

Fermionowa galaretka

Jednym z ulubionych poleceń w nowych, szkolnych podręcznikach fizyki jest wymienienie wszystkich stanów skupienia materii. Oprócz ciał stałych, cieczy i gazów autorom chodzi zazwyczaj o podanie czwartego, a czasem piątego stanu skupienia. Przyznam, że ja już dawno pogubiłem się, gdyż ostatnio stany skupienia mnożą się jak króliki.

Tytułowa galaretka jest właśnie jednym z nich (nie pytajcie którym). Jest to nadciekły kondensat fermionowy, który właśnie (koło Wielkiej Nocy), udało się uzyskać naukowcom z Duke University w Durham [1].

Kondensat fermionowy to właściwie oksymoron. Przecież podstawową własnością fermionów jest to, że nie można ich „zmusić” do przebywania w jednym stanie kwantowym. Odwrotnie zachowują się bozony. Jeżeli tylko mogą, to wszystkie „najchętniej” znalazłyby się w tym samym stanie. Ponieważ tak fermiony, jak bozony są między sobą nieodróżnialne, więc podział na bozony i fermiony bierze się z własności funkcji opisującej stan kwantowy układu wielu identycznych cząstek. Reaguje ona na operację zamiany miejscami dwóch spośród nich. Ponieważ powrotna zamiana nic nie zmienia, to pojedyncza zamiana może najwyżej zmieniać znak funkcji. Okazuje się, że robi to w przypadku układu identycznych fermionów. Natomiast gdy mamy do czynienia z identycznymi bozonami, znak się nie zmienia. O tym, czym jest dany rodzaj cząstek, bozonami czy fermionami, decyduje ich spin, czyli wewnętrzny moment pędu. Może on wyrażać się liczbą całkowitą w jednostkach \hbar i wtedy są to bozony, lub połówkową (wielokrotność $\hbar/2$) w przypadku fermionów. Ponieważ spin jest wielkością addytywną, to identyczne układy parzystej liczby związanych fermionów są bozonami.

Pora przypomnieć, o jaki rodzaj kondensacji chodzi. W przypadku bozonów jest to kondensacja Bosego-Einsteina. Odpowiednio oziębione bozony powinny wszystkie znaleźć się w najniższym stanie kwantowym. I rzeczywiście tak się dzieje. Pierwszą zaobserwowaną kondensacją tego typu była nadciekłość helu-4, a przed dziesięciu laty udało się przeprowadzić taki proces dla utrzymywanych w pułapce magnetoptycznej rozrzedzonych gazów. Główną trudnością eksperymentalną było otrzymanie niezwykle niskiej temperatury, mniejszej od milionowej części kelwina powyżej zera bezwzględnego. Za to osiągnięcie przyznana została Nagroda Nobla z Fizyki w 2001 roku.

W przypadku fermionów przed kondensacją powinny one połączyć się w pary. Jest jednak wiele możliwości łączenia w pary fermionów. Może to być albo „zwykłe” wiązanie, w którym dwa fermiony o przeciwnych spinach tworzą molekułę. Dla takich molekuł może zajść „zwykła” kondensacja Bosego-Einsteina.

Może jednak mieć miejsce bardziej subtelne wiązanie wynikające z oddziaływania wielu cząstek. W tym przypadku wiążą się fermiony, które mają zbliżone pędy, a nie przestrzenne pozycje. Ten typ wiązania występuje w nadprzewodnikach. Tak związane fermiony nazywa się parami Coopera.

Od kilku lat przypuszczano, że w układach rozrzedzonych par metali alkalicznych będących fermionami można regulować sposób ich wiązania poprzez zewnętrzne pole magnetyczne. W ten sposób można by było badać obszar przejściowy między kondensacją Bosego-Einsteina a kondensacją par Coopera.

Pod koniec zeszłego roku pojawiły się doniesienia o zaobserwowaniu kondensacji Bosego-Einsteina dla fermionowego litu i potasu [2, 3]. Na początku tego roku jedna z grup doniosła [4] o uzyskaniu kondensacji właśnie w takim przejściowym obszarze. W kwietniu natomiast pojawiło się doniesienie innej grupy [1] o zaobserwowaniu nadciekłości w takim układzie.

W tym ostatnim eksperymencie naukowcy uwięzili i oziębili atomy litu-6. Ostateczne oziębianie, standardowo już, odbyło się przez „odparowanie” gorętszych atomów. Zjawisko to jest analogiczne do stygnięcia szklanki herbaty. Żeby to stygnięcie umożliwić, stopniowo zmniejsza się „głębokość” pułapki tak, że najszybsze (a więc najgorętsze) atomy mogą ją opuścić, obniżając średnią temperaturę.

Następnie przystąpiono do sprawdzenia, „czy galaretka już zastygła”. W tym celu na chwilę wyłączono pułapkę, pozwalając próbce gazu się trochę rozprężyć, a następnie ponownie włączono lasery. W ten sposób próbka została wprowadzona w drgania. Częstość drgań i fakt zmniejszania się tłumienia ze zmniejszaniem temperatury świadczą o tym, że rzeczywiście galaretka była nadciekła.

Z badaniami tymi wiąże się nadzieje na lepsze zrozumienie wysokotemperaturowych nadprzewodników i, być może, wynalezienie nadprzewodnika nietracącego swych własności w temperaturze pokojowej (lub przynajmniej suchego lodu).

Charakterystyczną temperaturą układu wielu fermionów jest temperatura Fermiego (trochę to mało oryginalne). Jest to temperatura odpowiadająca wypełnieniu przez fermiony wszystkich najniższych (o najmniejszej energii) miejsc (przypomnijmy, że każdy fermion musi mieć swoje miejsce). Nawet dla wysokotemperaturowych nadprzewodników przejście do stanu nadprzewodzenia zachodzi dopiero, gdy temperaturę obniży się o dwa rzędy wielkości poniżej temperatury Fermiego. W przypadku fermionowych gazów kondensacja zachodzi już przy obniżeniu temperatury o czynnik 5. Jest to związane z silniejszym wiązaniem fermionów niż w przypadku „zwykłych” par Coopera w nadprzewodnikach. Jeżeli udałoby się zaprojektować materiał, w którym elektrony wiązałyby się tak silnie, to nadprzewodników nie trzeba by było chłodzić.

Piotr ZALEWSKI

[1] J. Kinast, S.L. Hemmer, M.E. Gehm, A. Turlapov, J.E. Thomas, *Evidence for Superfluidity in a Resonantly Interacting Fermi Gas*, **cond-mat/0403540**

[2] C.A. Regal, M. Greiner, D.S. Jin, *A molecular Bose-Einstein condensate emerges from a Fermi sea*, **cond-mat/0311172**

[3] S. Jochim, M. Bartenstein, A. Altmeyer, G. Hendl, S. Riedl, C. Chin, J. Hecker Denschlag, R. Grimm, *Bose-Einstein Condensation of Molecules*, *Science* **302**(2003)2101

[4] C.A. Regal, M. Greiner, D.S. Jin, *Observation of resonance condensation of fermionic atom pairs*, **cond-mat/0401554**