

V predošlej časti sme opísali zvláštny fenomén – kvantové stavy, vďaka ktorým celá kvantová fyzika dostala punc „nelokálnej teórie“. Tieto stavy sa ukazujú byť také dôležité, že dostali vlastné meno – previazané stavy (entangled states). Dnes si ukážeme niekoľko praktických ukážok, v ktorých tieto stavy majú hlavnú úlohu, poodhalíme závoj tajomnosti nad kvantovým klonovaním, možnosťou nadsvetelnej komunikácie a kvantovej teleportácie. Ešte jedno upozornenie: ak ste nečítali predchádzajúcu časť, bude vhodné ak to urobíte ešte pred tým, ako sa pustíte do tejto.

V našom svete je kopírovanie úplne bežné a ani nás len nenapadne premýšľať, aké by to bolo keby sme kopírovať nemohli. Kopírovanie je aj veľmi dôležitý prostriedok našej výchovy a vzdelávania. V detstve preberáme niektoré návyky svojich najbližších, kopírujeme ich správanie, opakujeme po nich slová a vety. Aké by to bolo keby sme si stranu knihy nemohli odkopírovať, ako by fungovalo rozmnožovanie bez možnosti vytvárania replík DNA? Kvantová fyzika však napriek tomu kopírovanie zakazuje. Ak máme jediný kvantový objekt pre nás v neznámom stave, tak tento objekt nedokážeme naklonovať, namnožiť.

KVANTOVÉ KLONOVANIE

Aby sme pochopili kvantový zákaz klonovania, tak si musíme uvedomiť nasledovný fakt. Akékoľvek kopírovanie skrýva v sebe aj možnosť „čítania“, t.j. informáciu, ktorú kopírujeme, vždy aj poznáme, resp. máme možnosť ju spoznať. Kopírovací stroj najprv prečíta obsah papiera (pixel po pixeli) a potom vytlačí nové kópie. V kvantovej fyzike je situácia iná. Proces čítania informácie o stave je procesom merania. Meranie spinu $\frac{1}{2}$ má iba dva možné výsledky, avšak počet možných stavov jedného spinu je oveľa väčší, dokonca nekonečný. Neexistuje meranie, ktorým by sme vedeli „prečítať“ úplnú informáciu o stave (ak máme iba jediný kvantový objekt). Opakovanie merania na našom spine nám tiež nepomôže. Meranie kvantového objektu totižto drasticky zmení pôvodný stav spinu a pôvodná informácia je navždy stratená. Ak chceme zistiť, o ktorý stav ide, tak potrebujeme oveľa viac spinov v tomto stave. Z jedného spinu informáciu o jeho stave nevieme prečítať,

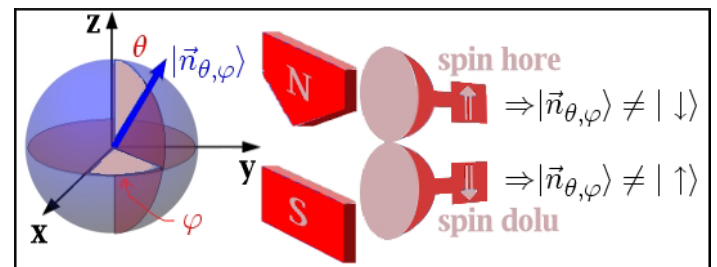
Množina stavov jedného spinu $1/2$ je spojitá nekonečná.

Stavy sú reprezentované dvojicou uhlov θ, φ , resp. smerom, a tvoria guľu (obr.1). Vďaka vlastnostiam kvantového merania z jedného spinu vieme získať iba dve hodnoty, ktoré nám veľa o uhloch θ, φ nepovedia. Konkrétny stav spinu zostáva prakticky rovnako záhadný ako bol pred uskutočnením merania. Paradoxne, jediné čo vieme povedať, je stav, v ktorom sa spin určite nenachádza. Spin meriame pomocou zariadení, ktoré zisťujú hodnotu spinu v určitom smere. Majú iba dva možné výsledky: spin hore (+1), alebo spin dolu (-1). Ak nameriame spin dolu, tak vieme, že spin sa nenachádzal v stave „spin hore“, a naopak. To znamená, že okrem tohoto stavu sa spin môže nachádzať v stave s ľubovoľnými hodnotami θ, φ . Tento stav budeme označovať symbolicky ako $|\vec{n}_{\theta, \varphi}\rangle$.

a teda ju nemôžeme vedieť ani skopírovať. Metóda „premeraj

a vyrob“, ktorú používame pre klasické objekty, nám pri klonovaní jedinej repliky kvantového stavu veľmi nepomôže.

Je kopírovanie kvantových stavov skutočne nemožné? Stále by ešte mohla mať kvantová teória nástroj, ktorý by potrebu prečítania informácie obišiel. Situácia je však taká, že takýto nástroj neexistuje a kvantová fyzika skutočne zabraňuje kopírovaniu kvantových stavov. Kopírovanie v rámci kvantovej teórie je možné len v prípadoch, ak sa obmedzíme iba na istú podmnožinu stavov. Napríklad ak vieme, že spin je v jednom z dvoch stavov $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$, tak kopírovať vieme. Môžeme použiť metódu *premeraj a vyrob*, alebo aj procedúru pri ktorej meranie priamo nevystupuje. Ďalšou možnosťou je tzv. *aproximatívne kopírovanie*, ktoré namiesto dvoch presných kópií vytvára iba dve približné kópie. Niekedy sa môže hodiť aj takéto nedokonalé zariadenie a prísne vzaté aj pri klasickom kopírovaní je na mikroskopickú úroveň každá kópia iná. Ako najlepšie sme schopní kolnovat? Tejto otázke a možnostiam vytvárania približných kópií sa venoval aj slovenský fyzik *Vladimír Bužek* (pozn. red.: ako prvý získal ocenenie *Vedec roka SR*, rozhovor s ním je v *Quarku* 7/1998).



Obr.1. Stavy spinu $\frac{1}{2}$. Na obrázku je znázornená množina všetkých možných stavov jedného spinu $\frac{1}{2}$. Každý bod na povrchu sféry zodpovedá inému kvantovému stavu $|\vec{n}_{\theta, \varphi}\rangle$. Vidno, že každý stav určuje smer (vektor) v trojrozmernom priestore, ktorý je definovaný dvojicou uhlov θ, φ . Pravá časť obrázku zobrazuje merací prístroj, ktorý určuje hodnotu spinu v smere osi z. Po prechode medzi magnety je spin zaznamenaný v jednom z dvoch detektorov (dva výsledky merania). Horný detektor zaznamenáva zložku spinu v smere osi z a dolný detektor zaznamenáva zložku spinu v protismere osi z. Do ktorého z detektorov spin dopadne je proces úplne náhodný. Jednotlivé stavy sa odlišujú iba početnosťou (pravdepodobnosťou) koľkokrát je spin zaznamenaný v ktorom detektore. Tento rozdiel je však vidno iba pri viacnásobnom opakovaní experimentu, čo si ale vyžaduje veľké množstvo kópií toho istého stavu. My však máme spin iba jediný. V prípade ak horný z detektorov zaznamenal spin, tak určite vieme povedať, že pôvodný stav nebol spin dolu v smere osi z. Nič viac o jeho pôvodnom stave povedať nevieme.

PRENOS NADSVETELNOU RÝCHLOSŤOU?

Kvantové klonovanie síce nesúvisí priamo s nelokálnosťou kvantovej teórie, ale rôzne jeho aspekty áno. Predstavme si situáciu, že klonovanie je možné a my si z jedného spinu vieme naklonovať spinov koľko len chceme. Potom nám však nič nebráni prenášať informáciu rýchlosťou väčšou ako rýchlosť svetla. Využiť sa dá práve nelokálnosť kvantovej fyziky. Ako sme spomenuli v minulom čísle *Quarku* pri EPR (Einstein, Podolski a Rosen) paradoxe, po premeraní spinu na Zemi sa spin

na Mesiaci nachádza v stave určenom výsledkom tohto merania. Pri meraní v smere z sa nachádza v jednom zo stavov $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$, avšak pri meraní v smere x je tento spin opísaný jedným zo stavov smerujúcich v smere, alebo protismere osi x . Tieto stavy budeme označovať nasledovne $|+\rangle, |-\rangle$. Voľba merania (smer z alebo smer x) je vecou experimentátora na Zemi. Ak chcem poslať odpoveď „áno“, tak zvolím meranie v smere osi z , a ak chcem poslať „nie“, tak premeriam v smere osi x . Experimentátor na Mesiaci má za úlohu zistiť aké meranie si experimentátor na Zemi zvolil, t. j. ktorý smer (z alebo x ?). Potrebujeme teda určiť, v ktorom zo štyroch možných stavov $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle, |+\rangle, |-\rangle$ sa nachádza jeho spin. Ak sa mu to podarí, tak pozná odpoveď. Týmto spôsobom možno pomocou voľby smeru merania prenášať informáciu.

Rýchlosť prenosu je obmedzená iba rýchlosťou, s akou je experimentátor na Mesiaci schopný rozlíšiť tieto stavy, resp. smery. Kvantová fyzika však takúto možnosť nepovoľuje. Prípadná existencia merania, ktoré by nám povedalo, o ktorý zo stavov ide, by znamenala, že tento spin môže mať nálepku až so štyrmi hodnotami. Ako sme si už povedali v minulej časti, spin $\frac{1}{2}$ môže mať najviac jednu nálepku s dvoma možnými hodnotami. Experimentátor by však mohol zvoliť prefikanejšiu taktiku, a síce daný spin si naklonovať a poriadne premerať vo všetkých smeroch. Tým by získal úplnú informáciu o stave. Akokoľvek pomalý by bol tento proces, tak vždy by sme si vedeli predstaviť takú vzdialenosť medzi dvoma spinmi, že rýchlosť prenosu informácie by prevyšovala rýchlosť svetla. Namiesto na Mesiaci, by sme experimentovali na Plute, prípadne ešte ďalej. Avšak ani klonovanie hoci len štyroch konkrétnych stavov spinu nie je v kvantovej teórii prípustné. Nemožnosť kvantového klonovania teda „zachraňuje“ *kauzalitu udalostí*, ktorá by sa narušila nadsvetelnou rýchlosťou komunikácie.

Kvantové klonovanie, resp. jeho obmedzenie, má aj oveľa praktickejší dôsledok. Na tomto princípe je založená *kvantová kryptografia*, t. j. bezpečný prenos informácie medzi dvoma bodmi. Žiadny potencionálny špión si nemôže naklonovať posielanú informáciu. Akýkoľvek jeho pokus by bol okamžite zaznamenaný a jeho prítomnosť by bola odhalená. O kvantovej kryptografii si však povieme viac až v niektorej z ďalších častí.

KVANTOVÁ TELEPORTÁCIA

O kvantovej teleportácii sa už v Quarku neraz písalo. My neurobíme výnimku. Pri slove teleportácia sa okamžite aj tým, čo nesledujú seriál StarTrek, vybaví predstava extrémne rýchleho presunu hmoty na diaľku. Nadšencom science fiction sa od vzrušenia objavia zimomriavky, že konečne prišiel ten čas a neskutočné sa stáva realitou. Hneď na začiatku však musím všetkých sklamať. Pri kvantovej teleportácii nejde o žiadny okamžitý presun hmoty.

Kvantová teleportácia napriek tomu rieši veľmi dôležitý problém. Predstavme si, že máme spin v nejakom stave (nevieme v akom) a chceme ho poslať na Pluto alebo ešte niekde ďalej. Ako to urobiť, čo najrýchlejšie, a najefektívnejšie? Priama metóda spočívajúca v jednoduchom poslaní nášho spinu nemusí uspieť. Kvantový stav spinu je veľmi krehký náklad, a bola by to vskutku veľká náhoda, ak by bol tento spin dopravený na Pluto (či už bežnou poštou alebo cez iné špecializované

Teleportácia. Pozrime sa teraz bližšie na to, ako to celé funguje. V hre máme tri spiny $1/2$. Dva z nich má experimentátor na Zemi a jeden sa nachádza na Plute. Spin na Plute spolu s jedným so spinov na Zemi je v špeciálnom stave a tvoria tzv. *EPR pár*. Zostávajúci spin na Zemi (ten, ktorý chceme teleportovať) je v neznámom stave určenom vektorom $\vec{n}_{\theta,\varphi}$, t. j. dvomi uhlami θ, φ . Experimentátor na Zemi uskutočňuje *Bellovo meranie* na oboch svojich spinoch. Označme si jeho výsledky symbolmi θ, x, y, z . Jeden z týchto symbolov ako výsledok posielame na Pluto, kde experimentátor uskutoční jednu zo štyroch transformácií I, X, Y, Z v závislosti od prijatej informácie. O aké transformácie vlastne ide? Uskutočnením Bellovo merania na spinoch na Zemi sa spin na Plute ocitne v jednom zo štyroch stavov v tejto tabuľke:

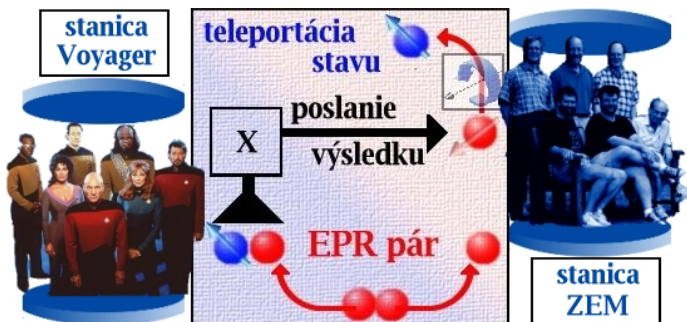
\vec{m}_0	$\theta' = \theta, \varphi' = \varphi$	Nulové otočenie
\vec{m}_x	$\theta' = -\theta, \varphi' = -\varphi$	180° otočenie okolo x
\vec{m}_y	$\theta' = -\theta, \varphi' = \varphi + \pi$	180° otočenie okolo y
\vec{m}_z	$\theta' = \theta, \varphi' = \varphi + \pi$	180° otočenie okolo z

V poslednom stĺpci tabuľky je operácia, ktorú treba vykonať, aby sme dostali pôvodný stav daný uhlami θ, φ . Opäť pripomíname, že nepotrebujeme vôbec poznať konkrétne hodnoty θ, φ . Stačí nám vhodne (podľa tabuľky) spin na Plute pootočiť a teleportáciu máme úspešne za sebou. Pootočenie spinu sa v laboratóriu realizuje pomocou vhodne zvoleného magnetického poľa, ale nepôjdeme teraz do hlbších detailov. Ako vidieť, označenie výsledkov merania nebolo zvolené náhodou, ale indikuje, akú transformáciu treba na Plute vykonať, resp. okolo ktorej osi treba spin pootočiť.

doručovateľské firmy) nepoškodený. V prípade, ak máme viac kópií nášho spinu, tak je situácia o niečo jednoduchšia. Môžeme sa pokúsiť pomocou rôznych meraní stav spinu odhadnúť, t. j. zistiť hodnoty uhlov θ, φ . Posielaný obyčajnú informáciu (v tomto prípade dva uhly) o stave spinu je pomerne jednoduchá a bežná záležitosť. Prijemca na Plute si chvíľku počká a po prijatí správy si jednoducho posielaný stav pripraví vo svojom vlastnom laboratóriu. Jediný problém je množstvo kópií stavu, ktoré potrebujeme na zisteniu stavu. Je veľmi veľký – v princípe nekonečný a, nanešťastie kvantové stavy nevieme klonovať.

Kvantová fyzika nám v tomto prípade ponúka aj iné riešenie – *teleportáciu*. Bude nám stačiť iba jediná kópia spinového stavu, avšak budeme požadovať zdieľanie špeciálneho stavu dvoch ďalších spinov. Jeden zo spinov vlastní prijemca na Plute, a druhý vlastnime my. Tento špeciálny stav je presne ten istý stav použitý na narušenie Bellových nerovností, t. j. stav dvoch spinov s celkovým nulovým spinom. Pri Bellových nerovnostiach bol využitý ten fakt, že meranie na jednom spine nám okamžite prezrádza stav druhého spinu. Kvantová teleportácia využíva podobný princíp. Špeciálne meranie na našej strane nám povie, čo má prijemca na Plute vykonať, aby bol jeho spin popísaný stavom, ktorý sme chceli teleportovať. Naše meranie je tzv. *Bellovo meranie*, ktoré je uskutočnené na oboch spinoch, ku ktorým máme prístup, t. j. na spine, ktorého stav chceme poslať na Pluto, a na spine, ktorý patrí do EPR páru (t. j. stavu použitého pri EPR paradexe). Toto meranie má štyri rôzne výsledky (meriame dva spiny súčasne) a každý z nich

definuje iný stav spinu na Plute. Našťastie však vždy existuje transformácia, ktorá s úplnou presnosťou pretransformuje tento stav na stav, ktorý posielame. Dôležité je, že táto transformácia vôbec nezávisí na teleportovanom stave, t.j. tento stav nemusíme poznať. Po uskutočnení tejto opravnej operácie dosiahneme teleportovanie stavu z jedného spinu na druhý spin, ktorý je ľubovoľne ďaleko. Bolo by možno lepšie, a zrejme aj správnejšie, hovoriť o *teleportácii kvantového stavu*, než o kvantovej teleportácii.



Obr.2. Teleportácia kvantového stavu. V ľavej časti obrázku sú postavy zo seriálu *Star Trek*, vďaka ktorým sa cestovanie pomocou teleportácie dostalo do širšieho povedomia. V pravej časti je skupina šiestich fyzikov (Charles Bennett, Gilles Brassard, Asher Perez, William Wootters, Richard Jozsa, Claude Crepeau), ktorá vymyslela kvantovú verziu teleportácie. V strede sa nachádza schematický obrázok teleportácie, ktorá je popísaná v texte a aj v rámčeku 2. V zakreslenom príklade bola v Bellovom meraní nameraná hodnota x , ktorá znamená, že druhý experimentátor vykoná rotáciu svojho spinu okolo osi x . Po tejto operácii je proces teleportácie ukončený.

K uskutočneniu teleportácie je nutné poslať informáciu o výsledku merania na Pluto, aby tamojší experimentátor vedel presne, čo má so svojim spinom urobiť a zavŕšiť tak celý proces. Naša schopnosť posielania tejto informácie ohraničuje rýchlosť celej teleportácie. Teória relativity definuje ako hornú hranicu dosiahnuteľnej rýchlosti rýchlosť šírenia sa svetla vo vákuu, asi 300 000 km/s. Z tohto faktu vyplýva, že pri teleportácii kvantového stavu nielenže nejde o presun hmoty, ale ani rýchlosť nie je okamžitá.

Pozor na nasledovnú úvahu! Kvantová teleportácia prenáša stav jedného spinu na iný spin. Nakoniec teda máme dva spiny v tom istom stave. Ako je to však potom s nemožnosťou kvantového klonovania? Ubezpečujem vás, že všetko je v poriadku a k žiadnemu klonovaniu neprichádza. Finta je v tom, že pôvodný spin (ktorého stav teleportujeme) sa po teleportácii už viac v tomto stave nenachádza, a teda nemáme žiadne dve kópie toho istého stavu. Nezabúdajme, že na pôvodnom spine bolo uskutočnené meranie, ktoré stav tohoto spinu úplne zmenilo. Teleportácia kvantového stavu už bola zrealizovaná aj experimentálne v niekoľkých nezávislých pokusoch.

KVANTOVÉ PREVIAZANIE

Kvantové previazanie je špecifická vlastnosť stavov kvantových systémov, ktorá nám hovorí, že vlastnosti dvoch kvantových objektov, aj keď sú navzájom veľmi vzdialené, veľmi úzko spolu súvisia. Prvý, kto pomenoval tento jav, nebol nikto iný ako *Erwin Schrodinger*. Stalo sa to približne v tom istom čase, ako sa na svete objavil aj EPR paradox, ktorý poukázal na

nelokálnosť kvantovej teórie. Pojmy nelokálnosti a kvantového previazania spolu súvisia, avšak neznamenajú úplne to isté (ako sa kedysi predpokladalo). Kvantové previazanie má svoju presnú matematickú definíciu a nelokálnosť je definovaná pomocou Bellových nerovností. V posledných rokoch sa vedcom podarilo zistiť, že nie všetky previazané stavy narušajú Bellove nerovnosti, t. j. tieto dve definície neznamenajú úplne to isté.

Obe tieto vlastnosti (nelokálnosť a previazanie) sa prejavujú v experimentoch ako *neklasické vzťahy* medzi fyzikálnymi pozorovaniami, ktoré na prvý pohľad odporujú našim (klasickým) intuitívnym predstavám. Iba nedávno bolo odhalené, že kvantové previazanie je veľmi užitočný informatický zdroj, ktorý sa dá využiť v teórii informácie. Umožňuje rýchlejšie vyriešenie klasických problémov. Na tzv. *kvantových počítačoch* by sme boli schopní rýchlejšie rozložiť prirodzené čísla na prvočísla. Práve nemožnosť efektívneho vyriešenia tejto úlohy je základom niekoľkých kryptografických komunikačných protokolov, napr. internetom bežne používané RSA kódovanie by prestalo byť bezpečným spôsobom utajenia komunikácie. Na druhej strane je spôsob, ako kvantové previazanie využiť na úplne bezpečný prenos informácií. O kvantovom počítaní a kvantovej kryptografii si povieme viac v niektorej z nasledujúcich častí. V súčasnosti sa fenomén kvantového previazania skúma zo všetkých strán a stále zostáva ešte veľa nezodpovedaných otázok. Úplné pochopenie potenciálu kvantového previazania je výzvou, a riešenie nám možno umožní lepšie pochopiť zákonitosti kvantovej teórie samotnej.

MARIO ZIMAN