

# Kvantové hlavolamy I

PAVEL CEJNAR  
MILOSLAV DUŠEK

Hamlet: Vidíte tamten mrak? Že vypadá jako velbloud?

Polonius: Na mou věru, dočista jako velbloud.

Hamlet: Řekl bych, že jako lasička.

Polonius: Záda to má jako lasička.

Hamlet: Či jako vorvaň?

Polonius: Úplně jako vorvaň.

W. Shakespeare, Hamlet (v překladu E. A. Saudka)

*Kvantová teorie je dnes asi nejlépe testovaná fyzikální teorie vůbec. Potvrzuje ji obrovské (a každý den narůstající!) množství experimentálních dat z nejrůznějších oborů fyziky – optiky, fyziky kondenzované fáze, fyziky atomů, jader a elementárních částic... Přestože kvantové zákony poznáváme již téměř sto*

1. Účastníci Solvayské konference v roce 1927, na níž se v bouřlivých diskusích formovala kvantová mechanika. Snímek archiv

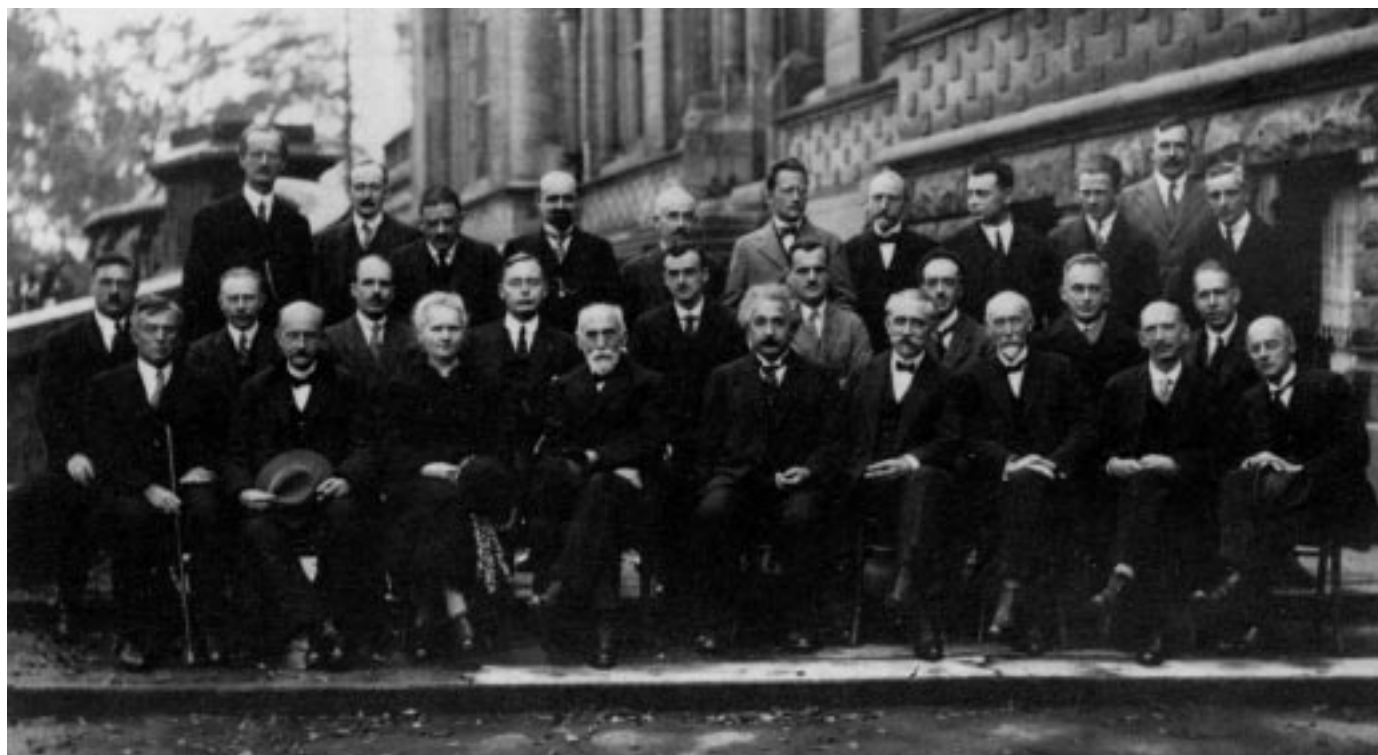
*let, jejich podstata nás dodnes nepřestává udivovat. Umíte si třeba představit, že jeden foton může současně procházet různými dráhami, ale přitom se při každém měření dá nachytat jen na jedné z nich?*

## Kvantové skoky

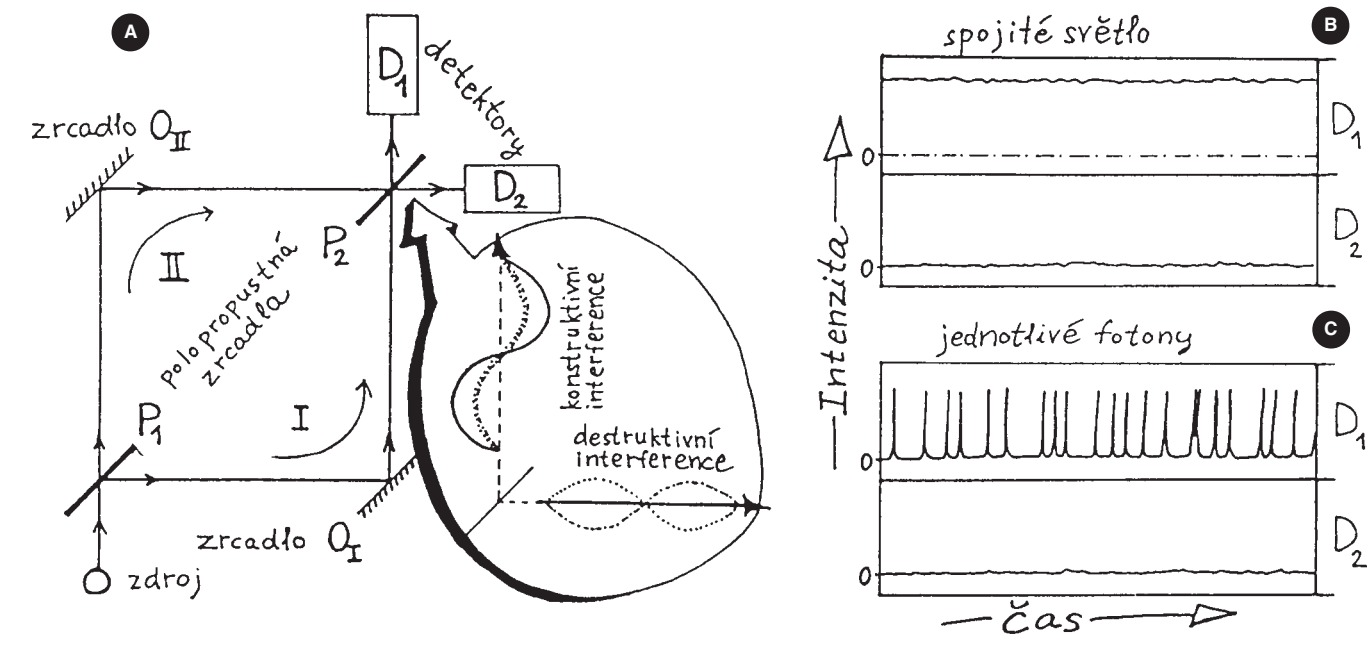
Asi nejznámějším projevem kvantové mechaniky, z něhož se odvozuje i její jméno, je *kvantování* fyzikálních veličin. Tím označujeme skutečnost, že fyzikální veličiny mají, na rozdíl od klasické (tj. předkvantové) fyziky, nespojitý (diskrétní) charakter. Např. energie elektronu v atomu vodíku nabývá jen některých hodnot, které po vynesení na číselnou osu tvoří posloupnost vzájemně oddělených bodů; všechny ostatní hodnoty jsou „zakázány“. Kvantování energie najdeme kromě atomů také v krystalových mřížkách, molekulách, atomových jádrech, soustavách vázaných kvarků a mnoha jiných mikroskopických systémech.

O kvantování se vědělo vlastně již od počátku našeho století, kdy Albert Einstein a Max Planck ukázali, že výměna energie mezi elektromagnetickým zářením a látkou se (při dané frekvenci záření) uskutečňuje jen po celistvých násobcích jistých minimálních porcí. To je způsobeno kvantováním energie elektronů v atomech a zároveň existencí „kvant“ elektromagnetického záření, fotonů. Mezi první, kdo se fenomén kvantování pokoušeli vysvětlit, patřili Niels

RNDr. Pavel Cejnar, Dr., (\*1964) a RNDr. Miloslav Dušek, Dr., (\*1964) vystudovali Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy. Pavel Cejnar se na katedře jaderné fyziky MFF UK zabývá statistickými přístupy v modelování struktury atomových jader, jaderných procesů a interakcí jader s okolím. Miloslav Dušek se na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci věnuje kvantové a koherenční optice, kvantové „nelokalitě“ a kvantové kryptografii. (e-mail: pavel.cejnar@mff.cuni.cz, dusek@optnw.upol.cz)



E. Henriot  
A. Piccard  
P. Debye  
I. Langmeir  
M. Knudsen  
W. L. Bragg  
M. Planck  
M. Curieová  
E. Herzén  
H. A. Kramers  
H. A. Lorentz  
T. de Donder  
P. A. M. Dirac  
A. Einstein  
E. Schrödinger  
E. Vershaffelt  
W. Pauli  
A. H. Compton  
P. Langevin  
Ch. E. Guye  
R. H. Fowler  
W. Heisenberg  
M. Born  
C. T. R. Wilson  
L. Brillouin  
N. Bohr  
O. W. Richardson



Bohr a Arnold Sommerfeld. Podle nich se elektrony v atomech mohou pohybovat jen po určitých orbitách, jimž právě odpovídají výše zmíněné diskrétní energie. Tato teorie však byla jen jakýmsi nouzovým vysvětlením toho, že atomy jsou stabilní navzdory klasické elektrodynamice, podle níž atomární elektrony mají „padat“ do atomového jádra v důsledku ztráty energie vyzařováním. Teprve v roce 1926 publikoval Erwin Schrödinger sérii článků s názvem *Kvantování jako problém vlastních hodnot*, v nichž jsou principy kvantování vyloženy deduktivním způsobem, nikoliv pouze fenomenologicky. Spolu s asi o rok staršími pracemi Wernera Heisenberga je pokládáme za základ současné podoby kvantové mechaniky.

Podle původních Bohrových představ mohou stavy atomu prodělávat jen skokové změny (přechody mezi jednotlivými kvantovými stavy za současného vyzaření fotonu odpovídající energie). Schrödinger viděl hlavní význam své práce v tom, že se v ní diskrétní energetická spektra atomů a náhlé kvantové přechody ukázaly být důsledkem matematicky jasných postulátů kladených na jistou *spojitou a plynule* se vy-

#### KVANTOVÁNÍ ENERGIE KYVADLA

Kvantová teorie je univerzální, a proto se kvantování týká i makroskopických objektů. Zde jsou však jeho projevy tak subtilní, že odchytky od klasické mechaniky téměř nepozorujeme. Představme si třeba jednoduché kyvadélko: Kulička zavěšená na velmi lehkém závěsu je gravitační silou donucena vykonávat kmity kolem své rovnovážné polohy. Energie takových kmitů (tj. maximální kinetická energie kývajících se kuličky) nabývá typicky hodnot řekněme desetitisícin joulu (1 J je asi 0,239 kalorie) – např. při délce závěsu 20 cm, maximální výchylce ze svislé polohy  $5^\circ$  a hmotnosti kuličky 20 gramů je energie kmitů v zemském tíhovém poli rovna asi  $1,5 \times 10^{-4}$  J. Podle klasické mechaniky můžeme tuto energii měnit spojité (stačí nepatrně změnit počáteční výchylku nebo impuls kuličky), ve skutečnosti se však i zde uplatňuje kvantování. Jednotlivé energetické hladiny jsou ale vzdáleny jen o zhruba  $10^{-33}$  J, což je hodnota z makroskopického hlediska zcela nicotná (je např. silně „přehlušena“ i nepatrným termickým chvěním kyvadélka, jehož energie je při běžných teplotách řádu  $10^{-21}$  J, tedy asi bilionkrát větší). V důmyslných experimentech se ale kvantování podařilo prokázat nejen na mikroskopické, ale i na makroskopické úrovni.

2. Interferenční pokus diskutovaný v textu. Schéma Machova-Zehnderova interferometru je zakresleno v části A. Grafy vpravo ukazují časovou závislost světelné intenzity registrované detektory  $D_1$  a  $D_2$  pro spojité světelné tok (B) a jednotlivé fotony procházející interferometrem (C). Veškerá intenzita světla vstupujícího do přístroje je v důsledku interference (viz obrázek v „publině“) registrována pouze detektorem  $D_1$ . Aby to bylo možné, jednotlivé fotony musí procházet „oběma rameny současně“!

výjící funkci polohy elektronu, tzv. vlnovou funkci. Ukázalo se ale, že ani to k zažehnání kvantových diskontinuit nestačí. Vypráví se<sup>1</sup>, že po jedné z celodenních diskusí s Bohrem Schrödinger vykřikl: *Jestliže budeme muset jít dál s těmi prokletými kvantovými skoky, pak lituji, že jsem se do toho kdy míchal*. Bohr odpověděl: *Ale my ostatní jsme vám za to velmi vděční, protože vaše práce udělala pro zdokonalení této teorie mnoho*. Vlnová funkce a s ní související fyzika skutečně přinesly do našeho chápání přírody (ale i do chápání mezi tohoto chápání) tak zásadní změny, že diskuse o jejich důsledcích dosud pokračuje. Podívejme se, v čem tyto změny spočívají<sup>2</sup>.

#### Interference jednoho fotonu

Uvažujme jednoduchý optický přístroj, tzv. Machův-Zehnderův interferometr, na obr. 2A. Paprsek světla ze zdroje dopadá na polopropustné zrcadlo  $P_1$ , které polovinu intenzity propouští a polovinu odráží, takže dopadající paprsek stěpí na paprsky dva. Každý z nich prochází jedním ramenem interferometru (I či II), odráží se od obyčejného zrcadla  $Q_I$  nebo  $Q_{II}$ , aby dospěl k polopropustnému zrcadlu  $P_2$  (opět s rovným poměrem dělení intenzit), kde se sbíhá s druhým paprskem. Interferometr je navržen tak, že optické dráhy paprsků v obou ramenech jsou přesně stejné. Za jistých podmínek se světlo za zrcadlem  $P_2$  šíří pouze ve směru paprsku z větve I, tedy nahoru. Detektor  $D_1$  pak registruje veškerou inten-

<sup>1</sup> M. Jammer: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Mc Graw-Hill, 1966.

<sup>2</sup> Skvělý výklad základů kvantové mechaniky najdete např. v posledním dílu přednášek Richarda P. Feynmana (R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *Feynmanove přednášky z fyziky 5*, Alfa, Bratislava 1990) nebo v knize D. Z. Alberta *Quantum Mechanics and Experience* (Harvard University Press, 1992). Velmi zajímavým výběrem původních prací o principiálních otázkách kvantové teorie je sborník *Quantum Theory and Measurement*, redigovaný J. A. Wheelerem a W. H. Zurekem (Princeton University 1983). Pěkné příklady nezvyklostí kvantových jevů lze najít také v knize R. Penrose *Shadows of the Mind* (Oxford University Press 1994, 1996).

zitu, zatímco detektor  $D_2$  neregistruje intenzitu žádnou (viz obr. 2B).

Tento jev je učebnicovým příkladem tzv. *interference* světla, dokládajícím jeho vlnovou povahu (světlo je elektromagnetické vlnění). Geometrickou představu paprsků musíme nahradit představou světelných vln šířících se rameny interferometru. Prvky interferometru lze udělat tak, že při průchodu polopropustným zrcadlem vlna plynule pokračuje, zatímco při každém odrazu dochází k jejímu posunu o čtvrtinu periody (tj. o čtvrtinu vlnové délky). Světlo dopadající do každého z detektorů se skládá z dvojice vln prošlých oběma rameny, které se sčítají do vlny výsledné. Obě vlny dopadající do  $D_1$  se na své cestě odrazily dvakrát. Jejich vzájemný posun je tedy nulový, takže se sčítáním zesilují (nastává konstruktivní interference). U detektoru  $D_2$  vlna prošla ramenem I prodělala tři odrazy, zatímco vlna z ramene II pouze jeden. Jejich vzájemný posun je proto roven polovině periody, obě vlny jsou tedy v protifázi a v součtu dají nulu (destruktivní interference)<sup>3</sup> – viz obr. 2.

Již jsme se zmínili o tom, že podle moderní fyziky je světlo proud kvant, tzv. fotonů. Obvyklé zdroje vyzařují tak obrovské počty fotonů za vteřinu, že nespojitá povaha jejich světla není patrná. V takových případech dobře funguje klasická vlnová teorie. Intenzitu světelného zdroje lze ale snížit až do té míry, že detektory za zrcadlem  $P_2$  pouze tu a tam registrují impuls, odpovídající *jedinému* dopadlému fotonu (pro jednoduchost budeme předpokládat stoprocentní účinnost registrace fotonů oběma detektory) – viz obr. 2C. Budeme-li postupně zeslabovat intenzitu světla, zjistíme, že interferenční chování pozorované při vyšších intenzitách, tj. fakt, že světlo dopadá pouze na detektor  $D_1$ , se při tom nemění. Viděli jsme, že klíčem pro pochopení interference při vyšších světelných intenzitách je vlnová představa, v níž se světlo šíří zároveň oběma větvemi interferometru. Jak ale vysvětlit interference pro jediný foton, jehož současnou přítomnost v obou ramenech interferometru si neumíme představit? Jednoduchý předpoklad, že na polopropustných zrcadlech se foton s pravděpodobností 50 % odrazí a s pravděpodobností 50 % projde, zjevně nepostačuje, neboť připouští i takový vývoj, při němž se foton na obou polopropustných zrcadlech odrazí, či naopak na obou pro-

jde, což by vedlo k jeho registraci detektorem  $D_2$ , tedy k rozporu s experimentem.

Potíž je v tom, že představa částice (fotonu) jako dobře prostorově lokalizovaného objektu, který se nemůže vyskytovat zároveň na dvou odlišných místech, je pozůstatkem „klasického“ myšlení, jež v kvantovém světě neplatí. Abychom vysvětlili interferenční chování jednotlivých fotonů v našem experimentu, musíme se této představě vzdát a připustit, že *jeden foton* se opravdu může šířit *oběma rameny současně*. (To že dělají? Fuj!) Jak uvidíme dále, podle kvantové teorie je stav fotonu za zrcadlem  $P_1$  dán tzv. superpozicí obou možných alternativ šíření, tj. průchodu větví I a průchodu větví II.

To však ještě není všechno. Představme si nyní, že z našeho optického přístroje odstraníme polopropustné zrcadlo  $P_2$  (viz obr. 3A). Interference pak samozřejmě zmizí – fotony budou dopadat jak do detektoru  $D_1$ , tak do  $D_2$  (obr. 3B). Jestliže se jediný foton, jak jsme řekli, šíří oběma rameny současně, pak bychom mohli očekávat, že bude registrován oběma detektory zároveň. Chyba lávky! Ve skutečnosti jediný foton může být zaregistrován *pouze jedním detektorem* – je nedělitelný, tj. nelze zaregistrovat něco jako „půlku fotonu“ (obr. 3C). Jak je to ale možné? To se teď foton pro změnu šíří jen jedním ramenem?

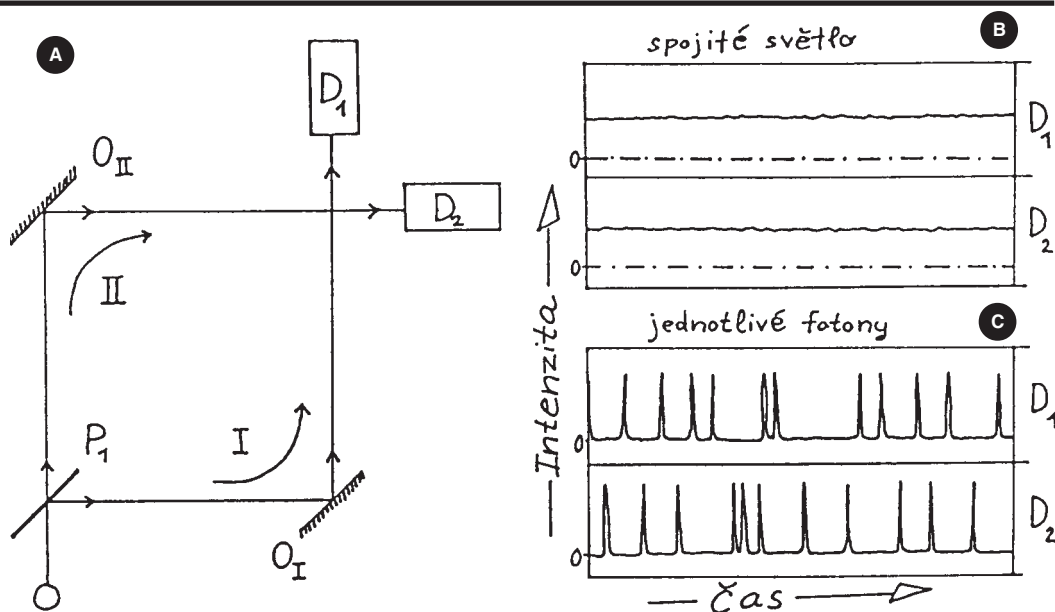
### Brání se rozum

Výše popsané jevy jsou dnes již dobře prokázaným experimentálním faktem<sup>4</sup> a zdá se, že je nelze opatřit žádným „klasickým“, „zdravému rozumu“ pocho-

<sup>3</sup> Prakticky lze interference pozorovat pouze tehdy, je-li použité světlo dostatečně koherentní, tj. jsou-li jeho fázové poměry i na relativně velkých vzdálenostech (větších než případné rozdíly délek obou ramen interferometru) vzájemně dobře definovány (tzn. neporušeny náhodnými vlivy při procesu vyzařování), tedy lze-li světelné vlnění v dané rozměrové škále popsat jednoduchou periodickou funkcí.

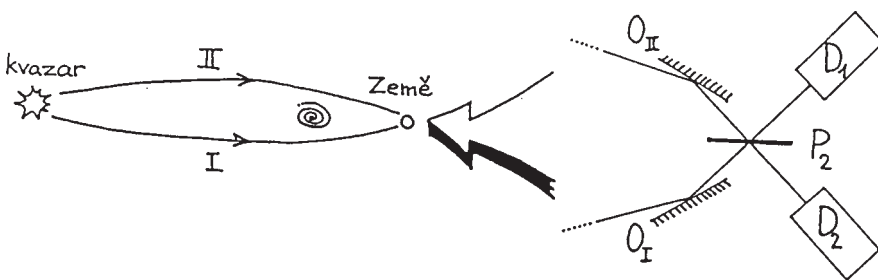
<sup>4</sup> Obtížnost těchto experimentů souvisí především s nesnadností přípravy „jednofotonových“ stavů světla. Při použití běžných zdrojů světla nelze např. ani za velmi nízkých intenzit zcela vyloučit případy, kdy v interferometru bude naráz více než jeden foton. Existují však způsoby, jak připravit stavy světla, které se jednofotonovým velmi blíží. Diskusi na toto téma i popis experimentu dokazujícího jednofotonovou interference najdete třeba v článku A. Aspecta a P. Grangiera *Wave-particle duality for single photons* (Hyperfine Interactions, Vol. 37, s. 3, 1987). Zasvěcenějším čtenářům doporučujeme též knihu J. Peřiny, Z. Hradila a B. Jurča *Quantum Optics and Fundamentals of Physics* (Kluwer, 1994).

3. Část A ukazuje schéma bezinterferenční analogie pokusu z obr. 2. V částech B a C je časová závislost světelné intenzity registrované detektory  $D_1$  a  $D_2$  pro spojitý světelný tok (B) a jednotlivé fotony (C). Oba detektory teď měří stejnou intenzitu, tj. do každého z nich dopadá průměrně polovina z celkového počtu fotonů vstupujících do přístroje. Zdá se ale, že každý jednotlivý foton projde vždy jen jedním ramenem.



### ASTRONOMICKÁ VERZE INTERFERENČNÍHO POKUSU

J. A. Wheeler ukázal, že experiment se zpožděnou volbou se dá provést také v poněkud větším měřítku, dávajícím bizarnosti kvantového dualizmu snad ještě více vyniknout. Nedávno bylo totiž zjištěno, že dva astronomické objekty s označením 0957+561A a 0957+561B, oddělené úhlovou odchylkou 6", jsou ve skutečnosti obrazem jediného astrofyzikálního útvaru (kvazaru). Ke zdvojení jeho obrazu dochází gravitačním rozštěpením dráhy fotonů působením galaxie, nacházející se asi na čtvrtině cesty od Země ke kvazaru (viz obrázek). Obě rozštěpené větve šíření světla tvoří vlastně dvě ramena pomyslného interferometru. Protože doba putování fotonů od kvazaru k Zemi je několik miliard let, mohlo by být rozhodnutí o umístění či neumístění zrcadla  $P_2$  do cesty fotonům pohodlně učiněno v lidských časových měřítkách (např. při ranní kávě).



ného interferometru. Protože doba putování fotonů od kvazaru k Zemi je několik miliard let, mohlo by být rozhodnutí o umístění či neumístění zrcadla  $P_2$  do cesty fotonům pohodlně učiněno v lidských časových měřítkách (např. při ranní kávě).

pitelným vysvětlením. Mohli bychom se třeba domnívat, že foton se před vstupem do interferometru nějak „dozví“ o přítomnosti či nepřítomnosti zrcadla  $P_2$  a „vybere“ si podle toho jednu ze dvou alternativ svého chování: buď se šíří zároveň oběma rameny jako klasická vlna (měření s  $P_2$ ), nebo si zvolí pouze jedno rameno jako klasická částice (měření bez  $P_2$ ). Představme si ale, že rozhodnutí o umístění či neumístění zrcadla  $P_2$  do cesty fotonu je učiněno teprve v poslední nanosekundě před jeho průchodem místem  $P_2$ . Za tuto dobu světlo uletí jen asi 30 cm. Pokud je délka ramen větší, bude tedy foton určitě za vstupním zrcadlem  $P_1$ , takže svou volbu již nemůže změnit. Přesto je podle kvantové teorie výsledek pokusu nezávislý na tom, zda rozhodnutí o zrcadle  $P_2$  bylo učiněno dlouho před měřením, či až v poslední okamžiku. Nedá se nic dělat, s klasickou logikou jsme zde prostě v koncích!

Právě popsany experiment se zpožděnou volbou navrhl r. 1978 John Archibald Wheeler a v poněkud modifikované podobě jej uskutečnili r. 1986 na univerzitách v Mnichově a Marylandu. Místo mechanického ovládní zrcadla  $P_2$  (které by v tak krátkých časech nebylo technicky proveditelné) byl do jednoho ramene interferometru vložen ultrarychle (tj. v nanosekundových časech) aktivovatelný optický element, umožňující zjistit přítomnost fotonu v tomto rameni. Předpovědi kvantové teorie v tomto i dalších podobných pokusech byly zcela potvrzeny.

Musíme tedy přijmout jako fakt, že při měření interference (tj. se zrcadlem  $P_2$ ) je foton „vlnou“, zatímco při měření dráhy (tj. bez  $P_2$ ) je *týž foton* „částicí“. Toto dvojaké chování je příkladem obecné vlastnosti kvantového světa, které se často říká vlnově-částicový *dualizmus* (viz také J. Podolský, *Vesmír* 71, 193–196, 1992). Fotony (a jak uvidíme dále, i další částice) mají zkrátka dvě tváře (podobně jako Dr. Jekyll alias Mr. Hyde), které se jakoby vzájemně doplňují – jsou komplementární.

Na cestě k pochopení kvantových jevů se navíc musíme vzdát i tak významného atributu klasické fyziky, jakým je její striktní determinizmus. V bezinterferenčním uspořádání je totiž podle kvantové mechaniky *princiálně nemožné* předpovědět, do jakého z detektorů foton dopadne; pro obě alternativy lze stanovit pouze pravděpodobnosti. Zdá se tedy, že náhoda je jaksi „vtištěna“ do základů našeho světa.

N. Bohr, spoluvůdce kvantové teorie a její brilantní advokát v diskusích s A. Einsteinem<sup>5</sup>, se důsledky kvantových zákonů pro naše myšlení a vidění světa snažil převést do srozumitelného jazyka. V jeho po-

<sup>5</sup> Je snad již obecně známo, že Einstein v „boha hrajícího v kostky“ nevěřil.

jetí kvantový svět ponechává mnoho svých vlastností neurčitých a obsahuje tak velké bohatství různých alternativ. My, makroskopičtí tvorové, se tyto vlastnosti snažíme dobýt pomocí klasických měřicích přístrojů, a proto dospíváme ke zdánlivě neslučitelným a ne přesně předpověditelným výsledkům. Samotný akt měření se přitom stává podstatným účastníkem fyzikálních dějů. J. A. Wheeler shrnuje Bohrovy úvahy takto: *Žádný elementární jev není jevem, dokud není registrovaným (pozorovaným) jevem [...] dokud není doveden do konce nevratným aktem zesílení, jakým je zčernání zrna bromidu stříbra ve fotografické emulzi nebo spuštění impulsu fotodetektoru.* Jak uvidíme příště, matematickým vyjádřením bohatství možností skrývajících se v kvantovém světě je princip superpozice, zatímco pravděpodobnostní vyčlenění výsledné podoby se děje v procesu kvantového měření.

/pokračování příště/

**JAMES H. SHIRLEY, RHODES W. FAIRBRIDGE** (editoři): **Encyclopedia of Planetary Sciences** (Encyclopedia of Earth Sciences Series), Chapman & Hall, Londýn 1997. 990 stran, 450 grafů a schémat, 180 černobílých a 63 barevných snímků, 1 CD-ROM. - ISBN 0-412-06951-2

Další svazek řady encyklopedií nakladatelství Chapman & Hall, představujících přehled znalostí o naší planetě, se zaměřuje daleko za její hranice – na tělesa sluneční soustavy. Hlavním redaktorem řady je R. W. Fairbridge, bývalý profesor geologie na Kolumbově univerzitě. Redaktorem svazku je J. H. Shirley, člen vědeckého týmu expedice sondy Galileo k Jupiteru. Na tvorbě přibližně 450 statí se podílelo přes 200 významných vědců z celého světa, mimo jiné Ing. Ivanka Charvátová, Csc., z Geofyzikálního ústavu AV ČR (odbornice na pohyb Slunce kolem těžiště sluneční soustavy, viz *Vesmír* 70, 270–273, 1991).

Autoři popisují nejen jednotlivé objekty sluneční soustavy včetně Slunce, jejich složení, vlastnosti jejich atmosfér, ale také metody a postupy jejich zkoumání dnes i v historii. Součástí knihy je i podrobný rozbor expedic pozemských sond k jednotlivým tělesům sluneční soustavy, včetně souhrnu získaných vědeckých dat. Zahrnuty jsou i články zabývající se nebeskou mechanikou. Řada hesel je věnována osobám, které se zasloužily o zkoumání těles sluneční soustavy, počínaje Aristarchem ze Samu.

CD-ROM, připravený ve spolupráci s Národním střediskem kosmických vědeckých dat NSSDC v Greenbeltu, MD, obsahuje přes 200 snímků kosmických objektů, pořízených americkými i ruskými sondami. Lze jej používat jak na PC, tak na počítačích řady Macintosh.

Encyklopedie je zdrojem mnoha informací o naší sluneční soustavě, včetně těch nejnovějších.

**Antonín Vítek**