

Kondensat Bosego–Einsteina

Kazimierz RZAŻEWSKI*

W temperaturze pokojowej gaz, zbiór atomów czy cząsteczek, a także powietrze, którym oddychamy, z powodzeniem można sobie wyobrazić jako rój maleńkich obiektów, niemal doskonałych punktów materialnych, poruszających się z prędkościami rzędu kilkuset kilometrów na godzinę i od czasu do czasu zderzających się zupełnie jak kule bilardowe. Oczywiście, różne atomy poruszają się w gazie z różnymi prędkościami. Odpowiedni rozkład prawdopodobieństwa występowania prędkości znamy jako rozkład Maxwella. Typowa, lub lepiej, średnia prędkość atomów maleje wraz z obniżaniem temperatury gazu proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z temperatury bezwzględnej. Tak, w wielkim uproszczeniu, wyobrażamy sobie gaz w stosunkowo wysokich temperaturach. Co się stanie, gdy zaczniemy gaz chłodzić, zmniejszając znacząco prędkości atomów?

Od czasów Louisa de Broglie'a wiemy, że z każdym poruszającym się obiektem mikroskopowym związana jest tak zwana fala materii. Długość tej fali λ rośnie wraz ze zmniejszającą się prędkością V :

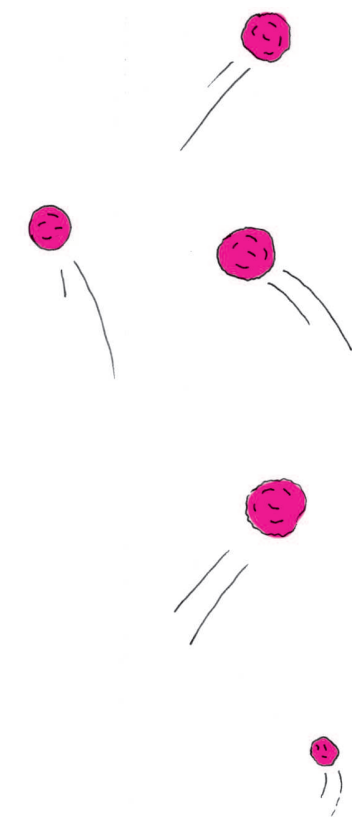
$$\lambda = \frac{h}{mV}.$$

Oczywiście, występujące w tym wzorze h to słynna, zdobyła okładkę, stała Plancka. Jeśli uda się schłodzić gaz do tak niskich temperatur, że owa długość fali de Broglie'a osiągnie wielkość porównywalną z typowymi odległościami pomiędzy atomami, to własności falowe atomów staną się ważniejsze niż to, że każdy z nich można traktować jako niewielką kulkę. Gaz stanie się jedną wielką falą materii. To właśnie istota przemiany fazowej do stanu zwanego kondensatem Bosego–Einsteina.

Nie każda substancja może podlegać takiej przemianie. Musi się ona składać z atomów będących bozonami, a nie fermionami. Bozonami zaś są te obojętne atomy, których jądra atomowe zawierają parzystą liczbę neutronów. Jak to rozumieć? Jądra atomowe składają się z dodatnio naładowanych protonów i obojętnych elektrycznie neutronów. Wokół jąder krążą ujemnie naładowane elektrony. Oczywiście, w obojętnym atomie elektronów jest tyle samo co protonów w jądrze. Wszystkie składniki atomów to fermiony, to znaczy cząstki o połówkowym spinie, czyli wewnętrznym momencie pędu. Spiny poszczególnych składników dodają się lub odejmują, więc wypadkowy spin elektronów i protonów jest zawsze całkowitą wielokrotnością elementarnego spinu (równego tej samej stałej Plancka podzielonej przez 2π). Zatem o ostatecznym wypadkowym spinie atomu decyduje parzystość liczby neutronów w jądrze; dla parzystej liczby neutronów atom ma spin całkowity, a wtedy jest bozonem. To bardzo ciekawe, bo zwykle makroskopowe własności substancji zależą od powłok elektronowych. Jądro atomowe jest jakieś sto tysięcy razy mniejsze niż cały atom i w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia zderzające się atomy nie zbliżają swoich centrów na odległości porównywalne z rozmiarami jąder. Tymczasem makroskopowe własności bardzo zimnych gazów istotnie zależą od wypadkowego spinu!

W tym momencie pojawiają się dwa zagadnienia.

Zderzenia i straty. Skoro warunek przemiany fazowej to porównywalność długości fali materii i średniej odległości pomiędzy atomami, to zamiast (oprócz) chłodzenia wydłużającego długość tej fali może należałoby zmniejszyć typowe odległości pomiędzy atomami, zwiększając gęstość gazu. Tu jednak pojawia się ciekawe ograniczenie. Bardzo zimny gaz atomowy powinien się najpierw skroplić, a potem zestalić. Aby zapoczątkować te procesy, niezbędne jest jednoczesne zderzenie trzech atomów. Gdy zderzą się dwa, to zasada zachowania energii nie pozwala im się zlepić, bo zlepek – cząsteczka zwana dimerem – ma energię ujemną (jest związana), a dwa nadlatujące atomy mają energię kinetyczną, która, oczywiście, jest dodatnia. Zderzenie trzech atomów pozwala pokonać tę trudność. Dwa atomy mogą się zlepić, a nadmiar energii może zostać wyniesiony przez trzeci atom. Szansa zderzeń trójciałowych gwałtownie rośnie z gęstością gazu. Zatem gęstość musi być ograniczona, aby gaz się nie skroplił i nie zestalił. W praktyce doświadczenia z kondensatem wykonuje się w rozrzedzonym gazie o gęstości rzędu 10^{14} atomów/cm³, czyli pięć rzędów mniejszej niż gęstość powietrza, którym oddychamy. Odpowiadająca



Rozwiązanie zadania F 899. Granica możliwej do osiągnięcia dokładności pomiaru położenia wynika z zasady nieoznaczoności Heisenberga: $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, gdzie Δx i Δp to odpowiednio dokładność pomiaru współrzędnej x i pędu p w kierunku x , a $\hbar = 1,0545 \dots \cdot 10^{-34}$ Js jest stałą Plancka h podzieloną przez $2\pi = 6,2831 \dots$

Długość λ fali de Broglie'a cząstki o pędzie p wynosi $\lambda = h/p$. Mamy więc

$$\frac{\Delta x}{\lambda} \geq \frac{p}{4\pi \Delta p}.$$

Dla cząstki swobodnej energia kinetyczna to $E = p^2/(2m)$, gdzie m oznacza masę cząstki. Stąd w przybliżeniu mamy

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\Delta p}{p}.$$

Ostatecznie otrzymujemy

$$\frac{\Delta x}{\lambda} \geq \frac{E}{2\pi \Delta E} \approx 1592.$$

*Centrum Fizyki Teoretycznej PAN



Rozwiązanie zadania M 1486.

Liczba $n - m$ dzieli liczby względnie pierwsze $n^7 - m^7$ i $n^3 - m^3$. W takim razie $n - m = 1$, a stąd

$$n^2 - m^2 = (n - m)(n + m) = n + m = 2m + 1$$

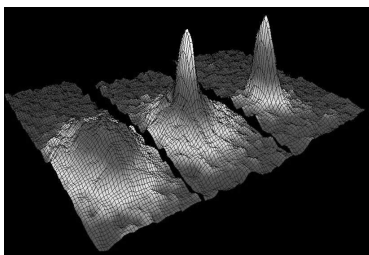
$$\begin{aligned} n^3 - m^3 &= (n - m)(n^2 + nm + m^2) = \\ &= (m + 1)^2 + (m + 1)m + m^2 = \\ &= 3m^2 + 3m + 1. \end{aligned}$$

Korzystając z własności największego wspólnego dzielnika, otrzymujemy

$$\begin{aligned} \text{NWD}(n^2 - m^2, n^3 - m^3) &= \\ &= \text{NWD}(2m + 1, 3m^2 + 3m + 1) = \\ &= \text{NWD}(2m + 1, 3m^2 + 3m + 1 - m(2m + 1)) = \\ &= \text{NWD}(2m + 1, m^2 + 2m + 1). \end{aligned}$$

Każdy dzielnik pierwszy liczby $m^2 + 2m + 1 = (m + 1)^2$ jest również dzielnikiem liczby $m + 1$, a więc także $2m + 2$. W takim razie nie może dzielić liczby $2m + 1$. Stąd

$$\text{NWD}(n^2 - m^2, n^3 - m^3) = 1.$$

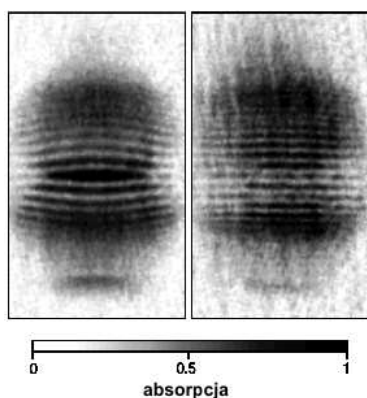


Zdjęcie pierwszego kondensatu atomów rubidu z laboratorium Carla Wiemana i Erica Cornella. Czerwiec 1995, JILA, Boulder, Colorado, USA.

tej gęstości temperatura krytyczna jest mniejsza niż jeden mikrokelwin, czyli mniejsza niż jedna milionowa stopnia powyżej zera bezwzględnego.

Chłodzenie i pułapkowanie obojętnych atomów. Rozwinięcie metod chłodzenia i pułapkowania obojętnych atomów jest trudniejsze niż elektrycznie naładowanych jonów, na które można działać polem elektrycznym. Zatem nic dziwnego, że niezbędne do wystąpienia tej przemiany warunki udało się wytworzyć dopiero w 1995 roku, 70 lat po teoretycznym odkryciu samej przemiany przez Alberta Einsteina, zainspirowanego wcześniejszą pracą hinduskiego fizyka Satyendry Bosego. Do opanowania przemiany gazu w stan skondensowany niezbędny był niezwykle rozwój technik pułapkowania i spowalniania (chłodzenia) atomów. Za te osiągnięcia przyznano w 1997 roku Nagrodę Nobla. Otrzymali ją Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i William D. Phillips. Oczywiście, bardzo zimnego gazu nie można po prostu trzymać w zamkniętym naczyniu. Nie sposób doprowadzić jego ścianek do tak niskich temperatur, więc schładzany gaz, odbijając się od nich, ponownie by się ogrzewał. W większości doświadczeń do pułapkowania wolno poruszających się atomów wykorzystuje się pola magnetyczne oraz to, że chłodzone atomy mają niezerowy moment magnetyczny – są maleńkimi magnesami. W takiej magnetycznej pułapce zimny atom oscyluje, zderzając się od czasu do czasu z innymi atomami. Do spowalniania wykorzystuje się światło lasera. Atom chętnie pochłania fotony o odpowiednio dobranej częstotliwości, zwanej częstotliwością rezonansową. Pochłaniając, doznaje jednocześnie odrzutu, przejmuje pęd absorbowanego fotonu – tak jak bramkarz łapiący pędzącą piłkę. Jeśli zjawisko tego pochłonięcia zdarzy się, gdy fotony nadbiegają na spotkanie zbliżającego się atomu, to pochłonięciu fotonu towarzyszy pożądane zmniejszenie jego prędkości. Ale, jak powiedzieliśmy, atomy oscylują, zatem trzeba jeszcze sprawić, aby atomy poruszające się w tę samą stronę co światło nie chciały absorbować fotonów, bo wtedy pochłonięciu fotonu towarzyszy niepożądane przyspieszenie atomu. Taką asymetrię procesu pochłaniania umożliwia zjawisko Dopplera. W przypadku fal akustycznych spotykamy się z nim w życiu codziennym, słysząc różnicę wysokości dźwięku zbliżającej się lub oddalającej się karetki pogotowia ratunkowego. Podobnie się dzieje z rezonansową częstotliwością poruszającego się atomu. Odstrojenie częstotliwości stosowanego światła od rezonansu dla spoczywającego atomu w stronę niższych częstotliwości – fizycy mówią „ku czerwieni” – powoduje, że procesy absorpcji zachodzą głównie, gdy atom biegnie naprzeciw padającej wiązki. Czytelnik Uważny w tym momencie powie: przecież wzbudzony atom po chwili wyemituje foton, powracając do stanu podstawowego, by być gotowym na następny akt pochłonięcia. Wypromieniowany foton wynosi ze sobą swój pęd i z prawa zachowania wynika, że atom, jak strzelec w momencie oddania strzału, doznaje odrzutu. To dzieje się jednak w przypadkowym kierunku i słabo wpływa na ogólny przebieg zjawiska. Ogranicza jednak minimalną, osiąganą tym sposobem temperaturę. W procesie chłodzenia dopplerowskiego uzyskuje się opóźnienia około 100 000 razy większe niż przyspieszenie ziemskie. Jednak ta minimalna temperatura to zdecydowanie więcej niż jeden mikrokelwin. Nie wystarcza to do uzyskania kondensatu. Zwykle następuje końcowy etap chłodzenia obrazowo zwany chłodzeniem przez odparowanie. Bierze się to z analogii do gorącej kawy w kubku, która chłodzi się, bo najszybsze cząsteczki są w stanie opuścić ciecz i poszybować daleko, obniżając średnią energię pozostałej w kubku kawy. W przypadku gazu ten rodzaj chłodzenia polega na umożliwieniu najszybszym atomom ucieczki z pułapki. Ich stan wewnętrzny – kierunek momentu magnetycznego – zostaje tak zmieniony, że albo w ogóle nie czują pułapki, albo wręcz są z niej wypychane. Ważne, że te pozostałe ciągle się zderzają, szybko wyrównując temperaturę. W procesie chłodzenia przez parowanie tracimy atomy, jednocześnie obniżając temperaturę. Chodzi jednak o to, by coś w pułapce pozostało. Udało się to wiosną 1995 roku w instytucie JILA w Boulder (Colorado) dwu ściśle współpracującym ze sobą grupom kierowanym przez Carla Wiemana i Erica Cornella. Już w 2001 roku otrzymali oni za to osiągnięcie Nagrodę Nobla. Podzielili ją z Wolfgangiem Ketterle, Niemcem ze słynnego MIT, który kilka tygodni później też wytworzył kondensat. W JILA skondensowano rubid o liczbie masowej 87, a w MIT sód o liczbie masowej 23. Obok zamieszczamy zdjęcie pierwszego w historii kondensatu. Było tam około 2000 atomów. Aby sfotografować taką maleńką chmurkę, należało wówczas wyłączyć pola magnetyczne tworzące pułapkę, pozwalając chmurze rozprężyć się. Taką większą chmurę oświetla się wówczas silnym impulsem światła laserowego. Po przejściu przez chmurę światło pada na matrycę kamery CCD. Można obrazowo powiedzieć, że chmura rzuca cień. Im na drodze promienia więcej atomów, tym większa absorpcja, a zatem ciemniej.

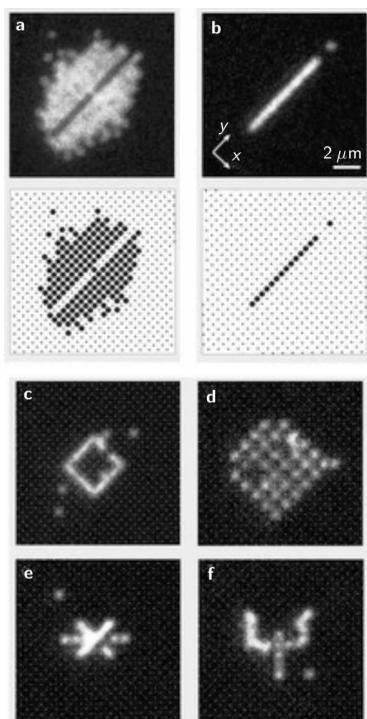
Po rozprężeniu gazu rozkład gęstości odzwierciedla rozkład prędkości atomów w pułapce. Z lewej widzimy szeroki rozkład dobrze opisywany wzorem Maxwella obowiązującym dla klasycznego gazu. Pojawiający się w niższych temperaturach stromy wierzchołek w centrum, odpowiadający bardzo małym prędkościom, to właśnie kondensat. Te atomy poruszają się w pułapce z prędkościami rzędu milimetra na sekundę. Po prawej stronie mamy już tylko samotny wierzchołek – to właśnie kondensat. W środku temperatura nieco wyższa, ale już poniżej krytycznej. Mamy trochę kondensatu i trochę chmury termicznej. Stan skondensowany gazu to, jak powiedzieliśmy, makroskopowa manifestacja kwantowych, falowych własności atomów. Jeśli kondensat to mocna fala materii, to dwie takie fale powinny interferować zupełnie jak fale na wodzie, dźwięk czy światło. Pierwsze piękne doświadczenie wykazujące interferencję dwu kondensatów wykonał już w 1996 roku Wolfgang Ketterle. Dwa niezależnie przygotowane kondensaty zostały jednocześnie pozbawione swoich pułapek. Rozprężając się, dwie chmury nałożyły się na siebie i objawiły piękny, klasyczny obraz interferencyjny, który widzimy na zdjęciu obok. Prawdziwe „linie papilarne” fizyki kwantowej.



„Linie papilarne” kwantowej fizyki gazu. Interferencja dwóch rozprężających się kondensatów Bosego-Einsteina obserwowana w 1996 roku przez Wolfganga Ketterlego w MIT.

Co się dzieje? Od 1995 roku upłynęło 20 lat. W tym czasie badania gazów kwantowych rozwinęły się niesłychanie. Co roku powstają tysiące doświadczalnych i teoretycznych prac na ten temat. Nie sposób je tu streścić. W kilku punktach zasygnalizuję tu najciekawsze, moim zdaniem, kierunki badań:

1. Skondensowano atomy wielu różnych pierwiastków. Udało się wytworzyć także kondensaty molekularne.
2. Udało się schłodzić także gazy fermionowe do temperatur, w których pojawiają się własności kwantowe. Być może najciekawsze jest tu zaobserwowanie par Coopera dwu przyciągających się fermionów o przeciwnych spinach.
3. Przedmiotem licznych prac doświadczalnych i teoretycznych są charakterystyczne defekty w kondensacie, takie jak wiry i solitony. Wiry każdy sobie pewnie wyobraża. To małe kwantowe tornada. Solitony zaś to dobrze zlokalizowane zaburzenia poruszające się w kondensacie przez stosunkowo długi czas bez widocznego rozplywania się.
4. Zarówno zimne fermiony, jak i bozony można umieścić w oczkach sieci optycznej. Taką sieć tworzy optyczna fala stojąca – rezultat interferencji przeciwbieżnych wiązek światła laserowego. W zależności od liczby par takich wiązek mamy do czynienia z jedno-, dwu- lub trójwymiarowymi układami regularnie rozłożonych w przestrzeni małych pułapek na atomy.
5. Atomy w takiej sieci stanowią niezwykle dogodną doświadczalną realizację sieciowych modeli teoretycznych od lat rozważanych przez fizyków zajmujących się fizyką materii skondensowanej. Mając w doświadczeniach dostęp do kontroli parametrów modelu, można pomierzyć wielkości fizyczne, których teoretycy nie są w stanie wyznaczyć z powodu złożoności obliczeń. Mówimy tu o „kwantowych symulatorach”, czyli realizacji marzeń Richarda Feynmana o budowie swojego analogowego komputera kwantowego.
6. Szczególnym osiągnięciem było wytworzenie tak zwanej fazy Motta, stanu bozonów, w którym w każdym oczku sieci znajduje się dokładnie jeden atom.
7. Doskonalenie metod obrazowania osiągnęło zdolność rozdzielczą pozwalającą fotografować pojedyncze atomy w sieci. Obok przedstawiamy takie zdjęcie z laboratorium I. Blocha z Monachium.
8. Skondensowane początkowo atomy alkaliczne oddziaływały głównie siłami van der Waalsa, które są krótkozasięgowe. Ich zasięg jest wielokrotnie mniejszy niż typowe odległości pomiędzy atomami. Atomy o większym momencie magnetycznym, czyli kolejno skondensowane: chrom, erb i wreszcie dysproz, to znacznie silniejsze magnesyki. Oddziaływanie takich magnesyków, czyli dipoli magnetycznych, ma stosunkowo duży zasięg. Energia takiego oddziaływania maleje z sześcianem odległości, a sama siła zależy od kierunków (nie jest izotropowa). To niezwykle wzbogaca fizykę gazów kwantowych.
9. Inny aspekt to możliwość wzbudzenia niektórych atomów kondensatu do tak zwanych stanów Rydberga. Atomy w tym stanie mają olbrzymie rozmiary – wewnątrz orbit elektronów mieszczą się tysiące atomów kondensatu. Być może uda się zobaczyć odcisnięty w kondensacie kształt funkcji falowej elektronu na takiej orbicie.



Adresowanie i fotografowanie pojedynczych atomów w sieci optycznej. Immanuel Bloch, Monachium.

Tu czas przerwać. Można by jeszcze długo wymieniać. Każdy z punktów należałoby następnie rozwinąć w osobny spory artykuł. Dodam tylko, że w punkcie 9 przemyciłem jedno z naszych niedawnych spostrzeżeń.