Boseho–Einsteinova kondenzace: Nobelova cena za fyziku 2001

Jitka Prokšová, Pedagogická fakulta ZČU, Plzeň*

Švédská královská akademie věd udělila Nobelovu cenu za fyziku v roce 2001 za dosažení **Boseho–Einsteinovy kondenzace** ve zředěných plynech alkalických atomů a za základní studium vlastností tohoto kondenzátu. Obdrželi ji:

Eric A. Cornell

- *1961 v Palo Alto v Kalifornii,
- USA
- titul PhD získal v roce 1990 na MIT, Cambridge ve státě Massachusetts, USA
- nyní vědeckým pracovníkem na NIST a profesorem na JILA, Boulder ve státě Colorado, USA

Wolfgang Ketterle

- *1957 v Heidelbergu, SRN
- titul PhD získal v roce 1986 na LMU v Mnichově
- nyní profesorem fyziky na MIT, Cambridge ve státě Massachusetts, USA

Carl E. Wieman

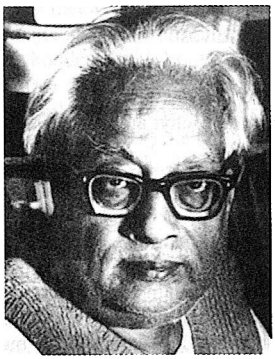
- *1951 v Corvallis v Oregonu,
- USA
- nyní profesorem fyziky na JILA, University of Colorado, Boulder ve státě Colorado, USA

Skupině fyziků z Colorada vedené C. E. Wiemanem a E. A. Cornellem přísluší prvenství při vytváření nového stavu hmoty, tzv. Boseho–Einsteinova kondenzátu. Ketterleho skupina publikovala výsledky studií tohoto kondenzátu sice o několik měsíců později, nicméně obě

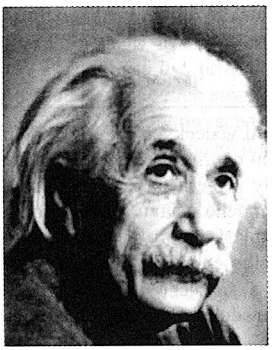
* proksovj@kof.zcu.cz

dvě pracoviště významně přispěla k základním studiím vlastností a možných aplikací této nové formy látky.

1. Historické pozadí



Satyendra Nath Bose



Albert Einstein

První desetiletí dvacátého století byla poznamenána bouřlivým rozvojem základních myšlenek kvantové mechaniky. V roce 1924 poslal indický fyzik **S. Bose** (1894–1974) **A. Einsteinovi** (1879–1955) dopis, ve kterém popisoval odvození Planckova rozdělovacího zákona pouze na základě statistických úvah. Einsteinovi připadl tento postup natolik důležitý, že ho přeložil do němčiny a zanedlouho příspěvek otiskl německý časopis pro fyziku. Einstein se pak začal sám věnovat práci související s touto problematikou a brzy publikoval dva články, ve kterých podával úplný pohled na kvantovou podstatu částic s celočíselným spinem, označovaných později jako **bosony**. Statistické rozdělení identických bosonů, kterých může být ve stejném stavu libovolně mnoho, proto nese ve svém názvu jména obou těchto významných fyziků, jedná se o **Boseho–Einsteinovu statistiku**.

Einstein ve svých dalších publikacích o této problematice uvedl i možnost fázového přechodu bosonů do nového stavu, který je dnes označován jako **Boseho–Einsteinova kondenzace (BEC)**. K ní může dojít jen za extrémně nízkých teplot, kdy částice systému kondenzují do stavu s nejnižší energií. Po dlouhou dobu nebyl známý žádný systém, který by BEC vykazoval. Až v roce 1938 F. London odhadl, že supratekuté chování, experimentálně zjištěné při teplotě 2,17 K u He^4, je možné vysvětlit pomocí modelu BEC. Další souvislosti se objevily v roce 1957 při teoretickém rozboru jevu supravodivosti, kdy Bardeen, Cooper a Schrieffer[1] objasnili spárování elektronů a jejich následné změny v chování analogií s bosonovými částicemi. A neméně závažným experimentem, který je možné považovat za specifický druh BEC, byl v roce 1972 pozorovaný fázový přechod He^3 do supratekutého stavu – Nobelovou cenou byli za tento objev oceněni američtí fyzici Richardson, Lee a Osheroff v roce 1996.

2. Cesta k nejnižším teplotám

Vzhledem k tomu, že tři z Nobelových cen za fyziku byly za posledních deset let uděleny právě za práce z oblasti velmi nízkých teplot, bylo vývoji metod chlazení (včetně nejnovějších – optických a magnetických pastí) věnováno hodně prostoru i ve Školské fyzice[2]. Zmiňme se proto jen v krátkosti o nejdůležitějších meznících v historii získávání nízkých teplot [1]:

1908: H. Kamerlingh-Onnes – zkapalnění hélia
1911: H. Kamerlingh-Onnes – objev supravodivosti rtuti

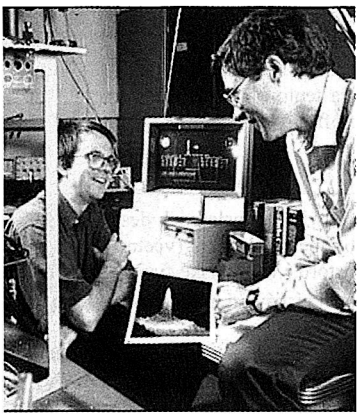
[1] Všichni tři vědci získali za teoretické objasnění jevu supravodivosti v roce 1972 Nobelovu cenu.
[2] Jedná se o články o Nobelově ceně za fyziku roku 1996 a 1997, které byly otisknuty v číslech 2 a 3 ve IV. ročníku.

1927: P. Debye a W. F. Giauque – adiabatická demagnetizace
1934: P. Kapica – konstrukce zkapalňovače hélia s detandérem
1950: I. J. Pomerančuk – chlazení adiabatickou kompresí He^3
1957: J. Bardeen, L. N. Cooper aj. R. Schrieffer – formulace mikroskopické teorie supravodivosti
1962: B. D. Josephson – teoretická předpověď jevů slabé supravodivosti
1972: D. D. Osheroff, D. M. Lee, R. C. Richardson – objev supratekutosti v He^3
1975: T. W. Hänsch, A. L. Schawlow – návrh dopplerovského chlazení atomů
1984: S. Chu, W. D. Phillips – realizace dopplerovského chlazení, záchyt atomů ve světelné pasti
1988: C. Cohen-Tannoudji – realizace chlazení gradientem polarizace
1995: C. E. Wieman, E. A. Cornell – objev BEC v Rb^{87}
W. Ketterle – objev BEC v Na^{23}

V devadesátých letech 20. století otevřelo experimentální studium chování atomů zachycených v optických, magnetických či kombinovaných typech pastí zcela nové oblasti výzkumu. V té době už bylo zřejmé, že nejlepším způsobem, jak dosáhnout přechodu do stavu BEC, bude použití tzv. **vypařovacího chlazení**, kterým lze snížit teplotu systému až na **desítky nanokelvinů**. Základní myšlenkou této metody je využití pružných srážek v souboru atomů již předchlazených v magnetické pasti s harmonickým průběhem potenciálu. Při těchto vzájemných srážkách dochází k předání kinetické energie z jednoho atomu na druhý, který pak může z pasti uniknout, a tak se průměrná teplota zbylých atomů v souboru neustále snižuje.

3. Výzkum BEC v souborech alkalických atomů

Na počátku devadesátých let 20. století bylo zřejmé, že pátrání vědeckých týmů nízkoteplotních laboratoří po objevu BEC v souborech vodíkových atomů nepřináší očekávaný výsledek. Objevily se spekulace, zda by se další experimenty neměly zaměřit na izotopy alkalických kovů (sodíku, lithia, rubidia atd.). C. E. Wieman z výzkumného ústavu JILA při coloradské univerzitě v Boulderu se rozhodl využít ke získání co nejnižší teploty systému kombinace záchytu atomů v magnetické pasti a následného vypařovacího chlazení. Přizval ke spolupráci E. A. Cornella a společně aplikovali tento experimentální nápad na soubor rubidiových atomů.

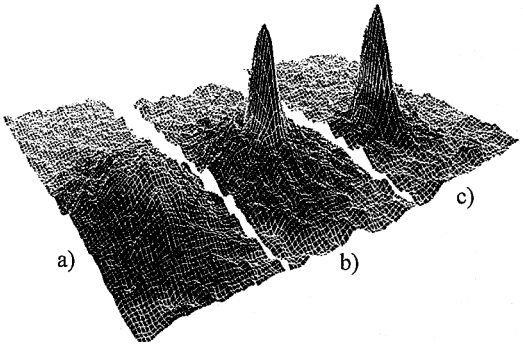


Cornell a Wieman v laboratoři

Z teorie je zřejmé, že atomy systému v BEC musí být v jediném kvantovém stavu s téměř nulovou energií. Aby k takovému jevu mohlo dojít, bylo nutné získat soubor rubidiových atomů jako páru o teplotě několika desítek nanokelvinů. Zároveň musí mít systém takovou hustotu, aby střední vzdálenost mezi jeho atomy byla menší než de Broglieho vlnová délka jednotlivých atomů. Pokud je tato podmínka splněna, vlnové funkce atomů se překrývají a celý soubor je možné považovat za jediný kvantový systém – BEC [3].

Wieman s Cornellem však stáli ještě před jedním problémem, a ten se týkal spinu studovaných atomů. Právě různost spinu u jednotlivých atomů zachycených v magnetické pasti působila proti tomu, aby systém úspěšně přešel do BEC. Magnetické pole se

totiž v pasti směrem ke středu zmenšuje, což má vliv na změny spinových stavů jednotlivých atomů. Odstraněním tohoto efektu se zabýval Cornell a navrhl uspořádání s rotujícím magnetickým polem. Tak došlo k eliminaci oblastí s nízkými hodnotami intenzity magnetického pole a měření prováděná v tomto uspořádání opravdu vedla k úspěchu. V červnu 1995 byl touto metodou poprvé zaznamenán mrak kondenzovaných rubidiových atomů ve stavu odpovídajícímu Boseho–Einsteinovu kondenzátu (obr. vpravo – teplota souboru asi 2 000 rubidiových atomů se postupně snižuje od grafu a) ke grafu c): a) situace před kondenzací, b) přechod do BEC, c) kondenzace dokončena – ostrý pík maxima rozložení kolem nulové rychlosti charakterizuje BEC).

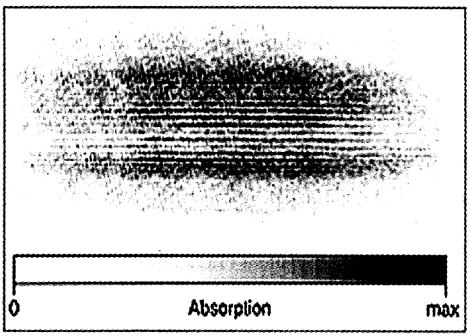


Grafické znázornění teoreticky vypočtených rozložení rychlostí v souboru rubidiových atomů

Úsilí o dosažení BEC vyvíjel i tým nízkoteplotní laboratoře v MIT, kde se skupina fyziků vedená Ketterlem vyhnula obtížím spojeným s centrální oblastí magnetické pasti tím, že do tohoto místa byl směrován silně odpuzující laserový svazek. Experiment byl prováděn pro soubor sodíkových atomů a i zde se zanedlouho podařil přechod do BEC úspěšně realizovat (dokonce do tohoto stavu přešel větší počet atomů). K publikaci jejich výsledků však došlo o několik měsíců později než u skupiny v Boulderu.

4. Fyzikální vlastnosti BEC

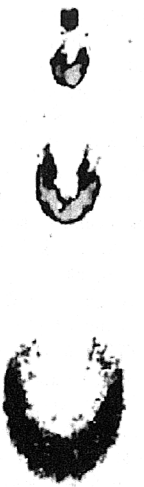
BEC lze považovat za fázový přechod systému do makroskopického kvantového stavu. I když se zatím provedené experimenty týkají jen „malých“ souborů (několika miliónů) atomů, je zřejmé, že ve zkoumaných alkalických plynech se tímto fázovým přechodem dostávají všechny atomy systému do stejného stavu. Jedná se tedy o kolektivní kvantový jev. Pro BEC je charakteristický také jev fázové koherence. U experimentů, při nichž došlo k rozdělení kondenzátu do dvou částí a vzniku dvou koherentních atomových mraků, bylo po jejich následné expanzi pozorováno v místech vzájemného překryvu jisté interferenční zřásnění (obr. vlevo). Aby bylo možné studovat zmíněný efekt, je nutné dostat koherentní mraky atomů ven z oblasti magnetické pasti, aniž by se ovšem narušila jejich kvantová povaha. Pro tento typ experimentů se více hodily větší soubory atomů zachycené Ketterleho skupinou. Z jejich výzkumu vyplývá, že



Interferenční zřásnění vzniklé skládáním dvou oblastí BEC sodíkových atomů.

kapky kondenzátu lze uvolnit ven z pasti pomocí elektromagnetických pulsů, přičemž nedochází ke ztrátě jejich koherence. Tento jev je základním krokem k činnosti atomového laseru (někdy bývá pojmem atomový laser označován pouze samotný fakt uvolňování kapek kondenzátu z pasti v analogii s uvolňováním fotonů z pulsního laseru). Záznam experimentu je vidět na obr. vpravo.

Také experimentální studium dynamického utváření kondenzátu, popřípadě jeho destrukce, přineslo řadu výsledků. Jednou z určovaných charakteristik je například kritická rychlost kondenzátu nebo vznik vírových struktur, které jako první pozorovali Cornell a Wieman a později byly vyšetřovány i Ketterlem. Vírové struktury jsou patrně důsledkem interakce kvantového charakteru vlnové funkce každé částice kondenzátu a rotujícího pole magnetické pasti. Poskytují nové možnosti pro výzkum aplikací BEC na jiné oblasti fyziky.



Kapky BEC sodíkových atomů – atomový laser.

5. VÝHLED DO BUDOUCNA

V současné době se studiem BEC zabývá přes dvacet vědeckých týmů, přičemž hlavní pozornost je věnována právě zmíněným vírovým strukturám. Je zřejmé, že použité metody laserového chlazení, které vedou k vytvoření koherentní vlnové funkce kondenzovaného atomového systému, vytvářejí nové prostředí pro nejrůznější fyzikální experimenty a že možnost jejich aplikací závisí především na tom, zda užití BEC bude dostupné běžně užívanými prostředky experimentálních pracovišť. Pak se očekává uplatnění především atomového laseru ve směrech jako jsou:

- atomová litografie a interferometrie (zvýšení přesnosti při precizních měřeních a při výrobě mikroelektronických součástek),
- kosmologie (modelování procesů probíhajících v supernovách a bílých trpaslících)

a dále

- nanotechnologie,
- holografie,
- kvantově informační procesy,
- nelineární optika.

LITERATURA A INTERNETOVÉ ODKAZY:

[1] Rotter M.: *Fyzikální základy a technika nízkoteplotního experimentu.* SPN, Praha 1982.

[2] <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/public.html> *Advanced information on the Nobel Price in Physics 2001* (anglicky).

[3] Halliday D. a kol.: *Fyzika.* VUTIUM a PROMETHEUS, Brno a Praha 2000.