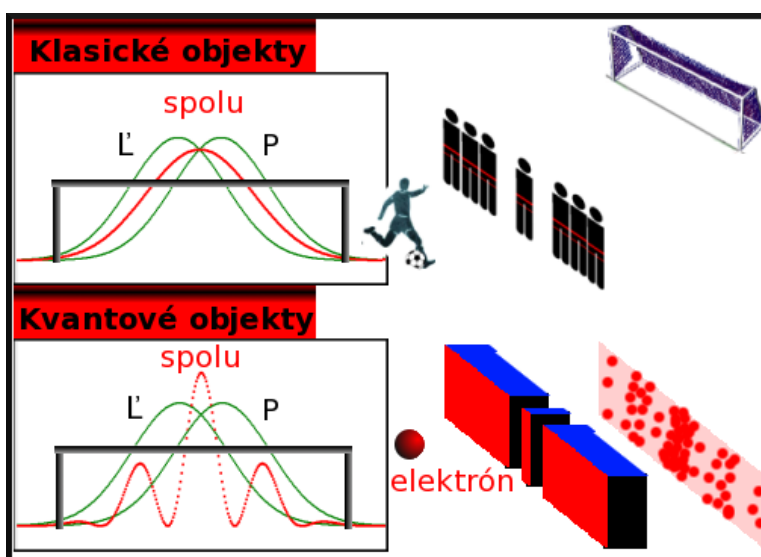


Kvantová fyzika je veľmi úspešnou fyzikálnou teóriou, ktorú používame hlavne na popis mikrosvetu. Prečo však aj na úrovni makrosvetu, ktorý sme schopní priamo vnímať, nepozorujeme kvantové efekty? Akým spôsobom a prečo sa objekty prestávajú správať podľa kvantových zákonov? Kde je hranica medzi kvantovým a klasickým svetom? Existuje vôbec takáto hranica? V tejto časti si povieme, čím sa vlastne tieto dve teórie líšia.

Dvojštrbinový experiment

Ešte základnejšou črtou kvantovej teórie, ako kvantové previazanie, je kvantová interferencia, resp. superpozícia kvantových stavov. Teraz sa pokúsime tento čisto kvantový jav vysvetliť. Predstavme si futbalistu, ktorého úlohou je kopnúť loptu do brány a v ceste mu stojí múr postavený z hráčov súperovho tímu. Aktér tohoto priameho kopu je veľmi všímavý a postrehol, že jeden z hráčov chýba, t.j. v múre je úzka „trhlina“. Rozhodne sa využiť situáciu a loptu kopne cez túto dieru v múre. Kam takto kopnutá lopta dopadne? Predstavte si, že ste na mieste brankára, ktorý si včas všimol prázdne miesto v múre. Kam by ste sa postavili? Prirodzene do stredu brány, resp. na miesto, kde pomyselná spojnica lopty a stredu trhliny pretína bránkovú čiaru. Skutočne, ak (ideálny) futbalista opakuje priamy kop z toho istého miesta viackrát, tak, použijúc práve popísanú stratégiu, najviackrát trafi práve do stredu brány. Pravdepodobnosť je pre stred brány najväčšia.



Obr. 1. Dvojštrbinový experiment. Na obrázku je znázornený dvojštrbinový experiment s klasickým telesom (futbalová lopta) a kvantovou časticou (elektrónom). Naľavo v obrázku je zobrazená pravdepodobnosť v oboch prípadoch (červená farba) a pre porovnanie sú zobrazené aj pravdepodobnosti v prípade, že jedna zo štrbín je uzavretá (zelená farba). Na spodnom grafe (v kvantovom prípade) vidno interferenčný obrazec.

Teraz si situáciu skomplikujme. Povedzme, že múr má trhliny dve: jednu naľavo, a druhú napravo od stredu múru. Kam bude lopta kopnutá v takomto prípade? Ak tieto trhliny nie sú veľmi ďaleko od seba (napr. ich oddeluje iba jediný hráč), tak najpravdepodobnejšie bude lopta kopnutá opäť do stredu brány. Ak však ľavú (pravú) trhlinu „zaplátame“ ďalším hráčom, tak lopta bude dopadať viac doľava (doprava). Funkcia $p_L(x)$ (resp. $p_R(x)$) označuje pravdepodobnosť toho, že lopta dopadne do miesta x v bránke, keď ľavá (resp. pravá) trhlina je zaplátaná. O každej z dopadajúcich lôpt vieme samozrejme povedať, ktorou z trhlín prišla. Potom pravdepodobnosť dopadu lopty do miesta x v bráne, ak obe trhliny sú odkryté, je rovná súčtu jednotlivých pravdepodobností, t.j. $p(x) = \frac{1}{2}(p_L(x) + p_R(x))$. Faktor $\frac{1}{2}$ vo vzťahu pre výslednú pravdepodobnosť znamená, že futbalista triafa loptu cez ľavú a cez pravú trhlinu rovnako často.

Zoberme teraz namiesto lopty elektróny (fotóny) vystrelované z elektrónového dela a namiesto hráčov tvoriacich múr uvažujme tienidlo s dvoma štrbinami. Hráčmi sú v tomto prípade atómy tvoriace tienidlo a štrbiny predstavujú miesta, kde títo atómoví futbalisti chýbajú. Ak zopakujeme ten istý experiment, tak spomínaný súčet jednotlivých pravdepodobností je v príkroch rozpore s experimentálnou realitou, ktorú pozorujeme v prírode, t.j. $p(x) \neq \frac{1}{2}(p_L(x) + p_R(x))$. Namiesto toho pozorujeme tzv. *interferenčný obrazec*, ktorý pozostáva zo striedania pravdepodobnejších, a menej pravdepodobných oblastí dopadu elektrónu do „bránky“. Zhruba povedané „kvantová lopta“ dopadá veľmi pravdepodobne do stredu a na okraje brány, ale pravdepodobnosť dopadnúť

kúsok naľavo, alebo napravo od stredu je zanedbateľná. Z pohľadu brankára ide o nerozriešiteľnú dilemu kam sa postaviť, aby loptu chytil.

Naviac pri tomto experimente nemáme absolútne žiadnu vedomosť o tom, ktorou štrbinou k nám elektrón priletel. Klasicky to vieme určiť na základe určenia smeru rýchlosti, ktorá nám presne hovorí odkiaľ elektrón priletel. Avšak kvantový objekt (pozri prvú časť tejto série uverejnenej v *Quarku 2005/1*) nemôže mať súčasne aj „nálepku“ polohy (x), a aj „nálepku“ rýchlosti (v). Túto vlastnosť nazývame *Heisenbergovým princípom neurčitosti*. Vďaka nemu, alebo práve preto, nevieme o smere rýchlosti prilietajúcej kvantovej lopty povedať vôbec nič. Tým, že zaznamenáme jej aktuálnu polohu, úplne zničíme informáciu o jej pôvodnej rýchlosti. Preto aj štrbina, ktorou elektrón letel, zostáva neurčenou. Snažiť sa špecifikovať dráhu, ktorú kvantová lopta vykonala, kým dopadla do bránky, v kvantovej teórii všeobecne nemá veľký zmysel. Prichádzme k zaujímavému poznatku, že dráhu pohybu kvantových objektov nevieme sledovať.

Teraz si predstavme, že sa niekto predsa len snaží zistiť, ktorou štrbinou elektrón preletel. Napríklad môžeme štrbiny mierne osvetliť. Aký bude výsledok? Kupodivu v tomto prípade opäť dostaneme, že výsledné pravdepodobnostné rozdelenie je v zhode s klasickým výrazom $p(x) = \frac{1}{2}(p_L(x) + p_R(x))$. Ako tomu rozumieť? Čo spôsobuje, že elektrón (kvantový objekt) nám zrazu dá klasický výsledok? Odpoveďou je *kvantové meranie*, ktoré narozdiel od klasického, veľmi dramaticky mení stav celého kvantového objektu. Dá sa povedať, že kvantový objekt je veľmi citlivý na akúkoľvek našu snahu niečo o ňom zistiť. Každý náš nový poznatok je zaplatený úplnou zmenou stavu kvantového objektu a pôvodný stav je nenávratne preč.

Vždy keď zistíme, ktorou štrbinou elektrón preletel, tak na prítomnosť druhej štrbiny môžeme úplne zabudnúť. Vieme, že elektrón ju nepoužil. Inými slovami elektrón, ktorý nám dopadne do detektora, má známu minulosť. Všetky dopadnutšie elektróny vieme potom zaradiť do dvoch skupín podľa toho, odkiaľ pochádzajú. Naviac pre tieto skupiny samostatne musí platiť, že pravdepodobnostné rozdelenie príslušných elektrónov je určené funkciám $p_L(x)$ a $p_R(x)$. V polovici prípadov elektrón prešiel cez ľavú štrbinu a v polovici cez pravú. Výsledná pravdepodobnosť je preto súčtom týchto pravdepodobností, t.j. $p(x) = \frac{1}{2}(p_L(x) + p_R(x))$.

Ak nemáme informáciu o tom, cez ktorú štrbinu elektrón preletel, tak nameriame úplne iné $p(x)$ a pravdepodobnosti $p_L(x)$, $p_R(x)$ vôbec nepoznáme. Aby sme ich poznali, museli by sme uskutočniť nové experimenty, v ktorých ponecháme pootvorenú iba jednu zo štrbín. A keďže porovnávame pravdepodobnosti získané v dvoch úplne odlišných meraniach, tak možno už nie je takým prekvapujúcim fakt, že $p(x) \neq \frac{1}{2}(p_L(x) + p_R(x))$.

Dôležité je si uvedomiť, že v klasickom prípade (s futbalovou loptou) sú dva jednoštrbinové experimenty obsiahnuté v jedinom experimente s oboma štrbinami otvorenými. Naviac však zisťujeme, ktorou zo štrbín elektrón preletel. Klasický experiment, v ktorom sú otvorené obe štrbiny a nezisťujeme, ktorou štrbinou teleso letelo, je ekvivalentný experimentu, pri ktorom túto informáciu zisťujeme predtým, než teleso dopadlo do bránky. Je nám jedno, či informáciu o dráhe zisťujeme, alebo nie. V kvantovom prípade je však situácia odlišná. Kvantový dvojštrbinový experiment nemôžeme chápať ako zloženie dvoch jednoštrbinových. Takáto úvaha, ktorá nás automaticky vedie k tomu, že máme sčítavať jednotlivé pravdepodobnosti, je nesprávna. Argument je založený na našej skúsenosti hovoriacej, že teleso predsa muselo ísť iba jednou zo štrbín. Nič nás však neopravňuje používať takúto skúsenosť aj pre kvantové objekty. Kvantová fyzika túto vlastnosť popiera a nevieme povedať, ktorú zo štrbín si elektrón vybral, resp. vyzerá to, akoby elektrón preletel cez obidve štrbiny súčasne.

Popísanému javu hovoríme *kvantová interferencia*. Pozor však na to, že táto interferencia nie je dôsledkom akejsi interakcie medzi elektrónmi, ktoré prechádzajú jednou, alebo druhou štrbinou. V našich experimentoch neuvažujeme o akomsi prúde elektrónov, ale vždy predpokladáme, že elektrón je v hre iba jeden jediný. Aby sme dostali pravdepodobnosti, tak experiment opakujeme viackrát, ale vždy iba s jedným elektrónom. Existencia *interferenčného obrazca* pre výslednú pravdepodobnosť $p(x)$ je prejavom tzv. *vlnových vlastností* častíc. Interferencia je vo fyzike dobre známy pojem, ktorý je charakteristický práve pre vlnenie (napr. vlny na vode, zvuk, svetlo, atď.). V nedávnej ankete o najkrajší fyzikálny experiment, ktorej výsledky boli zverejnené v *New York Times*, sa na prvom mieste umiestnil práve popísaný *dvojštrbinový experiment*.

Princíp superpozície

Pozorovanie interferenčného obrazca je jedným zo základných príznakov *kvantovosti* pozorovaného objektu. Interferencia je dôsledkom tzv. *princípu superpozície*, ktorý je jedným zo základných matematických pravidiel kvantového sveta. Je veľmi jednoducho sformulovateľný v reči matematiky a ako to už býva, len veľmi ťažko vysvetliteľný bez jej použitia. Dôležité je vedieť, že tento princíp stojí v pozadí všetkých odlišností kvantového popisu sveta od klasického. Ak pochopíte tejto základnej črte kvantovej teórie, tak ste na najlepšej ceste odkryť všetky ostatné tajomstvá kvantového sveta.

Princíp superpozície sa týka kvantových stavov. Ak vieme, že systém sa môže nachádzať v dvoch rôznych stavoch $|\psi\rangle, |\phi\rangle$, tak princíp superpozície nám zaručuje aj existenciu stavov, ktoré sú *superpozíciou* týchto dvoch. Zapisujeme to ako súčet, napr. $a|\psi\rangle + b|\phi\rangle$, kde a, b sú ľubovoľné, dokonca komplexné, čísla. V skutočnosti existuje isté obmedzenie na prípustné hodnoty a, b , ale pre nás a ani pre samotnú logiku superpozície nie je potrebné ho špecifikovať. Pripomíname, že symboly $|\psi\rangle, |\phi\rangle$ označujú iba

rôzne stavy kvantového systému a netreba za týmito symbolmi vidieť niečo komplikované. Ide iba o štandardne používané značky, pomenovania. Prehnané si môžeme predstaviť, že $|\psi\rangle, |\varphi\rangle$ sú symboly označujúce značku auta, napr. trabant a mercedes. Pre nás bude podstatné povedať si, aký je vŕah superpozície týchto stavov $a|\psi\rangle + b|\varphi\rangle$ k samotným stavom $|\psi\rangle, |\varphi\rangle$. Zhruba povedané, samotné stavy sa prejavujú istými vlastnosťami (nálepkami). Ich superpozícia však už nemá žiadnu z týchto charakteristík úplne presne. V podstate má úplne inú nálepku, ktorú jej vieme priradiť. Ako príklad si uveďme dvojštrbinový experiment. Častice ktoré prejdú pravou štrbinou sa na tienidle nachádzajú v stave ψ_R , kdežto tie čo prešli ľavou štrbinou sú v stave ψ_L . Takáto je situácia ak máme otvorenú iba jednu zo štrbín. Ak ponecháme otvorené obidve, tak prechádzajúca častica sa nachádza v superpozícii $\psi_R + \psi_L$, ktorá obsahuje informáciu o štrbine iba čiastočne, resp. nám povie, že častica si vyberala štrbiny s rovnakou pravdepodobnosťou. Nevieme však, ktorú si vybrala kedy.

Superpozícia a štatistická zmes

Označme si ako $p_\psi(x)$ pravdepodobnosť, že pri nejakom meraní X nameriame výsledok x , pričom meraný objekt je popísaný stavom $|\psi\rangle$. Podobne si naďefinujeme pravdepodobnosť $p_\varphi(x)$. Pri tom istom meraní uskutočnenom na časticiach v superpozícii $a|\psi\rangle + b|\varphi\rangle$, je výsledná pravdepodobnosť daná nasledovne

$$p(x) = |a|^2 p_\psi(x) + |b|^2 p_\varphi(x) + I(x)$$

Posledný výraz v tejto rovnici $I(x)$ je tzv. *interferenčný člen* a závisí od merania. Jeho hodnota môže byť aj kladná, aj záporná. Dokonca existujú merania, pre ktoré je táto hodnota nulová. V týchto prípadoch je potom výsledná pravdepodobnosť „klasická“, t.j. stav sa pre tieto merania javí ako *štatistická zmes* dvoch stavov $|\psi\rangle, |\varphi\rangle$ s váhami $|a|^2$ a $|b|^2$. Pre superpozíciu sú však zaujímavé tie prípady, keď je interferenčný člen nenulový a týchto je združujúca väčšina. Interferenčný člen opäť nie je ľubovoľnou funkciou. Nebudeme sa však snažiť špecifikovať príslušné technické detaily, pretože ich nebudeme potrebovať a pre logiku vecí nie sú podstatné.

Štatistická zmes dvoch stavov $|\psi\rangle, |\varphi\rangle$ je špeciálny stav, ktorý je výsledkom nasledovnej procedúry. Pre prípravu N častíc v zmesi zoberieme Nq_1 častíc v stave $|\psi\rangle$, Nq_2 častíc v stave $|\varphi\rangle$ a zamiešame ($q_1 + q_2 = 1$). Výsledky merania veličiny X pre takto pripravenú štatistickú zmes sú dané pravdepodobnosťami

$$p(x) = q_1 p_\psi(x) + q_2 p_\varphi(x)$$

Ak položíme $q_1 = |a|^2$ a $q_2 = |b|^2$, tak dostaneme pre výslednú pravdepodobnosť ten istý výraz, ako pri superpozícii s nulovým interferenčným členom. Rozdiel nastáva pri meraniach s nenulovým interferenčným členom. Štatistická zmes, narozdiel od superpozície, existuje aj v klasickej teórii.

Vieme ako vyrobiť štatistickú zmes, ale ako vlastne vyrobiť superpozíciu? Princíp superpozície nám nehovorí nič o tom, ako superpozíciu vyrobiť. Hovorí iba o jeho existencii. Čo je to teda vlastne ten princíp superpozície? Ide o tvrdenie, ktoré hovorí o existencii istého štatistického vzťahu medzi kvantovými stavmi. Pravdepodobnosti, ktoré sú dôsledkom štatistickej zmesi, sú „klasické“. Ide o náhodnosť spôsobenú zmiešavaním, ktorá sa vyskytuje aj v klasickej fyzike. Avšak náhodnosť, ktorá je dôsledkom superpozície má úplne iný charakter, ktorý vedie k pozorovaniu interferenčných obrazcov pre výsledné pravdepodobnosti. Ďalšou otázkou môže byť, ktoré stavy sú „základné“, resp. ako nájsť stavy, ktorých superpozíciou sú všetky ostatné? Odpoveďou je, že žiadne takéto význačné stavy neexistujú. Každý jeden stav môžeme vybrať ako „základný“, a naopak, každý jeden stav je iba superpozíciou iných stavov. Aj to je jeden z dôvodov, prečo neexistuje jednoduchý návod ako superpozíciu vyrobiť. V istom zmysle je superpozícia zabudovaná v každom stave a iba čaká na svoje odhalenie. Otázka, ktorá sa dá zodpovedať je, či stav, ktorý mám, je alebo nie je superpozíciou nejakej danej množiny stavov. Odpovedať na túto otázku sa dá spôsobom, že nájdeme interferenčný člen $I(x)$ ako jednoduchý rozdiel pravdepodobností, a potom overíme, či takto získaný výraz spĺňa všetky potrebné vlastnosti, alebo nie.

Vzťahy neurčitosti.

Už niekoľkokrát sme si spomenuli, že „obyvatelia“ kvantového sveta nemajú súčasne presne určenú svoju polohu a rýchlosť, resp. že niektoré fyzikálne veličiny sú navzájom *nekompaktibilné*. Presné určenie polohy znamená úplnú *neurčitosť* o rýchlosti a naopak. Pri neurčitosti je naša vedomosť je vyjadrená nie jednou hodnotou, ale celým intervalom (štatisticky). Napríklad uvedieme hodnotu 10 ± 45 , t.j. 10 ± 45 . Číslo 45 charakterizuje našu neurčitosť. Čím je väčšie, tým je aj naša neurčitosť vyššia, a naša znalosť o hodnote je menšia. Tento interval (10 ± 45) nám ohraničuje možné hodnoty výsledkov pri meraní danej veličiny (napr. rýchlosti). Kvantová teória pomocou vzťahov neurčitosti spája neurčitosť, ktoré sa týkajú dvoch meraní. Napríklad neurčitosť pre polohu (σ_x) a pre rýchlosť (σ_v) sú zviazané tzv. Heisenbergovým vzťahom neurčitosti

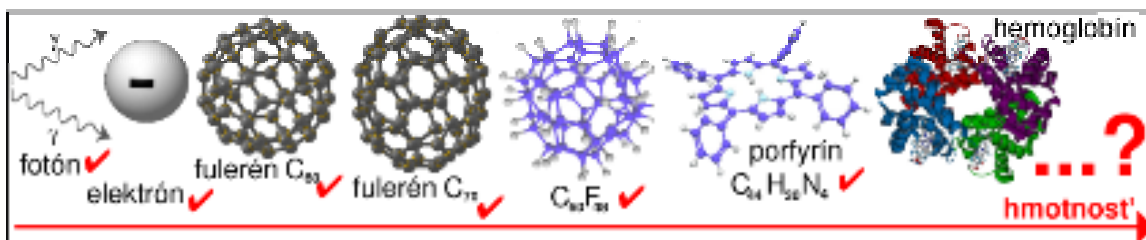
$$\sigma_x \cdot \sigma_v \geq \frac{\hbar}{m}$$

kde $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ J s je *Planckova konštanta* (základná konštanta kvantového sveta) a m je hmotnosť častice. Teraz poľahky overíme naše predchádzajúce tvrdenie. Ak zmeriame polohu ideálne, t.j. $\sigma_x = 0$, tak neurčitosť pre rýchlosť musí byť nekonečná. Inak by uvedený vzťah neplatil, pretože nula vynásobená konečným číslom je stále nula, kdežto na pravej strane máme síce malú, ale stále nenulovú hodnotu. Preto hovoríme, že naša neurčitosť je v tomto prípade maximálna a o hodnote rýchlosti nám ani merania nepovedia nič konkrétnejšie. Pri reálnych experimentoch však nikdy polohu nezmeriame úplne presne a naše meranie je zaťažené istou neurčitosťou, t.j. σ_x je vždy nenulové. Neurčitosť v rýchlosti (σ_v) je potom síce konečná, ale stále veľmi veľká.

Heisenbergov vzťah neurčitosti nám umožňuje povedať, nakoľko sa kvantová vlastnosť nekompaktibility prejavuje. Pre veľké hmotnosti je totižto pravá strana nerovnosti malá v porovnaní s mikroskopickými časticami. Napríklad pre elektrón $\frac{h}{m} = 1,157 \cdot 10^{-4}$ a pre 1kg teleso $\frac{h}{m} = 1,054 \cdot 10^{-34}$. Povedzme, že polohu a rýchlosť meriame s presnosťou na 10 desatinných miest, t.j. $\sigma_x \approx \sigma_v \approx 10^{-10}$. Pro zmeraní polohy s takouto presnosťou je v prípade elektrónu neurčitost' pre rýchlosť $\sigma_v \geq$ milión. Pre 1kg teleso (pri tej istej neurčitosti v meraní polohy) je podľa Heisenbergovho vzťahu neurčitost' pre rýchlosť $\sigma_v \geq 10^{-24}$, čo je oveľa menšie obmedzenie, ako je dané našim experimentálnym zariadením. V tomto prípade nie sme schopní vzťah neurčitost' overiť. Pre hmotnejšie telesá je obmedzenie dané vzťahom neurčitosti prakticky zanedbateľné, a preto efekty s ním spojené v klasickom svete nepozorujeme. V istom zmysle klasická fyzika je priblížením kvantovej fyziky. S narastajúcou hmotnosťou skúmaných objektov sú kvantové vlastnosti zanedbateľné a na klasickej úrovni sú všetky veličiny kompaktilné.

Ktorý kvantový objekt je najväčší?

Kvantová fyzika je všeobecne chápaná ako teória popisujúca svet veľmi malých rozmerov – mikrosvet. Je zjavné, že bežné objekty sa nesprávajú kvantovo. Napriek tomu všetky objekty sú zložené z molekúl, atómov, atď, t.j. práve z malých kvantových objektov. Čím to je, že zoskupovaním kvantových objektov sa kvantové vlastnosti akosi vytrácajú až nakoniec dostávame dokonale klasický svet? Kde je tá hranica, prípadne, ktorá vlastnosť ovplyvňuje „kvantovosť“ najviac? Poznáme totižto aj výnimky. Existujú aj makroskopické systémy, ktoré vykazujú kvantové vlastnosti. Napríklad javy supravodivosti a supratekutosti sú makroskopické a kvantové súčasne. Sú fyzici, ktorí takúto hranicu takmer bez váhania napíšu a oddelia klasický svet od kvantového, ale sú aj takí, ktorí v žiadnu hranicu neveria.



Obr.2. Kvantové vlastnosti molekúl. Na obrázku sú znázornené objekty, s ktorými bol uskutočnený dvojštrbinový experiment. Prvé experimenty boli tohoto typu boli uskutočnené ešte pred vznikom kvantovej teórie v oblasti optiky, kde bol jav interferencie veľmi dobre známy a prisudzoval sa vlnovej podstate svetla. V experimente s elektrónmi bolo po prvýkrát demonštrované, že aj častice (nielen vlny) sú schopné interferovať. V posledných rokoch boli uskutočnené interferenčné experimenty s molekulami fullerénu a porfyrínu, ktorý je momentálne najhmotnejším kvantovým objektom. Vedci v susednom Rakúsku majú za cieľ pokračovať v zvyšovaní hmotnosti kvantových objektov. Momentálne sa venujú molekulám hemoglobínu a malým vírusom.

Podobný názor zdieľa aj Anton Zeilinger zo susedného Rakúska, ktorého skupina (okrem iného) experimentálne testuje kvantovú interferenciu pre čoraz väčšie objekty. Vo svojich laboratóriách uskutočnili dvojštrbinový experiment s molekulami fullerénu C₆₀ (molekulové lopty) a C₇₀, fluórom obohateného fullerénu C₆₀F₄₈, a s biomolekulami porfyrínu (presnejšie meso-tetrafenylporfyrínu) C₄₄H₃₀N₄, ktoré sú napríklad súčasťou farebných centier chlorofylu. Ich ďalším cieľom je preukázať kvantové vlastnosti (interferenciu) enzýmov a vírusov, t.j. látok, ktoré možno ešte nepovažujeme za makroskopické, ale určite za klasické. Aspoň zatiaľ. Zaujímavou je aj otázka, či živé bunky majú kvantové vlastnosti, alebo nie. Otázka spojenia živých organizmov a kvantových vlastností je vzrušujúcou výzvou nielen pre fyzikov.

K čomu je superpozícia dobrá?

Hoci už od vzniku kvantovej teórie bol princíp superpozície akceptovaný ako jej základný princíp, jeho využitie pre praktické účely nebolo hlavným cieľom výskumu. Až v posledných rokoch s rozvojom tzv. kvantovej teórie informácie sa začal proces snahy o hlbšie pochopenie tohoto princípu. Celá mágia kvantového sveta je totižto ukrytá v tomto princípe a otázka prechodu z kvantového do klasického sveta je stále otvorená. Ukazuje sa, že práve z pohľadu informácie je princíp superpozície takmer prevratným javom, ktorý poskytuje riešenia pre niektoré úlohy a navyše, formuluje nové. V ďalších častiach si ukážeme ako princíp superpozície umožňuje vytvorenie kryptografického kľúča (kvantová kryptografia), pomáha rýchlejšie vyriešiť niektoré ťažké problémy (kvantové počítanie), a iné.

