

## Problém merania, princípy a informácia (časť 1.)

**Skôr ako pochopíme kvantovej fyzike, budeme musieť spojiť jej abstraktnosť s našim bežným vnímaním reality, t.j. s niečím čo cítíme a čomu si myslíme, že rozumieme. Dnes nám chýbajú jasné a pochopiteľné princípy (tzv. Uhrprinzip). Aká je úloha informácie v tomto snažení?**

Istým znakom nášho pocitu, že nejakej fyzikálnej teórii rozumieme, je schopnosť túto teóriu zhrnúť do zopár základných tvrdení, ktoré učene (a možno aj trochu nadnesene) nazývame *princípmi*. Napríklad termodynamiku, t.j. náuku o teple a tepelných strojoch, charakterizujú dva princípy: 1) *energia* uzavretého systému *sa zachováva* a 2) *entropia* uzavretého systému *neklesá*. Prvý z týchto princípov obmedzuje vývoj systému kvantitatívne a zabraňuje nám skonštruovať *perpetuum mobile*. Druhý princíp určuje kvalitatívne smerovanie vývoja a hovorí nám, ktoré procesy v prírode nepozorujeme. Ak nafilmujeme rozbitie pohára a pustíme tento film naopak, tak proces, ktorý vidíme (t.j. sformovanie pohára z črepov) v prírode nikdy nespozorujeme. Princíp narastania entropie tento proces zakazuje a hovoríme o nevratných dejoch.

Asi každý sa už stretol so základnými princípmi špeciálnej teórie relativity, t.j. *princípom relativity* a *princípom konštantnosti šírenia sa svetla*. Princíp relativity nám hovorí, že pozorovatelia popisujú udalosti rovnako bez ohľadu na to, či sa pohybujú, alebo nie, t.j. pre obidvoch platia tie isté fyzikálne zákony, tie isté rovnice. Iba konkrétne hodnoty polohy, času, rýchlosti, hmotnosti, energie a iných fyzikálnych veličín pre pozorované objekty sú pre rôznych pozorovateľov rôzne. Inými slovami: pre pozorovateľa stojaceho na stanici a pozorovateľa v idúcom vlaku má okolo letiaca vrana rôzne rýchlosti. Druhý princíp nám hovorí, že jedine svetlo, resp. nehmotné častice (napr. fotóny), sú výnimkou z tohoto pravidla a majú pre oboch pozorovateľov stále tú istú rýchlosť rovnú rýchlosti svetla vo vákuu, čo je približne  $c = 300\,000$  km/s.

### NIKTU JEJ ÚPLNE NEROZUMIE

Jeden z dôvodov, prečo je kvantová fyzika menej známa a populárna ako napríklad teória relativity, je aj neprítomnosť takýchto jednoduchých princípov. Priamo to súvisí so známym tvrdením *Richarda Feynmana*, že nikto kvantovej fyzike úplne nerozumie. Vieme ako ju používať, ale nerozumieme jej. Sme v podobnej situácii ako pri varení. Máme kuchársku knihu (kvantovú fyziku), ktorá nám hovorí, čo máme robiť, ale prečo a ako vznikne z vajčiek omeleta nemusíme vedieť, a ani nevieme. Je otázne, či vôbec niečo ako princípy kvantovej fyziky niekedy budeme mať.

### PRESNÉ PREDPOVEDE

Kvantová fyzika predpovedá deje s veľkou presnosťou. Jej hlavnou črtou, ktorú priamo pozorujeme, je kvantovanie hodnôt fyzikálnych veličín. Napríklad elektróny v atónoch môžu mať iba isté (diskrétné) hodnoty energie. Oveľa dôležitejšou črtou je však jej štatistický charakter. Kvantová fyzika nám neumožňuje predpovedať jednotlivý výsledok merania inak ako pravdepodobnostne. Táto vlastnosť úzko súvisí s tzv. *princípom superpozície* a *princípom neurčitosti*.

Princíp superpozície je princípom, ktorý vyjadruje vlastnosti matematického popisu kvantových systémov. Nejde o princíp „fyzikálny“, t.j. taký princíp, ktorý hľadáme, aby sme mohli povedať, že rozumieme. Princíp neurčitosti má zdanlivo oveľa bližšie k fyzikálnemu princípu, ale koniec koncov ide tiež iba o matematický princíp týkajúci sa obmedzení na presnosť súčasnej špecifikácie dvoch fyzikálnych veličín. Ak vieme určiť hodnotu jednej fyzikálnej veličiny úplne presne, tak hodnotu druhej veličiny poznáme iba nepresne a táto nepresnosť je daná práve formulkou, ktorá je obsahom princípu neurčitosti. Najznámejším príkladom tohoto princípu je trochu protiintuitívne poznanie, že pre kvantové častice nevieme presne naraz určiť ich polohu a rýchlosť.

### VEEMI DISKUTOVANÁ TÉMA

Na rozdiel od klasickej fyziky, v ktorej sa procesu merania nevenuje nejaká významná pozornosť a považuje sa viacmenej za triviálny akt, tak v prípade kvantového merania ide o veľmi diskutovanú tému. Prakticky od počiatku fyzikov trápila náhodnosť celého procesu, avšak až o niečo neskôr sa začalo diskutovať aj o probléme, čo sa vlastne s objektom pri meraní deje. Pri našej diskusii o dvojštrbinovom experimente sme si popísali tzv. vlnovo-časticový dualizmus (*Quark 2005/02*), ktorý v podstate ukazuje citlivosť interferencie na meranie. Pozorovaný interferenčný obrazec zmizol akonáhle sme mali možnosť povedať, ktorú cestu (štrbinu) si častica zvolila. Inými slovami, pri uskutočnení merania polohy častice, ktoré nám jednoznačne povie, ktorú cestu si častica vybrala, sa výsledok celého experimentu dramaticky zmení. To znamená, že pri kvantovom meraní sa s časticou udeje niečo dramatické. Všeobecné ponaučenie je, že vplyv merania kvantového objektu nemôžeme v žiadnom prípade zanedbať. Čo sa počas merania so systémom vlastne deje?



Obr.1. John von Neumann. Pôvodom maďarský fyzik a matematik, ktorý sa veľkou mierou pričínal o modernú formuláciu kvantovej teórie.

### DVA TYPY VÝVOJA

Pôvodom maďarský fyzik *John von Neumann*, ktorý ako prvý matematicky jasne sformuloval kvantovú teóriu, rozlišoval dva rôzne typy (procesy) ako sa kvantový systém môže meniť. Prvý typ popisuje postupnú a hlavne úplne deterministickú zmenu kvantového stavu popísanú známou *Schrodingerovou rovnicou*. Druhým typom je práve zmena stavu pri meraní, ktorá sa z pohľadu času deje skokovo a naviac je úplne náhodná. Hovoríme, že systém pri meraní *skolabuje* do určitého stavu, ktorý závisí od nameranej hodnoty. Jediné, čo vieme povedať, je pravdepodobnosť, s akou tento proces nastane pre konkrétny konečný stav, resp. konkrétnu nameranú

hodnotu. Práve tento kolaps a táto dualita vývoja je pre niektorých fyzikov živnou pôdou na diskusie o úplnosti a univerzálnosti kvantovej fyziky. Stále je snaha vysvetliť celý proces merania pomocou Schrodingerovského vývoja, avšak doposiaľ každý takýto pokus stroskotal, pretože Schrodingerova rovnica vedie k deterministickému vývoju a pri meraní je zmena úplne náhodná. Tento vnútorný rozpor medzi oboma typmi vývoja sa zatiaľ nikomu nepodarilo prekonať.

jedna z najdôležitejších rovníc vo fyzike

Schrodingerova rovnica

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

Ak by sme poznali riešenie vedeli by sme všetko o systéme

## SCHRODINGEROVA ROVNICA

Fyzika je bežne chápané ako veda, ktorá je plná vzorcov a človek zo školy neraz získa pocit, že celé jej umenie spočíva v úlohe nájsť a použiť ten správny vzorec. V skutočnosti vzorcov, resp. rovníc, ktoré sú dôležité, nie je až tak veľa a všetky vzťahy, ktoré sa naučíme sú odvodené zo zopár základných rovníc a platia pre špecifické situácie. Newtonova fyzika popisuje akýkoľvek pohyb všetkých telies a jej základ tvorí prakticky jediná rovnica, ktorá nám hovorí, že  $F = m \cdot a$  (sila = hmotnosť x zrýchlenie). Nič viac nepotrebujeme, aby sme popisali či už pád telesa na zem, alebo pohyb planét okolo Slnka. Táto rovnica nám popisuje akýkoľvek pohyb telies okolo nás. Albert Einstein nás naučil, že ide o rovnicu približnú a pre veľmi vysoké rýchlosti a energie platia úplne iné pohybové rovnice, tzv. *Einsteinove rovnice*. Svet elektriny a magnetizmu (vrátane celej optiky) úplne popisujú iba štyri *Maxwellove rovnice*. Pohybové vlastnosti kvantových systémov plne charakterizuje tzv. *Schrodingerova rovnica*, ktorá popisuje ako sa stav systému vyvíja v čase. Všetky tieto rovnice sú tzv. *diferenciálne rovnice*, ktoré popisujú ako sa vlastnosti skúmaných objektov menia vo veľmi krátkych časových škálach. Ak chceme uskutočniť nejaké užitočné predpovede, tak potrebujeme tieto rovnice vyriešiť. A práve táto úloha je nesmierne zložitou vo všetkých teóriách, kvantovú fyziku nevynímajúc. Vyriešiť Schrodingerovu rovnicu je jedným z kľúčov k pochopeniu vlastností kvantového sveta. Napriek tomu, že dnes ju vieme vyriešiť iba vo veľmi špecifických podmienkach a aj to poväčšine iba približne, tak využitím týchto riešení sa stretávame skutočne všade okolo nás. Napríklad pochopenie stability hmoty je toho príkladom, pretože podľa pohybových rovníc Newtonových a Maxwellových by elektróny prakticky v zlomku sekundy mali spadnúť do jadra, t.j. atómy by mali prakticky skolabovať. Schrodingerova rovnica ponúka síce ťažko stráviteľné, ale napriek tomu elegantné riešenie tohoto problému. Proces kvantového merania je zdá sa výnimkou z takéhoto modelu, pretože ide o proces, ktorý nie je riešením tejto rovnice.

## MODEL MERANIA

Štandardne si dnes meranie predstavujeme ako dôsledok interakcie meraného objektu a meracieho prístroja. Počas interakcie, ktorá predchádza samotnému odčítaniu výsledku, popísanej Schrodingerovským vývojom sa systém kvantovo previaže s meracím prístrojom. Vďaka tomu sa vytvoria veľmi silné korelácie medzi oboma systémami, t.j. previazanie vytvorené v procese interakcie nám zabezpečuje, že vlastnosti meracieho prístroja sú v priamom vzťahu s fyzikálnymi veličinami popisujúcimi meraný systém. Merací prístroj je makroskopický objekt, z ktorého vlastností nakoniec odčítame nameranú hodnotu, pričom oba systémy skolabujú do určitého známeho stavu. Inými slovami namiesto samotného systému nakoniec premeriavame merací prístroj. Ako však vykonávame toto meranie?

Problém merania sme týmto modelom nevyriešili, iba sme ho posunuli o poschodie vyššie. Problémom zostáva úloha, ako odčítať hodnotu z meracieho prístroja. Takto postupujeme ďalej na vyššie a vyššie poschodia, až nakoniec skončíme niekde pri našej schopnosti uvedomiť si výsledok, resp. zmerať stav nášho vedomia. Tu však dnešná fyzika končí. Neostáva nám zatiaľ nič iné ako prijať kvantové meranie sprevádzané kolapsom ako fakt.

## DVOJŠTRBINOVÝ EXPERIMENT

Ako príklad si spomeňme už diskutovaný dvojštrbinový experiment. Pri zisťovaní, ktorú štrbinu si častica zvolila, zisťujeme v podstate polohu tejto častice. Inými slovami snažíme sa „pohľadom“ zistiť, kde sa častica nachádza. Aby sme „videli“, tak si štrbiny osvetlíme a pozorujeme či sa svetlo rozptyľuje alebo nie. Pri objektoch, s ktorými sa bežne stretávame, takéto osvetlenie prakticky nezmení ich polohu. Avšak pre malú časticu je pohltie fotónov svetla veľkou udalosťou, ktorá mení jej vlastnosti. My nakoniec nepozorujeme priamo časticu, ale iba odrazené fotóny. V prípade, že spozorujeme rozptýlenie, tak vieme, ktorú cestu si častica vybrala. Toto meranie je úplne v súlade s popísaným modelom merania, v ktorom namiesto priameho merania systému (častice) uskutočňujeme meranie iného systému (fotónov), ktoré vlastne tvoria súčasť meracieho zariadenia.

## METÓDA HMATANIA

Pri zaznamenávaní samotného výsledku tohoto experimentu, t.j. interferenčného obrazca, tiež meriame polohu častice, ale úplne iným spôsobom. Namiesto „pozovania“ tentokrát používame skôr metódu akéhosi „hmatania“, resp. častice zachytávame v detektoroch. Po dopade častice do detektora sa v detektore spustí celá lavína procesov, ktoré tento veľmi slabý jav pretransformujú do makroskopicky pozorovanej zmeny, akou je napríklad zapípanie detektora, prípadne očernenia časti fotografickej platne. Častica môže vyvolať v detektore prúd v nejakej časti elektronického obvodu, prípadne chemickú reakciu, alebo nejaký iný jav, ktorý vieme priamo odporozovať našimi zmyslami. Pri takýchto typoch merania sa kvantová častica stáva súčasťou meracieho zariadenia a niekedy sa úplne zničí. V podstate ju strácame a hovoríme, že takýto typ merania polohy je *deštruktívnym meraním*. Každé meranie obsahuje tento element deštrukcie, ale v istých prípadoch, keď v skutočnosti robíme meranie na úplne inom systéme, prichádza k deštrukcii iného fyzikálneho systému, než ktorého vlastnosti meriame. Napríklad pri meraní

polohy častice pozoráním prichádza k deštrukcii rozptyľovaných fotónov. Stále však v procese merania máme kolaps, ktorého filozofické dôsledky sú v nemalej miere príčinou existencie rôznych interpretácií kvantovej fyziky.  
*(pokračovanie v budúcom čísle)*

**MARIO ZIMAN**