

Kondensat Bosego–Einsteina: o najzimniejszych atomach świata

Krzysztof PAWŁOWSKI*

Legenda głosi, że historia kondensacji Bosego–Einsteina rozpoczęła się przypadkiem, podczas wykładu na Uniwersytecie w Dhace. Prowadzący, Satyendra Nath Bose, pokazywał, że współczesny mu statystyczny opis teorii promieniowania ciała doskonale czarnego nie zgadza się z obserwacjami. Jednak podczas wyprowadzenia popełnił elementarny „błąd” – potraktował cząstki jako obiekty nierozróżnialne. Konsekwencją jego błędu była całkowita zgodność teorii i doświadczenia. Pewne jest, że w czerwcu 1924 roku Bose napisał do Alberta Einsteina list z prośbą o ocenę swego artykułu na temat nowego wyprowadzenia rozkładu Plancka. Artykuł, uprzednio odrzucony przez czasopisma naukowe, został przetłumaczony przez Einsteina na język niemiecki i za jego rekomendacją opublikowany.

Einsteina urzekła matematyczna elegancja wyników Bosego, ale podchodził sceptycznie do ich fizycznego znaczenia. Mimo to miesiąc po otrzymaniu listu przedstawił rozszerzenia i możliwe konsekwencje tej teorii. Tak powstała kwantowa teoria gazu doskonałego. Jednym z pierwszych wniosków, jakie Einstein z niej wyciągnął, była właśnie kondensacja Bosego–Einsteina.

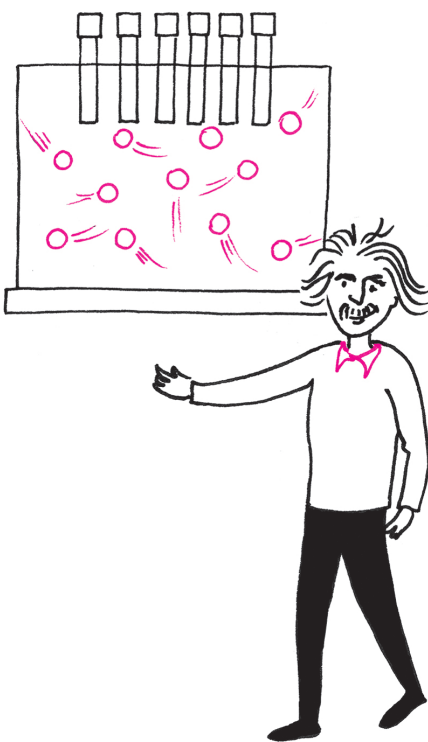
W swoim wyprowadzeniu Einstein rozważył naczynie z gazem, do którego dodawane są kolejne atomy, ale tak, aby temperatura nie ulegała zmianie. Teoria gazu doskonałego doprowadziła go do zaskakującego wniosku. Powyżej pewnej krytycznej gęstości każdy nowo dodany atom musi być nieruchomy. Gdy dodamy bardzo dużo cząstek, gaz będzie się składał z dwóch faz: ze „standardowej” fazy termicznej, której cząstki latają chaotycznie w różnych kierunkach ze średnią prędkością zależną od temperatury, oraz właśnie z kondensatu Bosego–Einsteina, utworzonego przez większość cząstek, które lewitują praktycznie nieruchomo. Wygląda to tak, jakby w trakcie losowania toto-lotka prawie wszystkie kule unosiły się nieruchomo w maszynie losującej, podczas gdy kilka z nich latałoby szybko po całym jej wnętrzu.

Nowa teoria wywołała ostrą krytykę środowiska fizyków. Nawet autor miał szereg wątpliwości, czego najlepszym świadectwem jest list Ehrenfesta do Joffego:

Mój drogi przyjacielu! Zdecydowanie Einstein jest z nami! W pełni zgodziliśmy się, że odrażająca praca Bosego jest bez żadnego znaczenia.

Największe zastrzeżenia budziły założenia teorii, ale nawet ci, którzy ją w całości zaakceptowali, nie dawali szans kondensacji Bosego–Einsteina. Otóż obliczono, że dla rzeczywistych atomów oraz dla rozsądnych gęstości kondensacja ujawni się dopiero przy ekstremalnie niskich temperaturach. Temperatura pokojowa to około 300 K, azot skrapla się w 100 K, temperatura w kosmosie jest szacowana na 3 K. Tymczasem typowe temperatury kondensacji oszacowano na setki nanokelwinów. Oczekiwano, że każda substancja w tej temperaturze powinna natychmiast zamrznąć, być ciałem stałym, a nie gazem. Poza tym, w czym trzymać kondensat? Gaz, zderzając się ze ściankami naczynia, ogrzewałby się do temperatury naczynia. Zatem należałoby schłodzić również naczynie, bo w innym przypadku kondensat natychmiast by wyparował.

Dopiero dużo późniejsze badania nad ciekłym helem przekonały społeczność naukowców, że kondensacja może być czymś więcej niż tylko matematycznym konceptem. Badania nad sublimacją pokazały, że kondensat może się uformować, zanim cały gaz przejdzie w ciało stałe, wystarczy jedynie zacząć od bardzo rozrzedzonego gazu. Ominęto również problem naczynia. Tutaj pomogło zrozumienie, jak materia oddziałuje ze światłem, oraz powstanie laserów.



*Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Otóż odpowiednio dobrany laser może wsysać atomy do środka swojej wiązki. Gaz zawieszają się w próżni, świecąc na niego laserami z różnych kierunków i dodatkowo oddziałując na niego polem magnetycznym.

Temperatura klasycznego gazu doskonałego jest z definicji proporcjonalna do średniej energii kinetycznej cząstek gazu. Natomiast energia kinetyczna jest proporcjonalna do kwadratu prędkości.

Długo głównym problemem pozostawało chłodzenie. Rozwiązania wykorzystywane obecnie są wynikiem prac kilku pokoleń badaczy. Atomy chłodzi się w wielu etapach, ostatni z nich, zwany chłodzeniem przez parowanie, jest stosunkowo prosty. W trakcie doświadczenia osłabia się wiązki laserowe i pole magnetyczne trzymające gaz. Pozwala to najszybszym atomom uciec poza zasięg tej magnetoptycznej pułapki. Zostają tylko atomy najwolniejsze, a zmniejszenie średniej prędkości to po prostu ochłodzenie. Efekt jest taki sam jak wtedy, gdy dmuchamy nad szklanką z gorącą herbatą. Dmuchaając, usuwamy te atomy, które były najslabiej związane z cieczą, czyli atomy najszybsze. Pozostają powolne cząstki, średnia prędkość tych, które pozostają, maleje, czyli herbata stygnie. Eksperyment jest więc przeprowadzony odwrotnie do idei Einsteina. Zamiast dodawać cząstki w stałej temperaturze, usuwa się większość cząstek – te najszybsze, aby zmniejszyć temperaturę. Czy w ten sposób osiągnie się kondensat?

Problem rozstrzygnięto w 1995 roku, 70 lat po pracach Bosego i Einsteina. W doświadczeniu najpierw ochłodzono gaz, potem nagle wyłączono magneto-ptyczną pułapkę trzymającą gaz. Część atomów natychmiast rozpięchła się na boki – te uznano za fazę normalną. W centrum został bohater tego artykułu – atomy o najniższej energii, zatem z niemalże zerową prędkością, tworzące kondensat Bosego–Einsteina.

W 1995 roku dwie grupy badawcze (pracujące niezależnie) wytworzyły kondensat w laboratorium. Zespół pod kierownictwem Erica Cornella i Carla Wiemana z JILA w Boulder skondensował gaz atomów rubidu. Natomiast grupa z MIT, kierowana przez Wolfganga Ketterlego, zaobserwowała kondensację gazu atomów sodu. Eric Cornell, Wolfgang Ketterle i Carl Wieman zostali za te badania uhonorowani Nagrodą Nobla z fizyki w 2001 roku, czyli zaledwie 6 lat po odkryciu, co jak na standardy Komitetu Noblowskiego jest czasem bardzo krótkim.

Zrozumienie kondensacji bardzo się zmieniło od czasów Einsteina. Okazało się, że kondensat jest dla materii tym, czym laser dla światła. Przypomnijmy długą, rozpoczętą jeszcze w XVII wieku, debatę na temat natury światła. Naukowcy podzielili się na dwa obozy. Pierwsi skłaniali się do teorii falowej, stwierdzającej, że światło jest dość podobne do dźwięku. Drugi obóz twierdził, że światło składa się z podobnych do małych kulek cząstek światła. Natura okazała się sprawiedliwa dla obu stron. Dzisiaj wiemy, że światło jest i falą, i zbiorem cząstek (fotonów) jednocześnie. Podobnie wygląda sprawa z atomami, jednak ich falowa natura ujawnia się dopiero przy ultraniskich temperaturach. Tutaj na scenę znowu wychodzi kondensat – jest on tak zimny, że jego atomy traktuje się jak fale. Co więcej – fale te są na tyle „długie”, że fale różnych atomów nakładają się. Wreszcie to, co czyni kondensat tak szczególnym, to jego spójność – w kondensacie fale różnych atomów wzmacniają się wzajemnie, tak jak dźwięk z kilku odpowiednio rozmieszczonych głośników. Właściwie kondensat bardziej przypomina jeden superatom, będący sumą setek tysięcy atomów dodających się do jednej fali materii. Dokładnie tak, jak fotony w laserze dodają się do jednej spójnej wiązki.

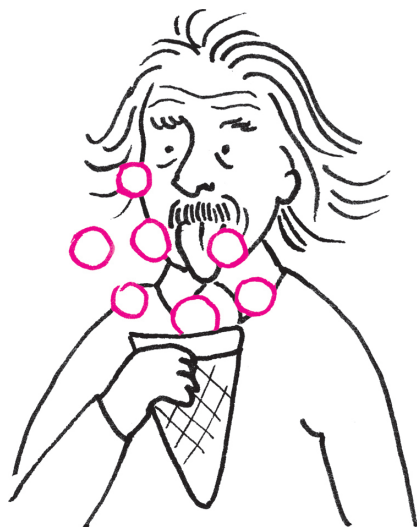
Pozostało jeszcze pytanie, które może nurtować Czytelnika – po co to wszystko? Jedną z motywacji jest użycie kondensatu do budowy nowego rodzaju komputerów – komputerów kwantowych. W klasycznym komputerze podstawową jednostką informacji jest bit – układ, który może przyjąć dwie różne wartości umownie nazywane „0” i „1”. Komputer kwantowy będzie oparty na kwantowych bitach, zwanych kubitami, w których „0” i „1” mogą występować jednocześnie. Okazuje się, że mając kubity, można wykonać niektóre zadania, na przykład rozłożenie liczby na czynniki pierwsze, szybciej, niż jest to możliwe w przypadku komputerów klasycznych. Jednym z wielu pomysłów na tworzenie kubitów miał być kondensat Bosego–Einsteina podzielony na dwie części, ale położone tak blisko siebie, żeby atomy mogły przeskakiwać między tymi dwoma kondensatami. Sterując oddziaływaniami między atomami wewnątrz kondensatów oraz zmieniając odległość między kondensatami, można by wykonywać proste operacje logiczne. Na przykład, gdyby wszystkie atomy znalazły się w jednym kondensacie, byłby to odpowiednik „0”, gdy w drugim – „1”. Tuż po podziale jednego kondensatu

na dwie równe części układ byłby w stanie superpozycji „0+1”. Istnieją teoretyczne propozycje, jak zrealizować wszystkie bramki logiczne niezbędne do działania komputera kwantowego. Obliczenia i pamięć komputera opierałyby się na zimnych atomach, natomiast informacje między kondensatami oraz elektroniką byłyby przesyłane za pomocą światła. Z jednej strony kondensat wydawał się bardzo dobrym kandydatem: jest to układ, który wyróżnia się spośród innych długim czasem spójności – pozostaje „kwantowy” przez sekundy, będąc rekordzistą w tej kategorii. Kolejną zaletą jest jego długi zasięg spójności – kondensatem manipuluje się jak jednym atomem, ale w wyniku uzyskuje się duże wzmocnienie manipulacji. Mimo tych zalet teraz wydaje się, że o ile badania nad kondensatem były milowym krokiem w kierunku kwantowych komputerów, sam kondensat, być może, nie jest najlepszym budulcem. Operacje na kondensacie zachodzą zbyt wolno, pozostaje problem ze skalowaniem, gdyż ciągle laboratoria muszą poświęcać całe pomieszczenia na elementy optyczne i elektroniczne niezbędne do wytworzenia kondensatu.

Natomiast ultrazimne atomy są już na tyle kontrolowane, że zaczynają służyć jako narzędzie do zrozumienia innych, bardziej skomplikowanych układów. Nauczono się, jak zmieniać siłę oddziaływań między atomami, dzielić kondensaty na części niemalże dowolnie rozmieszczone w przestrzeni, tworzyć chmury gazów jedno-, dwu- i trójwymiarowe. Stąd pomysły, żeby użyć zimnych gazów do zrozumienia innych układów. Dla przykładu, jednym z nierozwiązanych problemów fizyki teoretycznej jest wyjaśnienie nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego. Mechanizm musi być związany z ruchem elektronów wewnątrz sieci krystalicznej, jednak obecnie nie ma metod mierzenia tego ruchu. Przewiduje się natomiast, że ruch elektronów jest z dobrym przybliżeniem opisywany pewnym modelem, zwanym modelem Hubbarda. Korzystając z tego modelu, możemy napisać równania ruchu elektronów, jednak ich rozwiązanie okazuje się bardzo trudne. Nawet używając komputerów, umiemy je rozwiązać tylko dla maksymalnie kilkunastu cząstek. Można natomiast stworzyć podobny układ w zimnych gazach – rozdziela się je pomiędzy tysiące małych pułapek, używając tzw. sieci optycznych, tak aby atomy mogły przepływać między różnymi pułapkami. Ścisłej, buduje się taki układ, żeby ruch atomów był również opisywany modelem Hubbarda. Tym razem jednak mamy możliwość swobodnej zmiany parametrów tego modelu, a jednocześnie możemy śledzić ruch pojedynczych atomów. Poprzez badanie ich zachowania być może zostanie rozstrzygnięty problem, czy model Hubbarda wystarcza do wyjaśnienia nadprzewodnictwa, a jeśli tak – w jakich dokładnie warunkach to nadprzewodnictwo zachodzi. Budujemy zatem dobrze kontrolowany układ, tak aby udawał układ, którego jeszcze nie rozumiemy. Pomysł pochodzi od Richarda Feynmana i znany jest pod nazwą kwantowych symulatorów.

Inne, może bardziej przyziemne, zastosowanie to metrologia. Okazuje się, że niektóre wielkości, np. sekunda albo stała grawitacyjna mogą być zmierzone precyzyjniej, jeśli pomiarów dokona się używając atomów skondensowanych, a nie, jak to robiono wcześniej, atomów w fazie normalnej gazu. Tutaj pierwsze testy kondensat ma już za sobą, a kilka centrów miar i wag wdraża to rozwiązanie. Szczególnie interesujące są pomysły przygotowania kondensatu w takim stanie kwantowym, który umożliwi pomiary dokładniejsze niż jakikolwiek układ klasyczny.

Dokąd zmierza kondensat? Odpowiadając przewrotnie – w kosmos. Od 2010 roku międzynarodowy zespół badaczy opracowuje możliwość wysłania kondensatu w przestrzeń kosmiczną. Interferometry oparte na kondensacie mają posłużyć do dokładniejszych weryfikacji teorii grawitacji oraz dokładnego wyznaczenia stałej grawitacyjnej i pomiaru pola grawitacyjnego Ziemi. Być może za kilka lat na orbicie Ziemi kropla kondensatu Bosego–Einsteina, spadając w ziemskim polu grawitacyjnym, ujawni nowe tajemnice natury.



O sieciach optycznych pisaliśmy w *Delcie* 4/2011.



Rozwiązanie zadania F 865.

Dla prądu I płynącego wzdłuż krzywej l siła elektrodynamiczna działająca na element prądu Idl jest dana iloczynem wektorowym $dF = I \cdot dl \times B$. Ze względu na kształt rozważanego obwodu elektrycznego sumy składowych elementów prądu o zwrocie $+y$ i $-y$ muszą mieć taką samą wartość, a w konsekwencji składowa x wypadkowej siły elektrodynamicznej wyniesie zero. Natomiast suma wszystkich składowych x elementów prądu musi być skierowana od A do B i musi być równa całkowitemu prądowi, przepływającemu przez płytkę, a długość składowej x dowolnej drogi przepływu prądu musi być równa L . Stąd siła działająca na płytkę to $F = B \cdot I \cdot L$, gdzie prąd $I = \mathcal{E}/R_0$. Masa płytki wynosi $m = \rho \cdot d \cdot L^2 \sqrt{3}/4$. Z II zasady dynamiki dostajemy $a = 4 \cdot B \cdot \mathcal{E}/\sqrt{3} \cdot \rho \cdot d \cdot R_0 \cdot L$.