Krople kwantowe

*Krzysztof PAWŁOWSKI**

*Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Od dekad prowadzone są badania nad kondensatem Bosego–Einsteina – fazą materii wytwarzaną w temperaturach rzędu 100 nanokelwinów. Mimo że układ przechodzi już w fazę zastosowań, nagle okazał się bardziej tajemniczy, niż sądzono.

Prawie 100 lat temu Albert Einstein, posiłkując się spostrzeżeniami hinduskiego fizyka Satyendra Bosego, przewidział zjawisko zwane dzisiaj kondensacją Bosego–Einsteina. W ekstremalnych warunkach – temperaturach miliardy razy niższych niż temperatura pokojowa, w gazach o gęstościach setki tysięcy razy mniejszych niż gęstość powietrza wokół nas, nagle większość atomów zatrzymuje się. Jest to nagłe przejście, jak zamiana wody w lód. W tej fazie ujawnia się falowa natura materii. Na przykład obserwuje się interferencję atomów – dwie chmury gazu będące kondensatami Bosego–Einsteina po nałożeniu na siebie tworzą prążki interferencyjne, dokładnie tak samo jak światło.

Kondensat Bosego–Einsteina otrzymano w laboratoriach 70 lat po przewidywaniach Alberta Einsteina. Za osiągnięcia towarzyszące tym obserwacjom przyznano około 10 nagród Nobla. Obecnie kondensat jest wytwarzany rutynowo w setkach laboratoriów na świecie. Eksperymenty z kondensatem wykonuje się nawet w przestrzeni kosmicznej, na pokładach rakiet, wykorzystując go w miernikach pola grawitacyjnego. Trwają badania nad wdrożeniem kondensatu w futurystycznych urządzeniach: w komputerach kwantowych, symulatorach kwantowych, magnetometrach i nowych generacjach zegarów atomowych. Oczekuje się, że dzięki wykorzystaniu subtelnych efektów kwantowych nowe technologie prześcigną te obecnie stosowane.

Wydaje się więc, że jest to dobrze poznana i w pełni kontrolowana faza materii, opuszczająca powoli poletko badań podstawowych na rzecz inżynierii. Nic bardziej mylnego! Właśnie w dość rutynowym eksperymencie wykonanym pięć lat temu w Stuttgarcie w grupie prof. Tilmana Pfau pojawił się wynik nieoczekiwany. Eksperyment polegał na zmianie oddziaływań (tak, tak – w kondensatach można nawet regulować siłę, z jaką atomy się odpychają bądź przyciągają!), tak aby gaz przez przyciąganie między atomami skurczył się, a następnie eksplodował jak supernowa. Eksperyment był powtórzeniem doświadczeń sprzed 15 lat i miał na celu dokładniejsze zbadanie wzbudzeń, np. drgań, jakie przy okazji są wywołane w kondensacie. Jednak kondensat ani zbytnio się nie skurczył, ani nie eksplodował. Zamiast tego samoistnie rozdzielił się na... No właśnie, nie wiedziano, na co. Były to regularnie rozłożone skupiska atomów, w warunkach, w których gaz nie powinien być stabilny. Przez kilkanaście miesięcy publikowano sprzeczne wyjaśnienia tego zjawiska. Ostatecznie zrozumiano, że jest to inna, nowa faza materii, nazywana obecnie kroplami kwantowymi. Rzeczywiście bardziej przypomina ciecz niż gaz. Stabilność wynika ze słabych korelacji między nimi, spowodowanych zderzeniami między atomami, które dotychczas, jako efekty słabe, były pomijane w modelach teoretycznych. Okazało się, że te pomijane efekty stają się dominujące w opisie dynamiki kondensatu na granicy jego stabilności.

Ostatnie miesiące przyniosły kolejny zwrot akcji. Na granicy między fazą kropli kwantowych a kondensatu Bosego–Einsteina zaobserwowano tzw. *supersolid*. Chmura atomów w tym stanie ma zarówno własności kryształu, jak i kwantowej cieczy. W każdej pojedynczej obserwacji atomy tworzą regularnie rozłożone skupiska, jak węzły sieci krystalicznej. Z drugiej strony ciągle zachodzi interferencja między chmurami w tym stanie. Pośrednio wykazano, że taki gaz może płynąć, nie doświadczając tarcia, jak w fazie nadciekłej. Właściwości te zostały zaobserwowane w trzech różnych laboratoriach w odstępie zaledwie kilku miesięcy!

Bez wątpienia badania nad kondensatem Bosego–Einsteina przechodzą renesans. Rozwój technik doświadczalnych sprzyja zarówno wdrożeniom kondensatu do technologii, jak i wytwarzaniu kolejnych faz w ultrazimnych gazach atomowych. Czekamy na dalsze niespodzianki!

Rozwiązanie zadania M 1668. Zauważmy, że f przyjmuje wartości parzyste dla nieparzystych argumentów. Natomiast biorąc liczbę parzystą postaci $2^k a$, gdzie $k \geqslant 1$ i $2 \nmid a$, widzimy, że

$$2^k a \xmapsto{f} 2^{k-1} \cdot 3a \xmapsto{f} 2^{k-2} \cdot 3^2 a \xmapsto{f} \ldots \ldots \xmapsto{f} 3^k a.$$

Udowodnimy indukcyjnie, że dla dowolnego n z dowolnej liczb całkowitej dodatniej iterując f, otrzymamy nieparzystą liczbę podzielną przez 3^n. Pierwszy krok indukcji został zrobiony wyżej, gdzie z dowolnej liczby uzyskaliśmy liczbę nieparzystą podzielną przez 3. Przypuśćmy, że iterując f, uzyskaliśmy liczbę postaci $3^n a$, gdzie a jest liczbą nieparzystą. Wtedy

$$3^n a \xmapsto{f} 2^2 \cdot 3^{n-1} a \xmapsto{f} 2 \cdot 3^n a \xmapsto{f} 3^{n+1} a,$$

co kończy dowód indukcyjny.