

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Nobelova cena za fyziku v roce 2012 udělena za manipulace s individuálními kvantovými systémy a jejich měření

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 58 (2013), No. 1, 1–10

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/143253>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2013

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

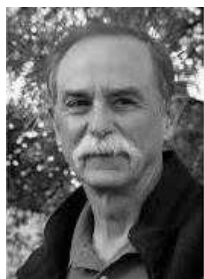


This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Nobelova cena za fyziku v roce 2012 udělena za manipulace s individuálními kvantovými systémy a jejich měření

Úvod

Chování jednotlivých elementů tvořících náš svět – atomů (látka) a fotonů (světlo) – je popsáno zákony kvantové mechaniky. Tyto částice jsou zřídka izolovány a obvykle silně interagují se svým okolím. K popisu souboru částic je na rozdíl od jednotlivých atomů či fotonů často možné použít klasickou fyziku. Již od počátků kvantové mechaniky používají fyzikové myšlenkové experimenty a snaží se předpovědět chování izolované kvantové částice.



DAVID J. WINELAND



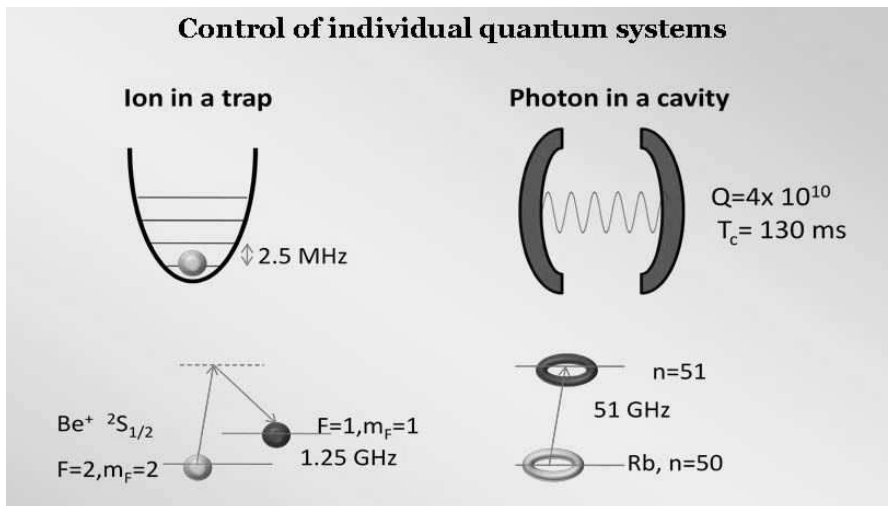
SERGE HAROCHE

Během 80. a 90. let byly vyvinuty metody umožňující chlazení iontů zachycených v pastech a jejich ovládní pomocí laserového světla. S jednotlivými ionty lze nyní manipulovat a pozorovat je in situ při pouze minimální interakci s okolím. Další metody umožňují záchyt fotonů a manipulaci s nimi uvnitř dutiny rezonátoru. V sofistikovaných experimentech je lze pozorovat, aniž by byly zničeny interakcí s atomy. Tyto techniky vedly k průkopnickému výzkumu, který otěstoval základy kvantové mechaniky a spojení mezi mikroskopickým a makroskopickým světem nejen v myšlenkách, ale i v reálném experimentu. Dále přinesly zlepšení do oblasti kvantového počítání a vedly k vývoji nové generace velmi přesných optických hodin.

V roce 2012 byla Nobelova cena za fyziku udělena D. Winelandovi a S. Harochovi za experimentální objevy dovolující měřit a ovládat jednotlivé kvantové systémy. Patří dvěma různým, avšak propojeným technologiím: iontům zachyceným v potenciálové pasti a fotonům uvězněným v dutině rezonátoru (viz obr. 1).

© The Royal Swedish Academy of Sciences, 2012.

Z anglického originálu *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2012 *Measuring and manipulating individual quantum systems** compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences přeložil MARTIN KOZÁK.



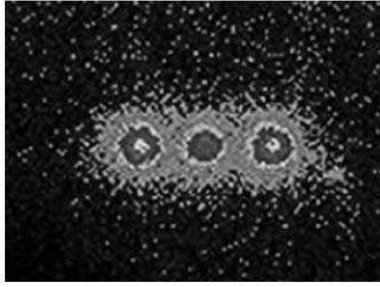
Obr. 1. Ilustrace dvou typů experimentů diskutovaných v textu. Vlevo: iont zachycený v pasti tvořené potenciálem harmonického oscilátoru. Jeho kvantový stav (jak vnitřní stav, tak i jeho pohyb) lze měnit prostřednictvím interakce s laserovými pulzy, jak je ukázáno pro případ iontů Be^+ . Vpravo: Jeden nebo několik fotonů zachycených v mikrovlnné dutině s vysokým Q . Stav pole uvnitř rezonátoru je měřen a kontrolován interakcí s vysoce excitovanými atomy Rb.

Mezi oběma experimenty je několik pozoruhodných podobností. V obou případech je kvantový stav pozorován pomocí kvantového nedestruktivního měření, ve kterém je kvantový systém svázan s harmonickým oscilátorem – problém popsán tzv. Jaynesovým-Cummingsovým hamiltoniánem. Dvouhladinový systém sestává z iontu (se dvěma hladinami propojenými interakcí s laserovým světlem) nebo z vysoce excitovaného atomu (se dvěma Rydbergovými stavy svázanými pomocí mikrovlnného pole). Kvantový harmonický oscilátor popisuje pohyb iontu v pasti či mikrovlnného pole v rezonátoru.

Zde popíšeme tyto metody pro dva případy, které byly demonstrovány experimentálně, a uvedeme některé významné aplikace ve vědě a technologii.

Ionty v pasti

Tento výzkum odstartoval v 70. letech minulého století z technik vyvinutých pro zachycení nabitých částic do pastí. Paul a Dehmelt byli oceněni v roce 1989 Nobelovou cenou za fyziku za objev zachycení iontů do pastí. Důležitým krokem vstříc kontrole izolovaných iontů bylo dopplerovské chlazení, které navrhli Hänsch a Schawlow [22] pro neutrální atomy a Wineland a Dehmelt [45] pro ionty. První experimenty s ionty provedli nezávisle Wineland (Mg^+) a Neuhauser (Ba^+) s kolegy v roce 1978. Wineland, Ekstrom a Dehmelt [47] diskutovali možnost zachycení iontu již v roce 1973. Experimentálně toho bylo dosaženo Toschekovou skupinou v roce 1980 (viz [35]), která pozorovala iont Ba^+ v Paulově pasti a Winelandem a Itanem [49], kteří zachytili iont Mg^+ v Penningově pasti. Skupina okolo Gabrielse vyvinula velice podobné techniky umožňující chlazení jednotlivých elektronů zachycených v Penningově pasti [37].

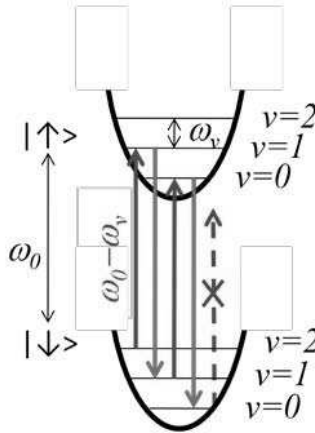


Obr. 2. Snímek fluorescence tří zachycených iontů Be^+ (galerie National Institute of Standards and Technology)

Iontové pasti jsou vytvořeny v ultravysokém vakuu pomocí kombinace statických a oscilujících elektrických polí. Existují pasti, kde je zachycen jen jeden iont, stejně jako lineární pasti, v nichž je několik iontů rozložených na přímce. Zachycené ionty oscilují a tyto oscilace jsou za nízkých teplot kvantovány. Zachycený iont má proto dvě sady kvantovaných energetických hladin: vibrační hladiny charakterizující pohyb iontu v pasti (tzv. externí stavy) a elektronové hladiny popisující vnitřní kvantový stav iontu. Přechody mezi těmito hladinami mohou nastat díky absorpci či emisi světla a díky dvoufotonovému procesu (tzv. Ramanův rozptyl). Ionty mohou být pozorovány pomocí optických přechodů, které vedou k silnému rozptylu světla, pokud jsou excitovány laserem. Potom mohou být přímo sledovány okem či CCD kamerou (obr. 2). Navíc vnitřní stav iontu může být určen z pozorování kvantových přeskoků. To demonstrovali Nagourney [33] a Wineland a kol. [1].

Důležitým krokem umožňujícím manipulaci s kvantovým stavem zachyceného iontu bylo chlazení na nejnižší energetickou hladinu pasti technikou známou jako chlazení pomocí postranního pásu (sideband cooling [14], [29]). Obrázek 3 ukazuje několik vibračních stavů iontu v pasti pro dvě různé elektronové hladiny ($|\downarrow\rangle$ a $|\uparrow\rangle$). Metoda je založena na přeměně vibrační energie iontu na jeho vnitřní excitaci. Toho lze dosáhnout pomocí úzkopásmového laseru svítícího na frekvenci $\omega_0 - \omega_\nu$, kde ω_ν představuje frekvenční vzdálenost mezi dvěma vibračními módy pasti a ω_0 je frekvenční vzdálenost mezi dvěma elektronovými hladinami iontu. Excitovaný iont relaxuje preferenčně do stavu se stejným vibračním kvantovým číslem ν . Díky tomu se jeho energie snižuje a postupně klesá k $\nu = 0$. Tato technika, vyvinutá Winelandem a spolupracovníky, dovoluje kontrolovat jak vnitřní, tak i vnější stupně volnosti zachyceného iontu. Přesným monitorováním vlastností pasti lze vytvořit Fockovy pohybové stavy (s přesně definovaným ν) stejně jako různé superpozice těchto stavů, tzn. koherentní nebo termální stavy [26].

Dalším průlomem byl vývoj technik umožňujících přenést kvantovou superpozici elektronových stavů na kvantovou superpozici vibračních stavů pasti [30], inspirovaný teoretickou předpovědí [9]. Tato superpozice může být následně přenesena na jiný iont sdílející s původním vibrační energetické hladiny, což ukázal v roce 2003 Blatt s kolegy na univerzitě v Innsbrucku v Rakousku [41]. Wineland a kol. použili tuto metodu v dekoherenčních měřeních a v konstrukci optických hodin a stala se také základem kvantových hradel založených na principu zachycených iontů. Příklad je ilustrován v rámečku 1.



Obr. 3. Princip chlazení pomocí postranního pásu (viz text)

Rámeček 1. Vytvoření a přenos superpozice stavů iontu v pasti

Předpokládejme iont zachycený v pasti v nejnižším elektronovém stavu $|\downarrow\rangle$ a v nejnižším vibračním stavu $|0\rangle$. Kvantový systém lze popsat stavovým vektorem

$$|\varphi_0\rangle = |\downarrow\rangle|0\rangle.$$

Iont může být excitován laserovým pulzem, přičemž vznikne koherentní superpozice kvantových stavů:

$$|\varphi_0\rangle \rightarrow |\varphi_1\rangle = (\alpha|\downarrow\rangle + \beta|\uparrow\rangle)|0\rangle.$$

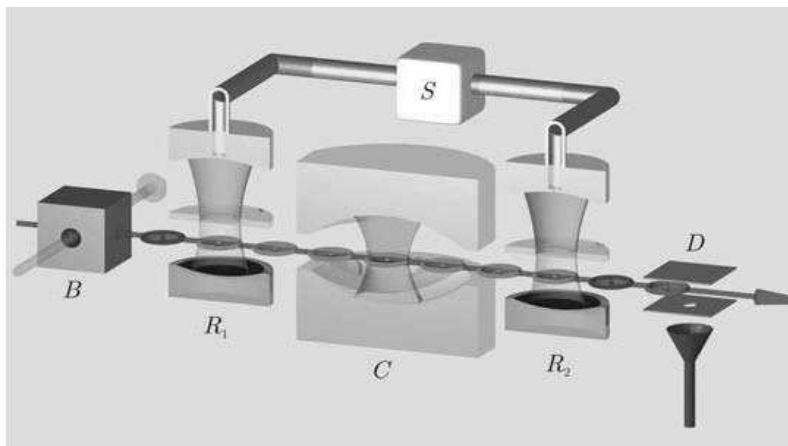
π -puls s červeným frekvenčním posunem (s frekvencí rovnou $\omega_0 - \omega_\nu$, viz obr. 3) interaguje s iontem. Jelikož se iont nachází v nejnižším vibračním stavu, je ovlivněn pouze stav $|\uparrow\rangle|0\rangle$. Ten se změní na $|\downarrow\rangle|1\rangle$:

$$|\varphi_1\rangle \rightarrow |\varphi_2\rangle = \alpha|\downarrow\rangle|0\rangle + \beta|\downarrow\rangle|1\rangle = |\downarrow\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle).$$

Superpozice je tedy přenesena na vibrační módy iontu. Jestliže se v pasti nachází další iont, bude sdílet vibrační hladiny s prvním iontem. Stejným způsobem může tedy být tato superpozice přenesena na vnitřní stavy druhého zachyceného iontu.

Fotony v rezonátoru

Výzkum zvaný rezonátorová kvantová elektrodynamika (CQED z angl. cavity quantum electrodynamics) odstartoval v 80. letech studiem změn ve vlastnostech atomu (hlavně spontánní emise), pokud je umístěn v optické či mikrovlnné rezonanční dutině (přehled lze najít v [18]). Kleppner a jeho skupina [21], stejně jako De Martini s kolegy [12]



Obr. 4. Experimentální uspořádání pro studium stavů mikrovlnného pole s pomocí kruhových Rydbergových atomů (viz text)

a skupina Haroche na Yaleově univerzitě [23] pozorovali potlačení spontánní emise, pokud se rozměry dutiny přiblížily vlnové délce emitovaného světla. Dalším krokem v tomto výzkumu bylo studium zesílení světla v takovéto dutině, k čemuž v mikrovlnné oblasti významně přispěl Haroche se spolupracovníky [16]. Skupina z Institutu kvantové optiky Maxe Plancka v Garchingu vedená Waltherem demonstrovala jednoatomový mikromaser [27], zatímco Haroche a jeho skupina prezentovali mikromaser operující pouze se dvěma fotony [3]. Paralelně s Harocheho prací v mikrovlnné oblasti [5] vyvinul Kimble CQED v optické části spektra (shrnutí lze nalézt v [28]), přičemž získal tzv. silnou vazbu atomového pole v dutině. CQED v optické oblasti kombinuje rezonátorovou dynamiku elektromagnetického pole s laserovým chlazením a s technikami zachycení do pastí a má zajímavé aplikace v kvantové optice a informatice [25]. CQED také inspirovala výzkum supravodivých obvodů, který byl nazván kvantová elektrodynamika obvodů (circuit-QED [42]).

Hlavní součástí experimentů, které provedli Haroche, Raimond, Brune a jejich spolupracovníci, je mikrovlnný rezonátor (obr. 4) tvořený dvojicí sférických zrcadel vzdálených od sebe 2.7 cm vyrobených ze supravodivého materiálu (Nb) a ochlazených na velmi nízkou teplotu ~ 0.8 K. Technologický pokrok v kvalitě zrcadel vedl na začátku minulého dekády k možnosti vytvořit rezonátor s extrémně vysokým koeficientem kvality Q (4×10^{10}), což zvedlo dobu života fotonu v rezonátoru na ~ 130 ms. V takovém rezonátoru urazí foton přibližně 40 000 km před tím, než je absorbován.

Pole v rezonátoru je v tomto experimentu měřeno pomocí atomů Rb, které jsou připraveny v kruhových Rydbergových stavech (např. $n = 50$, $l = |m| = 49$). Tyto atomy mají velkou plochu (poloměr 125 nm) a jsou velmi silně svázané s polem v rezonátoru. Přechod $n = 50(|\downarrow\rangle)$ na $n = 51(|\uparrow\rangle)$ má téměř stejnou frekvenci jako mikrovlnné pole v dutině (51 GHz). Dva různé rezonátory R_1 a R_2 (viz obr. 4) jsou použity k vytvoření a analýze kvantové superpozice mezi stavy $|\downarrow\rangle$ a $|\uparrow\rangle$. V detektoru (D) se díky selektivní ionizaci elektrickým polem určuje stav prošlých atomů. Fotony vytvořené v koherentním zdroji jsou přivedeny do rezonátoru pomocí vlnovodů.

vodu. Atomy procházejí rezonátorem jeden po druhém s danou rychlostí a díky tomu je určena i doba jejich interakce s polem. Ve většině experimentů provedených skupinou Harocheho měly atomy a pole mírně odlišné frekvence. Atom putující rezonátorem proto neabsorbuje fotony, ale jeho energetické hladiny se posouvají díky dynamickému Starkovu efektu. Tím vzniká posun fáze mikrovlnného pole v rezonátoru. Tento fázový posun má znaménko závislé na tom, je-li atom ve stavu $|\downarrow\rangle$ nebo $|\uparrow\rangle$, což vede k vytvoření entanglovaných stavů atomů a pole [6].

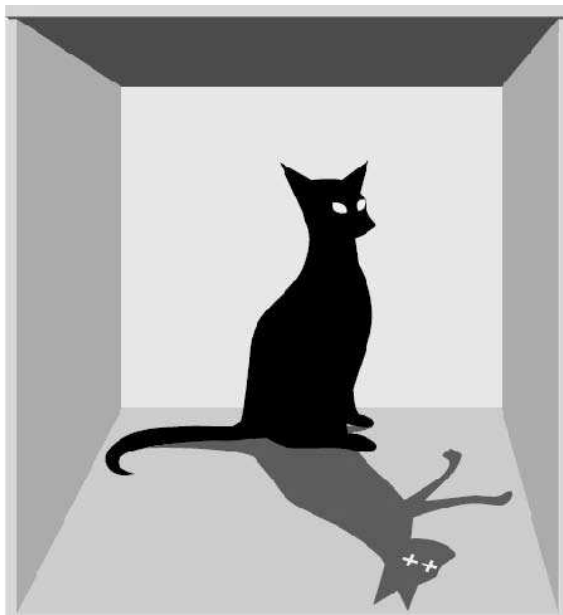
V roce 1990 navrhli Haroche a jeho spolupracovníci techniku vhodnou pro měření počtu fotonů v rezonátoru metodou kvantového nedestruktivního měření [4]. Nedávno tuto techniku byli schopni demonstrovat experimentálně [15] (podobné experimenty viz [36]). Jednotlivé fotony jsou zachyceny v rezonátoru a pozorovány prostřednictvím interakce s atomy. Princip měření je vysvětlen detailněji v rámečku 2. To vedlo k experimentům, kde byl pozorován „progresivní kolaps“ vlnové funkce. V těchto experimentech lze sledovat vývoj počtu fotonů s časem v průběhu měření [17].

Rámeček 2. Měření jednoho fotonu v rezonátoru bez jeho zničení

Atom ve stavu $|\uparrow\rangle$ je připraven v B (viz obr. 4). V R_1 je $\pi/2$ pulzem vytvořena superpozice atomových stavů $|\downarrow\rangle$ a $|\uparrow\rangle$ tak, že $|\varphi_1\rangle = (|\downarrow\rangle + |\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$. Po průchodu rezonátorem C se superpozice změní na $|\varphi\rangle = (|\downarrow\rangle + e^{i\phi}|\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$, kde ϕ je fáze nashromážděná superpozicí stavů během průchodu. Atomový dipól vytvořený superpozicí stavů se chová jako hodiny a fáze reprezentuje pozici hodinové ručičky po průchodu rezonátorem. Mikrovlnné pole v rezonátoru má frekvenci mírně odlišnou od frekvence mezi stavy atomu. Díky tomu atom procházející tímto polem neabsorbuje fotony, ale jeho energetické hladiny se posouvají. V důsledku tohoto posuvu se změní fáze ϕ v závislosti na počtu fotonů v rezonátoru. Čas průchodu atomu lze zvolit tak, že jestliže rezonátor neobsahuje žádný foton, $\phi = 0 \pmod{2\pi}$. Když atom přilétne do R_2 , je v superpozici $|\varphi_1\rangle$. V R_2 potom interaguje s dalším $\pi/2$ pulzem tak, že $|\varphi_1\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$, což lze zaznamenat v detektoru D. Rozladění atomové frekvence a pole uvnitř rezonátoru je nastaveno tak, že když dutina obsahuje právě jeden foton, pak $\phi = \pi$. Když atom dorazí do R_2 po interakci s jedním fotonem, nachází se v superpozici stavů $|\varphi_2\rangle = (|\downarrow\rangle - |\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$. Po interakci s $\pi/2$ pulzem přejde $|\varphi_2\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$. Díky tomu je možné nedestruktivně změřit, je-li v rezonátoru jeden nebo žádný foton. Tento typ experimentu lze opakováním za použití více atomů a různých fází rozšířit i pro případ několika fotonů vyskytujících se v dutině.

Experimentální studium paradoxu Schrödingerovy kočky

Základní otázka kvantové fyziky je přechod mezi kvantovým a klasickým světem. Tento problém je popisován populární cestou jako tzv. paradox Schrödingerovy kočky. Název odkazuje na myšlenkový experiment navržený Schrödingerem v roce 1935, který upozorňoval na potíže způsobené aplikací zákonů kvantové fyziky na každodenní život (viz obr. 5). Klade si otázku: Kdy během svého časového vývoje přestane kvantový



Obr. 5. Schrödingerova kočka

systém existovat jako superpozice stavů a přejde do jednoho či druhého stavu? Hranice kvantové a klasické fyziky byla studována mnoha fyziky od počátku kvantové teorie ve 30. letech (viz např. [50], přehled lze najít v [24]).

Schopnost ovládat jednotlivé kvantové systémy, získaná skupinami vedenými profesory Harochem a Winelandem, jim dovolila provést experiment podobný paradoxu Schrödingerovy kočky v laboratoři. Použili k tomu fotony a ionty (přehled viz [19]). V experimentu navrženém Davidovichev a kol. [10] a provedeném Harocheovou skupinou [6] byla pomocí svázání stavů Rydbergových atomů se stavy mikrovlnného pole vytvořena superpozice kvantových „Schrödingerově kočce podobných“ stavů. Takováto superpozice je velice křehká a může být snadno zničena interakcí s okolím (v tomto případě fotony opouštějícími rezonátor). Dekoherece takto vytvořené superpozice stavů, neboli její vývoj směrem ke statistickému souboru, mohla být měřena jako funkce času. Wineland a jeho spolupracovníci provedli podobné experimenty pomocí zachycených iontů. Vytvořili „kočce podobné“ stavy sestávající z jednotlivých zachycených iontů entanglovaných s koherentními pohybovými stavy [31] a pozorovali jejich dekoherenci [32]. Nedávno dokázali Haroche se spolupracovníky vytvořit „kočce podobné“ stavy, změřit je a zmapovat jejich vývoj od superpozice kvantových stavů ke klasickému statistickému souboru [11]. Tyto neobvyklé možnosti manipulace s kvantovými stavy je také dovedly k implementaci kvantové zpětné vazby, ve které jsou dekoherenční jevy měřeny a korigovány tak, že kvantový stav, např. daný Fockův stav, je „stabilizován“ [39].

Kvantové počítače

V teoretickém článku [9] navrhli Cirac a Zoller cestu, jak vytvořit kvantový počítač pomocí zachycených iontů. Kvantové bity (qubits) jsou zakódovány do hyperjemné struktury energetických stavů těchto iontů, které interagují velice slabě se svým okolím a díky tomu mají dlouhé doby života. Dva nebo více iontů mohou být spojeny prostřednictvím pohybu těžiště (viz rámeček 1). Wineland a jeho skupina byli první, kdo experimentálně uskutečnil operaci se dvěma kvantovými bity (řízené NOT hradlo, CNOT) mezi pohybem a spinem iontů Be^+ [30]. Od té doby prošla kvantová informatika založená na zachycených iontech významným vývojem. V roce 2003 dosáhl Blatt se spolupracovníky v Innsbrucku v Rakousku CNOT operace mezi dvěma Ca^+ ionty [41]. V současnosti nejpokročilejší technologie kvantového počítání je založena na iontech v pasti. Byla demonstrována možnost operovat až se 14 kvantovými bity a sérií hradel a protokolů (přehled viz [2]). Vývoj velkých zařízení, schopných provádět výpočty náročnější než jaké je možné uskutečnit na klasických počítačích, bude v budoucnosti vyžadovat vyřešení zásadních výzev a problémů.

Optické hodiny

Důležitou aplikací Winelandova výzkumu iontů v pasti jsou optické hodiny. Hodiny založené na optických přechodech jsou zajímavé, protože frekvence odpovídající přechodům ve viditelné nebo ultrafialové oblasti spektra jsou řádově větší než frekvence cesiových hodin pracujících v mikrovlnné oblasti. Optické hodiny vyvinuté Winelandem a jeho kolegy [13], [38], [7] dosáhly přesnosti pod 10^{-17} , o dva řády lepší než současný frekvenční standard založený na cesiových hodinách.

Optické hodiny využívají úzký (zakázaný) přechod v jednotlivém iontu, který není citlivý na změny v okolí. Iont musí mít také silné dovolené přechody, umožňující efektivní chlazení a detekci. Wineland s kolegy vyvinuli novou techniku, nazvanou kvantová logická spektroskopie, která je založena na superpozici dvou druhů iontů, jak je popsáno v rámečku 1. Zatímco jeden iont obsahuje silný spektroskopický přechod [např. $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ v $^{27}\text{Al}^+$ (267 nm)], druhý (např. $^9\text{Be}^+$) má silný přechod pro chlazení [40]. Přesnost dvou různých optických hodin lze porovnat metodou frekvenčního hřebenu navrženou Hänschem a Hallem (Nobelova cena za fyziku v roce 2005). Přesnost měření času dosažená pomocí optických hodin umožnila Winelandovi a jeho spolupracovníkům měřit relativistické efekty jako jsou dilatace času při rychlostech několika kilometrů za hodinu nebo rozdíl v gravitačním potenciálu mezi dvěma body s výškovým rozdílem jen 30 cm [8].

Shrnutí

David Wineland a Serge Haroche navrhli a použili nové technologie a metody dovolující s velkou přesností měřit a ovládat jednotlivé kvantové systémy. Jejich práce umožnila výzkum dekoherence pomocí měření časového vývoje stavů podobných Schrödingerově kočce, první kroky v oblasti kvantových počítačů a vývoj extrémně přesných optických hodin.

L i t e r a t u r a

- [1] BERGQUIST, J. C., HULET, R. G., ITANO, W. M., WINELAND, D. J.: *Phys. Rev. Lett.* *57* (1986), 1699.
- [2] BLATT, R., WINELAND, D.: *Nature* *453* (2008), 1008.
- [3] BRUNE, M., RAIMOND, J. M., GOY, P., DAVIDOVICH, L., HAROCHE, S.: *Phys. Rev. Lett.* *59*, (1987), 1899.
- [4] BRUNE, M., HAROCHE, S., LEFEVRE, V., RAIMOND, J. M., ZAGURY, N.: *Phys. Rev. Lett.* *65* (1990), 976.
- [5] BRUNE, M., SCHMIDT-KALER, F., MAALI, A., DREYER, J., HAGLEY, E., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: *Phys. Rev. Lett.* *76* (1996), 1800.
- [6] BRUNE, M., HAGLEY, E., DREYER, J., MAÎTRE, X., MAALI, A., WUNDERLICH, C., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: *Phys. Rev. Lett.* *77* (1996), 4887.
- [7] CHOU, C. W., HUME, D. B., KOELEMELJ, J. C. J., WINELAND, D. J., ROSEN BAND, T.: *Phys. Rev. Lett.* *104* (2010), 070802.
- [8] CHOU, C. W., HUME, D. B., ROSEN BAND, T., WINELAND, D. J.: *Science* *329* (2010), 1630.
- [9] CIRAC, J. I., ZOLLER, P.: *Phys. Rev. Lett.* *74* (1995), 4091.
- [10] DAVIDOVICH, L., BRUNE, M., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: *Phys. Rev. A* *53* (1996), 1295.
- [11] DELÉGLISE, S., DOTSENKO, I., SAYRIN, C., BERNU, J., BRUNE, M., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: *Nature* *455* (2008), 510.
- [12] DE MARTINI, F., INNOCENTI, G., JACOBOVITZ, G. R., MATALONI, P.: *Phys. Rev. Lett.* *59* (1987), 2955.
- [13] DIDDAMS, S. A., UDEM, T., BERGQUIST, J. C., CURTIS, E. A., DRULLINGER, R. E., HOLLBERG, L., ITANO, W. M., LEE, W. D., OATES, C. W., VOGEL, K. R., WINELAND, D. J.: *Science* *293* (2001), 825.
- [14] DIEDRICH, F., BERGQVIST, J. C., ITANO, W. M., WINELAND, D. J.: *Phys. Rev. Lett.* *62* (1989), 403.
- [15] GLEYZES, S., KUHR, S., GUERLIN, C., BERNU, J., DELÉGLISE, S., BUSK HOFF, U., BRUNE, M., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: *Nature* *446* (2007), 297.
- [16] GOY, P., RAIMOND, J. M., GROSS, M., HAROCHE, S.: *Phys. Rev. Lett.* *50* (1983), 1903.
- [17] GUERLIN, C., BERNU, J., DELÉGLISE, S., SAYRIN, C., GLEYZES, S., KUHR, S., BRUNE, M., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: *Nature* *448* (2007), 889.
- [18] HAROCHE, S., KLEPPNER, D.: *Phys. Today* *42* (1989), 24.
- [19] HAROCHE, S.: *Phys. Today* *51* (7) (1998), 36.
- [20] HOOD, C. J., CHAPMAN, M. S., LYNN, T. W., KIMBLE, H. J.: *Phys. Rev. Lett.* *80* (1998), 4157.
- [21] HULET, R. G., HILFER, E. S., KLEPPNER, D.: *Phys. Rev. Lett.* *55* (1985), 2137.
- [22] HÄNSCH, T. W., SCHAWLOW, A. L.: *Opt. Comm.* *13* (1975), 68.
- [23] JHE, W., ANDERSON, A., HINDS, E. A., MESCHÉDE, D., MOI L., HAROCHE, S.: *Phys. Rev. Lett.* *58* (1987), 666.
- [24] LEGGETT, A. J., CHAKRAVARTY, S., DORSEY, A. T., FISHER, M. P. A., GARG, A., ZWARGER, W.: *Rev. Mod. Phys.* *59* (1987), 1.
- [25] MCKEEVER, J., BOCA, A., BOOZER, A. D., MILLER, R., BUCK, J. R., KUZMICH, A., KIMBLE, H. J.: *Science* *303* (2004), 1992.

- [26] MEEKHOF, D. M., MONROE, C., KING, B. E., ITANO, W. M., WINELAND, D. J.: Phys. Rev. Lett. 76 (1996), 1796.
- [27] MESCHDE, D., WALTHER, H., MÜLLER, G.: Phys. Rev. Lett. 54 (1985), 551.
- [28] MILLER, R., NORTHUP, T. E., BIRNBAUM, K. M., BOCA, A., BOOZER, A. D., KIMBLE, H. J.: J. Phys. B 38 (2005), S551.
- [29] MONROE, C., MEEKHOF, D. M., KING, B. E., JEFFERTS, S. R., ITANO, W. M., WINELAND, D. J., GOULD, P.: Phys. Rev. Lett. 75 (1995), 4011.
- [30] MONROE, C., MEEKHOF, D. M., KING, B. E., ITANO, W. M., WINELAND, D. J.: Phys. Rev. Lett. 75 (1995), 4714.
- [31] MONROE, C., MEEKHOF, D. M., KING, B. E., WINELAND, D. J.: Science 272 (1996), 1131.
- [32] MYATT, C. J., KING, B. E., TURCHETTE, Q. A., SACKETT, C. A., KIELPINSKI, D., ITANO, W. H., MONROE, C., WINELAND, D. J.: Nature 403 (2000), 269.
- [33] NAGOURNEY, W., SANDBERG, J., DEHMELT, H.: Phys. Rev. Lett. 56 (1986), 2797.
- [34] NEUHAUSER, W., HOHENSTATT, M., TOSCHEK, P. E., DEHMELT, H.: Phys. Rev. Lett. 41 (1978), 233.
- [35] NEUHAUSER, W., HOHENSTATT, M., TOSCHEK, P. E., DEHMELT, H.: Phys. Rev. A 22 (1980), 1137.
- [36] NOGUES, G., RAUSCHENBEUTEL, A., OSNAGHI, S., BRUNE, M., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: Nature 400 (1999), 239.
- [37] PEIL, S., GABRIELSE, G.: Phys. Rev. Lett. 83 (1999), 1287.
- [38] ROSEN BAND, T., HUME, D. B., SCHMIDT, P. O., CHOU, C. W., BRUSCH, A., LORIN, L., OSKAY, W. H., DRULLINGER, R. E., FORTIER, T. M., STALNAKER, J. E., DIDDAMS, S. A., SWANN, W. C., NEWBURY, N. R., ITANO, W. M., WINELAND, D. J., BERGQUIST, J. C.: Science 319 (2008), 1808.
- [39] SAYRIN, C., DOTSSENKO, I., ZHOU, X., PEAUDE CERF, P., RYBARCZYK, T., GLEYZES, S., ROUCHON, P., MIRRAHIMI, M., AMINI, H., BRUNE, M., RAIMOND, J. M., HAROCHE, S.: Nature 477 (2011), 73.
- [40] SCHMIDT, P. O., ROSEN BAND, T., LANGER, C., ITANO, W. M., BERGQUIST, J. C., WINELAND, D. J.: Science 309 (2005), 749.
- [41] SCHMIDT-KALER, F., HÄFFNER, H., RIEBE, M., GULDE, S., LANCASTER, G. P. T., DEUSCHLE, T., BECHER, C., ROOS, C. F., ESCHNER, J., BLATT, R.: Nature 422 (2003), 408.
- [42] SCHOELKOPF, R. J., GIRVIN, S. M.: Nature 451 (2008), 664.
- [43] SCHRÖDINGER, E.: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (The present situation in Quantum Mechanics)*. Naturwissenschaften 23 (1935), 807, 823, 844.
- [44] THOMPSON, R. J., REMPE, G., KIMBLE, H. J.: Phys. Rev. Lett. 68 (1992), 1132.
- [45] WINELAND, D. J., DEHMELT, H.: Bull. Am. Phys. Soc. 20 (1975), 637.
- [46] WINELAND, D. J., DRULLINGER, R. E., WALLS, F. L.: Phys. Rev. Lett. 40 (1978), 1639.
- [47] WINELAND, D. J., EKSTROM, P., DEHMELT, H.: Phys. Rev. Lett. 31 (1973), 1279.
- [48] WINELAND, D. J., ITANO, W. M.: Phys. Rev. A 20 (1979), 1521.
- [49] WINELAND, D. J., ITANO, W. M.: Phys. Lett. A 82 (1981), 75.
- [50] ZUREK, W. H.: Phys. Today 44 (1991), 36.
- [51] <http://www.neocodesolutions.com>