

Kvantové hlavolamy III.

Hledání hranice mezi kvantovým a klasickým světem

PAVEL CEJNAR
MILOSLAV DUŠEK

PRO ČTENÁŘE
S HLUBŠÍM ZÁJMEM
O KVANTOVOU TEORII

V důsledku principu superpozice se kvantové částice mohou nacházet ve stavech, které nemají ve světě klasické fyziky analogii. Proč ale takové stavy běžně nepozorujeme i u makroskopických objektů, které se přece z kvantových částic skládají? Na tuto otázku fyzika zatím nemá jednoznačnou odpověď.

Kvantové testování bomby

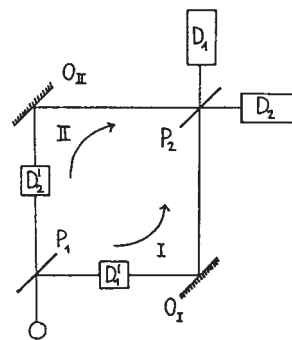
V minulém čísle jsme si vyložili dva základní axiomy kvantové teorie – princip superpozice a „princip“ kvantového měření (stručná rekapitulace je v rámečku). Viděli jsme, že s jejich pomocí můžeme popsat zdánlivě rozporné vlastnosti fotonů, totiž fakt, že při měření interference se fotony chovají „vlnově“, zatímco při měření dráhy „částicově“. Foton v interferometru je v superpozici stavů odpovídajících šíření jednotlivými rameny, a tak vlastně jakoby prochází oběma rameny současně. Tuto vlastnost, projevující se v interferenčním chování, však nelze odhalit přímým kvantovým měřením dráhy fotonu, protože jeho výsledkem může být jediné lokalizace fotonu buď v jednom, nebo v druhém rameni interferometru (foton je z hlediska měření nedělitelný).

V důsledku kolapsu vlnové funkce (redukce kvantové superpozice jen na jeden ze zúčastněných stavů) každé měření dráhy (zjišťování, kterým ramenem foton prošel) ovlivňuje následné měření interference. Abychom si to uvědomili, uvažujme o měření podle obr. 1. Přístroj na obrázku je vlastně Machovým-Zehnderovým interferometrem (viz rámeček) doplněným o dodatečné detektory D'_1 a D'_2 v obou ramenech. Předpokládejme, že tyto detektory fotony pouze registrují, ale neabsorbují,¹⁾ a tedy nám umožňují zjistit, kterým ramenem foton prošel, aniž by jej „zničily“. Měření uskutečněné dvojicí detektorů D'_1 a D'_2 způsobuje kolaps vlnové funkce fotonu. Jeho stav před dopadem na zrcadlo P_2 není superpozicí $|l\rangle - |r\rangle$ (jako by tomu bylo bez dodatečných detektorů), ale je to jen jeden z obou zúčastněných stavů, tj. buď $|l\rangle$, nebo $|r\rangle$, podle toho, ve kterém rameni byl foton nalezen. Pak ale na P_2 nemůže dojít k interferenci potlačující vlnu jdoucí do detektoru D_2 : foton může být se stejnou pravděpodobností zaregistrován oběma detektory D_1 a D_2 . V jednom experimentu prostě fotony nelze přinutit, aby byly přítomny jen v jednom rameni interferometru a zároveň vykazovaly interferenční chování. Tento rozpor příroda, zdá se, zakazuje.

Právě popsaný jev má pozoruhodné důsledky. Představme si bombu aktivovanou velmi citlivým mechanismem, reagujícím na sebemenší dotyk. Např. zrcátko je tak delikátně propojeno s roznětkou, že odraz třeba i jediného fotonu od zrcátka uvádí roznětku v činnost. Po nějaké době chceme zjistit, zda spouštěcí mechanismus dosud funguje. Jak to udělat, aby při tom bomba nevybuchla?

Právě popsaný jev má pozoruhodné důsledky. Představme si bombu aktivovanou velmi citlivým mechanismem, reagujícím na sebemenší dotyk. Např. zrcátko je tak delikátně propojeno s roznětkou, že odraz třeba i jediného fotonu od zrcátka uvádí roznětku v činnost. Po nějaké době chceme zjistit, zda spouštěcí mechanismus dosud funguje. Jak to udělat, aby při tom bomba nevybuchla?

1) To lze prakticky provést pomocí tzv. nedemoličního měření počtu fotonů, využívajícího např. nelineární optické prvky.

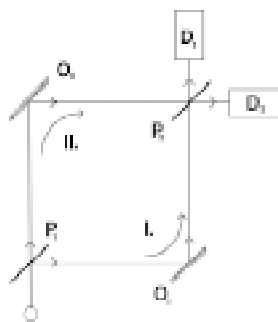


1. Jednofotonový pokus s dvojicí detektorů v ramenech interferometru. Kolaps vlnové funkce fotonu způsobený měřením jeho dráhy znemožňuje pozorování interference.

OPAKOVÁNÍ (Vesmír 77, 189–192, 1998/4)

Interferometr

Obrázek znázorňuje Machův-Zehnderův interferometr (P_1 a P_2 jsou polopropustná zrcadla, na nichž se světlo rovnoměrně dělí nebo „spojuje“, O_1 a O_2 jsou obyčejná zrcadla; ramena interferometru jsou stejně dlouhá). Ve směru detektoru D_1 se světelné vlny skládají konstruktivně, ve směru detektoru D_2 destruktivně – v důsledku interference tedy světlo registrujeme pouze na D_1 . Tento jev lze pozorovat nezávisle na intenzitě světla, tzn. i pro jednotlivé fotony. Jestliže ale odstraníme polopropustné zrcadlo P_2 , interference zmizí – fotony přicházejí náhodně buď do D_1 , nebo do D_2 .



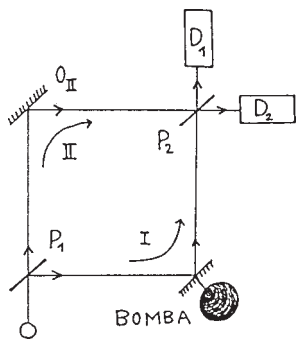
Princip superpozice

Každá lineární kombinace – tedy *superpozice* – libovolných stavů kvantového systému tvoří nějaký nový stav systému. Např. foton v interferometru je obecně ve stavu $\alpha|l\rangle + \beta|r\rangle$, jenž je superpozicí stavů $|l\rangle$ a $|r\rangle$ popisujících

jeho pohyb směrem „nahoru“, resp. „doprava“, tedy odpovídajících průchodu fotonu jednotlivými rameny. Koeficienty α a β jsou komplexní čísla; za polopropustným zrcadlem P_1 je konkrétně $\alpha = 1$, $\beta = i$, zatímco těsně před P_2 je $\alpha = -1$, $\beta = i$ (kde i je imaginární jednotka). Linearita kvantových evolučních rovnic zaručuje zachování superpozice při spontánním časovém vývoji ($|\Psi_t\rangle = \alpha|\chi_t\rangle + \beta|\phi_t\rangle$) se za čas t vyvine na $|\Psi_t\rangle = \alpha|\chi_t\rangle + \beta|\phi_t\rangle$). Znovu si promyslete, jak se linearita projevuje při evoluci stavu fotonu v interferometru.

Kvantové měření

Výsledek kvantového měření nelze obecně jednoznačně předpovědět. Kvantová teorie určuje pouze pravděpodobnosti jednotlivých možných výsledků. Máme-li např. atom ve stavu $|\phi\rangle = \alpha|E_1\rangle + \beta|E_2\rangle$, kde $|E_1\rangle$ či $|E_2\rangle$ jsou stavy, v nichž bychom s jistotou naměřili energie atomu rovné E_1 či E_2 , pak výsledkem měření energie na stavu $|\phi\rangle$ může být jak E_1 , tak E_2 (ale nic jiného!). Pravděpodobnosti obou výsledků jsou úměrné $|\alpha|^2$ či $|\beta|^2$. Kromě toho se stav systému při měření v obecném případě změní – dojde ke *kolapsu vlnové funkce*. Pokud jsme na stavu $|\phi\rangle$ změřili např. hodnotu E_1 , bude systém po měření ve stavu $|E_1\rangle$ (podobně pro E_2). Jaké jsou tedy v interferometru bez P_2 pravděpodobnosti registrace fotonu detektory D_1 a D_2 a proč?



2. Testování supercitlivé bomby. Fungující spouštěcí mechanismus bomby ničí interferenci podobně jako dodatečné detektory na obr. 1, což umožňuje „nedestruktivní“ odhalení bomby

Najít řešení tohoto problému se z pohledu každodenní zkušenosti zdá beznadějně. Právě popsané chování fotonů v interferometru ale řešení nabízí, jak ukázali Avshalom Elitzur a Lev Vaidman v roce 1993. Představme si, že zrcátko připojené k bombě bylo použito v jednom z ramen (např. v rameni I) Machova-Zehnderova interferometru – viz obr. 2. Jestliže spouštěcí mechanismus bomby nefunguje, je jeho zrcátko pouhým pasivním elementem, který jednoduše nahrazuje původní

zrcátko interferometru. V takovém případě budou fotony dopadat výhradně do detektoru D_1 . Jestliže je ale spouštěcí mechanismus funkční, je jeho přítomnost v rameni I rovnocenná měření dráhy fotonu v interferometru. Při tomto měření bude s pravděpodobností 50 % zjištěno, že foton prochází ramenem I; to jest, bomba vybuchne. Co ale když výsledkem měření bude, že foton v rameni I není? Pak tedy musí být v rameni II, a na polopropustném zrcadle P_2 může projít také do detektoru D_2 , který by musel zůstat němý, kdyby mechanismus nefungoval. To však znamená, že v některých případech mechanismus bomby nespustí, ale jeho funkčnost je přesto odhalena registrací fotonu v detektoru D_2 .

Za předpokladu fungujícího mechanismu je rozdělení pravděpodobností následující: V 50 % případů bomba vybuchne, v 25 % případů bomba sice nevybuchne, ale foton je zaregistrován v detektoru D_1 (takže nevíme nic), a ve zbývajících 25 % případů bombu odhalíme, aniž by vybuchla. Těch 25 % účinnosti se vám možná nezdá být zrovna velké terno, ale nezapomínejte, že všechny „klasické“ pokusy by měly účinnost nulovou. Navíc se popsaná metoda

dá použitím chytrého triku zdokonalit tak, že její účinnost se může libovolně přiblížit hodnotě 100 % – viz rámeček.

Zopakujme si to ještě jednou: Každá interakce s fungujícím spouštěcím mechanismem bomby vede k výbuchu. Dejme tomu, že uvedenou procedurou jsme zjistili, že mechanismus funguje, ale bomba nevybuchla. Znamená to, že v našem měření nedošlo k interakci s objektem, jehož vlastnost byla zjištěna? Další z kvantových hlavolamů²⁾...

VAROVÁNÍ MINISTRA ZDRAVOTNICTVÍ



...jejíž překonávání způsobuje alkoholismus. Kresba © P. Cejnar

Schrödingerova kočka a Wignerův přítel

Předpokladem popsané metody testování bomby je, že fungující spouštěcí mechanismus provádí v interferometru kvantové měření dráhy fotonu a ruší tak interferenci, stejně jako by činil jakýkoliv „obyčejný“ detektor průchodu fotonu umístěný do daného ramene. Co je ale v tomto případě vlastně bezprostřední příčinou kolapsu vlnové funkce? Do vzájemné interakce se zde dostávají přinejmenším foton, zrcátko, spouštěcí mechanismus, bomba a pozorovatel. Na kterém stupni tohoto řetězce ke kolapsu dochází? Tím se dostáváme k otázkám, na které fyzika zatím nemá jasnou odpověď.

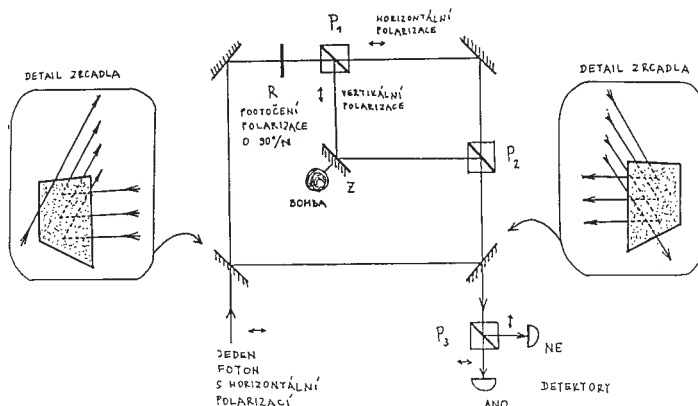
Samotná existence superpozic je sice udivující vlastností kvantového světa, na podobná překvapení si ale fyzikové na cestě k jevům stále vzdálenějším rozměrové škále běžné zkušenosti již museli zvyknout – stačí připomenout třeba teorii relativity a její „výstřednosti“. Kolaps vlnové funkce je ale spí-

2) Mnohem známějším hlavolamem souvisejícím také s procesem kolapsu vlnové funkce je již klasický paradox Einsteinův-Podolského-Rosenův (viz další pokračování).

BEZINTERAKČNÍ MĚŘENÍ

Poměrně nedávno byl navržen (a částečně již i experimentálně realizován) způsob, jak podíl případů, kdy je přítomnost předmětu („bomby“) „bezinterakčně“ detegována, učinit libovolně blízkým hodnotě 100 %. Uvažujme uspořádání podle obrázku: Do systému necháme vstoupit jeden foton s horizontální polarizací (viz Vesmír 77, 192, 1998/4), který v něm vykoná N oběhů (což se zajistí geometrií uspořádání – foton se pohybuje po „spirále“). V systému je umístěn polarizační rotátor R (tj. optický prvek stáčejejí směr polarizace fotonu, v našem případě o úhel $90^\circ/N$) a interferometr se stejně dlouhými rameny, složený ze dvou polarizačních děličů svazku P_1 a P_2 (tj. hranolů, které horizontální polarizaci propouštějí, zatímco vertikální odrážejí). Není-li přítomna bomba, jsou obě ramena interferometru průchodná, zrcátko Z je pouhým pasivním optickým elementem a polarizace fotonu je postupně pootáčena (vertikální a horizontální složky se po průchodu interferometrem na hranolu P_2 spojí, čímž se rekonstruuje polarizační stav, který byl před děličem P_1). Po N cyklech je pak foton polarizován vertikálně. V přítomnosti bomby (kdy je zrcátko Z spojeno s jejím spouštěcím mechanismem) se situace zcela změní: foton teď prochází vždy jen jedním ramenem interferometru (bomba funguje jako detektor dráhy fotonu). S pravděpodobností $\cos^2(90^\circ/N)$ projde horním ramenem (odpovídají-

cím horizontální polarizaci) a bombu mine; jeho polarizace se však přitom změní („zkolabuje“) na horizontální. Celková pravděpodobnost, že bomba nevybuchne a foton je po N oběhích zaregistrován s horizontální polarizací, je proto $P_N = [\cos^2(90^\circ/N)]^N$ (pravděpodobnost, že bomba vybuchne, je samozřejmě $1 - P_N$). S rostoucím počtem cyklů N se pravděpodobnost P_N blíží jedné (čím větší je N , tím méně je pravděpodobné, že se foton v libovolném oběhu pustí spodním ramenem směrem k bombě; čtenáři znalí infinitesimálního počtu se mohou přesvědčit, že $\lim_{N \rightarrow \infty} P_N = 1$). „Nebezpečí výbuchu“ lze tedy neomezeně snížit!



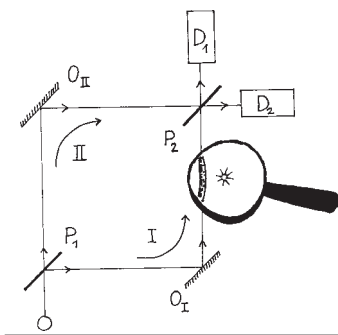
še podezřelý než jenom překvapivý. Každé skutečné měření je z mikroskopického hlediska děj velmi komplikovaný. Už jenom při interakci kvantového objektu s měřicím přístrojem zpravidla vstupuje do hry obrovské množství elementů (třeba částic, z nichž se přístroj skládá) a zahrnutí pozorovatele již ani nelze seriózně domyslet. Postuláty kvantového měření jsou zřejmě zjednodušeným (idealizovaným) popisem tohoto složitého procesu. Jak to ale probíhá ve skutečnosti? Jestliže fyzikové chtějí nějakému jevu opravdu porozumět, snaží se představit si jej jako výsledek chování všech jeho elementárních účastníků. Tomu ale v případě kolapsu brání jedna zásadní skutečnost: Všechny částice měřicího přístroje se řídí kvantovými evolučními rovnicemi, které jsou lineární (zachovávají stavy superpozice – viz rámeček na s. 272), a nemohou tedy být za kolaps odpovědné. Znamená to, že platnost lineární kvantové mechaniky někde končí?

Nemyslete si, že těmito problémy se fyzikové zabývají teprve dnes. Již několikrát zmíněný Niels Bohr vypracoval se svými kolegy promyšlený systém názorů, označovaný jako kodaňská interpretace kvantové teorie. Podle ní se svět kvantové teorie skládá nejen ze samotných kvantových objektů (které se obecně nacházejí ve stavech superpozice), ale také z *klasických měřicích přístrojů* (které se řídí klasickou fyzikou). Kolaps vlnové funkce je zde vlastně nutným prvkem sjednocujícím oba vzájemně neslučitelné způsoby popisu. Potíž je v tom, že tento názor, jakkoliv je z hlediska pozorování snad správný, nedává odpověď na všechny výše položené otázky. Jde tedy o to, aby byla obecným tvrzením kodaňské interpretace dána konkrétní fyzikální náplň.

V jistém smyslu extrémní pohled navrhl Eugene Wigner. Podle něj oním „klasickým měřicím přístrojem“, tj. hranicí, na níž přestává platit obyčejná lineární kvantová mechanika, může být lidský mozek (či vědomí?). Tak je možné, že kolaps vlnové funkce nastává až při zpracování kvantové informace *pozorovatelem*. Pro náš příklad měření energie elektronu (viz rámeček na s. 272) by to znamenalo, že superpozice $\alpha|E_1\rangle + \beta|E_2\rangle$ je zničena právě v okamžiku, když experimentátor odečte údaj měřicího přístroje.

Někteří fyzikové věří, že kolaps vlnové funkce se děje spíše už někde na úrovni „nevědomé“ hmoty než na úrovni „inteligentních“ pozorovatelů, soudí ale, že jeho plné pochopení bude možné teprve v rámci *úplnější teorie*, než je současná kvantová mechanika. Teorie, která bude muset obsahovat nové, zatím neznámé principy. Roger Penrose navrhuje, že touto úplnější teorií bude kvantová teorie gravitace. Podle něj ke kolapsu spontánně dochází v okamžiku, kdy interakce kvantového systému s okolím způsobí, že kvantového děje se začnou účastnit dostatečně velké části systému

3. Kvantový objekt v rameni I reaguje na průchod fotonu přechodem ze stavu $|0\rangle$ do stavu $|x\rangle$



a rozdělily mezi jednotlivými větvemi kvantové superpozice dosáhnou jisté míry vyjádřené v „gravitačních“ jednotkách (tzv. jednogravitonové kritérium). V jiném návrhu (jehož původci jsou Gian-Carlo Ghirardi, Alberto Rimini a Tullio Weber) je kolaps vlnové funkce náhodným procesem, opět určitým způsobem závislejícím na „velikosti“ kvantového systému (tzv. pro-

PROBLÉM SCHRÖDINGEROVY KOČKY

Následující myšlenkový experiment ilustruje nejasnosti koncepce kvantového měření. Schrödingerova kočka (snad míněno opravdu zvíře) je zavřena v krabici s ampulkou jedu. Rozpad radioaktivního atomového jádra slouží jako spouštěcí mechanismus pro rozbití ampulky (a tedy usmrcení kočky). Protože jádro je kvantový popis vlastní (může tedy být v superpozici stavů $|\text{celé}\rangle$ a $|\text{rozpadlé}\rangle$), dostává se pod „kvantovou jurisdikci“ i kočka. Tak je možné, že se systém nachází ve stavu

$$|\Psi_{\text{Sch}}\rangle = \alpha|\text{celé jádro}\rangle|\text{živá kočka}\rangle + \beta|\text{rozpadlé jádro}\rangle|\text{mrtvá kočka}\rangle,$$

kde obě dvojice vedle sebe stojících stavů představují stavy složené soustavy jádra + kočky. Kvantové měření převádí kočku z jejího neurčitého stavu do jednoho z „klasických“ stavů $|\text{živá}\rangle$ či $|\text{mrtvá}\rangle$. Byl-li výsledek měření „mrtvá“, má pozorovatel důvod k výčitkám svědomí? Nebo kočka zemřela dávno před tím, než informace o tom dosáhla jeho vědomí?

Představte si, že spolu s kočkou a ampulkou jedu je v bedně také další pozorovatel (Wignerův přítel), chráněný před účinky jedu skafandrem. Pozorovatel chystající se nahlédnout do bedny okénkem by si mohl myslet, že celá soustava jádro + kočka + přítel jsou v superponovaném stavu podobném $|\Psi_{\text{Sch}}\rangle$. Podle Wignera se ale stavy myslí pozorovatele obdařeného vědomím nemohou kvantových superpozic účastnit, takže přítel (a s ním i kočka a radioaktivní jádro) je vždy v klasickém stavu, buď veselý (kočka živá, jádro celé), nebo smutný (kočka mrtvá, jádro rozpadlé), bez ohledu na měření provedené pozorovatelem vně bedny.

Nedávno byl v článku s názvem *DNA-molekulární branec Schrödingerovy kočky* (popravdě řečeno to může být i sestřenice – v angličtině se to nepozná) popsán proces, kterým může vyzáření jediného kvanta γ (vysokoenergetického fotonu) při rozpadu atomového jádra způsobit dlouhodobé a klasicky měřitelné změny v rozkladu molekul DNA a enzymu fotolyázy. Principiálně jde o situaci podobnou problému Schrödingerovy kočky, protože by v něm do kvantových superpozic jakoby měly vstupovat i makroskopické objekty. Jestliže je stav rozpadajícího se jádra kvantovou superpozicí, bude v odpovídajícím stavu superpozice také rozklad DNA? Pokud ne, kdy a jak došlo ke kolapsu?

ces spontánní lokalizace); jeho existenci je třeba doadečně zahrnout do současné kvantové teorie.

Další dva zajímavé přístupy (vycházející z lineární kvantové teorie bez dalších doplňků) si popíšeme v následujících kapitolách.

Dekoherence

Je zajímavé si uvědomit, že interferenčnímu chování může být zamezeno i bez skutečného kolapsu vlnové funkce, pouhou interakcí sledovaného objektu s nějakým jiným kvantovým objektem, k jehož stavům je měření necitlivé. Představte si například, že registraci dráhy fotonu v interferometru z obr. 1 neprovádějí makroskopické detektory D_1 a D_2 , ale nějaký kvantový objekt umístěný v jednom z ramen (třeba atom reagující na průchod fotonu přechodem mezi dvěma různými stavy). Víme, že na počátku byl stav objektu jednoznačně určen, označme jej třeba $|0\rangle$, a že průchod fotonu daným ramenem způsobí přechod objektu do stavu $|x\rangle$, jednoznačně od výchozího stavu odlišitelného (tj. v řeči kvantové teorie k němu ortogonálního). Mikroskopický objekt tedy zaznamenává informaci o dráze fotonu – viz obr. 3 vlevo – můžeme jej proto pokládat za jakýsi „mikro-detektor“. I když ke skutečnému měření v tomto případě vlastně nedošlo (kvantový objekt není klasickým měřicím přístrojem), interference vymizí. Lze se o tom přesvědčit jednoduchou úvahou: Stav slož-

né soustavy foton + mikrodetektor těsně před dopadem fotonu na polopropustné zrcadlo P_2 (bez přítomnosti mikrodetektoru by zde foton byl ve stavu $|l\rangle \rightarrow |l\rangle$) je dán superpozicí $|l\rangle \rightarrow |o\rangle - |l\rangle |x\rangle$, kde např. $|l\rangle \rightarrow |o\rangle$ označuje stav doprava se šířícího fotonu a „neaktivovaného“ mikrodetektoru. Za zrcadlem P_2 je proto podle pravidel popsanych v části II. (Vesmír 77, 190, 1998/4) stav soustavy popsán výrazem

$$-|l\rangle |o\rangle - |l\rangle |x\rangle + |l\rangle |o\rangle - |l\rangle |x\rangle .$$

Je vidět, že poslední dva členy se zde neodečtou (jako tomu bylo v případě bez mikrodetektoru), protože se stavy mikrodetektoru liší. To ale znamená, že foton může být registrován i detektorem D_2 – interference zaniká! Dá se ukázat, že pravděpodobnost registrace v každém z detektorů je v tomto případě 50 %.³⁾ Obecně vzato, příčinou vymizení interference je principiální rozlišitelnost obou drah fotonu v interferometru (způsobená přítomností mikrodetektoru).

Jestliže zařazení zdánlivě nicotného mikroskopického elementu do schématu našeho myšleného experimentu je ve svých důsledcích vlastně nerozlišitelné od skutečného měření dráhy fotonu v interferometru, nemohla by potom existence nějakých na první pohled přehlédnutelných elementů způsobit efekt podobný měření i v reálném světě? Opravdu, těmito často přehlíženými účastníky kvantových procesů mohou být molekuly, atomy a jádra okolní hmoty a kvanta polí; souhrnně se jim všem říká *prostředí*.⁴⁾ Žádný reálný kvantový systém nelze od jeho okolí dokonale odizolovat. Stavy prostředí se proto mohou vázat se stavy systému, podobně jako se stavy mikrodetektoru v předchozím příkladu sdružují se stavy $|l\rangle$ a $|o\rangle$ fotonu v celkové superpozici. Takovéto korelované superpozice se anglicky označují jako „entangled states“, tedy „propletené“ stavy. Tak jako uvažovaný mikrodetektor, reálné prostředí monitoruje kvantový systém, zaznamenává v sobě informaci o něm a může tak zamezit jeho interferenčnímu chování.

Popsaný jev, nazývaný *dekoherence*, zavedli Wojciech H. Zurek, H. Dieter Zeh a další na konci 70. a počátku 80. let. Mezi fyziky je mu věnována značná pozornost. Schopnost „všudypřítomného“ prostředí rušit interferenční jevy dává naději, že studium dekoherence (nebo obecněji, studium otevřených, tj. neizolovaných, kvantových systémů) povede k lepšímu porozumění mechanismu, jímž dává ryze kvantové chování mikroskopických elementů vzniknout klasickému chování makroskopických objektů jako celku. Možná se tak přiblížíme i chápání procesů interakce kvantových objektů s makroskopickými měřicími přístroji, tedy porozumění mechanismu skutečných kvantových měření.⁵⁾

Na onom světě

Pozoruhodným způsobem přistupuje k problému kvantového měření Hugh Everett III v článku z roku 1957. Jeho interpretace, dnes známá pod názvem

3) Při jistém stupni citlivosti detektorů D_1 a D_2 ke stavům mikrodetektoru by pravděpodobnosti registrace v D_1 a D_2 byly obecně různé. Za určitých okolností by se pak interference dokonce mohla v plné míře obnovit.

4) Mimořádně, prostředí nemusí nutně tvořit jen jiné objekty, ale třeba i další „stupně volnosti“ zkoumaného systému, např. polarizace fotonů.

5) I při dokonalém odstínění vlivů okolí na zkoumaný systém k dekoherenci může docházet při zpracování kvantové informace mozkiem pozorovatele. Jeden náš přítel vyslovil hypotézu, že ženský mozek by se mohl lišit od mužského právě nižší mírou dekoherence. Schopností žen vidět kvantové superpozice by se daly vysvětlit různé rozepře, jejichž příčiny jinak tonou v temnotě.

mnohasvětová, se obejde zcela bez předpokladu o kolapsu vlnové funkce, a přitom je se standardní kvantovou teorií (s kolapsem) zcela ekvivalentní co do výsledků.

Everett považuje za hlavní vlastnost zakládající roli pozorovatele v kvantové teorii *paměť*. Stav paměťového média se záznamy výsledků minulých měření je třeba zahrnout do celkového stavu soustavy. Uvažujme například atom připravený na počátku ve vzbuzeném stavu $|e\rangle$ (tj. v některém z vyšších povolených energetických stavů) rozpadající se do základního stavu $|g\rangle$ (stavu s nejnižší energií) za současného vyzáření fotonu. Kvantový stav soustavy v libovolném čase můžeme obecně reprezentovat superpozicí

$$|\Psi_t\rangle = \alpha_t |e\rangle |0\rangle + \beta_t |g\rangle |1\rangle ,$$

kde první člen představuje dosud nerozpadlý excitovaný stav $|e\rangle$ a žádný foton (to je zapsáno jako $|0\rangle$) a druhý člen atom v základním stavu $|g\rangle$ a jeden emitovaný foton (čili $|1\rangle$). Protože vzbuzeň stav $|e\rangle$ je nestabilní, hodnoty váhových koeficientů α_t a β_t se s časem t mění. Přesný časový vývoj, určený kvantovými evolučními rovnicemi, závisí na detailech interakce mezi atomem a elektromagnetickým polem (fotony). Obecně ale platí, že v čase $t = 0$, který budeme považovat za okamžik přípravy vzbuzeň stavu, je $\alpha_0 = 1$ a $\beta_0 = 0$, zatímco v časech pozdějších se poměr absolutních hodnot obou koeficientů vyvíjí ve prospěch β_t (roste pravděpodobnost najít produkty rozpadu). Bedlivým sledováním atomu, přesněji toho, zda byl či nebyl vyzářen rozpad doprovázející foton, lze v principu monitorovat stav atomu. Zapisujeme-li výsledky těchto měření periodicky v určitých okamžicích do nějakého paměťového elementu, musíme v celkovém stavu soustavy kromě atomu a záření navíc počítat i s tímto elementem. Stavy paměti odpovídající jednotlivým možným záznamům (např. záznamy „eeeeegg“, „eggggg“ jsou ekvivalentní stavům |eeeeegg), |eggggg) apod.) jsou přítomny v celkové superpozici soustavy složené ze všech prvků zúčastněných v procesu.

V mnohasvětové interpretaci je pozorovatel *definován* právě sekvencí jeho paměťových záznamů. Znamená to, že oba výše uvedené příklady sekvencí určují dvě různá „já“ pozorovatele, která jako by obývala dva paralelní světy. Mnohost těchto světů bují v nepřetržitých větveních, vyvolaných stále novými akty měření (obr. 4). Všechny záznamy (světy) vykazují v podstatě klasické vlastnosti: částice v dráhových komorách se pohybují po rozlišených drahách a neskáčou z jednoho místa do druhého, vzbuzeň atomy se vždy rozpadají v nějakém rozlišeném okamžiku a nepřecházejí chaoticky mezi vzbuzeňm a základním stavem, jak by se mohlo zdát z povahy kvantových superpozic. To, čeho je ve standardní kvantové teorii dosaženo postulátem o kolapsu vlnové funkce, je u Everetta důsledkem ztotožnění pozorovatele s „paměťovým záznamem“.

Lze namítnout, že zahrnutí pozorovatele dovnitř superpozic (mnohasvětová interpretace vlastně není ničím jiným) je jen jiným vyjádřením předpokladu o kolapsu vlnové funkce. Asi ano.



KVANTOVÝ ZENONŮV JEV

Jak si všimli B. Misra a E. C. G. Sudarshan v roce 1977, periodickým opakováním měření se rozpad atomu může zpomalit, či dokonce úplně zastavit. Protože pravděpodobnosti se při opakování nezávislých jevů násobí, pro periodická měření v našem příkladu je pravděpodobnost nalézt N po sobě jdoucích výsledků „e“ úměrná hodnotě $|\alpha_{\Delta t}|^{2N}$ (tj. $|\alpha_{\Delta t}|^2$ na N -tou). Uvážíme-li, že složení N intervalů délky Δt dá nějaký čas t , můžeme psát, že $\Delta t = t/N$. Detailním kvantově-mechanickým výpočtem průběhu procesu rozpadu se zjistilo, že při rostoucím N (tedy při zvětšování frekvence měření neboli zkracování Δt) se hodnota $|\alpha_{\Delta t}|^{2N}$ zvětšuje (to je důsledkem nepatrných odchylek od exponenciálního rozpadového zákona). V limitním případě nekonečného N bychom dokonce dosáhli bez ohledu na t jednotkové pravděpodobnosti. To právě znamená, že opakované měření zpomaluje či (v limitním případě) zcela zastavuje roz-

pad. Trochu to připomíná známou aporii řeckého filozofa Zenona o nemožnosti pohybu letícího šípu, a tak se jev stal známým pod názvem kvantový Zenonův jev (nebo také efekt hlídacího psa).

Mimochodem ve výše popsaném mechanismu „100% bezinterakčního měření“ (viz rámeček na s. 273) je vlastně využito jakési optické varianty kvantového Zenonova jevu. Roli spontánní kvantové evoluce zde sehrává stáčení polarizace fotonu při každém oběhu přístrojem a opakovanému měření odpovídá průchod polarizačním děličem, za nímž je v jednom rameni umístěna bomba (když bomba nevybuchne, víme, že se foton „rozhodl“ pro horizontální polarizaci). Je-li pootočení polarizace v každém oběhu dostatečně malé, je foton s vysokou pravděpodobností nalézán stále v nezměněném (horizontálním) polarizačním stavu (bomba nevybuchuje).

Přece jen snad však má Everettův způsob pohledu nějaké výhody. Na jeho základě rozvíjejí Robert J. Griffiths, Murray Gell-Mann, James B. Hartle a další novou matematickou formulaci kvantové teorie, využívající tzv. *historií*. Tato formulace je pro svou nezávislost na existenci klasických měřicích přístrojů zvláště oblíbená u fyziků zabývajících se nejranějšími stadii vývoje vesmíru. V teorii kvantových historií se postupně zabydluje i koncepce dekoherence. Je zajímavé, že také jeden z tvůrců ideje kvantových počítačů (viz Vesmír 76, 250, 1997/5) David Deutsch věří, že efektivitu kvantových algoritmů je nutno chápat jako důsledek paralelismu výpočetních procesů probíhajících v různých světech. Při četbě podobných úvah zmátek v hlavě ubohého fyzikálního pěšáka dosahuje patologické míry. Ptá se: Je tomu opravdu tak? Budeme to někdy vědět? A mají vůbec podobná tvrzení smysl?

A přece si skáçou!

Vraťme se k příkladu rozpadajícího se atomu ($|\Psi_t\rangle = \alpha_t |e\rangle|0\rangle + \beta_t |g\rangle|1\rangle$). Představme si, že měření stavu atomu excitovaného v okamžiku $t = 0$ do stavu $|e\rangle$ periodicky opakujeme vždy po uplynutí časového intervalu Δt , který je velmi malý ve srovnání s dobou života τ stavu $|e\rangle$ (τ je doba, za kterou pravděpodobnost nalezení stavu $|e\rangle$ poklesne na určitý zlomek původních 100 %). Víme, že v prvním měření je pravděpodobnost výsledku „g“ úměrná hodnotě $|\beta_{\Delta t}|^2$. Jestliže je tento výsledek opravdu nalezen, zkolabuje podle standardní kvantové teorie stav atomu jen do členu $|g\rangle$ a při druhém měření bude již výsledek „g“ jistotou.⁶⁾ Naopak pravděpodobnost nalezení výsledku „e“ v prvním měření je úměrná hodnotě $|\alpha_{\Delta t}|^2$, a protože v takovém případě stav atomu přejde do výchozího stavu $|e\rangle$, ve druhém měření se vše opakuje. Použitím stejných úvah pro další a další měření v řadě vidíme, že naměřené výsledky dávají sekvence jako „eegggggg“, „eeeeeeegg“ atd. Takže to vypadá, jako by se atom rozpadal vždy ve velmi krátkém intervalu mezi dvěma měřeními. Ze spojitého časového vývoje koeficientů α_t a β_t v uvažované superpozici se pod vlivem měření stává skokový proces.

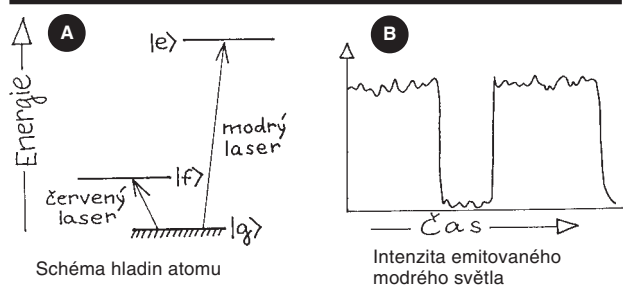
Takové náhlé změny stavu rozpadající se částice můžeme dnes přímo pozorovat. Pomocí důmyslného zařízení, nazývaného Paulova iontová past (viz Vesmír 69, 125, 1990/3), lze jediný (!) atom vystavit působení laserového svazku a pozorovat odezvu. Podobné experimenty probíhají v různých podobách již od poloviny osmdesátých let. Jeden z nich si teď popíšeme. Atomem je v tomto případě kladně ionizovaný

atom barya Ba^+ , a použitý laserový svazek je modré barvy. Absorbce fotonu vyslaného laserem vede k excitaci atomu do stavu $|e\rangle$, a ten se vyzářením fotonu stejné vlnové délky rozpadá do základního stavu $|g\rangle$ v procesech spontánní a indukované emise. Atom ve stavu $|g\rangle$ pak může znovu absorbovat foton a tak dále. Za určitou dobu působení laserového svazku na atom se vytvoří jakési rovnovážné rozdělení pravděpodobností pro nalezení atomu ve stavech $|e\rangle$ a $|g\rangle$.

Fotony vyzářené při indukované emisi nemůžeme odlišit od fotonů laseru. Naproti tomu fotony vyzářené při spontánní emisi se mohou šířit libovolnými směry, a tedy je lze registrovat odděleně. To vlastně představuje měření vypovídající o stavu atomu. Detekce každého takového fotonu by proto měla způsobit kolaps vlnové funkce iontu do stavu $|g\rangle$. Tento proces je možné využít k monitorování rozpadu jiného excitovaného stavu, řekněme $|f\rangle$, který je buzen druhým, červeným laserovým svazkem (viz obr. 5A). Excitace stavu $|f\rangle$ červeným světlem je mnohem méně pravděpodobná než excitace stavu $|e\rangle$ modrým světlem, a také rozpad $|f\rangle$ je mnohem pomalejší než rozpad $|e\rangle$. Když atom čas od času absorbuje červený foton a vytvoří stav $|f\rangle$, projeví se to zastavením registrace modrých fotonů z rozpadu stavu $|e\rangle$. Obnovení jejich registrace pak signalizuje, že stav $|f\rangle$ se rozpadl. Na obr. 5B je znázorněn časový průběh intenzity emitovaného modrého světla. Opravdu to vypadá, že atom si mezi jednotlivými stavy prostě jen tak přeskakuje.

Když si uvědomíme, že právě popsaný experiment podhaluje cosi ze snad nejintimnějšího života obyvatel kvantového světa, možná se nám trochu zatají dech. Interpretace těchto a podobných výsledků nám však znovu, ještě naléhavěji připomíná všechny pro-

5. Pozorování jediného atomu vystaveného působení dvou laserových svazků o různých frekvencích. Modré a červené světlo způsobuje přechody mezi stavy atomu podle části A obrázku. Protože detekce fotonu spontánně emitovaného ze stavu $|e\rangle$ znamená, že atom nemůže být ve stavu $|f\rangle$, lze měřením toku modrého světla monitorovat přechody atomu mezi stavy $|g\rangle$ a $|f\rangle$ – viz část B. Pozorované přechody mají skokový charakter.



6) Zanedbáváme zde malou (ale nenulovou) pravděpodobnost toho, že emitovaný foton bude zachycen, čímž se znovu vytvoří stav $|e\rangle$.

blémy okolo kvantového měření: Je skoková křivka na obr. 5B záznamem opravdových elementárních aktů kolapsu vlnové funkce? Jestliže redukce stavu atomu do $|g\rangle$ je způsobena detekcí spontánně vyzářeného „modrého“ fotonu, co se potom děje, když v určitém čase žádný foton nezachytíme (i když máme zapnutý detektor)? A kdy během relativně dlouhé odezvy detektoru na zachycený foton by vlastně k redukci stavu atomu mělo docházet? V důsledku interakce s laserovými paprsky nemůže být ani atom lapený v pasti považován za izolovaný systém. Nesouvisí tedy pozorované skoky spíše s vlastnostmi otevřených kvantových soustav než s přítomností měřicích přístrojů? Nevíme! Diskutované výsledky se mimochodem dají ekvivalentně popsat i v jazyce kvantových historií, z něhož je postulát kolapsu vytěsněn. Zdá se tedy, že na odpovědi si budeme muset ještě chvíli počkat.

Již jsme uvedli, že „skoková“ povaha energií a přechodů v atomech pohoršila kdysi E. Schrödin-

gera natolik, že zavedl spojitou vlnovou funkci $\Psi(\vec{r})$, která měla kvantové „nepřístupnosti“ uvést na pravou míru. Opravdu, kvantový svět, je-li ponechán sám sobě, vyvíjí se prostřednictvím $\Psi(\vec{r})$ hladce a deterministicky. Potíž je v tom, že takto pěkný je asi nikdy nemůžeme uvidět. A tak se zdá, že s kvantovými skoky v podobě náhlých změn stavů pozorovaných kvantových objektů se prostě musíme smířit. Možná, že nevratné změny kvantových stavů při měření jsou dokonce tím, co nás unáší dopředu v čase. A nebyl snad nějakým kvantovým skokem i samotný vznik vesmíru?

Inu, buh ví...⁷⁾

/pokračování přístě/

7) Čtenář obeznámený s matematickou formulací kvantové teorie nalezne zajímavé resumé současného stavu její interpretace např. v článku R. Omněse *Consistent interpretations of quantum mechanics* (Reviews of Modern Physics 64, No. 2, April 1992, s. 339). Méně formálně laděnou diskusi lze nalézt např. v knize E. Squirese *Conscious Mind in the Physical World* (Adam Hilger, Bristol 1990, kap. 11).

Zákon mimo zákon

(Úryvky z eseje o kvantové fyzice)

JOHN ARCHIBALD WHEELER

Jsou fyzikální zákony věčné a neměnné, nebo jsou – podobně jako biologické druhy – nestálé, jakési halabala povahy?

Hierarchické rozrušení rostlin a živočichů, jak dnes víme, povstává ze slepých náhod genetických mutací a přirozeného výběru. Podobně zákony plynů, vztah tlaku, objemu a teploty pro různé substance či zákony termodynamiky mají původ v chaosu molekulárních srážek. Ale pokud jde o molekuly samotné – o částice, z nichž jsou složeny, a silová pole, která je vážou – bylo by možné, že také ony odvozují svůj způsob chování, svou strukturu, a dokonce i svou existenci z mnohočetných náhod?

Takové otázky o „plánu“ fyziky bychom asi nekladli, kdybychom už měli aspoň jeho kostru. Jenže ji nemáme. Tu a tam potkáme někoho, kdo si ještě myslí, že fyzika spočívá právě v držení takového plánu. Opakuje Laplaceovu vizi, jak jí rozumí: pohybové zákony i počáteční souřadnice a hybnosti jsou určeny, a tedy je určena i budoucnost. Vesmír je stroj. Jenže toto paradigma je už překonáno. Kvantová mechanika nám dovoluje znát souřadnici nebo hybnost, ale ne oboje. O počátečních hodnotách, které Laplace potřeboval, princip komplementarity říká, že polovina z nich neexistuje a ani nemůže existovat [...] Vesmír není laplaceovský. Možná je halabala. Ale raději doufáme, že jednou pochopíme nezbytnost kvantových prvků v jeho stavbě.

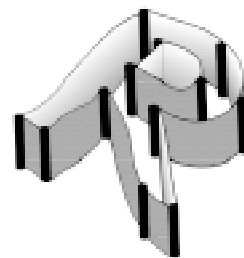
Poslechněme si historiku o hře s dvaceti otázkami. Pravidla jsou jednoduchá – jeden účastník je poslán ven z místnosti, ostatní se domluví na nějakém slově, dotýkný se vrátí a začne se ptát: „Je to živé?“ „Ne.“ „Je to zde na Zemi?“ „Ano.“ Otázky jdou od jednoho k druhému, dokud slovo není uhodnuto. Tazatel vítězí, jestliže mu stačilo dvacet otázek nebo méně. Jdete ven a čekáte tam neuvěřitelně dlouho. Když vás znovu vpusťí, všichni se usmívají. Odpovědi na vaše otázky přicházejí nejprve rychle, pak se ale každé čekání protahuje – divně, když odpověď je vždy jen jednoduché „ano“ nebo „ne“. Nakonec se zeptáte, jestli to slovo je „mrak“. „Ano.“ zní odpověď a všichni se smějí. Vysvětlují, že když jste byl venku, dohodli se nedomlouvat dopředu žádné slovo. Každý v kruhu mohl na jakoukoliv vaši otázku odpovědět „ano“ i „ne“, jak se mu chtělo. Nicméně když odpověděl, musel mít na mysli nějaké konkrétní slovo sluchitelné se svou odpovědí i s odpověďmi na všechny vaše předchozí otázky. Není divu, že rozhodnutí mezi „ano“ a „ne“ byla stále těžší!

Jaká je pointa? Srovnajte hru v jejích dvou podobách s fyzikou v jejích dvou formulacích, klasické a kvantové. Zaprvé, mysleli jste, že slovo už existuje „někde mimo“, jako si dříve fyzikové mysleli, že poloha a hybnost existují „někde mimo“, nezávisle na pozorování. Zadruhé, informace o slově přicházela na svět krok za krokem skrze otázky, které jste kladli, jako i informace o elektronu přichází na svět krok za krokem, skrze experimenty, které se pozorovatel rozhodne provést. Zatřetí, kdybyste se byli rozhodli pro jiné otázky, došli byste k jinému slovu – právě jako experimentátor by si

vytvořil jinou představu, co se s elektronem odehrávalo, kdyby měřil jiné veličiny nebo i stejné veličiny v jiném pořadí. Začtvrté, moc, kterou jste prokázali při uvedení slova „mrak“ na svět, byla jen částečná. Hlavní část výběru spočívala v odpovědích ano-ne vašich kolegů. Podobně experimentátor má prostřednictvím výběru experimentů vliv na to, co se s elektronem stane, ale ví, že je nejisté, co každé z jeho měření odhalí. Zapáté, ve hře existovalo pravidlo, podle něhož každý účastník musel volit své ano nebo ne ve shodě s nějakým slovem. Pozorování ve fyzice jsou také vždy konzistentní. Jeden člověk musí být schopen sdělit druhému srozumitelnou řečí svá zjištění a druhý je musí být schopen verifikovat [...]

Srovnání mezi světem kvantových měření a hrou dvaceti otázek v mnohém kulhá, ale vystihuje to hlavní. V reálném světě kvantové fyziky *žádný elementární jev není jevem, dokud není pozorovaným jevem*. V naší hře žádné slovo není slovem, dokud není povyšeno na skutečnou výběrem otázek a odpovědí. „Mrak“ čekající, až ho objevíte, když vstoupíte do místnosti? Naprostý přelud! Hybnost elektronu v atomu $p_x = 1,4 \times 10^{-24}$ kg.m/s nebo jeho poloha $x = 0,31 \times 10^{-10}$ cm čekající na změření? Čirá fantazie! Thomas Mann možná přeháněl, když navrhl: *...jsme to ve skutečnosti my, kdo způsobuje to, co se jeví, jako že se nám stává*. Je ale nepopíratelné, že každý z nás jakožto pozorovatel je také jedním z účastníků procesu přivádění „reality“ na svět.

To, co nazýváme „realita“ – symbolizované písmenem „R“ na obrázku – se skládá z zpracované papírové konstrukce představ a teorií upevněné mezi několika železnými pilíři pozorování



Setkat se s kvantovým světem je cítit se jako cestovatel z daleké země, který poprvé v životě vidí automobil. Ta věc má zjevně dávat nějaký užitek, a to podstatný, jenže jaký? Člověk může otevřít dveře, stáhnout a vytáhnout okénko, zapnout a vypnout světla a snad i protočit startér, to všechno bez znalosti hlavního smyslu. Svět kvant je ten automobil. Používáme ho v tranzistoru k řízení strojí, v molekule k přípravě anestetika, v supravodiči k vytvoření magnetu. Je možné, že celou dobu postrádáme to hlavní, totiž roli kvantových principů v konstrukci vesmíru samotného?

Otočili jsme klíčkem startéru. Motor se nerozběhl. □

/Z knihy *Quantum Theory and Measurement* (ed. J. A. Wheeler a W. H. Zurek, Princeton University 1983) přeložil Pavel Cejnar/