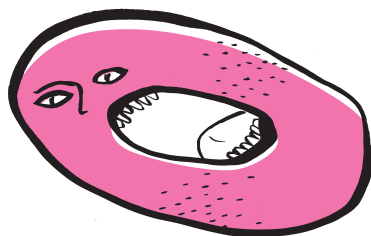


Kontrolowalne układy kilkuatomowe Damian WŁODZYŃSKI*

*Doktorant w Instytucie Fizyki PAN

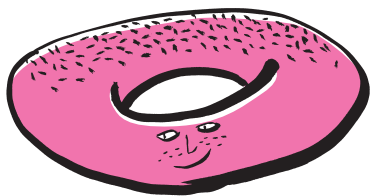


Więcej o kondensacie Bosego–Einsteina pisali Krzysztof Pawłowski w Δ_{14}^{10} i Kazimierz Rzążewski w Δ_{16}^3 .

Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił ogromny postęp w przygotowywaniu układów atomowych i manipulowaniu nimi. Z jednej strony rozwinięte zostały techniki pułapkowania gazów atomowych w małej przestrzeni za pomocą pól magnetycznych i laserów. Z drugiej strony wynaleziono i udoskonalono chłodzenie laserowe, pozwalające na schładzanie atomów do temperatur bardzo bliskich zera bezwzględnego (tak niskich, że nazwano je ultrazimnymi). Postęp ten umożliwił otrzymanie słynnego kondensatu Bosego–Einsteina (a później również tzw. zdegenerowanego gazu Fermiego) dla różnych pierwiastków. Co więcej, używając pól magnetycznych, można również zmieniać efektywną siłę oddziaływań pomiędzy atomami (opisuje to tzw. rezonans Feshbacha). Wszystko to pozwala na daleko idącą kontrolę nad stanem i właściwościami układu wieloatomowego. Parametrem, który nie był precyzyjnie kontrolowany w przeprowadzanych w przeszłości eksperymentach, była liczba atomów. Zmieniło się to w roku 2011, kiedy grupa profesora Selima Jochima z Heidelbergu opublikowała wyniki eksperymentu, w którym badacze pułpkowali kilka atomów (do 10), ściśle kontrolując ich liczbę.

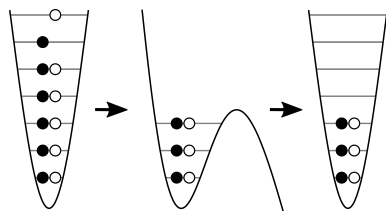
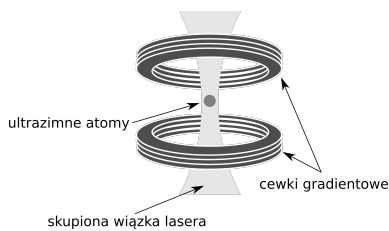
Aby wyjaśnić, jak uzyskano kontrolę nad liczbą atomów w pułapce, potrzebujemy wprowadzić pojęcie *atomów fermionowych*. Okazuje się, że wszystkie atomy można podzielić na dwa typy, posiadające zupełnie różne własności statystyczne, które można obserwować w bardzo niskich temperaturach. O typie atomu decyduje parzystość sumarycznej liczby protonów, neutronów i elektronów. Jeżeli całkowita liczba tych cząstek, z których składa się atom, jest parzysta, to wtedy wiele identycznych atomów może znajdować się w tym samym stanie. Tego typu atomy, zwane *bozonowymi*, tworzą w bardzo niskiej temperaturze kondensat Bosego–Einsteina. Jeżeli całkowita liczba cząstek jest nieparzysta, to identyczne atomy podlegają zakazowi Pauliego – podobnie jak elektrony w atomie – nie mogą znajdować się w tym samym stanie kwantowym. Takie atomy nazywamy *fermionowymi*. W bardzo niskiej temperaturze atomy fermionowe z dużym prawdopodobieństwem zajmują stany o najniższych możliwych energiach (po jednym atomie na stan). Taki układ nazywa się *zdegenerowanym gazem Fermiego*. Nazewnictwo, „gaz bozonowy” oraz „gaz fermionowy”, nawiązuje do dwóch rodzajów cząstek elementarnych: *bozonów* i *fermionów*, które posiadają opisane wyżej własności statystyczne.

W eksperymencie grupy profesora Jochima użyto atomów izotopu litu ${}^6\text{Li}$ złożonych z 3 protonów, 3 neutronów i 3 elektronów, czyli atomów fermionowych. Co więcej, ich stan wewnętrzny był ściśle kontrolowany, w szczególności każdy z atomów mógł znajdować się tylko w jednym z dwóch rozróżnialnych stanów wewnętrznych. Atomy ${}^6\text{Li}$ w tym samym stanie wewnętrznym są identyczne, natomiast atomy w różnych stanach nie są. Oznacza to, że w praktyce badacze pracowali z mieszaniną dwóch rodzajów atomów fermionowych i mogli mieć co najwyżej dwa atomy w jednym stanie. Sytuacja ta znowu przypomina problem elektronów w atomie, ponieważ elektron również może znajdować się w jednym z dwóch stanów wewnętrznych (może mieć jedną z dwóch wartości spinu).



O pułapkach optycznych i innych narzędziach zrobionych ze światła pisal Piotr Fita w Δ_{20}^4 i Δ_{20}^5 .

Na początku eksperymentu badacze dysponowali rezerwuarem zawierającym dużą liczbę schłodzonych atomów litu. Z tego rezerwuaru pobierali około 600 atomów i umieszczali je w mikropułapce utworzonej z pojedynczej skupionej wiązki laserowej. Działanie tej mikropułapki polega na tym, że oscylujące pole elektryczne w wiązce laserowej polaryzuje atomy i jeżeli częstotliwość lasera jest odpowiednio dobrana, to atomy są wciągane do obszaru, gdzie natężenie światła jest większe, czyli do centrum wiązki. W takiej pułapce optycznej szerokość pułpkującego potencjału może być różna w kierunkach równoległych i prostopadłych do osi wiązki lasera. Taka możliwość została wykorzystana do tego, aby przygotować pułpkę znacznie węższą w kierunkach prostopadłych. W konsekwencji uzyskano pułpkę, która dla małej liczby atomów efektywnie była jednowymiarowa (poszczególne stany okupowane przez atomy różniły się od siebie tylko w kierunku równoległym do wiązki).



Atomy w pułapce przed i po użyciu cewek gradientowych

Na tym etapie eksperymentu atomy w mikropułapce miały temperaturę około $3 \mu\text{K}$ (mikrokelwinów), a liczba atomów w pułapce nadal nie była dokładnie określona. W następnym kroku wokół wiązki lasera włączano cewki wytwarzające gradient pola magnetycznego. Takie zmieniające się wzdłuż osi pole magnetyczne było odczuwane przez atomy jako dodatkowy, liniowy potencjał, który powodował częściowe otwarcie pułapki, co umożliwiało ucieczkę większości atomów. Tylko kilka atomów zajmujących najniższe poziomy energetyczne pozostało w pułapce po wyłączeniu pola magnetycznego. Ponieważ wszystkie najniższe poziomy energetyczne w tak niskich temperaturach są zajęte z prawdopodobieństwem bliskim jedności, liczba pozostających w pułapce atomów mogła być kontrolowana z dużą precyzją poprzez odpowiednie dobieranie parametrów pola magnetycznego. Na koniec eksperymentu badacze potrzebowali zmierzyć, ile atomów pozostało w mikropułapce. Robili to, oświetlając atomy i mierząc fluorescencję, czyli światło wyemitowane przez atomy po wzbudzeniu światłem padającym, przy użyciu kamery CCD. Eksperyment i pomiar były powtarzane wielokrotnie w celu obliczenia prawdopodobieństwa wytworzenia układu o z góry zadanej liczbie atomów. Prawdopodobieństwo sukcesu zmieniało się z tą liczbą. Jeżeli na przykład zadaną liczbą atomów w układzie było 2, to taki układ uzyskiwano z prawdopodobieństwem 96%. Natomiast dla układu złożonego z 8 atomów było to 87%. Uzyskane prawdopodobieństwa były więc bardzo wysokie, zwłaszcza biorąc po uwagę, że był to pierwszy tego rodzaju eksperyment.

Tego typu techniki eksperymentalne mogą znaleźć zastosowanie w symulacjach kwantowych. Idea takich symulacji polega na tym, aby wykorzystać dobrze kontrolowalne układy kwantowe do symulowania innych układów kwantowych, takich które są zbyt trudne do badania w laboratorium, albo do modelowania na klasycznym komputerze. Układy ultrazimnych atomów, w których można precyzyjnie kontrolować zarówno liczbę atomów, jak i własności międzyatomowych oddziaływań, są idealnym kandydatem na takie kwantowe symulatory.



Zadania

Przygotował Dominik BUREK

M 1720. Dodatnie liczby x_1, x_2, \dots, x_n spełniają nierówności

$$x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 < \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{2} \quad \text{oraz} \quad x_1 + x_2 + \dots + x_n < \frac{x_1^3 + x_2^3 + \dots + x_n^3}{2}.$$

Udowodnić, że $n > 50$.

Rozwiązanie na str. 15

M 1721. Wyznaczyć wszystkie liczby pierwsze p , dla których ciąg liczb $1, 2, \dots, p$ (w tej kolejności) można podzielić na kilka (więcej niż jeden) bloków kolejnych liczb tak, że suma liczb w każdym bloku jest taka sama.

Rozwiązanie na str. 10

M 1722. Dany jest wielokąt wypukły $\mathcal{F} = A_1 A_2 \dots A_n$. Dla dowolnego punktu P wewnątrz wielokąta punkty B_i to punkty przecięcia prostych PA_i z obwodem \mathcal{F} (różne od A_i). Wielokąt \mathcal{F} nazwiemy *zbalansowanym*, jeśli dla pewnego punktu P w jego wnętrzu punkty B_1, B_2, \dots, B_n leżą wewnątrz różnych boków \mathcal{F} . Rozstrzygnąć, czy \mathcal{F} musi być zbalansowany dla (a) parzystego n , (b) nieparzystego n .

Rozwiązanie na str. 21

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 1055. Dwie identyczne, niewielkie kulki, każda o średnicy d , wykonane są z dielektryka. Odległość środków kulek wynosi $r \gg d$. Jedną z kulek naładowano ładunkiem q . Ile razy zmaleje siła wzajemnego przyciągania kulek, gdy odległość ich środków zostanie zwiększona k razy?

Rozwiązanie na str. 3

F 1056. Dwa izolowane, oddalone od siebie, kuliste przewodniki o promieniach $r_1 = 3 \text{ cm}$ i $r_2 = 9 \text{ cm}$ naładowano do potencjałów $U_1 = 1,5 \text{ kV}$ i $U_2 = 3 \text{ kV}$, a następnie połączono cienkim drucikiem. Ile ciepła wydzieli się w druciku?

Przenikalność elektryczna próżni $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Rozwiązanie na str. 3