

Podľa všetkého prvým, kto vyslovil hypotézu, že hmota okolo nás (zem, voda, vzduch atď.) sa skladá z viac už nedeliteľných častíc, tzv. atómov, bol grécky učenec *Demokritos* žijúci v piatom storočí pred našim letopočtom. Dokázať, prípadne vyvrátiť túto hypotézu však ľudia boli schopní až po vyše dvetisícich rokoch. Chemikom sa v tej dobe podarilo odhaliť, že hmota sa skladá z molekúl, ktoré sú zložené z ešte elementárnejších stavebných kociek – atómov, ktoré ruský chemik *Dmitrij Mendelejev* zoradil do tzv. periodickej tabuľky elementárnych prvkov.

Koniec 19. storočia však priniesol nejedno prekvapenie. Objav elektrónu naznačil, že aj atómy predsa len majú akúsi vnútornú štruktúru. Začali sa pokusy o pochopenie stavby samotných atómov.

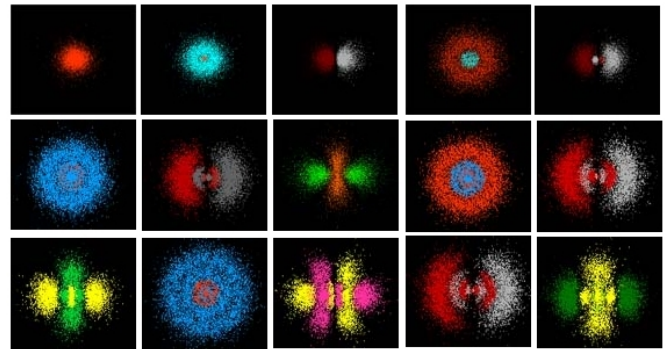
Model atómu

Ernst Rutherford pozoroval rozptyl kladne nabitého alfa žiarenia na atómoch striebra a prišiel k záveru, že atómy sa skladajú z veľmi malého kladne nabitého jadra a elektrónov. Svojimi experimentmi vyvrátil predstavu tzv. pudingového modelu atómov, podľa ktorého sa atóm skladá z akejsi kladne nabitej hmoty (puding) a elektróny si plávajú v takejto hmote podobne ako hrozienka v pudingu. E. Rutherford dokázal, že v atóme je kladný náboj sústredený do extrémne malého objemu v porovnaní s celkovým rozmerom atómu. Odtiaľto bol už len malý krôčik k tzv. planetárnemu modelu atómov. Podľa tohoto modelu elektróny v atóme obiehajú okolo jadra po eliptických dráhach podobne ako planéty okolo Slnka. Takmer okamžite však nastalo sklamanie, pretože takýto model nesúhlasí s predpoveďami teórie elektromagnetizmu. Podľa tejto teórie by mal krúžiaci elektrón vyžarovať a tým strácať svoju pohybovú energiu. Za približne 10^{-12} sekundy by sa mal elektrón v atóme zrútiť do jadra, čo je ale v rozpore s tým, čo pozorujeme. Záver je teda jednoznačný: atóm nemôže byť a nie je malá slnečná sústava. Klasická fyzika nielenže nebola schopná popísať svetlo ako prúd fotónov (písali sme o tom v minulej časti v *Quarku 2005/11*), ale nedokáže ani úplne popísať správanie a stavbu hmoty.

Začiatkom 20. storočia sa fyzici pokúšali vymyslieť model aspoň toho najjednoduchšieho atómu – vodíka, ktorý sa skladá z jediného elektrónu a jeho jadro má jednotkový kladný náboj, t.j. atóm ako celok je elektricky neutrálny. Trochu bizarné východisko z krízy ponúkol dánsky fyzik *Niels Bohr*, ktorý nedbal na známe fyzikálne zákony a jednoducho postuloval pravidlá, ktorými sa atóm vodíka riadi. Predpokladal, že elektrón sa pohybuje po kruhovej dráhe (orbite) okolo jadra, ale nevyžaruje. Navyše orbity, po ktorých sa elektrón pohybuje, nie sú ľubovoľné. Elektrón môže mať iba isté hodnoty energie (energia zodpovedá orbite), t.j. jeho energia v atóme je *kvantovaná*. Atóm má povolené vyžarovať iba v prípade, ak elektrón preskakuje zo vzdialenejšej orbity na orbitu bližšiu k jadrú. Podobným mechanizmom atóm vodíka aj prijíma energiu od fotónov. Iba ak má fotón tú správnu energiu a elektrón je na tej správnej hladine, tak atóm dokáže tento fotón pohltiť. Popritom elektrón povyskočí na vzdialenejšiu orbitu, t.j. získa energiu.

Napriek tomu, že Bohrov model atómu vodíka bol vlastne

prvým skutočným krokom ku kvantovej fyzike, nie je úplne správny. Ide sice o veľmi dobrú predstavu, ako chápať správanie vo vnútri atómu, ale stále používa predstavu orbít, t.j. predstavu, že elektrón sa v atóme pohybuje po akejsi dráhe. Dnes vieme, že v kvantovej fyzike elektróny nemajú presne určenú dráhu, po ktorej sa pohybujú. Vieme iba povedať, s akou pravdepodobnosťou sú na akom mieste, ak poznáme ich energiu, resp. orbitu. Podľa kvantovej fyziky sú elektróny v atóme akosi rozmazané. Hovoríme, že tvoria elektrónový obal, o ktorom má zmysel hovoriť, ale o konkrétnych dráhach elektrónov nevieme povedať nič. S tou istou situáciou sme sa už stretli v časti o kvantovej interferencii (*Quark 2005/02*).



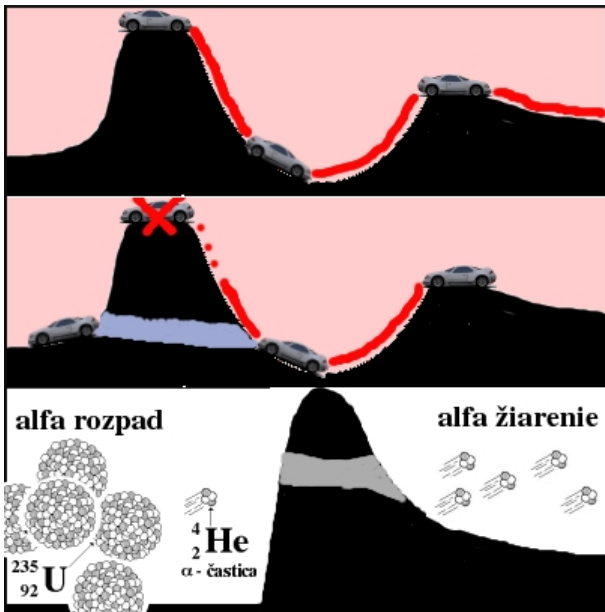
Obr.1. Orbity atómu vodíka. Ako sa elektrón v atóme pohybuje? Nepoznáme jeho konkrétnu dráhu, pretože žiadnu nemá, ale poznáme pravdepodobnosti, kde sa asi v atóme nachádza. Na obrázku vidíme výskyt elektrónu v atóme vodíka. Každý obrázok zodpovedá rôznej energii, t.j. orbite. Na každej orbite sa môže nachádzať iba istý maximálny počet elektrónov. Rôzne farby zodpovedajú rôznym elektrónom s tou istou energiou.

Schroedingerova rovnica

Bohrov model zožal svojho času obrovský úspech, pretože presne vysvetlil spektrum atómu vodíka, t.j. frekvencie elektromagnetického žiarenia, ktoré vodík dokáže pohltiť. Bohužiaľ sa však nepodarilo tento model rozšíriť na zložitejšie atómy obsahujúce viacero elektrónov. Presnú teóriu atómov sa podarilo naformulovať rakúskemu fyzikovi *Ervinovi Schroedingerovi*, ktorý napísal rovnicu opisujúcu akékoľvek dianie v kvantovom svete. Ide o rovnicu, ktorá je ekvivalentom Newtonovej rovnice pre mechaniku telies alebo Maxwellových rovníc pre elektromagnetizmus. Kľúč ku kvantovému svetu a stavbe atómov je skrytý v tejto rovnici. Schroedingerova rovnica nám okrem iného pomohla pochopiť periodickosť Mendelejevej tabuľky elementárnych prvkov, chemické väzby a chemické reakcie. Akým spôsobom vlastne táto rovnica vysvetľuje, resp. zabezpečuje stabilitu atómov? Trochu zjednodušene môžeme povedať, že Schroedingerova rovnica zaväzuje kvantové systémy k istému správaniu. Presnejšie povedané, určuje, ako napríklad elektrón môže narábať s pridelenou energiou. V prípade elektrónov v atóme nám hovorí, že energia sa zachováva, t.j. atóm nevyžaruje! Navyše ešte Schroedingerova rovnica určuje, aké energie vlastne elektróny v atóme môžu mať, t.j. ktoré „orbity“ sú povolené. Skôr ako o orbitách však zvykneme hovoriť o energetických hladinách, t.j. povolených hodnotách energie. Klasická fyzika používa pri predpovediach Newtonovu rovnicu a Maxwellove rovnice, ktoré keď aplikujeme na atómy, tak vedú k ich kolapsu, ale Schroedingerova rovnica je tým pravidlom, ktorý pozorovanú stabilitu atómov presne opisuje.

Tunelovanie

Okrem toho, že kvantová fyzika vysvetľuje stavbu atómov a hmoty, otvára dvere aj možnosti tzv. tunelovania, t.j. ako prekážajúcu hmotu „prekonávať“. Pri tomto jave kvantová častica dokáže preniknúť aj cez bariéru, cez ktorú by podľa klasickej fyziky prejsť nemala, pretože nemá na to dostatočnú energiu. Predstavme si cestu spájajúcu dva vrcholy, ktoré nemajú rovnakú výšku. Ak auto spustíme z väčšieho kopca a vylúčime z hry trenie, tak hravo prejde za nižší kopec. Naopak to však v žiadnom prípade nepôjde, t.j. auto pustené z nižšieho kopca nemá šancu na ten vyšší kopec ani len vyjsť. Kvantové auto by sa však dokázalo dostať aj za tento vyšší kopec. Aby sme tento jav vysvetlili, tak si musíme predstaviť, že kvantové auto využíva akýsi tunel, ktorý ale v skutočnosti neexistuje, t.j. pretuneluje cez kopec. Ako je to možné? Odpoveď je opäť skrytá v Schrodingerovej rovnici, ktorá určuje ako kvantové auto so svojou energiou narába.



Obr.2. Tunelovanie. Auto spustené z vyššieho kopca na nižší vyjde bez akýkoľvek problémov, ale naopak nikdy, pretože energia auta spusteného z menšieho kopca nie je dostatočná. Auto sa teda nikdy do priestoru za vyšší kopec nedostane. Toto však neplatí pre kvantové objekty (kvantové auto), ktoré sa za kopec niekedy môže dostať napriek tomu, že nemá dostatočnú energiu na prekonanie vyššieho kopca, t.j. využije akýsi tunel, ktorým kopec prekoná. Podobne sa „cíti“ aj alfa častica v jadre napríklad uránu. Pomocou pretunelovania dokáže prekonať jadrové sily a opustiť uránové jadro. Tento jav je prejavom rádioaktivity, pri ktorej vzniká tzv. alfa žiarenie.

Ako sme už spomínali, kvantová fyzika predpovedá iba pravdepodobnosti, t.j. aj tunelovanie je javom pravdepodobnostným a častica (kvantové auto) má iba istú pravdepodobnosť, že bariéru pretuneluje. Bariéru môžeme charakterizovať energiou U , ktorá je potrebná na to, aby ju častica podľa klasickej fyziky prekonala. Ak je pohybová energia častice E väčšia ako U , tak častica bariéru prekoná. Ak ale $E < U$, tak podľa klasickej fyziky (Newtonova rovnica) častica nikdy za bariéru neprenikne. Podľa kvantovej fyziky existuje istá pravdepodobnosť, že častica cez bariéru prenikne aj v takomto prípade. Táto pravdepodobnosť klesá exponenciálne z dĺžkou (hrúbkou) bariéry L , hmotnosťou častice m a rozdielom energií U a E ,

teda

$$\text{pravdepodobnosť} = \exp[-2L (2m(U - E))^{1/2} / h],$$

kde $h = 1.06 \times 10^{-34}$ J.s je Planckova konštanta. Tunelovanie je preto ťažšie ak je bariéra hrubá, hmotnosť veľká a energia oveľa menšia ako energia bariéry. Ak si do tohoto vzťahu dosadíme parametre typické pre náš každodenný život, tak zistíme, že pravdepodobnosť pretunelovania človeka cez múr je približne 10^{-30} , čo je skutočne zanedbateľná hodnota, ktorá prakticky znamená, že človek nikdy cez múr neprejde bez toho, aby ho vôbec nepoškodil. Bolo preto potrebné vymyslieť dvere. Aby to nevyzeralo, že kvantová fyzika dokáže len „rúcať“ bariéry, tak ich aj stavia. Častice, ktoré majú dostatočnú energiu na preniknutie bariéry ($E > U$) niekedy nepreniknú, t.j. máme aj situáciu akéhosi odrazenia sa od neexistujúcej prekážky. Inými slovami to, že kvantovému autu udelíme dostatočnú energiu ešte nezaručuje, že auto cez kopec prejde. Vidíme, že kvantová fyzika je v istom zmysle férová a nielen povoľuje zakázané (tunelovanie), ale aj zakazuje povolené.

Pravdepodobne prvou aplikáciou javu tunelovania bolo vysvetlenie rádioaktívneho alfa rozpadu americkým fyzikom *Georgom Gamowom*. Pri alfa rozpade sa jadro atómu rozpadá a produkuje héliové jadrá, t.j. alfa častice. Héliové jadro je stabilným systémom a je preto prirodzene predpokladať, že v nejakom zmysle existuje v jadre atómu ešte pred alfa rozpadom. Podobne ako predpokladáme, že elektrón sa nachádza v atóme aj pred ich ionizáciou. Môžeme si predstaviť, že alfa častica je v jadre viazaná nejakou silou. Táto jadrová sila vytvára istú bariéru, cez ktorú sa alfa častica nevie dostať a vďaka tomu je držaná v jadre atómu. Podľa kvantovej fyziky však existuje istá pravdepodobnosť, že alfa častica pretuneluje, t.j. jadro a aj celý atóm opustí. A to je presne to, čo pozorujeme. Pravdepodobnosť tunelovania priamo súvisí s polčasom rádioaktívneho rozpadu daného atómu, t.j. vďaka tunelovaniu sme trochu viac pochopili proces rádioaktívneho rozpadu.

Kvantová elektronika

Javy spojené s tunelovaním pozorujeme napríklad aj v polovodičoch, resp. na rozhraniach polovodičov ako napríklad v tzv. „tunelovej dióde“. Tunelovanie je jednou zo základných techník, ktoré sa uplatňujú v tzv. kvantovej elektronike. V roku 1985 ruskí fyzici *Dmitrij Averin* a *Konstantin Licharev* navrhli tzv. jednoelektrónový tunelový tranzistor (z ang. „single electron tunneling (SET) transistor“), ktorý o dva roky neskôr skonštruovali v Bellových laboratóriách v USA. Tento tranzistor sa skladá z nevodíča vloženého medzi dve vodivé elektródy. Elektróny bežne cez nevodíča neprejdú, ale v tomto prípade ide skutočne o veľmi úzky nevodivý pás (asi 1 nanometer, t.j. 10 atómov vedľa seba), ktorý je z pohľadu elektrónov bariérou.

Akonáhle majú kvantové častice pred sebou bariéru, tak sa snažia tunelovať. A presne na tomto princípe funguje aj SET tranzistor. Ak sme už spomínali, prechod závisí od hrúbky bariéry, ktorá je v tomto prípade veľmi úzka a prúd, ktorý vzniká závisí od množstva elektrónov, ktoré sa snažia bariéru prekonať. Toto zariadenie pracuje s individuálnymi elektrónmi a má veľmi blízko k tzv. kvantovým bodkám, ktoré sa fyzici snažia použiť ako kvantový bit, t.j. základný stavebný kameň kvantového počítača. Okrem toho SET tranzistor našiel svoje využitie aj pri presných meraniach veľkosti náboja a prúdu.

Nadsvetelná rýchlosť

Tunelovanie otvára zaujímavú otázku, akou rýchlosťou vlastne častica cez bariéru prechádza? Existujú experimenty, v ktorých fyzici tvrdia, že namerali nadsvetelné rýchlosti prenosu informácie pomocou tunelovania. Najznámejší je asi prípad, v ktorom bola vraj prenesená časť Mozartovej symfónie rýchlosťou 4,7-krát vyššou než je rýchlosť svetla vo vákuu. Napriek tomu, že akademická debata o príslušných experimentálnych výsledkoch stále trvá, všeobecne sa prijal konsensus, že v ani jednom experimente sa nenarušila kauzalita, t.j. neuskutočnil sa nadsvetelný prenos informácie. Celý problém je v definovaní, čo je rýchlosť prenosu cez bariéru, resp. ako sa vysporiadať s pravdepodobnostným charakterom celej teórie pri definovaní takejto rýchlosti. Diskusia o tejto téme však ešte nebola uzavretá.

Záverom

Dočítali ste poslednú časť seriálu článkov o svete kvantovej fyziky. Tento seriál nemal ambíciu a ani časopriestor podrobne krok za krokom vysvetľovať zákonitosti kvantového sveta. Skôr išlo o vyvolanie pocitu, že kvantová fyzika, aj keď je teóriou technicky komplikovanou, nie je až taká úplne odtrhnutá od života a jej prejavy môžeme nepriamo sledovať aj okolo nás. Tak je to koniec koncov s akoukoľvek fyzikou, stačí sa len pozorne a kriticky pozerat'.

MÁRIO ZIMAN