rozložení, při němž většina elektronů leží v jedné linii s otvorem. Právě tak by se měl chovat paprsek částic.

Potud je to všechno v pořádku. Světlo je vlna. Naneštěstí pro tento jednoduchý obraz věcí však existují rovněž velmi dobré důkazy, že světlo se skládá z částic zvaných fotony. A způsob, jakým skrze dva otvory ve stěně částice procházejí, se velmi liší, podle naší každodenní zkušenosti, od způsobu, jakým skrze otvory ve stěně procházejí vlny.

Předpokládejme, že příslušné dva otvory by byly opravdu otvory ve stěně a vy že byste stáli na jedné její straně s velkou hromadou kamenů. Ty byste po jednom házeli zhruba ve směru stěny, aniž byste přitom nějak zvlášť přesně mířili. Některé kameny by prošly jedním otvorem, některé druhým, a za stěnou by tak vznikly dvě menší hromady kamenů. Tento vzorec (dvě hromady kamenů) by byl přesně týž jako vzorec, který byste dostali, kdybyste na polovinu času zablokovali jeden otvor a na druhou polovinu času zase druhý. Určitě byste nedostali hromadu kamenů ležící uprostřed mezi dvěma otvory, právě za souvislou částí stěny. Částice, které procházejí otvory po jedné, vzájemně *neinterferují*.

Samozřejmě, pokud otvory souběžně prochází mnoho částic, pak není obtížné představit si, jak by spolu mohly interferovat, narážejíce na sebe, aby na druhé straně vytvořily jiný druh vzorce. Koneckonců, jsme zvyklí na představu, že samotná voda se skládá z částic – z molekul – a že tato okolnost zčeřením na rybníce nikterak nebrání, aby vytvářela náležitě se chovající vlny. Umíme si představit, že stejným způsobem by záplava fotonů z lampy mohla spolupůsobit jako vlna, když tyto fotony procházejí skrze dva otvory. Nicméně když se podíváme, co se děje s *jednotlivými* fotony, jež po jednom procházejí experimentem se dvěma otvory, záhada se jen dále prohlubuje.



Obr. 3: Elektron nebo foton procházející jedním z dvojice otvorů by se měl chovat, jako by procházel jediným otvorem – pokud je nám zde ovšem zdravý rozum vůbec něco platný. Podle zdravého rozumu by přítomnost druhého otvoru neměla mít žádný účinek.

Na tomto místě je důležité, abych zdůraznil, že tento experiment byl skutečně proveden, a to týmem pracujícím v Paříži v polovině 80. let. Jeho členové v konečném důsledku sledovali jednotlivé fotony, jež procházely experimentem se dvěma otvory a vzájemně interferovaly. Když jsem psal své *Pátrání po Schrödingrově kočce*, důkazy o chování světla za těchto okolností byly velmi silné, ale upřímně řečeno, stále ještě nebyly nezvratné. Nyní již víme, co se děje, když prochází experimentem jednotlivý foton, a to mimo jakýkoli náznak pochybností.

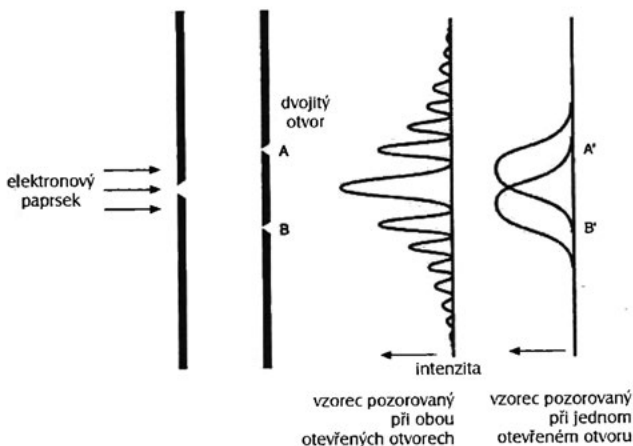
Všechno, co ve skutečnosti vidíme, je ovšem vzorec, jež na stínítku vytvořilo světlo po průchodu dvěma otvory. Představte si, že světelný zdroj je natolik zeslaben, že v jednom okamžiku z něj vystupuje pouze jediný foton, který pak prochází experimentem (právě toho

již dnes fyzikové umějí docílit, přestože příslušný trik vyžaduje velkou dovednost a sofistikovanou aparaturu). Dál si představte, že roli stínítka na druhé straně dvou otvorů hraje fotografická deska, na niž se příchod každého fotonu zaznamená v podobě bílé tečky. Jak jednotlivé fotony procházejí aparaturou, v každém případě vidíte přesně to, co byste očekávali – jeden foton opouští světelný zdroj, načež na fotografické desce vytvoří jednu bílou tečku. Ale když experimentem projdou první stovky, pak tisíce a pak miliony fotonů, naskytne se vám fantastický pohled. Jednotlivé bílé tečky se na fotografické emulzi shromáždí přesně do jasných pásů typického vlnového interferenčního vzorce, mezi nimiž zůstanou tmavé pásy.

Přestože se každý foton vydává na cestu jako částice, a jako částice dopadá i na desku, celé to vypadá, jako kdyby prošel oběma otvory najednou, interferoval se sebou samým a jaksi „usoudil“, kam se má na emulzi umístit, aby svým skromným dílem přispěl k úhrnnému interferenčnímu vzorci. Toto chování obnáší dvě záhady. Za první, jak může jednotlivý foton projít oběma otvory najednou? Za druhé, když už tento trik zvládne, jak potom „ví“, na které místo úhrnného vzorce se má zařadit? Proč každý foton nepostupuje po téže dráze a na druhé straně prostě neskončí na stejném místě?

Možná je to záhadné celé, ale teď byste mohli konkrétně tvrdit, že na světle je něco divného. A opravdu je. Světlo (lépe řečeno, elektromagnetické záření) se totiž šíří vždy stejnou rychlostí, rychlostí světla (označovanou c). Jakkoli se pohybujete, a jakkoli se pohybuje světelný zdroj, když změříte rychlost světla, vždycky dostanete stejný výsledek. To má hluboké důsledky, jak uvidíme, až začnu probírat teorii relativity, a rozhodně se to nepodobá cho-

vání čehokoli jiného ve světě naší každodenní zkušenosti. Fotony navíc nemají žádnou klidovou hmotnost, což je další podivná a zdravému rozumu odporující vlastnost. Není snad podivné chování fotonů procházejících experimentem se dvěma otvory způsobeno faktem, že nemají klidovou hmotnost a šíří se rychlostí světla? Nebo je to snad jen další podivná vlastnost světla, kterou je třeba přidat k seznamu? Jak to vyjádřil Ralph Baierlein: „Světlo se šíří jako vlna, ale odchází a přichází jako částice.“ Není to nakonec jenom jedna z „oněch věcí“, zvláštní vlastnost světla?



Obr. 4: Jak elektrony, tak fotony se však chovají, jako by o přítomnosti druhého otvoru věděly. Vzorec, který spatřujeme při obou otevřených otvorech, není stejný jako ten, který byste obdrželi sečtením vzorců, jež získáte při otvorech otevřených jednotlivě. Znamená to, že elektrony jsou ve skutečnosti vlnami?

Naneštěstí tomu tak není. Přesně tentýž trik totiž můžete udělat s elektrony – které, i když nejsou přesně tím druhem částic,

s nimiž jsme v našich každodenních životech zvyklí jednotlivě zacházet, mají nejen hmotnost, nýbrž i elektrický náboj, a jsou tak slušné, že se v závislosti na konkrétních okolnostech pohybují různými rychlostmi. Přesto se elektrony rovněž šíří jako vlny, ale odcházejí a přicházejí jako částice. A to se už pouští z hlavy, jako pouhá jedna z „oněch věcí“, mnohem obtížněji.

ELEKTRONOVÁ INTERFERENCE

Elektrony jsou významnými příslušníky světa částic. Jejich částicovou totožnost jako první odhalil J. J. Thomson v roce 1897, který pracoval v Cavendishově laboratoři v Cambridgi. Thomson ukázal, že elektrony jsou kousky hmoty, jež nějak unikly, nebo byly odlomeny, z atomů – byl to vůbec první důkaz, že atomy nejsou nedělitelné. Každý elektron má přesně tutéž hmotnost (něco přes 9×10^{-34} kg, což představuje „desetinnou čárku“, po níž následuje 30 nul a 9“ kg). Každý elektron má tentýž elektrický náboj ($1,6 \times 10^{-19}$ coulombu). Lze s nimi manipulovat pomocí elektrických a magnetických polí a pohybují se rychleji nebo pomaleji, podle toho, jak jsou „postrkovány a potahovány“ v prostředí. V řadě ohledů se elektrony chovají jako drobné, elektricky nabitě kulky.

Přesto již v druhé polovině 20. let, pouhých třicet let po jejich objevu, bylo jasné, že elektrony se chovají rovněž jako vlny. Jedním z těch, kteří to v roce 1927 dokázali, byl George Thomson, syn J. J. Thomsona. Podvojná podstata elektronů, jejich takzvaná vlnově-částicová dualita, byla dobře doložena dlouho před po-

lovinou 80. let. Skutečný experiment se dvěma otvory za použití elektronů však provedl tým japonských vědců teprve v roce 1987.

Než k tomu došlo, učebnice (včetně Feynmanovy) a populární výklady (včetně mého) popisovaly takové experimenty teoreticky, přičemž s velkou sebedůvěrou ujišťovaly čtenáře, že i když se jedná o pouhé „myšlenkové experimenty“, na základě všeho, co je o elektronech známo, lze říct, jak by se chovaly, kdyby byly konfrontovány se dvěma drobnými otvory ve stěně. Nicméně uplynulo už plných devadesát let od odhalení elektronů jako částic, a šedesát let od jejich odhalení jako vln, než tým z výzkumných laboratoří firmy Hitachi a Gakušujnské univerzity v Tokiu opravdu provedl trik se dvěma otvory i v případě elektronů.

„Dva otvory“ se v tomto experimentu podařilo vytvořit pomocí přístroje známého jako elektronová biprizma, a roli stínítka, na které elektrony dorazily na druhé straně, sehrála televizní obrazovka, na níž příchod každého elektronu vytvořil přetrvávající skvrnku světla. Po sobě následující elektrony tak na obrazovce postupně vykreslovaly vzorec.

Výsledky experimentu byly přesně tytéž jako výsledky získané ekvivalentním experimentem s fotony. Zdrojem elektronů byla koncová část elektronového mikroskopu, standardního laboratorního vybavení, jehož funkce byla dobře známa. Elektrony vystupovaly z ústí elektronového „děla“ jako částice a jako částice také na stínítko na druhé straně dorazily, přičemž každý vytvořil jednu skvrnku světla. Ale vzorec, který vykreslily na stínítku, byl interferenční vzorec, což dokazovalo, že elektrony prošly oběma otvory jako vlny.

V souvislosti s tímto podivným chováním elektronů byste do mě mohli šfoulat a chytat mě za slůvka. Koneckonců, jednotlivý elektron nemůžete podržet v ruce. Elektron nikdy nikdo neviděl, pouze skvrnky, jež vytváří, když narazí na vhodně citlivá stínítka. A z každodenní zkušenosti víme, že tyto bizarní interferenční jevy se nevyskytují, jestliže skrze otvory házíme kameny. Ani kameny, ani baseballové míčky, ani nic jiného ve světě každodenní zkušenosti tuto podivnou vlnově-částicovou dualitu nevyskazuje.

Nicméně fyziky to nepřivádí do rozpaků. Chcete-li důkaz, že částice dost velké na to, aby je šlo spatřit, se při průchodu experimentem se dvěma otvory rovněž chovají jako vlny, pak vám ho mohou poskytnout.

Částice, o něž se zde jedná, jsou atomy. Souhlasím, atomy stále ještě nemůžete spatřit prostým okem, a ani nemůžete držet jednotlivý atom na dlani. Jednotlivé atomy, zachycené v magnetických polích, však už je nyní možné vyfotografovat. Tento úspěch (popsal ho kupříkladu Hans von Baeyer ve své knize *Taming the Atom* [Zkrocení atomu]) je vskutku pozoruhodný, poněvadž pojem atomů vědci plně přijali až na začátku 20. století. Vždyť ještě Albert Einstein získal svůj doktorský titul za práci, jež mimo jiné ustanovovala skutečnost existence atomů. Přestože jsou atomy mnohem větší než elektrony, podle standardů každodenního života jsou stále nepatrné. Kupříkladu atom uhlíku má hmotnost pouze něco pod 2×10^{-26} kg, což představuje dvaadvacetmilionkrát víc, než je hmotnost elektronu. Atom měří přibližně jednu desetimiliontinu milimetru, což znamená, že k tomu, aby se pře-

klenula vzdálenost mezi dvěma zoubky na lemu poštovní známky, by bylo třeba deseti milionů atomů. Přesto se jednotlivé atomy podařilo vyfotografovat a jejich „podobu“ lze dokonce spatřit na televizních obrazovkách v „reálném čase“.

Experiment se dvěma otvory za použití celých atomů byl poprvé proveden až na začátku 90. let. Vědecký tým na Kostnické univerzitě v Německu při tom použil atomy helia, jež procházely štěrbinami širokými 1 mikrometr (jedna miliontina metru) ve zlaté fólii, za níž byl umístěn detektor. Tentokrát nešlo vykreslování interferenčního vzorce zobrazit přímo na televizní obrazovce, ale měření počtu heliových atomů, jež dorazily do různých míst „stínítka“ detektoru, ukázala nyní již povědomý interferenční vzorec. Rovněž celé atomy se tedy šíří jako vlny, ale přicházejí jako částice.

Vzápětí nato oznámilo výsledky podobných experimentů několik dalších skupin badatelů. Jedna z nich, na MIT, použila paprsek atomů sodíku. Výsledky všech těchto experimentů jsou stejné. Jednotlivý atom, který prochází experimentem se dvěma otvory, putuje najednou oběma cestami a interferuje se sebou samým. Vypadá to tak, že atom opravdu může být ve stejném okamžiku na dvou místech (v obou otvorech).

V roce 1993 došlo v této oblasti k (prozatím) poslednímu významnému obratu. Badatelé z Národního ústavu pro standardy a technologii Spojených států v Boulderu ve státě Colorado, a z Texaské univerzity oznámili, že tento typ experimentu se jim podařilo jaksi převrátit vzhůru nohama. Místo aby vyslali atomy experimentem se dvěma otvory, naopak zachytili páry atomů v magnetickém poli a tyto atomy v konečném důsledku použi-

li jako „otvory“, od nichž odráželi světlo a poté měřili vytvořené interferenční vzorce. Vlny, které se odrážejí od atomů, se šíří ve značné míře stejným způsobem jako vlny, které se šíří z otvorů v experimentu se dvěma otvory. Tento nový experiment ovšem funguje jenom proto, že atomy jsou částice, jež lze polapit magnetickými poli, aby pak na nich docházelo k rozptylu světla. Neexistuje žádný výstižnější příklad vlnově-částicové duality než tato kombinace experimentů zahrnujících atomy – částice dost velké na to, aby je šlo vyfotografovat (jen si vzpomeňte), a interferenci.

Protože v případě kamenů nebo baseballových míčků či čehokoli jiného, s čím můžeme ručně manipulovat, dotknout se toho a spatřit to na vlastní oči, se tyto podivné úkazy neprojevují, musí existovat nějaká úroveň, hranice, na níž pravidla kvantového světa přestávají platit. Někde v měřítku velikostí mezi atomem a lidskou bytostí kvantová pravidla vystupují ze hry, aby do ní vstoupila pravidla klasické fyziky. Kde přesně se tato úroveň nalézá a proč k této změně pravidel dochází, to jsou témata, kterým se v knize budu věnovat později. Příslušné odpovědi se dotýkají vlastního jádra našeho pojmu skutečnosti.

Pro tuto chvíli je však tím, co je třeba znovu a znovu zdůrazňovat, samotný fakt, že experimenty tohoto typu už byly provedeny. Jejich výsledky ovšem pro fyziky neznamenalý žádné překvapení. Po roce 1930 mohl kterýkoli věci znalý fyzik na základě pravidel kvantové teorie předpovědět, jak tyto experimenty dopadnou. *Mohly* však dopadnout jinak – kvantová teorie *mohla* být nesprávná. Ukázalo se však, že je správná. Když byly koncem 80. a začátkem 90. let provedeny klíčové experimenty, jež se týkaly dějů přímo

na nejhlubší úrovni, v samém jádru záhady, získané „odpovědi“ přesně odpovídaly hlavním předpokladům kvantové fyziky.

Takže: Jak vlastně kvantová fyzika toto podivné chování částic vysvětluje?

STANDARDNÍ HLEDISKO

Standardní interpretace dějů v kvantovém světě je označována jako kodaňská interpretace. O její rozvinutí se totiž ve značné míře zasloužil dánský fyzik Niels Bohr, který pracoval právě v Kodani. K souboru myšlenek, který se posléze stal kodaňskou interpretací, významně přispěli i další vědci, zejména Němci Werner Heisenberg a Max Born, ale Bohr byl vždy jejím nejhorlivějším zastáncem. Tento soubor byl v zásadě úplný v roce 1930, takže jeho dnešní stáří odpovídá době kratší, než je délka jednoho lidského života. Od té doby z kodaňské interpretace vycházela víceméně veškerá praktická práce týkající se kvantového světa. Právě ona je příběhem, jenž je vyprávěn nadějným fyzikům na univerzitě či v koleji. Přesto spočívá na některých vcelku bizarních pojmech.

Z těchto pojmů je klíčový takzvaný „kolaps vlnové funkce“. Když Bohr a jeho kolegové hledali vysvětlení, jak by se objekt, jako je foton nebo elektron, mohl „šířit jako vlna, ale přicházet jako částice“, prohlásili, že to je samotný akt pozorování vlny, který způsobuje její „kolaps“, takže se stává částicí. V akci to můžeme vidět v elektronové verzi experimentu se dvěma otvory – elektron prochází experimentem jako vlna, načež „zkolabuje“ do podoby jednoho bodu na stínítku detektoru.

To je ale jenom jedna část celého příběhu. Jak může vlna jednotlivého elektronu interferovat sama se sebou, a podle čeho si vybírá, do kterého bodu na stínítku zkolabuje? Podle kodaňské interpretace je to tak, že experimentem ve skutečnosti neprochází žádná skutečná vlna, ale jen vlna pravděpodobnosti. Rovnice, jež popisuje, jak se pohybuje kvantová vlna – vlnová rovnice odvozená Rakušanem Erwinem Schrödingerem –, nepopisuje materiální vlnu, jaká zčeří hladinu rybníka, nýbrž pravděpodobnost, že se foton (nebo elektron nebo cokoli jiného) bude nalézat na konkrétním místě.

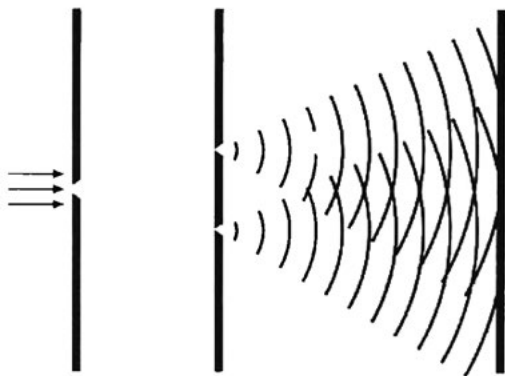
Podle tohoto obrazu, vybudovaného převážně na Bornových výsledcích, elektron, který není pozorován, v podobě částice vlastně vůbec neexistuje. Je určitá pravděpodobnost, že byste mohli najít elektron zde, a jiná pravděpodobnost, že byste ho mohli najít tamhle, v principu by se však mohl objevit kdekoli ve vesmíru. Některé jeho polohy jsou velmi pravděpodobné – ve světlých prouzcích experimentu se dvěma otvory –, zatímco jiné vysoce nepravděpodobné – v tmavých prouzcích. Ve skutečnosti je ale *možné*, ač vysoce nepravděpodobné, že se daný elektron objeví na Marsu nebo v televizoru vašeho souseda, a vůbec ne v příslušném interferenčním vzorci.

Jakmile je však elektron pozorován, šance se mění. Vlnová funkce zkolabuje (možná na Marsu, pokud se tam také někdo dívá, nebo, což je pravděpodobnější, v interferenčním vzorci), a v tomto okamžiku je už na sto procent jisté, kde se elektron nalézá. Nicméně v okamžiku, kdy se přestanete dívat, pravděpodobnost začne z daného místa kamsi odplouvat. Pravděpodobnost,

že elektron najdete na téměř místě, kam jste se dívali posledně, klesá, a šířením příslušné vlny pravděpodobnosti vesmírem roste pravděpodobnost, že ho najdete někde úplně jinde.

Přes veškerou svou podivnost je tato koncepce v praxi nadmíru užitečná, protože ve všech praktických aplikacích, jako je výroba televizorů a počítačových čipů, máme co dělat s obrovským množstvím elektronů. Pokud se všechny řídí striktními pravidly pravděpodobnosti a statistiky, znamená to, že chování převážné části těchto elektronů je předpověditelné. Pakliže víme, že 30 procent elektronů se bude v počítačovém obvodu pohybovat po jedné cestě, zatímco 70 procent jich půjde druhou, nemusíme se zatěžovat tím, kterou cestou se vydá jednotlivý elektron. Stejně tak majitelé kasina dobře vědí, že pravidla pravděpodobnosti jim dlouhodobě zaručují zisk, i když se občas stane, že ten či onen hráč dosáhne v ruletě velké výhry. Alberta Einsteina však celá tato představa natolik znechucovala, že ji komentoval svým slavným výrokem: „Nemohu uvěřit, že Bůh hraje s vesmírem v kostky.“ Její důsledky se ukážou v plné nahotě, když přejdeme k experimentům zahrnujícím jednotlivé elektrony nebo jednotlivé fotony.

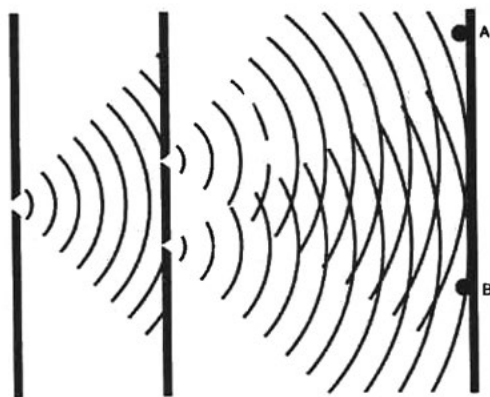
Jedna část této holé pravdy nám bude zřejmá, když se nad celým problémem opětovně zamyslíme v kontextu experimentu se dvěma otvory. Tato verze experimentu sice dosud nebyla provedena s jednotlivými elektrony, ale experimenty, jež jsou jen o něco složitější, potvrdily očekávaný způsob chování elektronů, a není pochyb, že kdybyste provedli experiment v čisté formě, výsledek by byl tentýž.



Obr. 5: Standardním vysvětlením záhady předkládané na obr. 4 je, že každým z otvorů procházejí „vlny pravděpodobnosti“, které rozhodují, kde každá částice z paprsku skončí. Vlny pravděpodobnosti interferují přesně tak, jako to dělají vodní vlny.

Za prvé, vzpomeňte si, co se stane s interferenčním vzorcem (vytvořeným buď světlem, nebo elektrony) v případě uzavření jednoho otvoru. Vzorec zmizí. Samozřejmě, když je otevřen pouze jeden otvor, pak mají-li se vůbec elektrony dostat na stínítko detektoru, musejí procházet právě a pouze jím. Jestliže ale elektrony považujete jednoduše za částice, už to je samo o sobě dost podivné. Jak elektron procházející jedním otvorem „ví“, zda je druhý otvor otevřen či nikoli? Jednoduchá částice procházející jedním otvorem v experimentu se dvěma otvory by ani nevěděla, ani by se nestarala, zda je druhý otvor otevřen nebo ne. Pokud však experiment uspořádáte tak, že druhý otvor je v okamžiku, kdy každý jednotlivý elektron opouští „dělo“, uzavřen (nebo otevřen), nicméně vzápětí je otevřen (nebo uzavřen) ještě dřív,

než se tento elektron dostane k prvnímu otvoru, pak si elektron „zvolí“ takovou vhodnou dráhu k cílovému stínítku, aby vytvořil ten správný druh celkového vzorce. Experiment můžete dokonce uspořádat tak, že druhý otvor budete otevírat a uzavírat náhodně. Každý jednotlivý elektron si v jednom otvoru zvolí dráhu, která závisí na tom, zda je druhý otvor *ve stejném čase* otevřen či nikoli.



Obr. 6: Když se však díváme po částicích, nalézáme částice (v tomto příkl. A a B)! Vlny pravděpodobnosti rozhodují o tom, kde jsou částice, vlny však nepozorujeme nikdy. Ve skutečnosti ani nevíme, co se vlastně aparaturou šíří. Toto podivné chování vedlo ke zrodu bonmotu, že elektron (nebo foton) „se šíří jako vlna, ale přichází jako částice“.

Zdá se, že elektrony vnímají větší část světa než jen bezprostřední místo, kde se nacházejí. Jsou si vědomy podmínek nejen v jednom otvoru, nýbrž v celém experimentu. Tato nelokálnost představuje základní součást kvantové mechaniky a Einsteina hluboce znepokojovala; právě ona byla podnětem k jeho pou-

kazu na „strašidelné působení na dálku“, ač při této konkrétní poznámce měl na mysli jistý ještě podivnější projev nelokálnosti, k němuž se dostanu za chvíli.

Dosud však všechny důkazy poskytlo prostě pozorování vzorce vytvořeného na stínítku detektoru, když experimentátor zkouší různé kombinace otevřených a uzavřených otvorů. Proč se tedy nepodívat a nezjistit, co se děje v samotných otvorech? Představte si, že u každého z obou otvorů v experimentu je umístěn detektor, načež budou skrze otvory po jednom vysílány elektrony. Nyní se můžete podívat, zda elektron prochází oběma otvory najednou jako vlna, nebo zda prochází pouze jedním z otvorů (nebo, když už chceme být opravdu důslední, zda náhodou neprochází každým otvorem jeden „půlektron“). A můžete rovněž trvale poočku sledovat stínítko koncového detektoru, abyste viděli, jaký druh vzorce se na něm vykresluje – poté, co už experimentem prošlo mnoho elektronů. V takové situaci zjistíte, že každý elektron je vždy pozorován jako částice, jež prochází *bud'* jedním, *nebo* druhým otvorem. Chová se jako malá kulka. A ejhle! Interferenční vzorec mizí. Vzorec na stínítku se místo toho stává vzorcem, jaký vytvářejí malé kulky nezávisle procházející skrze ten či onen otvor (nebo kameny házené skrze dva otvory ve stěně). Akt pozorování elektronové vlny způsobuje její kolaps, takže se v klíčovém okamžiku, kdy prochází otvorem, chová jako částice. Nepředstavujte si však, že tímto jsme se záhadě nelokálnosti vyhnuli. Ve skutečnosti stačí, abychom se podívali pouze na jeden ze dvou otvorů, a vzorec se hned změní. Pokud to uděláme, vidíme pouze kulkám podobné elektrony, jak procházejí skrze otvor,

a na stínítku spatřujeme vzorec příhodný pro částice. Elektrony procházející druhým otvorem nějak „vědí“, že se díváme na první otvor, a následkem toho se rovněž chovají jako částice.

Přitom se v příběhu stále uplatňuje pravděpodobnostní zřetel kodaňské interpretace. Za předpokladu, že uspořádání experimentu je úplně symetrické, zjistíte, že po každé ze dvou možných cest postupovala přesně polovina elektronů. 50 procent prochází jedním otvorem, 50 procent druhým. Neexistuje žádný způsob, jak byste mohli předpovědět, kterým otvorem jednotlivý elektron projde, a proto ani to, do kterého „cákance“ na stínítku detektoru dorazí. Podobně jako když házíte mincí a padne vám série hlav, na základě pouhé náhody může jedním otvorem po sobě projít několik elektronů. Ale poté, co oběma otvory prošel milion elektronů, jež při tom byly pozorovány, půl milionu jich bude vjednom „cákanci“ na stínítku a půl milionu ve druhém. Pravděpodobnostní vlna stále koná svou práci, i když pozorujete elektrony a víte, že se chovají jako částice.

Bohr tvrdil, že to, na čem vlastně záleží, není chování jednoho elektronu, ba ani chování milionu elektronů. Záleží na uspořádání celého experimentu, včetně elektronů, dvou otvorů, stínítka detektoru a lidského pozorovatele. Nelze říct, že elektron „je“ vlna, nebo že „je“ částice. Všechno, co lze říct, je, že pokud je experiment uspořádán určitým způsobem, a jsou provedena určitá měření, spatříte určité výsledky. Uspořádejte experiment tak, aby jeho cílem bylo měření vln, a dostanete interferenční vzorec; uspořádejte experiment tak, aby jeho cílem bylo monitorování částic, jež procházejí otvory, a spatříte částice procházející otvo-

ry. S rozhodnutím, zda máte či nemáte zapnout detektory u obou otvorů a dívat se po částicích, můžete dokonce počkat, až elektrony opustí „dělo“ – konečný výsledek (vzorec na stínítku) bude v každém případě záviset na celkovém uspořádání experimentu. A tento holistický pohled na kvantový svět nás zavádí do velmi hlubokých filozofických vod.

HLUBOKÉ VODY

Kodaňská interpretace zaujímala v kvantové fyzice vládnoucí postavení po víc než půl století, od roku 1930 až daleko do 80. let. Během celé této doby proti ní drtivá většina fyziků v zásadě nevystupovala. O hluboké filozofické záhady, jež s kodaňskou interpretací souvisejí, se nestarali – ve skutečnosti se o ně většina fyziků nestará ani nyní –, ovšem za předpokladu, že jí lze užít jako praktického nástroje k předpovědi výsledku experimentů. V posledních letech se však mezi fyziky ohledně toho, co vlastně kvantová teorie „znamená“, přece jen rozšířil pocit jakési stísněnosti. Rada lidí proto začala vyvíjet stále intenzivnější snahy o nalezení alternativních interpretací.

Hlavní problém představuje ona záležitost s kolapsem vlnové funkce. Je to sice všechno velmi hezké, když nám Bohr říká, že je třeba vzít v úvahu celý experiment a že způsob, jakým vlny zkolabují, bude záviset pouze na celkovém uspořádání experimentu, ale nic takového, jako je čistý, samonosný experiment, neexistuje. Tato interpretace kvantové mechaniky nám říká, že objekty jako elektrony jsou skutečné jenom do té míry, v jaké jsou pozorovány

– že měřicí aparatura je v jistém smyslu „skutečnější“ než fotony a elektrony a všechno ostatní. To není jenom moje interpretace kodaňské interpretace, právě to výslovně stanovili Bohr a Heisenberg se svými kolegy. Heisenberg kupříkladu prohlásil: „Kodaňská interpretace se týká věcí a procesů, jež lze popsat v pojmech klasických představ, to jest skutečna, jako základu jakékoli fyzikální interpretace.“ Jinak řečeno, atomy, z nichž je všechno v klasickém světě utvořeno, jsou o něco méně skutečné než věci, které se z těchto atomů skládají! Nad tím se zarazila řada lidí jako nad vyložené divnou věcí dokonce už ve 30. letech. O to hůře stravitelné je to nyní, když už byly atomy vyfotografovány.

Když se tato linie úvah – kodaňská interpretace – použije v případě experimentu se dvěma otvory, pak z ní plyne, že se na experiment musí někdo podívat, aby ho takříkajíc usadil do jednoho stavu. Dobře to vystihují slova Heinze Pagelse, který byl v době citovaného výroku (1981) prezidentem Newyorské akademie věd a nepochybně rozuměl tomu, o čem vůbec kvantová teorie je: „Objektivní existence elektronu v nějakém bodu prostoru, kupříkladu v jednom ze dvou otvorů, nemá nezávisle na aktuálním pozorování žádný smysl. Zdá se, že elektron začíná existovat jako skutečný objekt teprve tehdy, když ho pozorujeme!“ Experimentátor je však rovněž součástí vnějšího světa, nejen experimentu. Lidé se skládají mimo jiné z elektronů – co kolabuje vlnové funkce *těchto* elektronů, aby je to donutilo chovat se jako lokalizované objekty uvnitř experimentátorova těla? Podle všeho jsou to interakce ve světě mimo pozorovatele. A co dělá v tomto smyslu „skutečným“ svět mimo pozorovatele? Další in-

terakce, s dalšími věcmi (a pozorovateli), ve stále větším a větším měřítku. Vezměte kodaňskou interpretaci doslova, a vyplyne vám z ní, že elektronová vlna kolabuje, aby vytvořila bod na stínítku detektoru, protože se na ni dívá celý vesmír. To je dost podivné už samo o sobě, ale někteří kosmologové (a mezi nimi zejména Stephen Hawking) se znepokojují, že z toho ve skutečnosti nutně plyne existence čehosi „mimo vesmír“, co se dívá na vesmír jako na celek, čímž kolabuje jeho celkovou vlnovou funkci. Alternativní formulací je zde tvrzení Johna Wheelera, že pouze přítomnost vědomých pozorovatelů, v podobě nás samých, kolabuje vlnovou funkci a tím umožňuje existenci vesmíru. Podle tohoto obrazu všechno ve vesmíru existuje jenom proto, že se na to *díváme*. Dále v knize se budu těmito zoufalými řešeními a východisky z nouze zabývat podrobněji, ale už samotný fakt, že takové argumenty seriózně předkládají uznávaní vědci, dostatečně názorně ukazuje, v jak hlubokých vodách se nalézáme.

Další problém se týká vztahu mezi částicovým a vlnovým zřetelem chování kvantového objektu. Bohr oba tyto zřetele popsal jako komplementární vlastnosti, stejně jako jsou komplementární hlava a orel na minci. Položíte-li minci naplocho na stůl, bude nahoře buď hlava, nebo orel, ale nikdy obě strany najednou. V kodaňské interpretaci objekt jako elektron není ani vlnou, ani částicí, nýbrž něčím jiným, čímśi, co nedokážeme popsat běžným jazykem. V závislosti na tom, jaká měření si zvolíme, že na něm budeme provádět, nám však ukáže buď částicovou, nebo vlnovou tvář – podle toho, kterou stranou nahoru se rozhodneme položit kvantovou minci. Ve skutečnosti může mít

i další vlastnosti, jež dosud nedokážeme změřit, a o nichž tudíž nevíme zhola nic.

Tato komplementárnost čili vlnově-částicová dualita souvisí se slavným principem neurčitosti, který objevil Heisenberg. Nejjednodušší verze tohoto principu nám říká, že nelze změřit současně jak polohu, tak hybnost kvantového objektu. Hybnost je jednoduše mírou toho, jak rychle se takový objekt pohybuje a kterým směrem. V řadě ohledů je to vlnová vlastnost – vlny se musejí někam šířit, neboť jinak by to nebyly vlny. Poloha je zase vyhraněně částicovou vlastností – vlna je už ze své podstaty roztažená, zatímco částice se omezuje na jedno místo. Můžeme provést měření, jež nám poslouží k pozorování polohy elektronu, nebo můžeme provést měření, která nám prozradí, kam se pohybuje, a v obou případech můžeme provést tak přesná měření, jak se nám jenom zlíbí. Ale úsilí o velmi přesné změření polohy vždy způsobuje znejasnění hodnoty hybnosti elektronu, a to v rozsahu, který lze vyčíslit, a naopak.

Přitom se nejedná, jak některé učebnice dosud chybně naznačují, čistě o výsledek praktických potíží s prováděním přesných měření. Není to prostě proto, že bychom elektronu při měření jeho polohy uštěďrovali jakýsi kopanec (třeba formou fotonů, které by se od něj odrážely), který mění jeho hybnost. Kvantový objekt *nemá* přesně definovanou hybnost a přesně definovanou polohu. Ani sám elektron svým způsobem „neví“, kde vlastně je nebo kam míří. S trochou nadsázky: Pokud přesně ví, kde je, netuší, kam míří. Když přesně ví, kam míří, nemá sebemenší potuchy o tom, kde vlastně je. Obvykle však kvantový objekt má přibližnou představu jak o tom, kde je, tak o tom, kam míří. Důležitým

slovem je zde ale právě to „přibližnou“. Přestože je to z hlediska diktovaného „zdravým rozumem“, jež vládne v našem každodenním světě, těžko pochopitelné, kvantový objekt nelze připoutat k jednoznačně určenému místu a vždy existuje jistá neurčitost v tom, kam spěje.

Toto je nesmírně důležité kupříkladu v reakcích jaderného slučování. Neboť je to právě kvantová neurčitost, co umožňuje, aby se atomová jádra, jež se podle představ klasické fyziky nenacházejí dost blízko u sebe, při těchto reakcích přece jen překryla a zkombinovala. Jadernými reakcemi tohoto druhu si svou vysokou teplotu udržují i hvězdy. Nebýt kvantové neurčitosti, Slunce by nezářilo způsobem, jakým to činí.

Na tomto místě se musíte vypořádat s obtížnými myšlenkami, nechystám se vás však provádět historií toho, jak byly rozvinuty, nebo vám předkládat důkazy, že právě to je vskutku ten způsob, jakým funguje kvantový svět. Nyní je totiž k dispozici už celá řada dalších knih, včetně mých vlastních, v nichž se můžete s příslušnými podrobnostmi seznámit. V této knize mě víc zajímá to, kde kodaňská interpretace selhává a co by ji mohlo nahradit. Opravdu se však zdá, že na kvantové úrovni je neurčitost jakousi životní realitou. Ve světě každodenní zkušenosti se neurčitost neprojevuje ze stejného důvodu, proč se v něm neprojevuje vlnově-částicová dualita. Rovnice popisující tyto jevy obsahují číslo známé jako Planckova konstanta, pojmenované po kvantovém průkopníku Maxi Planckovi. Ve srovnání s hmotností a hybností objektů ve světě každodenní zkušenosti je Planckova konstanta nepatrná. Má hodnotu pouhých $6,55 \times 10^{-27}$ ergsekund (nestarejte se teď

o jednotky; na tomto místě je důležité jen to, aby hmotnost byla měřena v ekvivalentních jednotkách, gramech). Kvantové jevy převládají pouze u objektů, jež hmotnostně patří „k těžé partě“ jako elektron se svou hmotností $9,1 \times 10^{-31}$ kg, nebo, abychom použili jednotky srovnatelnější s ergsekundami, $9,1 \times 10^{-28}$ g. Jakmile přejdete k hmotnostem, jež značně přesahují hmotnosti atomů, kvantové projevy jsou tak malé, že jejich vliv můžete ignorovat – *vyjma* faktu, že vše, co je větší než atomy, se samo o sobě skládá z atomů.

Teď bychom se měli na chvíli zastavit, abychom získali názornější představu, jak vzdálen je vlastně od naší každodenní zkušenosti kvantový svět. Číslo 10^{-27} znamená jednu miliardtinu miliardtiny miliardtiny. Pokud by tedy měl nějaký objekt průměr 10^{-27} centimetrů, bylo by třeba miliardu miliard miliard takových objektů, aby překlenuly vzdálenost jednoho centimetru. Takže: Jak velkou vzdálenost bychom překlenuli, kdybychom vzali miliardu miliard miliard objektů, každý o průměru jednoho centimetru – řekněme, že by to byly kostky cukru – a poskládali je vedle sebe? Odpověď je 10^{27} centimetrů. Jak velká je to vzdálenost? Dobrá, standardní jednotka měření délky v astronomii, vzdálenost, kterou světlo urazí za jeden rok (jeden světelný rok), činí přibližně 10^{18} centimetrů, takže 10^{27} kostek cukru poskládaných vedle sebe tak, aby se dotýkaly, by sahalo na vzdálenost jedné miliardy (10^9) světelných let. Nejvzdálenější známé objekty ve vesmíru, některé kvasary, jsou od nás nějakých 10 miliard světelných let daleko. Takže 10^{27} kostek cukru by sahalo přes desetinu vzdálenosti k nejvzdálenějšímu známému kvasaru. Zaokrouhlíme-li přísluš-

ná čísla, děje kvantového světa probíhají v měřítku, jež je o tolik menší než kostka cukru, o kolik je tato kostka menší ve srovnání s celým pozorovatelným vesmírem. Vyjádřit to lze ovšem i jinak: V této logaritmické škále se lidé nalézají přibližně uprostřed mezi kvantovým světem a celým vesmírem – a tvrdíme, že dokážeme pochopit, co se děje v obou těchto extrémech.

V případě cihly, domu nebo osoby neočekáváme, že by se u nich projevila vlnově-částicová dualita, protože tyto věci jsou ve srovnání s Planckovou konstantou tak obrovské. Na druhé straně fyzikové očekávají, že vlnově-částicová dualita se projeví u kvantových objektů, přestože jedním z klíčových znaků kodaňské interpretace je, že oba tyto zřetele nemůžete spatřit najednou. Bohr se v tomto ohledu vyjadřoval naprosto nekompromisně. Tvrdil, že je už v principu nemožné spatřit objekt, jako je foton nebo elektron, jak souběžně vykazuje vlnové i částicové vlastnosti. Později však uvidíme, že, naneštěstí pro Bohra a pro kodaňskou interpretaci, experimentátoři už vmetli rukavici do tváře i tomuto tvrzení.

Základem je zde to, že kodaňská interpretace funguje v tom smyslu, že poskytuje sérii receptů – týkajících se neurčitosti, kolapsu vlnové funkce, pravděpodobnosti, role pozorovatele a holismu experimentů –, jichž fyzikové mohou využít k předpovědi výsledku experimentů. Ale *nevysvětluje* nic. To, že si fyzikové tento fakt uvědomují, není nic nového. Einstein strávil deset let života v přátelském duchu vedenou korespondenční bitvou s Bohrem, v jejímž rámci se pokoušel poukazovat na nedostatky a absurditu kodaňské interpretace. Stejně tak Schrödinger roz-

vinul snad ten nejznámější příklad kvantové absurdity ve snaze přesvědčit kolegy o tom, že celý tento soubor myšlenek je tak směšný, že by měl být zavržen. Teď mám samozřejmě na mysli slavný „myšlenkový experiment“ s kočkou v krabici. Přes svou notorickou známost (kočka se v roce 1995 „dožila“ šedesátky) stále stojí za to shrnout si ho jako příklad potíží, jež musí umět vysvětlit jakákoli zdokonalená interpretace kvantové teorie – jakákoli interpretace, která věci opravdu *vysvětluje*.

KOČKA V KRABICI

Jedním z nejpodivnějších znaků kodaňské interpretace, který nejjasněji vyšel najevo právě v „experimentu“ s kočkou v krabici, je role vědomého pozorovatele v určování toho, co se děje v mikrosvětě. Nejjednodušším příkladem této role je představit si krabici, která obsahuje jediný elektron. Pokud se do krabice nikdo nedívá, pak podle kodaňské interpretace existuje stejná pravděpodobnost, že elektron najdete na kterémkoli místě uvnitř krabice – vlna pravděpodobnosti, jež s elektronem souvisí, rovnoměrně vyplňuje celou krabici. Teď si představte, že do krabice – stále aniž se do ní kdokoli dívá – je vsunuta přepážka, která ji rozdělí na dva stejné boxy. Zdravý rozum nám říká, že elektron musí být buď na jedné, nebo na druhé straně přepážky. Kodaňská interpretace však prohlašuje, že vlna pravděpodobnosti je stále rovnoměrně rozložena přes obě poloviny krabice. To znamená, že stále existuje šance 50 : 50, že elektron najdete v *té či oné* polovině krabice. Vlna kolabuje pouze tehdy a elektron se stává „sku-

tečným“, když se někdo do krabice podívá a zaznamená, na které straně přepážky se elektron nalézá. V tomto okamžiku vlna pravděpodobnosti na druhé straně přepážky zmizí. Pokud krabici opět uzavřete a na elektron se přestanete dívat, jeho vlna pravděpodobnosti se zase rozšíří, aby vyplnila přepaženou polovinu krabice, ve které byl elektron lokalizován, nicméně zpět do druhé poloviny krabice se již nerozšíří.

Celou situaci výstižně shrnul fyzik Paul Davies: „Je to, jako kdyby před pozorováním existovaly dva obláčkové elektronové ‚přízraky‘, z nichž každý obývá jednu polovinu krabice. Oba čekají na pozorování, které jeden z nich změní ve ‚skutečný‘ elektron a souběžně s tím způsobí, že druhý z nich zmizí úplně.“ Toto slovo – „souběžně“ – je zde nesmírně důležité, protože zdůrazňuje, že se jedná o další příklad nelokálnosti v plném nasazení. Ale než se pustím do výkladu příslušných důsledků, chci vám vysvětlit, jakým způsobem Schrödinger prokázal absurditu tvrzení, že za skutečnost elektronu, který existuje v jedné či druhé polovině krabice, odpovídá pozorovatel.

Schrödingerův záhadný myšlenkový experiment se poprvé objevil v tisku v roce 1935. Vychází z takového uspořádání kvantové situace, kdy jsou šance každého ze dvou možných výsledků přesně 50 : 50. Schrödinger ve své původní verzi využil radioaktivního rozpadu, protože radioaktivní zdroje se rovněž řídí pravidly pravděpodobnosti; příslušnou situaci však můžeme snadno navodit i pomocí elektronu v rozdělené krabici. Samotný Schrödinger též ve skutečnosti hovořil o experimentu prováděném v ocelové komoře, pro niž se v kvantovém folklóru vžil termín

„krabice“. V té se mimo jiné nachází kočka, o kterou tady jde. Upřednostňuji velkomyslnější interpretaci pojmu „komora“, jež poskytuje kočce prostor, aby si užívala života, dokud ještě může. Nic z toho však neovlivňuje pádnost výsledného Schrödingerova argumentu.

Takže představme si, že celý systém, který jsem prve popsal – napůl předělená krabice, jeden elektron a automaticky padající přepážka –, stojí na stole v uzavřené místnosti bez oken. Přepážka zapadla a rozdělila krabici na dvě poloviny. Jsou šance přesně 50 : 50, že elektron je v té či oné polovině krabice. Mimo krabici se nachází detektor elektronů, který je připojen k aparatuře, jež v případě detekce elektronu zaplní místnost jedovatým plynem. V rohu místnosti je kočka, která se poklidně zabývá vlastními záležitostmi. Schrödinger toto uspořádání popsal jako „dábelské zařízení“, ale pamatujte na to, že se jedná pouze o „myšlenkový experiment“ a že žádná opravdová kočka nikdy netrpěla špatným zacházením, jež se právě chystám popsat.

Schrödinger nás v konečném důsledku vyzývá, abychom si představili, co se stane, když se jedna polovina krabice s elektronem automaticky otevře, což elektronu dovolí, pokud se nalézá právě v ní, uniknout ven. Dosud neproběhlo žádné lidské pozorování toho, co se v uzamčené místnosti děje. Podle kodaňské interpretace stále existuje padesátiprocentní šance, že elektron je v zavřené polovině krabice, nicméně teď existuje rovněž padesátiprocentní šance, že elektron je někde v hlavním prostoru místnosti. Protože se jedná o myšlenkový experiment, můžeme si představit, že detektor je tak citlivý, že dokáže spolehlivě zachytit

přítomnost byť jen jednoho jediného elektronu, který byl přidán k obsahu místnosti. Pokud tedy elektron z krabice unikl, stroj by ho měl zachytit a spustit uvolňování jedovatého plynu, který následně kočku zabije.

Mohli byste si myslet, že právě to se stane i tehdy, když se nikdo nedívá: Elektron z krabice buď unikne, nebo neunikne. Pokud neunikne, kočka je v bezpečí, pokud ano, vlna pravděpodobnosti elektronu zkolabuje, jakmile si detektor elektronu „povšimne“, a osud kočky je zpečetěn. Bohr však prohlásil, že takový pohled na věc, vycházející ze zdravého rozumu, je nesprávný.

Standardní interpretace kvantové teorie nám totiž říká, že ponecháme-li samotný detektor elektronů se skládá z mikroskopických objektů kvantového světa (atomů, molekul a tak dále) a interakce s elektronem probíhá na této úrovni, také detektor podléhá kvantovým pravidlům, včetně pravidel pravděpodobnosti. V rámci tohoto obrazu vlnová funkce celého systému nezkolabuje, dokud vědomý pozorovatel (raději by měl být vybaven plynovou maskou, pakliže chce vědomým také zůstat) neotevře dveře, aby nahlédl dovnitř. V tomto okamžiku, a *pouze* v tomto okamžiku, se elektron „rozhoduje“, zda je uvnitř, nebo vně krabice, detektor se zase „rozhoduje“, zda zachytil elektron, či nikoli, a kočka se „rozhoduje“, zda je mrtvá, nebo živá. Dokud někdo nenahlédne do místnosti, kodaňská interpretace popisuje situaci uvnitř jako „superpozici stavů“ – neboli, Schrödingerovými slovy, „obsahující jak živou, tak mrtvou kočku (omlouvám se za tuto chmurnou představu), přičemž oba tyto stavy jsou ve výsledné promíchané či rozplizlé směsi zastoupeny stejným dílem“.

Podle toho, jak se chcete na celou tuto situaci dívat, můžete si představit, že v místnosti je kočka, která je současně mrtvá i živá, nebo kočka, která není ani mrtvá, ani živá, ale jaksi „zavěšená“ mezi oběma těmito krajnostmi. Pokud je však kodaňská interpretace správná, nemůžete si myslet, že místnost obsahuje prostě buď mrtvou kočku, nebo živou kočku, dokud se do místnosti někdo nepodívá.

Hlavním účelem Schrödingerova argumentu je zdůraznit absurditu kodaňské interpretace, takže nebudte překvapeni, pokud v něm najdete mezery. Zřejmou záhadou je to, jak máte definovat „vědomého“ pozorovatele. Kočka je zajisté dostatečně kompetentní na to, aby věděla, zda vdechla či nevdechla jedovatý plyn, a uhynula, ne? Nemohla by reakce kočky na události uvnitř místnosti splnit tentýž účel jako lidský pozorovatel nahlízející dveřmi? Kudy však povedete hranici? Když sestupujete od lidského měřítka do kvantového světa, dokáže vlnovou funkci zkolabovat mravenec? Nebo bakterie?

Podívejme se na tuto záhadnou věc z druhé strany, postupující z kvantového světa vzhůru. Je to všechno velmi hezké, když se řekne, že detektor elektronů nemůže zkolabovat vlnovou funkci, protože se skládá výlučně z kvantových objektů, jako jsou atomy a molekuly – jenomže lidská bytost (nebo kočka) se rovněž skládá z atomů a molekul. Pokud ke zkolabování vlny pravděpodobnosti *není* kompetentní detektor, proč bychom k tomu měli být kompetentní my? A je v příslušném kontextu podmínkou toho, aby byl pozorovatel vědomý, to, že nutně musí být také živý? Dokázal by nahlédnutím do místnosti zkolabovat vlnovou funkci i sofistiko- vaný počítač?

Vzdalme se však od původního elektronu ještě více. Jaká situace nastane, když bude osoba, jež se dívá do místnosti, aby spatřila, zda kočka je či není mrtvá, sama v budově, která je uzamčena na noc? Striktní kodaňská interpretace nám říká, že superpozice stavů (Schrödingerovo rozpliznutí) zahrnuje i tohoto pozorovatele až do doby, dokud se někdo jiný zvenčí budovy nepodívá, aby spatřil, jak experiment probíhá (nebo snad nezatelefonuje, aby se zeptal, jaký je „stav hry“). Takže nejen kočka, nýbrž i lidský pozorovatel může být „zavěšen“ mezi dvěma krajnostmi, dokud se na něj někdo nepodívá. A kdo se dívá na onu osobu mimo budovu, aby zkolaboval zase *její* vlnovou funkci? Neměl by celý proces pokračovat donekonečna, v nekonečné regresi?

Klíčově důležitou otázkou je zde to, kde nakreslíte čáru mezi kvantovými pravděpodobnostmi a tím, co považujeme za skutečnost. Kolik molekul, jestliže dáte přednost této úrovni, musí obsahovat systém, aby se stal „skutečným“ a dokázal kolabovat vlnové funkce? A jak musí být tyto molekuly uspořádány, aby systém splnil účel?

Právě tento druh záhady dnes trápí filozofy a odborníky na kvantovou mechaniku. Všichni vědí, že kvantová teorie *funguje*; chtějí však vědět, *proč* funguje, a mít určitou pochopitelnou představu o tom, co se děje uvnitř zavřené místnosti, když se nikdo nedívá. Tato záhada je nicméně závažnější, než jak by naznačovala pouhá jednoduchá verze scénáře s kočkou v krabici. Než však přejdu k vlastnímu významu kvantové mechaniky, chci odhalit hlubší zřetele celého tajemství. Pomohou mi při tom dcery Schrödingerovy kočky.

JINÝ ZŘETEL SKUTEČNOSTI

Určitou známkou toho, jak dramatického pokroku dosáhla moderní fyzika, je fakt, že i když se nikdo vážně nepokusil uzavřít kočku do podobné krabice či komory, aby spatřil, co se s ní v takové situaci děje, jiný myšlenkový experiment, který napadl Alberta Einsteina bezprostředně předtím, než Schrödinger vymyslel svou záhadu kočky v krabici, se v 80. letech opravdu stal praktickou skutečností. Možná je ale dobře, že se Einstein nedožil toho, aby spatřil, jak se jeho myšlenkový experiment změnil v praktickou skutečnost, neboť – přestože byl stejně jako záhada kočky v krabici navržen kvůli zdůraznění absurdity kvantové teorie – když byl test opravdu proveden, kvantová teorie jím prošla s vlajícími prapory.

Příslušnou myšlenku Einstein nerozvinul sám, nýbrž s Borisem Podolským a Nathanem Rosenem. Bylo to krátce poté, co se začátkem 30. let přestěhoval do Princetonu. Uveřejnili ji společně v roce 1935 – téhož roku, kdy Schrödinger uveřejnil „paradox“ kočky v krabici. Známa je jako „EPR paradox“, protože zdůrazňuje nelogičnost (podle standardů každodenního zdravého rozumu) podstaty kvantové skutečnosti.

Tuto záhadu pak podrobněji rozpracoval David Bohm, americký fyzik, který se v roce 1951 usadil v Anglii; nadále však zůstávala čistě myšlenkovým experimentem. Nicméně v polovině 60. let John Bell, irský fyzik, který tehdy pracoval v CERN v Ženevě, přišel na způsob, jak ji převést do podoby experimentu, který v principu mohl být proveden na párech fotonů, jež by byly

souběžně vyzařovány z atomu do protilehlých směrů. V té době si ovšem dokonce ani Bell nemyslel, že takový experiment lze prakticky uskutečnit. Přesto se v průběhu následujících zhruba dvaceti let výzvy změřit předpovědi teoretického vztahu odvozeného Bellem chopilo hned několik badatelů. Nejúplnější a nejvíc rozhodující z těchto experimentů pak provedl Alain Aspect se svými kolegy, kteří začátkem 80. let pracovali v Orsay blízko Paříže. Tito badatelé prokázali mimo jakékoli rozumné pochybnosti, že zdravý rozum (a Einstein) se mýlí a že v kvantovém světě opravdu vládne nelokálnost. Popíši zde právě Bellovu verzi EPR paradoxu – tak jak byla testována Aspectem.

V rámci Aspectova experimentu se měří vlastnost fotonů zvaná polarizace. Polarizaci si můžete představit třeba tak, jako by každý foton polarizovaného světla nesl imaginární kopí, jímž míří určitým směrem – nahoru, dolů, do stran, nebo někam mezi tím. Chování polarizovaného světla vykazuje řadu podivných znaků – některé proberu ve 3. kapitole – ale zde je důležitý pouze fakt, že různé zřetele fotonové polarizace lze změřit a že tyto vlastnosti spolu vzájemně souvisejí v souladu s kvantovými pravidly. Pakliže reálnou situaci trochu zjednodušíme, může to být tak, že jeden foton musí kopím mířit nahoru a druhý zase do strany, ale v pravidlech není nic, co by předepisovalo, kterým směrem jím má mířit který konkrétní foton. Jsou-li z atomu vyzářeny dva fotony, pak podobně jako Schrödingerova kočka existují v superpozici stavů, dokud někdo nezměří polarizaci jednoho z nich. V tomto okamžiku vlnová funkce tohoto fotonu zkolabuje do jednoho z možných stavů – jeho kopí bude mířit třeba naho-

ru. Ve stejném okamžiku ovšem nutně zkolabuje i vlnová funkce *druhého* fotonu do druhého stavu – jeho kopí bude mířit do strany. Na druhý foton se přitom nikdo nepodíval, a v době, kdy je prováděno měření, mohou být od sebe oba fotony značně vzdáleny (v principu mohou být třeba na opačných stranách vesmíru), ale když jedna vlnová funkce zkolabuje, totéž učiní i druhá. Právě to Einstein nazýval „strašidelným působením na dálku“. Vypadá to totiž tak, jako by dva kvantové objekty (v tomto případě dva fotony) zůstávaly vzájemně propleteny navždy, takže když se do jednoho „šfouchne“, ten druhý sebou „škubne“, a to okamžitě, nehledě na to, jak jsou od sebe oba fotony daleko.

Přijmout něco takového se přičilo jmenovitě Einsteinovi, protože, jak uvidíme, základem jeho teorie relativity je fakt, že světlo se šíří vždy stejnou rychlostí a že žádný objekt nebo signál nemůže být zrychlen z pohybu pomalejšího, než je pohyb světla, na pohyb rychlejší než pohyb světla. Podle teorie relativity (alespoň tak, jak byla původně chápána) neexistuje nic, co by dvě částice mohlo přes libovolný prostor okamžitě propojit. Ještě sice poznáme, že na teorii relativity může být víc, než si původně uvědomoval sám Einstein; ale v jeho době to bylo zvláště pro něj silným argumentem proti možnosti podobného působení na dálku.

Jak však lze doopravdy, prostřednictvím experimentů, získat důkazy svědčící buď ve prospěch strašidelného působení na dálku, nebo proti němu? Měřit oba fotony je zbytečné; vždy dostanete správné odpovědi (v našem příkladě jedno kopí nahoru, druhé do strany), okamžité spojení však v akci nikdy „nespatříte“. Neboť vše, co při provádění těchto měření můžete říct, je, že vlastnosti

Vážení čtenáři, právě jste dočetli ukázkou z knihy Schrödingerova koťata.
Pokud se Vám ukázka líbila, na našem webu si můžete zakoupit celou knihu.