

# Kondensacja Bosego–Einsteina

*Przed trzema laty naukowcom z Kolorado udało się zrealizować wieloletnie marzenie fizyków – przybliżyć świat kwantów codziennym wyobrażeniom*

Eric A. Cornell i Carl E. Wieman

**W** czerwcu 1995 roku nasz zespół badawczy w Joint Institute for Laboratory Astrophysics (obecnie zwanym JILA) w Boulder (Kolorado) wytworzył małą, choć niezwykle kroplę. Ochładzając 2000 atomów rubidu do temperatury niższej niż zaledwie jedna stumiliardowa stopnia powyżej zera bezwzględne (jedna stumiliardowa kelvina), uzyskaliśmy warunki, w których na całe 10 s atomy straciły swoją tożsamość i zachowywały się jak pojedynczy „superatom”. Pod względem własności fizycznych upodobniły się do siebie – przede wszystkim poruszały się dokładnie tak samo. Wytworzony w ten sposób kondensat Bosego–Einsteina (BEC), po raz pierwszy zaobserwowany w gazie, można uważać za cząstkowy odpowiednik lasera – z tą różnicą, że w kondensacie to atomy, a nie fotony tańczą w idealnej harmonii.

Nasza krótko żyjąca galaretowata próbka była urzeczywistnieniem teoretycznych przewidywań, które intrygowały naukowców od 74 lat, czyli od momentu, kiedy Albert Einstein i hinduski fizyk Satyendra Nath Bose przewidzieli istnienie kondensatu. W temperaturze pokojowej atomy gazu poruszają się chaotycznie wewnątrz całej objętości pojemnika, w którym są zamknięte. Niektóre z nich mają dużą energię (dużą prędkość), inne mniejszą. Uogólniając pracę Bosego, Einstein wykazał, że jeśli taki gaz zostanie odpowiednio oziębiony, wówczas znaczna część wszystkich atomów osiadzie w jednym stanie o najniższej możliwej energii. Fale, które w matematycznym formalizmie teorii opisują takie fizyczne cechy atomów, jak ich położenie i prędkość, zlewają się wzajemnie i w rezultacie nie można odróżnić jednego atomu od drugiego.

Postęp, jaki dokonał się w badaniach nad otrzymaniem kondensatu Bosego–Einsteina, wzbudził wielkie zainteresowanie fizyków, a nawet został odnotowany przez czołowe gazety codzienne. Częściowo podyktowane to było dramaturgią, która nieodłącznie towa-

rzyszy trwającym dziesiątki lat próbom eksperymentalnej weryfikacji teorii Einsteina. Przede wszystkim jednak fascynacja ta wynikała z faktu, że kondensat jest makroskopowym oknem, przez które można spojrzeć na dziwny świat mechaniki kwantowej – teorii zasadzającej się na spostrzeżeniu, że cząstki elementarne, takie jak elektron, wykazują własności falowe. Mechanika kwantowa, która zawiera słynną zasadę nieoznaczoności Heisenberga, opisuje strukturę i oddziaływanie materii, przypisując cząstkom własności typowe dla fal.

Niezwykle rzadko można zauważyć efekty kwantowe, gdy obserwuje się makroskopową ilość jakiejś substancji. W zwykłych ciałach, potocznie zwanych ciałami objętościowymi, wkłady pochodzące od niezliczonej liczby budujących je cząstek dodają się w sposób niespójny, zaciemniając falowe własności wynikające z praw mechaniki kwantowej. Natomiast w przypadku kondensacji Bosego fala opisująca własności dowolnego atomu jest dokładnie w tej samej fazie, co fala opisująca każdy inny atom. Fale kwantowo-mechaniczne rozciągają się więc na całą objętość kondensatu i można je zauważyć gołym okiem. Tak oto to, co było mikroskopowe, staje się makroskopowe.

## Stare paradoksy w nowym świetle

Wytworzenie kondensatu Bosego–Einsteina rzuca nowe światło na stare problemy mechaniki kwantowej. Jeśli przykładowo dwa atomy (lub więcej) znajdują się w tym samym stanie kwantowomechanicznym, tak jak to się dzieje w kondensacie, wówczas z fundamentalnych powodów w żaden sposób nie daje się ich odróżnić za pomocą jakiegokolwiek pomiaru. Te dwa atomy zajmują taką samą objętość, poruszają się z identyczną prędkością, rozpraszają światło o tej samej barwie itp.

Nasze codziennne doświadczenie, oparte na znajomości materii w normalnej temperaturze, nie pomaga nam zrozumieć tego paradoksu, ponieważ w zwykłych temperaturach w przypad-

ku próbek o typowych rozmiarach przestrzennych zawsze można wyznaczyć położenie i ruch każdego pojedynczego obiektu należącego do danego zbioru. Ponumerowane piłeczki pingpongowe podskakujące w wirującym bębnie maszyny losującej ilustrują te rodzaje ruchów, które można opisać prawami mechaniki klasycznej.

**PULAPKA ATOMOWA** chłodzi atomy dzięki wykorzystaniu dwóch odmiennych mechanizmów. Najpierw sześć wiązek laserowych (czerwony) oziębia atomy, które początkowo miały temperaturę pokojową, jednocześnie popychając je do środka szklanego pudełka opróżnionego z powietrza. Następnie wiązki laserowe są wyłączane, a cewki magnetyczne (miedziane) zostają zasilane. Płynący w nich prąd wytwarza pole magnetyczne, które chwyta większość atomów, jednocześnie pozwalając tym o największej energii uciec z pułapki. W ten sposób średnia energia pozostałych atomów maleje, dzięki czemu próbka oziębia się oraz skupia jeszcze ciaśniej wokół środka pułapki. W rezultacie wiele atomów osiąga stan o najniższej dozwolonej przez mechanikę kwantową energii, tworząc jedną całość zwaną kondensatem Bosego–Einsteina.

MICHAEL GOODMAN

W ekstremalnie niskich temperaturach lub – z drugiej strony – w przypadku układów o bardzo małych rozmiarach przestrzennych mechanika klasyczna przestaje być przydatna. Krucha analogia między atomami i piłeczkami pingpongowymi się rozplywa. Nie możemy dokładnie wyznaczyć położenia atomu i powinniśmy go sobie wyobrażać raczej jako rozmytą plamkę. Plamka ta – znana pod nazwą paczki falowej – obrazuje obszar przestrzeni, w którym szansa znalezienia atomu jest duża. W miarę jak atomy stają się zimniejsze, rozmiar każdej z plamek rośnie. Dopóki poszczególne paczki falowe pozostają rozdzielone przestrzennie, dopóty można w zasadzie odróżnić atomy. Jednak gdy temperatura staje się wystarczająco niska, paczki falowe sąsiadujących atomów zaczynają zachodzić na siebie. Wtedy właśnie atomy „Bose-kondensują”, zajmując stan o najniższej energii, a paczki falowe ato-

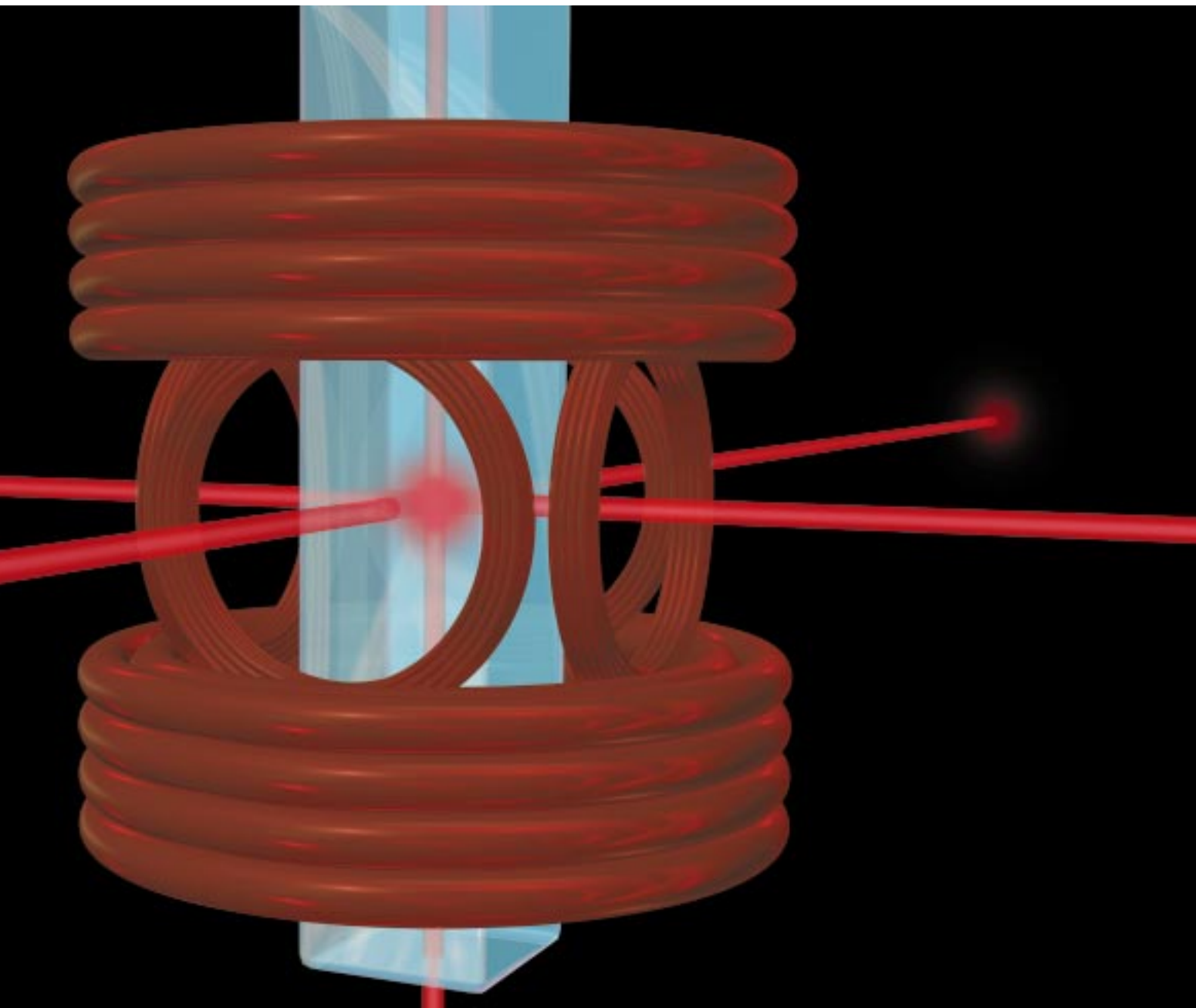
mów łączą się w jeden makroskopowy pakiet. Atomy przechodzą kwantowy kryzys tożsamości: nie możemy ich już od siebie odróżnić.

Obecne poruszenie towarzyszące zagadnieniom związanym z kondensatem kontrastuje z reakcjami na odkrycie Einsteina w 1924 roku, kiedy przewidział on możliwość istnienia takiej formy materii. Prawdopodobnie z powodu niewiary w uzyskanie wymaganej temperatury – mniejszej niż jedna milionowa kelvina – hipotetyczny gazowy kondensat traktowano raczej jako wątpliwą ciekawostkę o niewielkim znaczeniu fizycznym. Dla porównania: nawet w najzimniejszych otchłaniach przestrzeni międzygalaktycznej panuje temperatura milion razy za wysoka dla zaistnienia kondensacji Bosego.

Jednak po upływie kilkudziesięciu lat znów powróciła moda na kondensację Bosego. Fizycy zauważyli, że zjawisko to

może być odpowiedzialne za nadciekłość helu, czyli efekt, który pojawia się w znacznie wyższej temperaturze niż kondensacja Bosego w gazie. Poniżej temperatury 2.2 K lepkość ciekłego helu nagle zanika, co sprawia, że staje się „bardziej” niż ciekły, po prostu nadciekły.

Aż do późnych lat siedemdziesiątych technologia chłodzenia nie była na tyle zaawansowana, by fizycy mogli w ogóle brać pod uwagę realizację oryginalnej idei Einsteina – otrzymanie BEC w gazie. Pracownicy laboratoriów MIT, Universiteit te Amsterdam, University of British Columbia i Cornell University musieli stawić czoło fundamentalnym problemom. Uzyskanie kondensatu wymagało schłodzenia gazu znacznie poniżej temperatury, w której zwykle on zamarza. Innymi słowy, konieczne było wytworzenie przesyconego gazu. Oczekiwano, że najlepszym kandydatem będzie wodór, gdyż atomy tego pierwiast-



ka opierają się procesowi łączenia w grupy, który poprzedza zamarzanie.<sup>1</sup>

Chociaż badaczom tym dotąd nie udało się uzyskać kondensacji Bosego–Einsteina w wodorze, przyczynili się oni do znacznie głębszego zrozumienia napotykanych trudności, a także znaleźli bardzo sprytnie metody ich pokonywania. My zaś skorzystaliśmy z ich doświadczeń. Zainspirowani eksperymentami z wodorem oraz zachęceni wynikami własnych badań nad użyciem laserów do chwywania i chłodzenia atomów alkalicz-

nych w 1989 roku zaczęliśmy podejrzewać, że właśnie te atomy, czyli cez, rubid i sól, mogą być znacznie lepszymi kandydatami niż wodór do uzyskania kondensatu Bosego. Ze względu na swoją skłonność do łączenia się w grupy nie są wcale lepsze od atomów wodoru, niemniej jednak znacznie szybciej niż one przechodzą do fazy skondensowanej. Te o wiele większe atomy zderzają się dużo częściej, dzieląc między siebie energię tak szybko, że osiągają stan kondensatu, zanim gaz zdąży zamarznąć.

Wydawało się również, że stosunkowo łatwo i tanio będzie można oziębic atomy, jeśli uda się połączyć wspaniałe metody chłodzenia i pułapkowania atomów alkalicznych z pomocą światła laserowego z wypracowanymi przez naukowców badających wodór technikami chwywania atomów w zewnętrznym polu magnetycznym i odparowywania gorących cząstek. Pomysły te narodziły się w wyniku licznych dyskusji z naszym przyjacielem, a jednocześnie byłym nauczycielem Danielem Kleppnerem – jednym z liderów grupy badawczej z MIT próbującej uzyskać kondensat w gazowym wodorze.

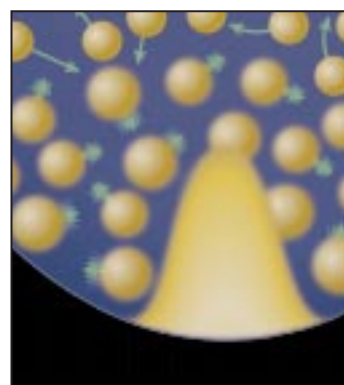
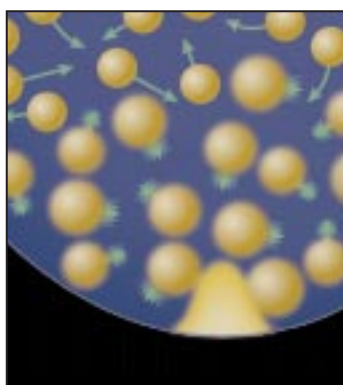
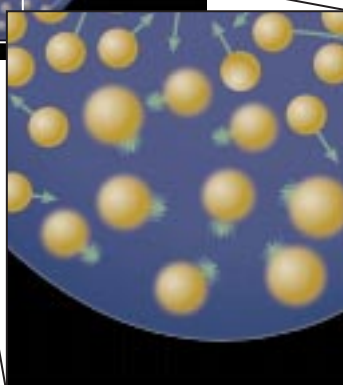
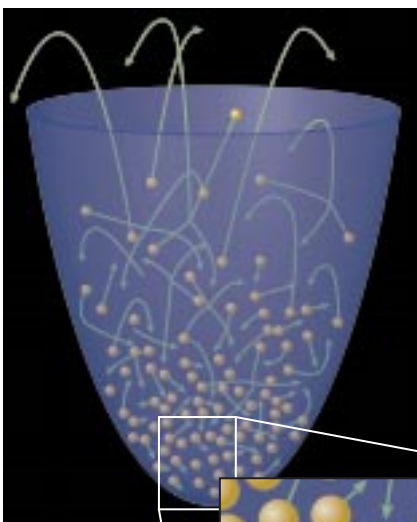
Ostatecznie nasza hipoteza dotycząca metali alkalicznych okazała się słuszną. Zaledwie kilka miesięcy po tym, jak udało się nam z atomami rubidu, grupa Wolfganga Ketterlego z MIT wytworzyła kondensat Bosego w sodzie; do tej pory zespołowi Ketterlego udało się wytworzyć kondensat składający się z 10 mln atomów. W chwili pisania tego artykułu już co najmniej siedem zespołów wytworzyło kondensaty.<sup>2</sup> Badania z atomami rubidu oprócz nas prowadzą Daniel J. Heinzen z University

of Texas w Austin, Gerhard Rempe z Universität Konstanz w Niemczech i Mark Kasevich z Yale University. Z atomami sodu niezależnie od grupy Ketterlego z MIT pracuje zespół pod kierunkiem Lene Vestergaard Hau z Rowland Institute for Science w Cambridge (Massachusetts). Z kolei Randall G. Hulet z Rice University wytworzył kondensat w litie.

Wszystkie wymienione zespoły badawcze używają tej samej podstawowej aparatury. Każde chłodzenie, w tym również oziębienie atomów, polega na odebraniu ciepła z układu oraz na izolowaniu od otoczenia chłodzonej próbki. Warunki te muszą być spełnione na każdym z dwóch etapów chłodzenia atomów. W pierwszym etapie światło laserowe zarówno chłodzi, jak i izoluje atomy. W drugim – pole magnetyczne izoluje układ, a chłodzenie odbywa się przez odparowanie.

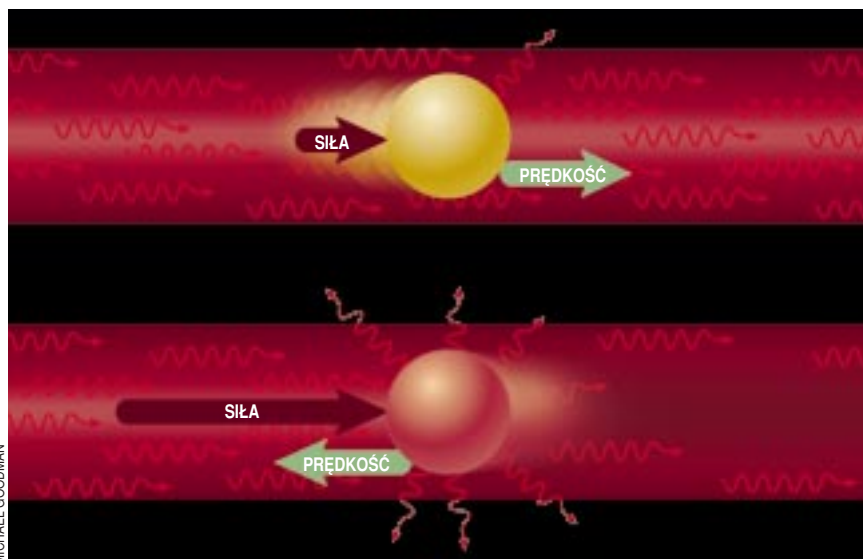
### Laserowe chłodzenie i pułapkowanie

Sercem naszej aparatury jest małe szklane pudełko otoczone pętlami z drutu, czyli cewkami magnetycznymi [ilustracja na stronach 26–27]. Całkowicie odpompowując powietrze z tej szklanej komórki, uzyskujemy niezwykle sprawnie działający termos. Następnie umieszczamy w jego wnętrzu niewielką ilość par rubidu. Sześć wiązek światła laserowego przecina się w środku komórki, otaczając zawarty wewnątrz gaz. Światło laserowe nie musi być intensywne, do jego wytworzenia używamy więc tanich laserów półprzewodnikowych podobnych do tych, jakie stosuje się w odtwarzaczach płyt kompaktowych.



**CHŁODZENIE PRZEZ ODPAROWANIE** zachodzi w pułapce magnetycznej, którą możemy sobie wyobrazić jako głęboką miskę (*niebieski*). Atomy, których trajektorie zostały oznaczone na rysunku za pomocą długich zielonych strzałek, mają największą energię i uciekają z pułapki (*u góry z lewej*). Te, które zostały, bardzo często zderzają się ze sobą, dzieląc przy tym energię (*z lewej*). W rezultacie atomy poruszają się na tyle wolno i są tak gęsto upakowane na dnie miski, że uwidacznia się ich kwantowa natura. Tzw. pakiety falowe reprezentujące obszary, w których prawdopodobieństwo znalezienia atomu jest duże, stopniowo zbliżają się i zaczynają zachodzić na siebie (*poniżej z lewej*). W pewnym momencie dwa atomy zderzają się i jeden z nich łąduje tak blisko punktu stacjonarnego, jak tylko pozwala na to zasada nieoznaczoności Heisenberga. To zdarzenie uwalnia lawinę atomów lokujących się w stanie o najniższej energii pułapki i łączących się w jedną odpowiadającą stanowi podstawowemu plamkę, która jest kondensatem Bosego–Einsteina (*poniżej pośrodku i z prawej*).





Częstotliwość światła wytwarzanego przez lasery dobieramy w taki sposób, aby atomy chętnie pochłaniały i emitowały fotony. Atom może zaabsorbować i wyemitować wiele milionów fotonów w ciągu sekundy, za każdym razem doznając małego odrzutu w kierunku ruchu zaabsorbowanego fotonu. Odrzut ten zwany jest ciśnieniem promieniowania. Cała sztuka chłodzenia laserowego polega na tym, aby zmusić atom do absorbowania przede wszystkim fotonów biegnących w kierunku przeciwnym do jego ruchu, co w rezultacie prowadzi do spowolnienia atomu (innymi słowy – do chłodzenia). Cel ten osiągamy, starannie dopasowując częstotliwość światła laserowego, która musi pozostawać w odpowiednim stosunku do częstotliwości światła najchętniej pochłanianego przez atomy [ilustracja powyżej].

W naszym układzie doświadczalnym światło laserowe służy nie tylko do chłodzenia atomów, ale także do ich „więzienia”, czyli utrzymywania z dala od mających temperaturę pokojową ścianek komórki. W rzeczywistości obie te funkcje realizowane są w podobny sposób. Również efekt pułapkowania atomów uzyskujemy, odpowiednio wykorzystując ciśnienie promieniowania. Światło musi przeciwstawiać się skłonności atomów do dryfowania poza środek pułapki. Słabe pole magnetyczne dostraja rezonansową częstotliwość atomu tak, żeby chętniej absorbował on światło z tej wiązki, która podąża w kierunku środka pułapki (zauważmy, że sześć wiązek laserowych krzyżuje się w środku komórki). Wypadkowy efekt jest taki, że wszystkie atomy są popychane w kierunku jednego niewielkiego obszaru i utrzymywane tam jedynie siłą światła laserowego.

Za pomocą tych technik w ciągu minuty napełniamy naszą pułapkę laserową

10 mln atomów rubidu wychwyconymi z wypełniającej komórkę pary o temperaturze pokojowej. Te schwyte atomy mają temperaturę równą około jednej czterdziestomilionowej stopnia powyżej zera bezwzględnego – niezwykle niską wedle prawie wszystkich możliwych norm, aczkolwiek ciągle około 100 razy za wysoką, by uzyskać BEC. Posługując się światłem laserowym, nie zdołamy zapobiec przypadkowemu poszturchiwaniu atomów przez pojedyncze fotony, co uniemożliwia dalsze chłodzenie lub osiągnięcie większej gęstości atomów.

Aby więc obejść ograniczenia wynikające z przypadkowego wpływu fotonów na ruch atomów, na tym etapie oziębiania wyłączamy wszystkie lasery i rozpoczynamy drugą fazę chłodzenia. Polega ona na pułapkowaniu magnetycznym i chłodzeniu przez odparowanie – metodach wypracowanych w poszukiwaniach kondensatu w atomowym wodrze. Funkcjonowanie pułapki magnetycznej wykorzystuje fakt, że każdy atom zachowuje się jak mała sztabka magnesu, jest więc poddany działaniu siły, gdy zostanie umieszczony w polu magnetycznym [ilustracja na następnej stronie]. Starannie dobierając geometrię pola magnetycznego, które musi być również stosunkowo silne, możemy uwięzić atomy. Poruszają się one wówczas w polu magnetycznym podobnie jak piłeczki toczące się po ściankach głębokiej miski. Atomy o największej energii uciekają z tej magnetycznej miski w trakcie chłodzenia przez odparowanie, unosząc ze sobą więcej energii, niż średnio by się im należało, a zatem pozostałe atomy stają się zimniejsze.

Proces ten przypomina stygnięcie kawy. Najbardziej energetyczne cząsteczki wody wyskakują z kubka (w postaci pary), obniżając w ten sposób średnią

CHŁODZENIE LASEROWE atomu polega na wykorzystaniu ciśnienia, czyli siły, jaką wywierają fotony padające na atom. Atom poruszający się naprzeciw wiązki laserowej napotyka światło o większej częstotliwości niż atom zmierny zgodnie z wiązką. W procesie chłodzenia częstotliwość wiązki jest dobrana w ten sposób, że atom biegnący naprzeciw wiązki rozprasza więcej fotonów, niż atom uciekający od niej. Wypadkowy efekt prowadzi do zmniejszenia prędkości, a więc ochłodzenia atomu.

energii reszty cieczy. Tymczasem wielka liczba zderzeń pomiędzy pozostałymi w naczyniu cząsteczkami prowadzi do rozdziału między nimi pozostałej energii. Gęstość naszej chmury atomowej złapanej przez pole magnetyczne jest znacznie mniejsza niż gęstość wody w kubku. Z tego powodu głównym wyzwaniem, jakiemu stawialiśmy czoło przez pięć lat zmagani eksperymentalnych, było rozwiązanie problemu zderzeń atomowych. Zderzenia te muszą bowiem być na tyle częste, aby w ich wyniku energia została rozdzielona między schwyte atomy, zanim zostaną one wybite z pułapki przez ciepło, nie uwięzione atomy o temperaturze pokojowej, których pewna liczba pozostaje w naszej szklanej komórce.

Problem ten został rozwiązany na drodze wielu drobnych ulepszeń, nie zaś dzięki jakiemś przełomowemu odkryciu. Przykładowo: podłączając naszą komórkę do pompy próżniowej, zwracaliśmy baczność uwagę na to, aby każda część była idealnie czysta. Nawet najmniejsze zabrudzenie z naszych rąk, które osadziłoby się na wewnętrznych powierzchniach aparatury, mogłoby stać się źródłem par obniżających jakość próżni. Wprowadziliśmy do komórki odpowiednią liczbę atomów rubidu w celu napełnienia pułapki optycznej, musieliśmy także zadbać o to, aby ta niewielka ilość pary rubidu, której nie udało się uwięzić, była tak mała jak tylko możliwe.

Te kolejne kroki były bardzo pomocne, ale ciągle nie udawało się nam uzyskać gęstości umożliwiającej wydajne chłodzenie przez odparowanie. Podstawowym problemem była skuteczność pułapki magnetycznej. Mimo że pole wytwarzające magnetyczną „miskę” może być dość silne, to jednak mały magnesik wewnątrz atomu jest bardzo słaby. Z tego powodu niełatwo manipulować atomem za pomocą pola magnetycznego, nawet jeśli porusza się on dosyć wolno (tak jak nasze atomy wstępnie ochłodzone światłem laserowym).

Ostatecznie w roku 1994 stanęliśmy przed koniecznością zbudowania nowej

pułapki magnetycznej, znacznie głębszej i węższej. Ta pośpiesznie skonstruowana, wąska i jednocześnie głęboka pułapka okazała się ostatnim ogniwem niezbędnym do ochłodzenia przez odparowanie atomów rubidu i uzyskania kondensacji. Później przekonaliśmy się, że konstrukcja naszej szczególnej pułapki nie jest jedynym możliwym rozwiązaniem. Obecnie istnieje niemal tyle różnych pułapek, ile grup badających kondensaty.

### Migawkowa fotografia „superatomu”

Jak możemy się przekonać, że rzeczywiście wytworzyliśmy kondensat Bosego–Einsteina? W celu zaobserwowania chmury ochłodzonych atomów robimy migawkowe zdjęcie cienia rzucanego przez oświetlony błyskiem lasera kondensat. Ponieważ atomy w miarę ochładzania skupiają się w pobliżu dna magnetycznej miski, chmura jest zbyt mała, aby łatwo ją było dojrzeć. Powiększenie jej wymaga wyłączenia ograniczających chmurę pól magnetycznych, co pozwala atomom swobodnie uciekać we wszystkich kierunkach. Około 0.1 s później oświetlamy tę rozszerzoną chmurę błyskiem światła laserowego. Atomy rozpraszają światło na boki, rzucając cień, który obserwujemy za pomocą kamery wideo. Badając ten cień, możemy wyznaczyć początkowy rozkład prędkości chmury uwięzionych atomów. Pomiar prędkości pozwala również określić temperaturę próbki.

Na wykresie rozkładu prędkości [ilustracja na sąsiedniej stronie] strzelisty

wierzchołek odpowiada kondensatowi. Jego atomy mają najmniejszą możliwą prędkość, dlatego pozostają gęsto skupione w środku rozszerzającej się chmury. Nasze zdjęcie jest kolejnym dowodem na to, że coś złego dzieje się z klasyczną mechaniką. Kondensat tworzy się w stanie o najniższej możliwej energii. W mechanice klasycznej termin „najniższa energia” oznacza, że atomy spoczywają nieruchomo w środku pułapki, co powinno przejawiać się w postaci nieskończenie wąskiego i wysokiego piku na wykresie. Obserwowany wierzchołek różni się od tego klasycznego obrazka z powodu efektów kwantowych, które da się ująć w trzech słowach: zasada nieoznaczoności Heisenberga.

Zasada nieoznaczoności ogranicza nasze możliwości poznania cegółowiek, także atomów. Im dokładniej znamy położenie atomu, tym mniej wiemy o jego prędkości, i na odwrót. To dlatego wierzchołek odpowiadający kondensatowi nie jest nieskończenie wąski. Gdyby był, wiedzielibyśmy, że atomy znajdują się dokładnie w środku pułapki i ich prędkość wynosi dokładnie zero. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności nie możemy znać obu tych parametrów jednocześnie.

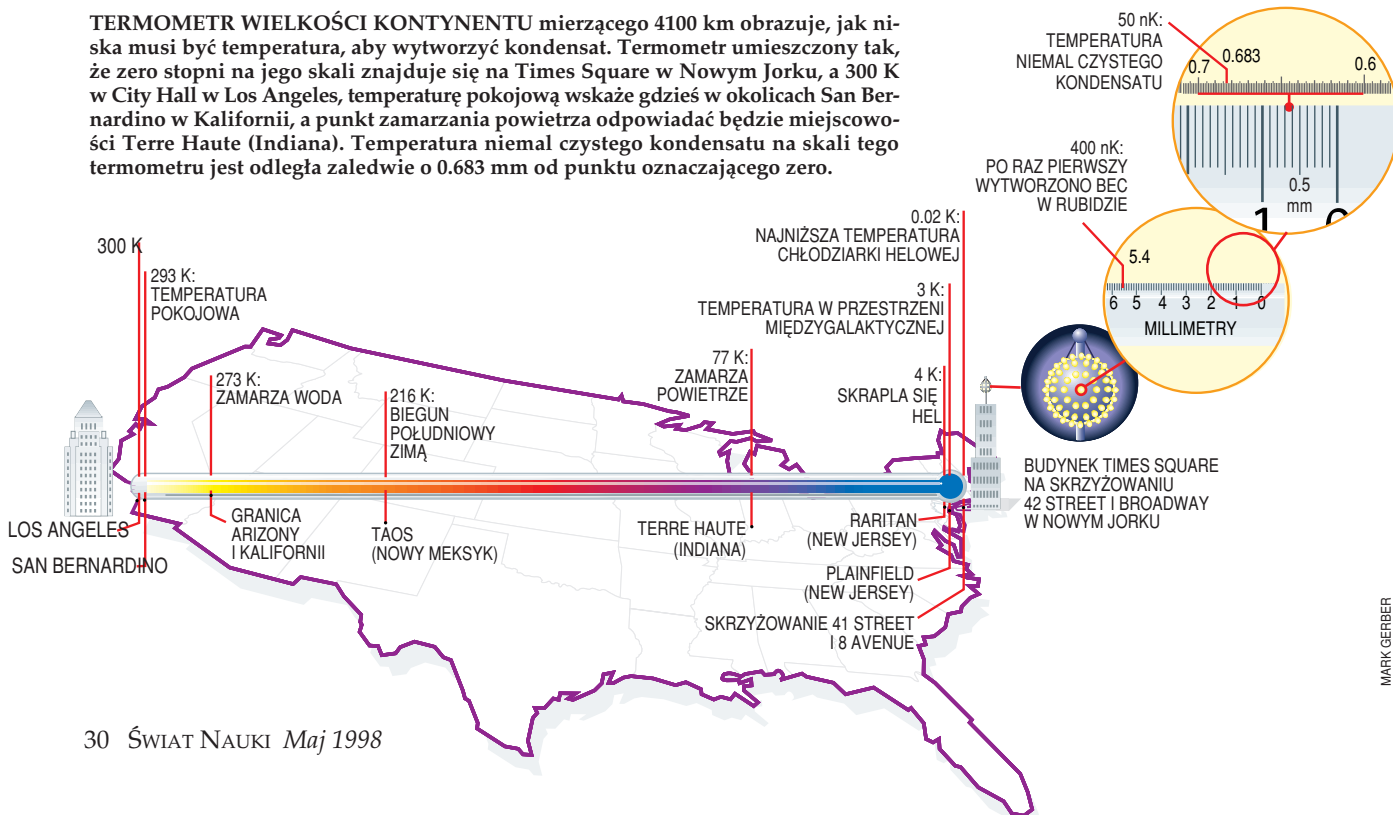
Teoria Einsteina wymaga, aby skondensowane atomy miały możliwie najniższą energię, podczas gdy zasada nieoznaczoności Heisenberga zabrania im pozostawać na samym dnie pułapki. Mechanika kwantowa rozwiązuje ten konflikt, postulując, że energia atomu znajdującego się w jakimkolwiek zbiorniku, w tym w naszej pułapce, może

przyjmować wartości należące do pewnego dyskretnego zbioru dozwolonych wartości energii – najmniejsza z nich jest nieco większa od zera. Ta najniższa dozwolona energia zwana jest energią drgań zerowych, ponieważ nawet atomy, których temperatura wynosi dokładnie zero, mają tę minimalną energię. Atomy obdarzone taką energią poruszają się powoli w pobliżu środka pułapki, ale nigdy nie mogą spocząć w jej środku. Zasada nieoznaczoności oraz inne prawa mechaniki kwantowej przejawiają się zazwyczaj jedynie w zachowaniu obiektów o rozmiarach mikroskopowych, takich jak pojedyncze atomy lub jeszcze mniejszych. Kondensacja Bosego–Einsteina jest więc rzadkim przypadkiem pozwalającym zaobserwować zasadę nieoznaczoności działającą w świecie obiektów makroskopowych.

### Granica precyzji

Kondensacja Bosego–Einsteina jest zjawiskiem tak nowym i tak różnym od dotąd poznanych, że nie potrafimy przewidzieć, czy zda się na coś więcej niż jako akademicki przykład do demonstracji praw mechaniki kwantowej. Niemniej jednak możemy snuć przypuszczenia, opierając się na uderzającej analogii fizycznej: atomy tworzące kondensat Bosego pod wieloma względami przypominają fotony w wiązce światła laserowego.

Wszystkie fotony w wiązce laserowej poruszają się dokładnie w tym samym kierunku oraz mają taką samą częstotli-



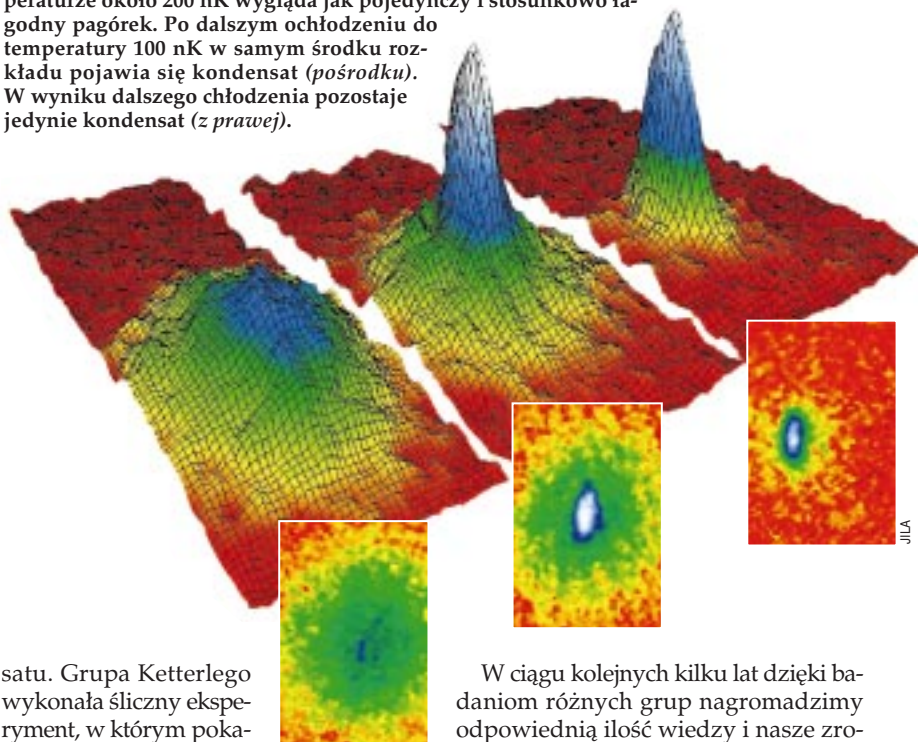


wość i fazę oscylacji. Te własności pozwalają niezwykle precyzyjnie manipulować światłem laserowym i umożliwiają jego zastosowanie w odtwarzaczach płyt kompaktowych, drukarkach laserowych i innych urządzeniach. Podobnie kondensacja Bosego stwarza najlepsze z możliwych warunki do precyzyjnej kontroli – tym razem atomów zamiast fotonów. Fale materii kondensatu Bosego–Einsteina mogą zostać odbite, zogniskowane, ulegają dyfrakcji, da się też modulować ich częstotliwość i amplitudę. Tak precyzyjne kontrolowanie ruchu atomów z pewnością pozwoli zwiększyć precyzję pomiaru czasu; najdokładniejsze na świecie zegary wykorzystują przejścia optyczne w atomach chłodzonych światłem laserowym. Spodziewane są również zastosowania w innych dziedzinach. Puszczając wodze fantazji, możemy wyobrazić sobie wiązkę atomów zogniskowaną w obszarze o rozmiarze poprzecznym równym jednej milionowej części metra, „napylającą” tranzystor wprost na układ scalony.

Ale do tej pory wiele własności kondensatu Bosego–Einsteina wciąż pozostaje nie znanych. Szczególnie interesująca jest lepkość kondensatu. Przypuszcza się, że powinna ona być zaniedbywalnie mała, co oznaczałoby, iż kondensat jest „nadciekły” – zmarszczki powierzchni i wiry raz w nim wzbudzone nigdy nie zanikną. Inne interesujące własności dotyczą fundamentalnych różnic między światłem laserowym a kondensatem. Wiązki laserowe nie oddziałują ze sobą – mogą się krzyżować, nie wpływając wzajemnie na siebie. Kondensat natomiast nie jest ściśliwy i przejawia pewną sprężystość, mówiąc krótko – jest ciecżą. Materiał, który jest jednocześnie ciecżą i spójną falą, musi niewątpliwie charakteryzować się bogactwem różnych zachowań, co w języku fizyków oznacza, że upłynie sporo czasu, zanim je w pełni zrozumiemy.

Tymczasem wiele grup zaczęło zajmować się pomiarami różnych cech konden-

OBRAZ CIENIA rzucanego przez tworzący się kondensat Bosego–Einsteina został poddany obróbce komputerowej w celu przejrzystego ukazania rozkładu prędkości zimnej chmury atomowej. Górne i dolne rysunki przedstawiają te same rozkłady obserwowane pod różnymi kątami. Te miejsca, gdzie ukazana na górnych wykresach powierzchnia wznosi się wysoko, odpowiadają obszarom najgęstszego upakowania ledwie poruszających się atomów. Zanim kondensat się utworzy (z lewej), rozkład prędkości chmury o temperaturze około 200 nK wygląda jak pojedynczy i stosunkowo łagodny pagórek. Po dalszym ochłodzeniu do temperatury 100 nK w samym środku rozkładu pojawia się kondensat (pośrodku). W wyniku dalszego chłodzenia pozostaje jedynie kondensat (z prawej).



satu. Grupa Ketterlego wykonała śliczny eksperyment, w którym pokazała, że jeżeli dwie niezależne chmury kondensatu zachodzą na siebie, to wytwarzają pasiasty wzór – prążki odpowiadające na przemian konstruktywnej i destruktywnej interferencji. Dokładnie taki sam wzór powstaje w wyniku interferencji promieniowania laserowego. W przypadku chmury atomowej te dwa naprzemienne obszary są odpowiednio paskami o dużej i małej gęstości. Nasza grupa badała wpływ oddziaływań między atomami na kształt kondensatu oraz na sposób, w jaki on drga delikatnie „potrząśnięty” za pomocą pola magnetycznego. Ostatnio kilka innych zespołów przyłącza się do tych badań, planując własne eksperymenty.

W ciągu kolejnych kilku lat dzięki badaniom różnych grup nagromadzimy odpowiednią ilość wiedzy i nasze zrozumienie tego osobliwego stanu materii się pogłębi. Wtedy dziwny, fascynujący świat mechaniki kwantowej stanie się nam bliższy.

Tłumaczyl  
Mariusz Gajda

Przypisy tłumacza:

<sup>1</sup> Aby atomy wodoru nie tworzyły cząstek, wcześniej odpowiednio się je przygotowuje. Wewnętrzne „magnesiki” każdego atomu, o których będzie mowa w dalszej części artykułu, są ustawiane równoległe do siebie.

<sup>2</sup> Autorzy, zdając sobie sprawę z niezwykle szybkiego rozwoju tej dziedziny fizyki, celowo napisali „co najmniej”. W czasie tłumaczenia tego artykułu co najmniej dwa nowe zespoły wytworzyły kondensat: grupa badaczy z Ludwig Maximilians Universität München kierowana przez Teodora W. Hänscha – w rubryce, a zespół z NIST w Gaithersburgu kierowany przez laureata ubiegłorocznej Nagrody Nobla Williama D. Phillipsa – w sordzie.

## Informacje o autorach

ERIC A. CORNELL i CARL E. WIEMAN są członkami JILA, dawniej zwanego Joint Institute for Laboratory Astrophysics, który zatrudnia pracowników National Institute of Standards and Technology (NIST) i University of Colorado. Cornell, fizyk w NIST i profesor uniwersytecki, razem z Wiemanem kierował zespołem w JILA, który po raz pierwszy wytworzył kondensat Bosego–Einsteina w gazie. Wieman, profesor fizyki University of Colorado, jest również znany z badań dotyczących łamania symetrii w oddziaływaniach cząstek elementarnych. Autorzy pragną podziękować kolegom: Michaelowi Andersonowi, Michaelowi Matthewsowi i Jasonowi Ensherowi za ich wkład do realizacji projektu dotyczącego kondensacji.

## Literatura uzupełniająca

NEW MECHANISMS FOR LASER COOLING. William D. Phillips i Claude Cohen-Tannoudji, *Physics Today*, vol. 43, ss. 33-40, X/ 1990.

OBSERVATION OF BOSE-EINSTEIN CONDENSATION IN A DILUTE ATOMIC VAPOR. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman i E. A. Cornell, *Science*, vol. 269, ss. 198-201, 14 VII 1995.

BOSE-EINSTEIN CONDENSATION. Red. A. Griffin, D. W. Snoke i S. Stringari, Cambridge University Press, 1995.

OBSERVATION OF INTERFERENCE BETWEEN TWO BOSE CONDENSATES. M. R. Andrews, C. G. Townsend, H.-J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn i W. Ketterle, *Science*, vol. 275, ss. 637-641, 31 I 1997.

BOSE-EINSTEIN CONDENSATION. Strony World Wide Web dostępne w Internecie pod adresem <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec>

WYDARZENIA ROKU 1995. FZYKA. Andrzej Kajetan Wróblewski, *Wiedza i Życie*, ss. 23-24, I/1996.

LASEROWE PUŁAPKOWANIE CZĄSTEK ELEKTRYCZNIE OBOJĘTNYCH. Steven Chu, *Świat Nauki*, ss. 36-43, IV/1992.

IGRASZKI Z ATOMAMI. Andrzej Kajetan Wróblewski, *Wiedza i Życie*, ss. 18-21, I/1998.

LASEROWE CHŁODZENIE I PUŁAPKOWANIE ATOMÓW. Krzysztof Ernst, *Wiedza i Życie*, ss. 42-46, II/1998.