

## Svet kvantovej fyziky VI Skladáme kvantový počítač

Základným stavebným kameňom dnešných počítačov sú tzv. čipy, resp. integrované obvody. Ide o elektronické zariadenia obsahujúce množstvo tranzistorov, ktorých činnosti rozumieme vďaka kvantovej teórii. Napriek tomu však tranzistory svoj kvantový pôvod nevyužívajú a z pohľadu informatiky je ich fungovanie úplne klasické. V tejto časti si predstavíme základné súčiastky kvantových počítačov a naznačíme si základné experimentálne techniky, ktoré sa pri kvantovom počítaní používajú.

V dnešnej dobe sa o jeden bit informácie stará niekoľko desiat tisíc častíc, avšak tento počet sa z roka na rok závratne znižuje. Prirodzenou hranicou tejto miniaturizácie bude informácia reprezentovaná jednotlivými časticami. Ešte skôr ako narazíme na túto principiálnu hranicu, prideme do oblastí, v ktorých je už chod sveta určený kvantovou fyzikou. Táto teória je plná zvláštností a podivností, ktorým síce nerozumieme tak ako by sme chceli, ale vieme ich využívať. Princípy kvantovej fyziky prinášajú do oblasti spracovania informácie úplne nové prvky. V minulej časti (*Quark 2005/06*) sme načrtli, že hlavná sila kvantových počítačov je v tzv. kvantovom paralelizme, ktorý nám v istom zmysle umožňuje vykonať naraz obrovské množstvo výpočtov, t.j. operácií.

### HEADÁ SA KVANTOVÝ BIT

Kvantový počítač by mal namiesto s bitmi informácie pracovať s tzv. kvantovými bitmi, t.j. dvojhladinovými kvantovými systémami. Každá z hladín reprezentuje jednu z logických hodnôt (nula, alebo jedna). Aby sme vedeli plnohodnotne vykonávať kvantové výpočty, tak potrebujeme kvantové objekty, s ktorými vieme veľmi dobre manipulovať, ktorých správanie a vývoj vieme ustrážiť a kontrolovať. Ktoré častice si vybrať? Použiť priamo elektróny, alebo protóny by bolo perfektné. Avšak obidve tieto častice až priveľmi radi interagujú a dobrá „izolácia“ elektrónov a protónov nie je práve jednoduchá vec. Iná je situácia s atómami, prípadne iónmi. Častíc tohoto typu je okolo nás pomerne dosť. Ako je to však s ich kvantovými vlastnosťami?

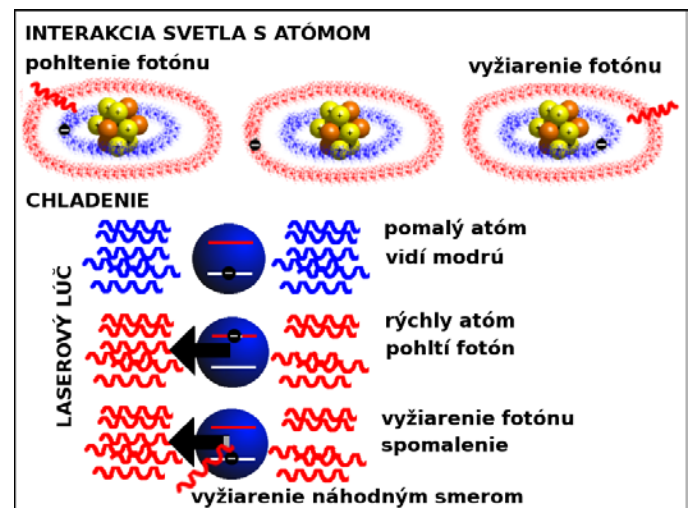
Jedným z prvých úspechov kvantovej fyziky bolo vysvetlenie spektrálnych čiar atómu vodíka. Vďaka kvantovej mechanike sa nám podarilo pochopiť nielen periodicitu Mendelejevovej tabuľky prvkov (atómov), ale aj princíp chemickej väzby, chemických reakcií a v neposlednom rade aj stabilitu hmoty. Tieto výsledky samy osebe ešte neznamenajú, že atómy okolo nás prejavujú všetky črty kvantových systémov. Skôr opak je pravdou a bežne nemusíme brať do úvahy ich kvantovú podstatu. Ak chceme pripraviť atóm v nejakom superpozičnom stave a overiť princíp superpozície, prípadne interferenciu (písali sme o tom v *Quarku 2005/03*), tak si potrebujeme tieto častice pripraviť v laboratóriu za veľmi špecifických podmienok.

### CHLADENIE

Jedným z hlavných nepriateľov kvantových nádejí je teplota, ktorá svojim spôsobom pracuje proti prejavom kvantového sveta a s jej zvyšovaním sa vo všeobecnosti veľmi rýchlo strácajú kvantové vlastnosti. Podľa učebníc fyziky teplota vyjadruje mieru chaotického pohybu častíc a je úmerná priemernej energii častíc. Ak teda chceme použiť atómy na realizáciu kvantových bitov, tak ich potrebujeme najprv schladiť, resp. spomaliť. Nulová

teplota teoreticky znamená stav bez pohybu, ale kvôli princípu neurčitosti kvantové systémy takýto stav „absolútneho pokoja“ nikdy nemôžu dosiahnuť. Predstavujeme si to tak, že kvantová častica neustále vykonáva akýsi vibračný pohyb, napr. elektróny stále akosi obiehajú okolo jadra. V kvantovej fyzike stav s nulovou teplotou definujeme ako stav s najmenšou energiou, tzv. základný stav.

Podľa kvantovej mechaniky sa atóm zbavuje prebytočnej energie tým, že vyžiari fotón. Atómy aj molekuly okolo nás však neustále bombardujú fotóny najrôznejších energií, ktoré vracajú vyžiarenú energiu atómu späť. Aj preto sa atómy prakticky nenachádzajú vo svojom základnom stave a majú nenulovú teplotu. Aby sme pochopili akým spôsobom chladenie funguje, tak potrebujeme získať predstavu o vzájomnej interakcii svetla (fotóny) a látky (atómy, ióny, molekuly). Ide o pomerne komplikovaný fyzikálny proces, ktorá sa dá predstaviť nasledovne. V prvom rade treba povedať, že konkrétny atóm neinteraguje s hocakým fotónom, ale iba s fotónmi určitej energie, t.j. určitej farby, resp. frekvencie. Pri tejto interakcii prichádza k zmene stavu atómu, v ktorom zasiahnutý elektrón „preskočí“ na vzdialenejšiu obežnú dráhu (získa energiu fotónu), alebo úplne vyletí z atómu preč, t.j. vznikne záporný ión. Atómy majú tendenciu minimalizovať svoju energiu, t.j. elektróny časom popreskakujú na bližšie a menej energetické obežné dráhy. Pri takomto preskoku stratia časť svojej energie, ktorá je vyžiarená do okolia vo forme fotónov. Rozdiel energií medzi dvoma obežnými dráhami (hladinami) je úmerný energii (frekvencii) absorbovaného, alebo vyžiareného fotónu.



**Obr.1** Interakcia svetla s atómom pozostáva z troch fáz: pohltenie fotónu, excitácia atómu a vyžiarovanie fotónu. Pri chladení atómov sa využíva Dopplerov jav, podľa ktorého pre pohybujúci sa a pre stojaci atóm má ten istý fotón rozdielnú energiu (frekvenciu).

Jedna z metód chladenia využíva tzv. Dopplerov jav. Atómy pohybujúce sa veľkou rýchlosťou vidia fotóny inej frekvencie, ako atómy pomalšie. Vyberieme teda laser, ktorý bude pohlčován rýchlymi atómami, zatiaľ čo pomalšie si tento laser ani nevšimnú, t.j. fotóny pre ne nemajú tú správnu frekvenciu. Pri vzájomnom kontakte atómu a fotónu sa okrem energie zachováva aj hybnosť, čo sa prejavuje ako isté kopnutie fotónu do atómu. Ide o proces podobný zrážke dvoch guľčiek. V tomto prípade však jedna z nich (fotón) po zrážke zanikne. Keďže spätné vyžiarovanie

fotónu je v úplne náhodnom smere, tak pri opakovaným interakciách sa príspevky k hybnosti pochádzajúce z vyžarovania fotónov navzájom vyrušia. Zostáva iba hybnosť pochádzajúca od absorbovaných fotónov, ktorá má však iba jeden smer a efektívne spomaľuje rýchlosť atómov, t.j. atómy ochladzuje (viď Obr.1).

### ČASTICE V PASCI

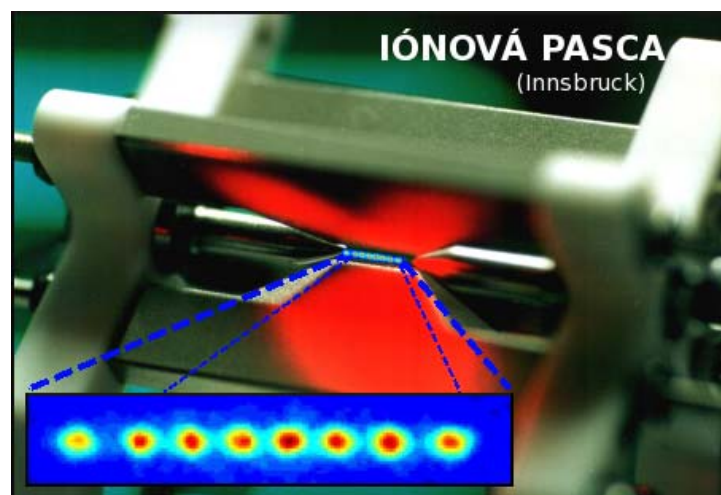
Aby sa nám spomalené atómy, alebo ióny zase nerozutekali, tak ich lapíme do pasce a pokiaľ možno, čo najviac odizolujeme od nežiadúcich vplyvov okolitého sveta. Samozrejme ide o špeciálnu pascu, ktorá sa tvorí pomocou laserov a elektród vytvárajúcich špeciálne silové pôsobenie. Pomocou elektrických a magnetických síl sa vytvorí akoby jama, do ktorej sa atóm alebo ión zachytí. Do takejto pasce vložíme niekoľko atómov, na ktorých sa budeme pokúšať vykonávať výpočty. Okrem priestorových stupňov voľnosti majú atómy a ióny aj vnútorné stupne voľnosti, ktoré zodpovedajú vzájomnému usporiadaniu elektrónov a protónov, z ktorých je atóm alebo ión zložený. Pre jednoduchosť si to predstavíme tak, že elektróny obiehajú okolo jadra po istých dráhach, ktoré zodpovedajú možným vnútorným stavom, resp. energetickým hladinám. Elektróny medzi niektorými hladinami preskakujú, pričom alebo vyžarujú fotón, alebo absorbujú energiu nejakého fotónu. Kvantový bit je realizovaný nejakými dvoma vnútornými hladinami týchto častíc. Vyberáme si také, s ktorými vieme čo najlepšie narábať. V laboratóriách po celom svete sa robia experimenty s atómami, prípadne iónmi vápnika, berýlia, sodíka, lítia, atď.

Pri konštruovaní kvantových hradíel a pri kvantovom počítaní na časticiach v pasci opäť používame laser. Dve vybrané hladiny si označíme ako  $|g\rangle$  („ground state“) a  $|e\rangle$  („excited state“). Je výhodné vybrať si také hladiny, medzi ktorými sú samovoľné preskoky elektrónov zakázané, t.j. hodnoty informácie sa nám náhodne nemenia. Ak však chceme hodnotu kvantového bitu zmeniť, tak práve pomocou lasera zmeníme podmienky atómu alebo iónu takým spôsobom, že tento prechod je umožnený. V závislosti od doby svietenia laserom na atóm zmeníme aj jeho vnútorný stav zodpovedajúci kvantovému bitu. Týmto laserovými pulzmi vykonávame výpočet na jednotlivých atómoch. Zložitejším spôsobom vieme pomocou laserov sprostredkovať aj vzájomné interakcie medzi kvantovými bitmi, t.j. realizovať zložitejšie kvantové hradlá a teda uskutočniť plnohodnotný kvantový výpočet.

Ak chceme zistiť v akom stave sa náš kvantový bit nachádza, tak použijeme laser pracujúci na inej frekvencii. Laserom, ktorým vykonávame výpočty na jednotlivých kvantových bitoch by sme totižto tento stav menili. K tomu aby sme zistili hodnotu kvantového bitu, používame ešte jednu pomocnú hladinu  $|m\rangle$ . Merací laser je nastavený tak, aby donútil elektrón z hladiny  $|g\rangle$  preskočiť na hladinu  $|m\rangle$ . Samovoľný preskok medzi týmito hladinami je povolený a preto sa tento elektrón vráti na svoju pôvodnú hladinu, pričom sa vyžiari fotón. Ak svietime takýmto laserom na kvantový bit v hodnotou  $|g\rangle$ , tak pozorujeme, že atóm vyžaruje. Ak má kvantový bit hodnotu  $|e\rangle$ , tak žiadne vyžarovanie nepozorujeme. Ak sú obe hodnoty v superpozícii, tak pozorujeme striedanie sa vyžarovania a nevyžarovania.

Ignacio Cirac a Peter Zoller v roku 1995 ako prví navrhli využitie iónov v pasci na kvantové počítanie. Ešte v tom istom roku tento návrh experimentálne zrealizovali v laboratóriách

NIST (National Institute of Standards and Technology) v USA. Chris Monroe a Dave Wineland použili kvantové bity zakódované v iónoch berýlia  ${}^9\text{Be}^+$  a ako prví zrealizovali kvantové hradlo s názvom *kontrolované NOT*. Na interakciu dvoch kvantových bitov pri tomto hradle sa využívajú pohybové stupne voľnosti iónov v pasci. Kontrolované NOT tvorí jednu zo základných súčiastiek kvantového počítača a pomocou neho dokážeme v podstate zrealizovať akýkoľvek kvantový výpočet. Zdanlivo nič nestojí v ceste ku kvantovému počítaču založenom na iónoch, prípadne atómoch v pasci. Ako to však býva, svet nie je taký jednoduchý a príroda nám stavia do cesty ďalšie prekážky. Nami popísané princípy kvantového počítania s atómami a iónmi pomocou laserov sú v skutočnosti o niečo komplikovanejšie. V súčasnosti nie je problém uložiť do pasce niekoľko iónov, prípadne atómov. S ich množstvom však narastá aj ich vzájomné ovplyvňovanie a opäť narážame na známy problém. Čím je systém zložitejší, tým je ťažšie udržať a pozorovať všetky jeho kvantové prejavy.



Obr.2 Ióny vápnika zachytené v pasci. Fotka je urobená CCD kamerou.

Isté vylepšenie by mohla priniesť myšlienka tzv. *mikropascí*, t.j. každý z kvantových bitov (atómov) bude vo svojej vlastnej maličkovej pasci. V tomto prípade treba vytvoriť silové pole, ktoré si môžeme predstaviť ako periodicky usporiadané jamy, do ktorých sa atómy zachytia (niečo ako obal na vajíčka). Tento model je momentálne oblasťou veľmi intenzívneho výskumu, ktorý v sebe spája rôzne experimentálne techniky.

### POLOVODIČOVÉ A SUPRAVODIVÉ KVANTOVÉ BITY

Okrem atómov a iónov existujú aj iné návrhy na realizáciu kvantových bitov. Veľmi sľubnou oblasťou je oblasť polovodičov, ktorá dominuje dnešným klasickým počítačom, ako aj oblasť supravodičov. V roku 1997 David Loss and David di Vincenzo navrhli spôsob ako využiť spiny jednotlivých elektrónov uväznených v tzv. *kvantových bodkách*. Kvantové bodky sú akési nanoostrovčeky elektrónov v inak vyprázdnenom priestore v tuhých látkach. Takýto priestor je vytvorený medzi dvoma vrstvami kovov, ako napríklad GaAs (t.j. gálium a arzén) a AlGaAs (t.j. hliník, gálium a arzén). Tieto nanoštruktúry nám slúžia na zachytenie elektrónov, ktoré by nám inak poľahky unikli a akékoľvek výpočty by neboli možné. Následne bolo navrhnutých niekoľko ďalších typov kvantových bitov založených na technológiách spojených s polovodičovými

štruktúrami a javom supravodivosti. Podrobnejšie si však o nich povieme až v niektorej z ďalších častí.

## **BUDÚCNOSŤ**

Nikto dnes nevie povedať, aké riešenie prinesie budúcnosť. Nevieme povedať, či zdoláme všetky prekážky, ktoré nám konštruovanie kvantového počítača ešte postaví do cesty. Nie je síce známy žiadny principiálny dôvod, prečo by kvantový počítač nemal fungovať. Nie je však ani jasné, či vôbec bude fungovať. Hlavným problémom je fenomén tzv. *dekoherencie*, ktorá je pomenovaním procesu straty kvantových vlastností potrebných pre kvantový paralelizmus, t.j. kvantovej superpozície. Nevieme, či budeme niekedy schopní tento proces eliminovať pre ľubovoľne veľký počet kvantových bitov. Vypracovala sa technika tzv. *kvantovej korekcie chýb*, ktorá dokáže za istých predpokladov úspešne bojovať proti dekoherencii. Nakoľko ale možno tieto predpoklady splniť v praxi, je dnes ešte otáznе. V súvislosti s týmto si pripomeňme počiatky vzniku počítačov. Aj v tej dobe bolo mnoho kritických ohlasov a málokto predpokladal, že sa počítače vyvinú do tej formy, v akej ich poznáme dnes. Prvý počítač ENIAC zaberá celú halu a odhady na veľkosť počítačov budúcnosti neboli veľmi nádejné. Zlom priniesol až objav polovodičových súčiastok, v ktorom má kvantová fyzika tiež svoje pevné miesto, pretože princíp fungovania polovodičov a tranzistorov chápeme iba vďaka nej. Čakáme na podobný prelom v technológii, ktorý konštrukciu kvantových počítačov posunie ďalej.

Potrebuje vôbec kvantové počítače? Spomeňme si na motiváciu, ktorá ľudí priviedla k myšlienke kvantových počítačov. Argumenty týkajúce sa efektívnejšieho riešenia zložitých úloh, ktoré sú kľúčové pri súčasnej kryptografii, zatiaľ úplne neobstoja, pretože stále ešte nie je známe, či sú tieto problémy skutočne natoľko zložité. Môže sa stať, že už zajtra niekto vymyslí spôsob ako efektívne rozložiť číslo na prvočísla. Jedinou otázkou potom bude, či je Shorov kvantový algoritmus stále ešte rýchlejší, alebo nie. Odhliadnuc od tejto otvorenej otázky z teórie zložitosti, predsa len existuje akýsi dôvod, prečo by kvantové počítače mohli byť užitočné. Postreh *Richarda Feynmana* a iných o tom, že kvantové systémy nedokážeme efektívne simulovať na klasických počítačoch je stále pravdivý. Kvantový počítač by nám umožnil prekonať istú výpočtovú bariéru a pomohol nám riešiť úlohy z kvantovej fyziky používajúc priamo jej metódy. Simulácie a modelovanie majú aj praktický dosah, t.j. uplatňujú sa aj mimo samotnej fyziky. Napríklad pri výpočtoch vlastností a charakteristík zložitých molekúl, ktoré potenciálne môžu slúžiť ako lieky, alebo urýchľovať chemické reakcie pri výrobe nejakých materiálov, atď.

V neposlednom rade myšlienka kvantových počítačov podnietila základný výskum jednej zo základných teórií nášho sveta – kvantovej fyziky, ktorú dnes vidíme v úplne inej rovine ako ju videli jej tvorcovia. Takisto podnietila experimentálnu snahu o presnejšiu manipuláciu s jednotlivými kvantovými objektmi, ktorá sa v budúcnosti môže hodiť napríklad pri výrobe presnejších meracích zariadení. Pri zmenšovaní nakoniec určite narazíme na atómy, resp. jednotlivé častice. Vôbec pritom nemusíme využiť celý potenciál ponúkaný kvantovou teóriou, ale iba niektoré jej črty (podobne ako aj pri tranzistore). Na bežné počítanie nepotrebuje vytvárať superpozície. Kvantové počítače dokážu všetko, čo dokážu aj klasické a keď sa vzdáme snahy využívať kvantový paralelizmus, tak vyvinuté techniky pri manipuláciách s atómami, iónmi, alebo supravodičmi si nájdú

svoje využitie. Veľmi pravdepodobne raz postavíme aspoň klasický počítač používajúci jednotlivé častice na uchovávanie a spracovanie informácie. Ktorá z techník, resp. ktorá častica alebo aký polovodič v tomto súboji nakoniec zvíťazí je dnes neznáme. Budúcnosť bude určite plná prekvapení.

MARIO ZIMAN