

Jiří Hošek

Nobelova cena za fyziku 2001

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 47 (2002), No. 1, 1--6

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141104>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2002

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



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

Nobelova cena za fyziku 2001

Jiří Hošek, Řež u Prahy

Nobelova cena za fyziku 2001 byla udělena Ericu A. Cornellovi (Univ. Boulder, USA), Wolfgangu Ketterlemu (MIT, USA) a Carlu E. Wiemannovi (Univ. Boulder, USA) „za dosažení stavu Boseho-Einsteinovy kondenzace v řídkých plynech alkalických atomů a za první fundamentální studia vlastností těchto kondenzátů“ (citace Švédské Akademie věd).

Mistrovským a novátorským použitím laserů a magnetického pole byla konečně po zhruba dvacetiletém soustředěném úsilí mnoha fyziků vytvořena nová forma hmoty a experimentálně stanoveny její specifické vlastnosti: Velké, prakticky makroskopické množství atomů s celočíselným spinem, ochlazené pomocí laserů pod určitou kritickou teplotu a držené ve vhodném vnějším magnetickém poli, „zkondenzuje“ do jediného (nejnižšího) energetického stavu, předpovězeného kvantovou teorií. Výsledná Boseho-Einsteinova kondenzace (BEC) projevuje makroskopické kvantové chování „na vlastní oči“, ne nepodobné chování silně interagující kvantové kapaliny supratekutého He-II. Zatímco ${}^4\text{He}$ se stává supratekutým při kritické hodnotě $T_\lambda = 2,17\text{ K}$, je k dosažení BEC potřeba systém atomů ochladit na ekvilibristicky nízkou teplotu \sim desítek nanokelvinů.

Že je mikrosvět dokonale popisován univerzálními zákony kvantové teorie, je „ad nauseam“ experimentálně prověřovaný fakt. Nejnovější experimenty navíc dokládají, že *kvantový svět* se svým základním pojmem kvantového stavu *je svět reálný*: čtenář určitě alespoň z doslechu ví, že kvantový stav specifikuje všechny fyzikální charakteristiky systému v míře, v jaké je to možné, a že pastička v tvrzení souvisí mj. s Heisenbergovým principem neurčitosti. Na rozdíl od klasické fyziky, tj. v rozporu s každodenní intuicí, nelze principiálně určit současně přesnou polohu kvantového objektu a jeho impuls. Ještě hůře lze strávit projev reálnosti kvantového světa související s objektivní neurčeností systému, dokud na něm nebylo provedeno měření.

Pravda ale je, že přímé projevy kvantového chování mikrosvěta atomů a molekul jsou lidským smyslům, odkázaným na makroskopické rozměry a klasickou zkušenost, prakticky nedostupné. Je tomu tak proto, že charakteristická de Broglieova tepelná vlnová délka atomů a molekul materiálního světa, charakterizující jejich „kvantovost“, je při normálních teplotách podstatně kratší než typická vzdálenost mezi těmito objekty. Vlnový (kvantový) charakter hmoty je pak zcela překryt klasickým tepelným pohybem atomů a molekul a makroskopická hmota se chová klasicky.

Bystrý čtenář určitě usoudil, že z uvedeného plyne, že k zesílení kvantových efektů by mělo dojít snižováním teploty. Má pravdu. Číselné hodnoty základních fyzikálních

Ing. JIŘÍ HOŠEK, CSc. (1943), Oddělení teoretické fyziky, Ústav jaderné fyziky AV ČR, 250 68 Řež u Prahy.

veličin jsou ale takové, že ani průchod Eskymáka šterbinou iglů nebude mít kvantový charakter. Teploty, při nichž lze pozorovat koherentní kvantové projevy hmoty v makroskopickém měřítku, jsou dosažitelné pouze ve fyzikálních laboratořích.

Vždy se v souvislosti s kvantovou mechanikou mluví o Heisenbergově principu neurčitosti. Téměř nikdy se nemluví o principu, který má pro vysvětlení jevů, které budeme popisovat, klíčovou důležitost: Je to princip identičnosti či nerozlišitelnosti kvantových částic stejného druhu, chtělo by se říci „princip určitosti“: Všechny elektrony ve vesmíru jsou identické a nerozlišitelné. Všechny atomy na světě v základním stavu, např. rubidia, jsou identické a nerozlišitelné. A když je vybudíme, přejdou vyzářením energie ve formě gama kvant do základního stavu, identického s původním. Takové vlastnosti klasické makroskopické objekty rozhodně nemají.

Z hlediska kvantově mechanického popisu velkého počtu identických kvantových objektů (elektronů, kvarků, nukleonů, atomů, molekul) rozlišujeme všeho všudy dva typy systémů: (A) Systémy identických fermionů. (B) Systémy identických bosonů.

- A. Fermiony jsou kvantové objekty charakterizované celkovým polocelým spinem (momentem hybnosti). Typickými příklady ze života jsou: elektrony, kvarky, nukleony, atomy ${}^3\text{He}$ a vůbec všechny atomy s celkovým lichým počtem protonů + neutronů + elektronů. Identické fermiony jsou „nesnášenlivé“: V jednom kvantovém stavu se jich nemůže nalézat víc než jeden. Tento fundamentální a univerzální Pauliho princip má za následek, že fermiony o sobě vědí, i když mezi sebou neinteragují. Říkáme, že se jejich kvantová statistika řídí Fermiho-Diracovým rozdělením.
- B. Bosony jsou kvantové objekty charakterizované celočíselným spinem. Typickými příklady ze života jsou: fotony, intermediální bosony W a Z, gluony, piony, atomy vodíku a ${}^4\text{He}$ a vůbec všechny atomy s celkovým sudým počtem protonů + neutronů + elektronů. Identické bosony jsou „kolektivistické“: Pokud je to energeticky výhodné, mají tendenci se hromadit v jediném kvantovém stavu bez omezení. Říkáme, že se jejich kvantová statistika řídí Bosého-Einsteinovým rozdělením.

Stanovit přesně chování ideálních (tj. vzájemně neinteragujících) Fermiho a Bosého kvantových plynů není se znalostí aparátu kvantové mechaniky žádný problém. Za určitých předpokladů jsou dokonce tyto modely docela dobrým přiblížením pro popis reálných fyzikálních systémů.

Teplota degenerace, od níž se systém částic s hmotností m a hustotou $n = N/V$ začne chovat kvantově, je dána vztahem

$$T_D = C \frac{1}{m} \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3},$$

kde C je univerzální konstanta poskládaná z číselného násobku mocnin Planckovy a Boltzmanovy konstanty. Odvození plyne z již řečeného: de Broglieova tepelná vlnová délka je porovnána se střední vzdáleností mezi částicemi systému. Například: V systému elektronů v kovech s hustotou $n \equiv N/V = 10^{29} \text{ m}^{-3}$ je $T_D < 2,5 \cdot 10^5 \text{ K}$. Ve většině současných experimentů s řídkými atomovými plyny je teplota degenerace mezi 500 nK a $2 \mu\text{K}$ při hustotách mezi 10^{20} a 10^{21} m^{-3} .

V roce 1925 Albert Einstein analyzoval chování ideálního systému identických bosonů s hustotou n a ukázal, že (i) od kritické teploty T_0 dané formulí uvedeného typu se konečná frakce hustoty bosonů nachází ve stavu s nulovou hybností, až v blízkosti $T = 0$ všechny částice přijdou do tohoto (základního) stavu, tzv. Boseho-Einsteinova kondenzátu (BEC); (ii) v bodě T_0 má specifické teplo při konstantním objemu nespojitou derivaci.

Na Einsteinovu práci, která měla v době svého vzniku spíš charakter kuriozity, si 6 let po objevu supratekutosti ^4He (systém identických bosonů s nulovým spinem), tzv. He-II, v roce 1932 vzpomněl Fritz London: (i) Naměřené specifické teplo He-II mělo tvar ne nepodobný Einsteinovu a (ii) po dosazení experimentálních hodnot m a $\rho = 0,145 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ dostal $T_0 = 3,14 \text{ K}$, přitažlivě blízko experimentálně naměřené hodnotě $T_\lambda = 2,17 \text{ K}$. Vysvětlení supratekutosti pomocí BEC údajně přivádělo L. D. Landaua spolehlivě do stavu zuřivosti. Neuměl si představit, že lze relativně silnou interakci mezi atomy hélia jen tak zanedbat. V roce 1947 přišel N. N. Bogoljubov s teoreticky přesvědčivým započítáním slabé interakce mezi bosony, v němž opět hlavní roli hrálo makroskopické obsazování základního stavu. Podle Landaua byl model z teoretického hlediska nenapadnutelný. Pouze se nehodil pro popis He-II. *K čemu se tedy hodil?* Další vývoj dal Landauovi plně za pravdu: (1) Ani při nejnižších teplotách není v supratekutém He-II významně zastoupen BEC. (2) Mikroskopická teorie He-II se správným započítáním silné interakce mezi atomy do makroskopicky kvantového obrazu dosud neexistuje. (3) Bogoljubovův model, rozpracovaný později Grosseem a Pitajevským na případ nehomogenních kondenzátů, se perfektně hodí pro popis řídkých atomových plynů, jimž je věnován tento článek.

Velmi poučné je zmínit se i o typickém nízkoteplotním chování mnohofermionových systémů.

(1) Ideální systém identických fermionů nevykazuje zvlášť zajímavé chování (kromě nulového zvuku v ^3He): Poslušny Pauliho principu obsadí fermiony při $T = 0$ všechny dostupné energetické hladiny až po tzv. Fermiho mez.

(2) Díky specifické krátkodosahové interakci mezi elektrony v kovech dojde při teplotách řádu 10 K k fázovému přechodu do supravodivého, makroskopicky kvantového stavu. Jevo byl poprvé pozorován v roce 1911 Kammerlinghem Onnesem. Přestože interakce není silná, byl jevo teoreticky objasněn teprve v roce 1957 Bardeenem, Coope-rem a Schriefferem (BCS). Vysvětlení, jak už to u geniálních vysvětlení bývá, je úžasné elegantní, představuje v teoretické fyzice významný mezník a je dodnes inspirativní: Přestože jsou elektrony nesnášenlivé, mohou za určitých podmínek vytvářet páry, obejít tak Pauliho princip a ve velkých množstvích se začít chovat kolektivisticky.

(3) Hustota fermionového ^3He v kapalném stavu je prakticky stejně vysoká jako u ^4He . Díky nesnášenlivosti a specifické interakci mezi atomy dojde i v tomto systému k fázovému přechodu podobnému přechodu elektronů do supravodivého stavu. Kritická teplota je ale podstatně nižší, zhruba 2 milikelviny. Objev supratekutosti ^3He byl svého času triumfem experimentální fyziky nízkých teplot. Protože atomy ^3He jsou na rozdíl od elektronů elektricky neutrální, mluvíme, stejně jako u ^4He , o supratekutosti ^3He . Se znalostí BCS už teoretické vysvětlení jevu vyžadovalo „pouze“ prvotřídní profesionály.

Pro intuitivní chápání makroskopické kondenzace atomů je třeba zdůraznit, že pouze systémy atomů ^3He a ^4He zůstanou kapalné v termodynamické rovnováze při normálním tlaku i při teplotách blízkých absolutní nule. Vysvětlení je samozřejmě kvantově mechanické: Atomy i v blízkosti absolutní nuly teploty vykonávají tzv. „nulové“ kmity, které v případě interakcí mezi atomy hélia nedovolí systému ztuhnout v minimu potenciální energie.

BEC řídkých atomových plynů, za který byla v roce 2001 udělena Nobelova cena, se od kanonických příkladů supratekutých kapalin již uvedených liší v jednom důležitém směru: Atomy jsou drženy „v pasti“: v potenciálové jámě. Obsadí tudíž ve stavu BEC jedinou kvantovou hladinu, odpovídající vlnové funkci, která je prostoro-rově lokalizovaná. To má za následek, že intuitivně srozumitelnou termodynamickou limitu, na kterou jsme zvyklí z homogenních systémů ($N = \text{počet částic} \rightarrow \infty$, $V = \text{objem systému} \rightarrow \infty$ tak, že hustota $n = N/V$ je konečná), je třeba modifikovat (objem pasti je vždy konečný). Omezený smysl bude mít v konečné pasti i pojem supratekutosti.

Nápady manipulovat atomy pomocí laserů začaly vznikat brzy po jejich přiznání jako fyzikálních přístrojů. První důležitý krok byl učiněn v roce 1975, kdy se zrodil nápad chladit pomocí laserů plyny volných atomů: Atom, absorbující foton, převezme i jeho impuls. Následně spontánní emisi odpovídá impuls v náhodném směru, takže v průměru dochází k snižování rychlosti atomů. Metoda, která je reálně používaná, bere do úvahy Dopplerův posun — atomy jsou ochlazovány pouze tehdy, pohybují-li se proti laserovému svazku. Konfigurace 6 laserů namířených do konečného objemu tak chladí všechny atomové stupně volnosti. Metoda má zřejmě absolutní mez chlazení danou náhodným procesem spontánní emise.

Druhý důležitý, pravděpodobně rozhodující krok na cestě k BEC byl učiněn C. Cohenem-Tannoudji, S. Chu a W. D. Phillipsem. Ti navrhli účinnou metodu, jak plyny chlazené Dopplerovou metodou udržet pohromadě. Použili kombinaci optického pole se specifickým potenciálem (tzv. optická melasa) a nehomogenního magnetického pole (MOT — magneto-optická past (trap)). Za rafinované metody chlazení a uvěznění atomů byla v roce 1997 S. Chu, C. Cohenu-Tannoudjimu a W. D. Phillipsovi udělena Nobelova cena.

Při snahách o vytvoření BEC atomových plynů bylo nezbytné splnit současně několik smrtících podmínek:

- pouze některé atomy jsou vhodné z hlediska existujících laserů;
- vlnové funkce atomů se musejí překrývat, čehož lze dosáhnout při rozumné hustotě; hrozí ale, že atomy buď vytvoří molekulu a systém zahřeje, nebo ztuhnou.

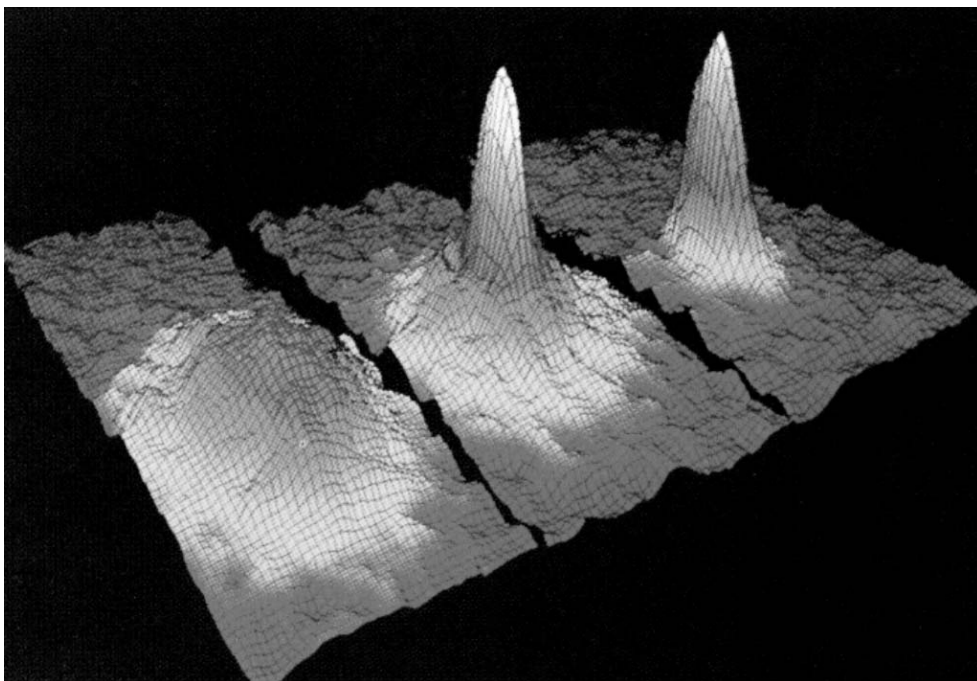
Pokusy začaly celkem přirozeně se spinově polarizovaným atomárním vodíkem a do této oblasti přinesly novou a důležitou metodu chlazení „odpařováním“ nejenergetičtějších atomů v pasti. Byla to právě tato metoda, která přivedla v roce 1995 alkalické atomy v pasti do stavu BEC. Skupiny na MIT a v Amsterdamu sice demonstrovaly uvěznění spinově-polarizovaného vodíku i odpařovací chlazení a je určitou historickou nespravedlností, že stavu BEC dosáhly až v roce 1998.

Neúspěchy s vodíkem inspirovaly dvě skupiny fyziků (Cornell a Wieman v Boulderu, Ketterle na MIT) k hledání BEC v plynech alkalických atomů: Majíce jeden valenční elektron a lichý jaderný spin mohou tyto atomy ve vnějším magnetickém poli obsazovat vhodné stavy bosonového charakteru.

Obě skupiny se velmi rychle dostaly na úroveň experimentů s vodíkem. Nejchladnější atomy držené v magnetickém poli v jediném spinovém stavu se však v ose pasti, kde magnetické pole bylo nulové, ztrácely — bez pole se spiny spontánně překlápěly.

Tuto poslední překážku odstranila každá skupina po svém: Cornell vyvinul metodu, v níž se magnetické pole otáčelo, čímž po vystředování oblast nulového pole zmizela. Ketterle vypudil atomy z oblasti nulového magnetického pole silně repulzivním laserovým svazkem.

Skupina z Boulderu ohlásila dosažení BEC v plynu rubidia ^{87}Rb v červnu 1995. V základním stavu neizotropního harmonického oscilátoru bylo ~ 2000 atomů. Pozorování tohoto stavu bylo destruktivní: Past byla otevřena (magnetické pole vypnuto) a BEC byl zobrazen pomocí stínu vytvořeného rezonančním světlem. Asymetrický kondenzát, odpovídající asymetrii vlnové funkce základního stavu, jasně vystoupil na pozadí atomů, jejichž tepelné rozdělení bylo podle očekávání sféricky symetrické (viz obrázek).



Obr. 1. Vznik BEC v rubidiu. Jako první zleva je znázorněno rozložení atomů v obláčku před kondenzací, poté na začátku kondenzace a posléze po úplné kondenzaci. Výška „píku“ odpovídá počtu atomů. Obrys expandujícího obláčku atomů byl zachycen 6 ms po vypnutí sil, které udržovaly atomy v pasti.

O čtyři měsíce později ohlásila dosažení BEC v plynu sodíku také skupina MIT. Nejenže jejich způsob zobrazení byl jiný (nedestruktivní), počet atomů ve stavu BEC byl o víc než 2 řády vyšší.

Zjednodušeně lze říct, že čím je pro elektromagnetické pole fotonů laser, tím je pro Schrödingerovo pole atomů Bosého-Einsteinův kondenzát: laser je systém mnoha fotonů v jednom kvantovém módu, BEC je systém mnoha atomů v jednom kvantovém módu.

Vytvořením BEC tak rozhodně vzniklo nové odvětví atomové fyziky, fyziky atomových laserů, které se od roku 1995 intenzivně rozvíjí.

Na rozdíl od fotonů v laseru však atomy v BEC mezi sebou *interagují*, takže vytvořením BEC současně vzniklo také nové odvětví fyziky mnoha částic. V neinteragujícím systému, tak jak to stanovil před dávnými lety Albert Einstein, je vznik BEC jasně patrný na chování specifického tepla systému. Nobelova cena byla udělena nejen za vytvoření BEC, ale i za první fyzikální experimenty, které určily jeho charakteristické vlastnosti a které jsou způsobeny interakcí mezi atomy.

V alkalických plynech, v nichž se atomy slabě odpuzují, jsou získané experimentální výsledky o vlastnostech BEC v nádherném souhlase s teoretickými předpověďmi. Nemůžeme si odpustit obdivnou poznámku: Mnoho teoretických výpočtů a numerických simulací vlastností BEC provedli ti, kteří experimenty sami prováděli!! Díky interakcím dochází k následujícím (a mnoha dalším, které nezmiňujeme) fyzikálním projevům systému BEC:

- (i) spektrum elementárních excitací je interakcí modifikováno,
- (ii) existují kolektivní excitace systému,
- (iii) rozdělením kondenzátu na dvě části byly pozorovány efekty interference,
- (iv) roztočením kondenzátu se plně projeví jeho makroskopický kvantový charakter — vzniknou kvantované víry jako logický důsledek kvantovacích podmínek.

Existence koherentní vlnové funkce interagujících mnohoatomových systémů nabízí široké možnosti jejich fyzikálního zkoumání. Zmíňme alespoň některé:

1. Lze očekávat detailní experimentální prověřování „teoretické kvantové mechaniky“ těchto velkých systémů (atomový analog nelineární optiky, Josephsonův efekt, ...).

2. Chování velkého počtu bosonových atomů s přitažlivou interakcí, z klasického hlediska nestabilní vůči kolapsu, je v kvantovém režimu mimořádně zajímavé.

3. Popsaných (a vhodně adaptovaných) metod chlazení je možné použít (a už se tak děje) ke zkoumání systémů fermionových atomů. Ačkoliv samotné kondenzovat nemohou, nabízí se možnost vzniku uspořádaných fází ve stavu, v němž fermionové atomy obejdou Pauliho princip a kondenzují ve formě Cooperových párů.

V každém případě se rodina makroskopických kvantových systémů, čítající před rokem 1995 elektronové supravodiče a supratekuté izotopy hélia, utěšeně rozrostla.