



Nobel 2001

Wojciech Gawlik
Instytut Fizyki UJ

Tegoroczną Nagrodę Nobla z fizyki otrzymali: Eric Cornell, Wolfgang Ketterle i Carl Wieman za osiągnięcie kondensacji Bosego-Einsteina w rozrzedzonych gazach atomów alkalicznych oraz za podstawowe badania własności kondensatu. E. Cornell i C. Wieman są Amerykaninami i pracują w Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) w Boulder, który jest wspólną placówką naukową Uniwersytetu Kolorado i rządowego National Institute of Science and Technology (NIST). Ketterle zaś jest Niemcem, od ok. 12 lat pracującym w Massachusetts Institute of Technology (MIT).



Eric A. Cornell



Wolfgang Ketterle



Carl E. Wieman

Tegoroczna nagroda została przyznana za doświadczalne odkrycie z 1995 roku. Wówczas to, w odstępie czterech miesięcy, trzy różne grupy amerykańskie niezależnie zaobserwowały kondensację Bosego-Einsteina w gazach atomów alkalicznych. Pierwsza była grupa E. Cornella i C. Wiemana, która pracowała z atomami rubidu (Rb^{87}), druga była grupa Randalla Huleta (Rice University) eksperymentująca z litem (Li^7), zaś trzecia grupa W. Ketterlego używająca w swych doświadczeniach sodu (Na^{23}). Te trzy, wykonane w różnych warunkach i z różnymi pierwiastkami doświadczenia przyniosły niezwykle przekonujący dowód słuszności teoretycznych przewidywań Satyendry Natha Bosego i Alberta Einsteina z lat 1924–25.

Kondensacja Bosego-Einsteina to zjawisko dotyczące jednego z dwóch rodzajów cząstek kwantowych, rozróżnianych przez to, jakie mają momenty pędu. Chodzi tu o całkowite kręty atomów, na które składają się zarówno spiny jądra atomowego, jak i spinowe oraz orbitalne momenty pędu wszystkich elektronów w atomie. Kręty¹ te mogą być albo całkowite – cząstki takie nazywamy **bozonami**, albo po-

¹ Kręt – moment pędu.

łówkowe – mówimy wówczas o **fermionach**. Ten podział istotnie rozróżnia symetrię funkcji falowych i statystyczne własności cząstek: bozony mogą bez ograniczeń gromadzić się w najniższych stanach energetycznych (opisuje to tzw. statystyka Bosego-Einsteina), podczas gdy fermiony mogą co najwyżej pojedynczo zapełniać dany stan (co wynika ze statystyki Fermiego-Diraca). Bozonowy bądź fermionowy charakter cząstek staje się istotny, gdy ich energia jest dostatecznie mała, aby ograniczenia obsadzenia stanu podstawowego były zauważalne. Wymaga to drastycznego obniżenia energii badanego układu – a więc obniżenia jego temperatury. Na podstawie prac Bosego Einstein przewidział, że gdy układ nieoddziałujących cząstek doskonałego gazu zostanie dostatecznie oziębiony, wówczas nastąpi w nim przejście fazowe polegające na obsadzeniu przez wszystkie cząstki stanu podstawowego. To przejście fazowe to właśnie kondensacja Bosego-Einsteina. Dotychczas uważano, że jest ona odpowiedzialna za zjawisko nadciekłości, występujące tylko w bozonowym izotopie helu He^4 (odkryte przez H.K. Onnesa – Nagroda Nobla w 1913 roku i wyjaśnione przez L.D. Landaua – Nobel 1962). Ciekły hel jest jednak układem bardzo odległym od założeń idealnego gazu i dlatego zawiera zaledwie kilka procent skondensowanych atomów He^4 . Badanie zjawiska kondensacji Bosego-Einsteina za pomocą nadciekłego helu było więc i trudne i niedokładne. Tymczasem ogromna jest jego rola dla zrozumienia procesów, jakie rządzą układami kwantowymi w stanie bliskim degeneracji kwantowej, czyli wtedy gdy cząstki kwantowe stają się nierozróżnialne, co dzieje się w ultraniskich temperaturach. Oprócz nadciekłości inne przykłady takich sytuacji to powstawanie tzw. par Coopera w zjawisku nadprzewodnictwa (Nagroda Nobla dla J. Bardeena, L.N. Coopera i J.R. Schrieffera w 1972 roku) oraz nadciekłość w He^3 (Nobel dla D.M. Lee, D.D. Osheroffa i R. Richardsona w 1996 roku).

Efekty degeneracji kwantowej, a więc i kondensacja Bosego-Einsteina, to zjawiska, w których istotne stają się falowe własności materii, zatem sytuacja, gdy długość fal materii – nazywanych falami de Broglie’a – jest porównywalna z odległościami między cząstkami. Długość fali de Broglie’a, jest określona przez pęd cząstek następującym wzorem: $\lambda_{dB} = h/mv$ (h oznacza stałą Plancka, m masę, a v prędkość cząstki) i dla np. cząsteczek gazu w temperaturze pokojowej jest niezwykle mała – znacznie mniejsza od odległości między cząsteczkami (atomami) gazu (np. dla cząsteczek powietrza N_2 , O_2 w temperaturach pokojowych jest rzędu zaledwie 10 nm). Obserwacja falowych własności materii wymaga więc zarówno niskiej temperatury (aby λ_{dB} było możliwie duże), jak i dostatecznie dużej gęstości cząstek (aby zmniejszyć odległości międzycząsteczkowe). Należy przy tym jednak unikać naturalnego w niskich temperaturach łączenia się poszczególnych atomów w cząsteczki lub ich skraplania albo zestalania się. Wówczas bowiem powstałyby silnie oddziałujące układy, w których kondensacja Bosego-Einsteina byłaby zdominowana przez oddziaływania wewnątrz fazy skondensowanej. Od strony doświadczalnej kondensacja Bosego-Einsteina gazu atomowego była więc ogromnym wyzwaniem. Jej realizację umożliwił dopiero niezwykle rozwój optycznych metod chłodzenia i pułapkowania atomów. Metody te pozwalają obecnie

na osiągnięcie w laboratoriach fizycznych najniższych temperatur we wszechświecie. Za ich opracowanie przyznano w 1997 roku Nagrodę Nobla S. Chu, C. Cohenowi-Tannoudjiemu i W. Philipsowi (*Foton* 55). Tegoroczna nagroda jest więc kontynuacją długiej już serii tych najwyższych wyróżnień naukowych za prace z fizyki zimnej materii.

Obserwacja kondensatu wymagała jeszcze niższych temperatur niż te, na jakie pozwalają metody optyczne. Do opracowania nowych metod ochładzania i pułapkowania atomów ogromny wkład wniósł zwłaszcza W. Ketterle, który w 1990 roku przyjechał z Monachium na staż podoktorski do MIT i tam umiejętnie wykorzystał wcześniejsze prace nad ochładzaniem i pułapkowaniem wodoru. Prace Ketterlego i innych grup doprowadziły do osiągnięcia temperatur poniżej 1 mikrokelwina – rzędu 10–100 nK, przy gęstościach atomowych rzędu 10^{12} at/cm³. Ciekawe jest to, że wbrew potocznemu rozumieniu znaczenia słowa „kondensat” mamy w nim do czynienia z niezwykle rozrzedzonym gazem. Największe gęstości kondensatu nie przekraczają 10^{13} at/cm³, co odpowiada gęstości gazu w średniej jakości aparaturze próżniowej.

Bardzo ciekawe jest to, jak ważne było przeświadczenie tegorocznych laureatów, że cel jest możliwy do osiągnięcia. Na początku lat 1990. mekką optycznych badań zimnych atomów w pułapkach było laboratorium kierowane przez C. Cohena-Tannoudjiego w Ecole Normale Supérieure w Paryżu, gdzie pracowano z atomami cezu. Miałem wielokrotnie przyjemność je zwiedzać i dyskutować z pracującymi tam fizykami. Wszyscy oni określali jako długofalowy cel swych badań kondensację Bosego-Einsteina. Nikt jednak wówczas nawet tam – na „światowym biegunie zimna” – nie wierzył, że stanie się to możliwe, a już zwłaszcza w perspektywie krótszej niż 20 lat. Tymczasem młodzi Amerykanie – przede wszystkim Wieman w JILA, Hulet na Uniwersytecie Rice czy też Ketterle w MIT, którzy wówczas dopiero wkraczali w tę dziedzinę – uznawali wprawdzie prymat Paryża, ale nie mieli żadnych kompleksów ani obaw, że kondensacja w atomach może być nieosiągalna. Z przyczyn bardziej przypadkowych niż zasadniczych (wcześniej zgromadzone wyposażenie laboratorium, niechęć do pracy z tym samym pierwiastkiem co Francuzi, aby nie narazić się na zarzut nieoryginalności) zajęli się rubidem, litem i sodem. Ich brak kompleksów i zapał doprowadził w 1995 roku do opisanego powyżej odkrycia. Oczywiście paryżanie natychmiast próbowali powtórzyć te wyniki w swoim laboratorium z cezem, co jednak się nie udało. Później dopiero okazało się, że było to niemożliwe, ponieważ cez – w odróżnieniu od innych alkaliów – ma wyjątkowo duży przekrój czynny na zderzenia i z powodu zbyt silnego oddziaływania atomów cezu ich kondensacja nie jest możliwa. Tej własności cezu jednak wcześniej nie znano. Gdyby więc nie szczęśliwy przypadek w doborze pierwiastka przez kilku ambitnych młodych ludzi, być może do dzisiaj nie mielibyśmy kondensatu Bosego-Einsteina. Z drugiej strony, można też spekulować, czy kondensat zostałby otrzymany wcześniej, gdyby nie niefortunny wybór cezu do doświadczeń w Paryżu – o ile można mówić o pechu przy badaniach, za które i tak przyznano Nobla (w 1997 roku)!

Niełatwo mówić o możliwych zastosowaniach obecnego odkrycia. Jego znaczenie należy jednak z pewnością do kategorii podstawowych. Nie jest przy tym najważniejsze, że wreszcie w bardzo czystej formie doświadczalnie zademonstrowano coś, co teoretycznie zostało przewidziane już 70 lat wcześniej. Znacznie ważniejsze jest to, że mamy możliwość prac nad nowymi układami fizycznymi – szumnie i chyba przesadnie nazwanymi już nowym stanem materii. Dzięki temu można badać niezwykle, i w przeważającej części nieznaną, własności układów złożonych z wielkiej liczby cząstek w sposób niezaburzony ich silnym oddziaływaniem. Na przykład dla lepszego zrozumienia zjawiska nadciekłości ważne są intensywnie już prowadzone badania wirów w kondensacie. Z kolei metody badania atomów bozonowych w ultraniskich temperaturach stosuje się od niedawna także do badań atomów fermionowych w warunkach degeneracji kwantowej. Celem jest obserwacja tworzenia par Coopera i lepsze zrozumienie zjawiska nadprzewodnictwa.

Konkretnymi zastosowaniami, jakie już się rysują przed kondensatem, są niezwykle precyzyjne pomiary fizyczne. Precyzja zawdzięczana jest niemal całkowitej eliminacji zaburzeń pochodzących od oddziaływań międzyatomowych, a także z ogromnego spowolnienia ruchu atomów i eliminacji rozszerzenia dopplerowskiego ich linii widmowych. Atomy w kondensacie mogą więc posłużyć do budowy ultradokładnych wzorców czasu. Ponadto atomy w kondensacie są spójne, co znaczy, że ich fale materii są spójne. Oznacza to, że nawet po wypuszczeniu ich z pułapki chmura atomów zachowuje długo swój pierwotny kształt i zachowuje się jak skolimowana wiązka laserowa. Pozwala to oczekiwać zastosowań technicznych w litografii, gdzie wiązka „lasera atomowego” będzie mogła precyzyjnie zapisywać rozmaite struktury obwodów scalonych. Wysoki stopień spójności atomowej pozwala też z nadzieją myśleć o realizacji komputerów kwantowych. Nie sposób wreszcie nie wspomnieć o niezwykle ciekawych propozycjach badań kosmologicznych za pomocą kondensatów. Okazało się, że procesy zachodzące w czarnych dziurach można modelować poprzez zachowanie się wiązek światła w wirach kondensatu, zaś efekty stabilizacji białych karłów, eksplozji supernowych czy kolapsu grawitacyjnego można doświadczalnie modelować, manipulując oddziaływaniami pomiędzy skondensowanymi atomami. Stwarza to nadzieję na rozwój doświadczalnej kosmologii uprawianej na stole laboratoryjnym.

W Polsce tematyka związana z kondensacją Bosego-Einsteina jest intensywnie uprawiana przez teoretyków warszawskich (Mariusz Gajda i Jan Mostowski – IF PAN, Kazimierz Rzązewski – CFT PAN, Marek Trippenbach – IFD UW). W IF UJ zespół autora tej notatki zbudował jedyną jak dotąd w Polsce pułapkę magnetooptyczną, z którą prowadzi doświadczenia nad własnościami atomów w temperaturze poniżej 100 μ K (jest to obecnie „polski biegun zimna”) i przygotowuje się do kondensacji Bosego-Einsteina. Chcemy, aby w ciągu 2 lat można było eksperymentować z kondensatem w Polsce. Mamy nadzieję, że będzie to możliwe zarówno w Krakowie, jak i w powstającym Krajowym Laboratorium Fizyki

Atomowej, Molekularnej i Optycznej przy UMK w Toruniu, w którym budujemy odpowiednie stanowisko badawcze.

Zagadnienia związane z fizyką ultraniskich temperatur i tematyką nagrody Nobla są dokładniej omówione w prezentacji na stronie

<http://silly.if.uj.edu.pl/zoa/grupy/wg.htm>.

Objaśnienie ilustracji:

Ilustracja przedstawia trójwymiarowe obrazy chmury atomów otrzymane przy obniżaniu temperatury spulapkowanych atomów Rb⁸⁷. Oś pionowa reprezentuje liczbę atomów, a płaszczyzna pozioma jest płaszczyzną przecinającą centrum pułapki. Kolejne zdjęcia (od lewej) przedstawiają temperatury: 400 nK, 200 nK, 50 nK. Widać, że przy 200 nK zaczyna się pojawiać frakcja atomów zajmujących samo centrum pułapki, gdzie są w najniższym energetycznie stanie, czyli właśnie kondensat Bosego-Einsteina. Po jeszcze silniejszym ochłodzeniu, atomów nieskondensowanych już nie ma i pozostaje wyłącznie kondensat. Jest to wynik pierwszej obserwacji kondensatu Bosego-Einsteina gazu atomowego w laboratorium Cornella i Wiemana z 1995 roku (źródło: <http://jila-www.colorado.edu/bec/>).

