

РОЗДІЛ II

Теоретична фізика

УДК 538.9

П. П. Шигорін – асистент кафедри теоретичної і математичної фізики Волинського державного університету імені Лесі Українки

Бозе–айнштайнівська конденсація та новий світ когерентних хвиль речовини

Роботу виконано на кафедрі теоретичної і математичної фізики ВДУ ім. Лесі Українки

Створення бозе–айнштайнівських конденсатів в атомних газах лужних елементів, які утримуються в магнітних пастках при ультранизких температурах, відкрило нові можливості для дослідження квантових явищ на макроскопічному рівні. Викладено історичний огляд явища бозе–айнштайнівської конденсації від моменту теоретичного передбачення до моменту експериментальної реалізації в атомних хмарах лужних елементів.

Ключові слова: бозе–айнштайнівська конденсація, квантове явище, магнітна пастка.

Shvgorin P. P. Bose–Einstein Condensation and the New World of Coherent Matter Waves. After creation a Bose–Einstein condensates in the atomic gases of alkaline earth metal, that holds in the magnetic trap at ultra low temperatures, the new features for investigation of the quantum phenomena on macroscopic level are appear. In this paper is described the historical review of the Bose-Einstein condensation phenomenon from its theoretical prediction to experimental realization in the atomic clouds of alkali elements.

Key words: Bose–Einstein condensation, quantum phenomenon, magnetic trap.

Бозе–айнштайнівська конденсація (БАК) – одне з найбільш інтригуючих явищ, передбачених квантовою статистичною механікою. Воно має тривалу і багату історію, що починається з 20-х років минулого століття і частково описана в біографіях Альберта Айнштейна [1] та Фріца Лондона [2], а також в оглядах Аллана Гріффіна [3; 4] та Себастьяна Бейлібара [5].

Уперше термін бозе-статистика з'явився в роботі індійського фахівця з математичної фізики Шатъендраната Бозе, в якій він на основі статистичних міркувань отримав розподіл Планка для спектра фотонів у випромінюванні абсолютно чорного тіла (1924 р.). Не в змозі самостійно опублікувати свою роботу, Бозе відіслав її Айнштейну, який переклав її на німецьку мову і організував публікацію [6].

У 1924–1925 рр. Айнштейн опублікував дві статті, в яких він узагальнив роботу Бозе на випадок атомів ідеального газу, тобто на випадок частинок із відмінною від нуля масою [7; 8]. У другій із цих статей він звернув увагу на одну цікаву особливість розподілу атомів по квантових енергетичних рівнях: якщо газ атомів-бозонів охолодити нижче певної температури (так званої критичної), то макроскопічне число атомів переходить (конденсується) в квантовий стан із найнижчою енергією.

Виникнення макроскопічного заповнення одного з квантових станів називають БАК.

Явище БАК унікальне в тому сенсі, що воно являє собою суто квантово-статистичний фазовий перехід, оскільки відбувається навіть при відсутності взаємодії між атомами. Айнштейн назвав такий фазовий перехід “конденсацією без сил притягання”.

Більше десяти років явище БАК “не знаходило” застосування у фізиці, доки в кінці 30-х років Фріц Лондон та Ласло Тісса не воскресили ідею конденсації як можливого механізму для пояснення надплинності рідкого гелію-4 при температурах, нижчих T -точки.

Нагадаємо, що явище надплинності було відкрите Петром Капицею [9] і незалежно Джеком Аленом та Доном Майзене [10] в 1938 р. Воно полягає в тому, що при температурах, нижчих

I -точки, рідкий гелій-4 протікає крізь вузькі капіляри (діаметром порядку 10^{-4} см), не зазнаючи опору, тобто не гальмуючись.

Таким чином, рідкий гелій-4 нижче температури I -точки ($^4\text{He-II}$) поводить себе як ідеальна рідина (в'язкість дорівнює нулю).

Для пояснення незвичних особливостей надплинного гелію-4 Лондон, ґрунтуючись на близькості температури I -точки та температури конденсації ідеального бозе-газу, а також на інтуїтивних міркуваннях про макроскопічну квантову когерентність, висунув гіпотезу, що й за наявності взаємодії між атомами гелію в ньому є бозе-конденсат, який зумовлює надплинність. Тісса спробував побудувати на основі цих ідей теорію надплинності, важливою частиною якої була дворідинна модель. В основу цієї моделі була покладена ідея про те, що надплинна рідина складається з двох взаємопроникних рідин (компонент): "нормальної рідини", яка поводить себе як класична рідина, та "надрідини" (надплинної компоненти) з нульовою в'язкістю, яка протікає по тонких капілярах без тертя. Надплинна компонента ототожнювалася з бозе-айнштайнівським конденсатом, який має рухатися когерентно, оскільки усі атоми конденсату перебувають в одному квантовому стані. Дворідинна модель Тісси змогла якісно пояснити деякі екзотичні властивості надплинного гелію-4. Вона також передбачала, що в $^4\text{He-II}$ можуть поширюватися так звані температурні хвилі.

Однак теорія Тісси некоректно описувала експеримент і була піддана критиці Левом Ландау.

У 1941 Ландау запропонував напівфеноменологічну теорію надплинності [11], в основі якої було твердження про те, що кожен слабко збуджений стан може розглядатись як сукупність елементарних збуджень (квазічастинок). Явище надплинності Ландау пов'язав із особливими властивостями закону дисперсії квазічастинкових збуджень (фононів та ротонів). У теорії був також запропонований критерій надплинності, згідно з яким ідеальний бозе-газ не може бути надплинним.

Для обчислення властивостей надплинного гелію-4 Ландау побудував дворідинну гідродинаміку, яка зберігала уявлення про наявність двох типів руху, як і в теорії Тісси, але мала суттєві відмінності.

Головна відмінність дворідинних моделей Тісси та Ландау полягає в природі нормальної компоненти. Тісса міркував у термінах ідеального газу, і відповідно ототожнював нормальну компоненту з надконденсатними атомами. Згідно ж Ландау – нормальну компоненту утворює газ квазічастинок.

Експерименти з вимірювання швидкості другого звуку (температурних хвиль) вказували на правильність теорії Ландау, а не Тісси.

Теорія надплинності Ландау стала загально визнаною, хоча в ній залишалося слабке місце, пов'язане з її феноменологічним характером (зокрема, в теорії фігурували три параметри, які слід було брати з експерименту).

Ситуація радикально змінилася з 1947 року, коли Микола Боголюбов дослідив модель слабко-неідеального бозе-газу [12]. Він припустив, що в такій системі наявний конденсат і, як наслідок, отримав спектр квазічастинкових збуджень, який був постульований Ландау. З теорії випливало, що якщо густину конденсатних частинок покласти рівною нулю, то закон дисперсії квазічастинок набуває такого вигляду, як для ідеального газу, і явище надплинності зникає.

Те, що ідеальний газ не може бути надплинним, легко довести, не використовуючи критерій надплинності. Справді, у виродженому ідеальному бозе-газі частинки, які знаходяться в основному стані, не можуть поводити себе як "надплинні", оскільки ніщо не заважає їм обмінюватись імпульсом зі збудженими частинками під час зіткнень і, тим самим, зазнавати тертя під час руху через рідину.

Натомість, взаємодія між частинками бозе-газу може стабілізувати конденсат так, що частинка, виходячи з колективного руху, не буде втрачати енергію, тобто народження елементарних збуджень буде збільшувати енергію, а не зменшувати її, як це відбувається в ідеальному газі.

Таким чином, з'явилась якісно нова, при цьому мікроскопічна, теорія, яка містила ключ до розуміння явища надплинності.

Можемо також стверджувати, що Боголюбов реабілітував "булькотіння"¹ Лондона та Тісси про БАК, як можливий механізм виникнення надплинності. Більше того, своєю теорією він стимулював майбутні теоретичні дослідження БАК [13]. Не менш важливою для розуміння явища надплинності є запроваджена Боголюбовим концепція квазісередніх [14].

¹ Саме так Аллан Гріффіна назвав спроби Лондона та Тісси пояснити надплинність на основі БАК [4].

Слід відзначити, що теорія Боголюбова слабо-неідеального бозе-газу є основою сучасного розуміння явища надплинності, оскільки вона відбиває основну рису, притаманну фазовим переходам другого роду, – появу характерного квазісереднього, яке описує конденсат, а БАК є мікроскопічною основою дворідинної гідродинаміки Ландау, яка й надалі успішно описує слабо-нерівноважні процеси в квантових рідинах.

Подальший розвиток уявлень про БАК також пов'язаний з ім'ям Боголюбова. Йдеться про побудову мікроскопічної теорії надпровідності – явища бездисипативного протікання струму через провідник.

Головна відмінність надпровідника від надплинного гелію-4 з точки зору теоретичного опису полягає в тому, що електрони надпровідника є фермі-частинками, для яких справедливий принцип заборони Паулі і безпосередньо ідея про конденсацію не може бути застосована. Однак, як тільки Леоном Купером була з'ясована можливість утворення в надпровіднику зв'язаних електронних пар (куперівських пар), які можна було трактувати як аналоги бозе-частинок, відповідна теорія була побудована (1957, 1958 рр.).²

Як зазначив Боголюбов: надпровідність є надплинністю електронної системи, зумовленої конденсатом куперівських пар.

Отже, до 1960 року існували дві реальні фізичні системи, в яких могла б реалізуватися БАК: надплинний гелій-4 та надпровідник.

Втім, якщо й справді в цих системах існувала БАК, то вона маскувалась би сильною взаємодією частинок і її експериментальне виявлення було і залишається надзвичайно складним завданням.

Для безпосереднього спостереження БАК, очевидно, слід було шукати цей ефект у розріджених системах.

Аби зрозуміти, в якому напрямку мали рухатись експериментатори, слід докладніше вивчити фізичну природу БАК. Подальші міркування будемо вести на мові квантово-механічних хвильових пакетів.

Нехай газ атомів-бозонів масою m знаходиться при температурі T . При цьому атоми здійснюють тепловий хаотичний рух. Будемо розглядати атоми як хвильові пакети, що мають розміри порядку довжини теплової хвилі де-Бройля

$$l = \left(\frac{2ph^2}{mkT} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Величина l визначає невизначеність координати, що пов'язана з тепловим розкидом імпульсів. Як видно з визначення l , зі зниженням температури вона зростає.

Отже, при поступовому охолодженні атомів, ми дійдемо до стану, коли довжина теплової хвилі де-Бройля стає одного порядку з міжатомною відстанню. Як наслідок, хвильові пакети сусідніх атомів починають перекриватися і бозе-газ проявляє колективну поведінку (навіть за відсутності взаємодії між атомами!). При цьому в системі відбувається фазовий перехід і утворюється бозе-айнштайнівський конденсат – хмарина атомів, кожен із яких перебуває в тому самому квантовому стані з найменшою енергією.

На рис. 1 схематично зображено критерій утворення бозе-айнштайнівського конденсату.³

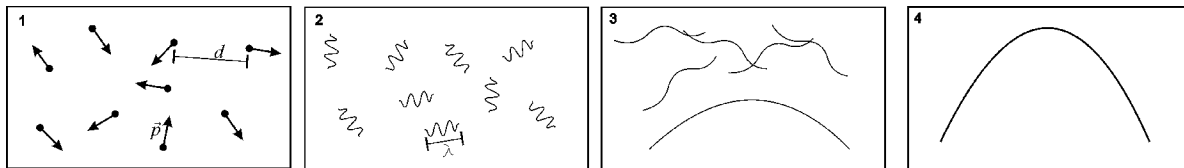


Рис. 1. Утворення бозе-айнштайнівського конденсату: 1) при високих температурах газ можна розглядати як сукупність більярдних кульок; 2) при низьких температурах атоми можна розглядати як квантово-механічні хвильові пакети; 3) коли температура наближається до критичної температури фазового переходу, хвильові пакети починають перекриватися, і утворюється бозе-конденсат; 4) при температурі, яка дорівнює нулю, усі атоми переходять у конденсат (для ідеального газу) і утворюється “гігантська хвиля речовини”

² Зацікавленого читача відправляємо до прекрасної монографії з надпровідності Анатолія Свідзинського [15].

³ Креслення 1 запозичене з Нобелівської лекції Вольфгана Кеттерла [16].

Математично умову появи в бозе-газі конденсату можна записати у вигляді

$$l \sim d, \quad d \sim n^{-1/3} \Rightarrow l^3 n \sim 1. \quad (2)$$

Тут d – відстань між атомами, n – концентрація атомів.

У випадку ідеального бозе-газу послідовний розрахунок дає таку формулу [17]

$$l^3 n = z(3/2) = 2,612. \quad (3)$$

Відповідно, температура квантового виродження

$$T_c = \frac{2p\hbar^2}{mk} \left(\frac{n}{z(3/2)} \right)^{2/3}. \quad (4)$$

Отже, на перший погляд, отримати БАК, в принципі, нескладно – потрібно охолодити атоми до температури, при якій хвильові пакети починають перекриватися! Проте такому квантовому виродженню передують більш звичні для нас фазові переходи в рідкий та твердий стан. Отже, якщо ми хочемо отримати БАК, то маємо якимось чином “оминути” конденсацію газу в рідину або тверде тіло.

Як відомо, хімічна рівновага в системі (утворення молекул чи кластерів) встановлюється внаслідок тричастинкових зіткнень між атомами, тоді як термодинамічна рівновага встановлюється через двочастинкові зіткнення. Оскільки ймовірність тричастинкових зіткнень пропорційна квадрату концентрації атомів, а ймовірність двочастинкових – першому степеню, то при дуже низьких концентраціях газу (порядку 10^{14} см^{-3}) термодинамічна рівновага встановиться раніше, ніж хімічна, і в газі може відбутися квантове виродження. Такий стан газу буде метастабільним (від кількох секунд до хвилини), після чого газ перейде в стабільну рідку чи тверду фазу.

Отже, для виявлення БАК у “чистому вигляді” слід було експериментувати з надзвичайно розрідженими атомними системами. Однак при таких наднизьких концентраціях критична температура знижується до мікро- та нанокельвінів!

Після десятиліть експериментальних досліджень, розробок і вдосконалень устаткування, невдач та розчарувань, настав тріумф – БАК була виявлена в розріджених парах лужноземельних металів, які утримувалися при ультранизьких температурах у магнітних пастках.

У 1995 році три незалежні групи американських учених повідомили про те, що вони отримали бозе-айнштайнівський конденсат у “чистому вигляді”.

Група експериментаторів під керівництвом Вольфгана Кеттерля (Massachusetts Institute of Technology) отримала конденсат із 500 000 атомів ^{23}Na при температурі 2 мкК [16]. У той самий час група, яку очолювали Ерік Корнелл та Карл Віман (Joint Institute for Laboratory Astrophysics in Boulder), виявила БАК в атомах ^{87}Rb [18]. Нарешті, група Роберта Х'юлета (Rice University) експериментувала з атомами ^7Li [19].

У результаті таких експериментів не лише підтвердилося передбачення про БАК, а й, фактично, була отримана речовина в новому стані, в якому, завдяки сильній просторовій неоднорідності, квантові ефекти відіграють вирішальну роль на макроскопічному рівні.

Атоми у стані бозе-конденсації утворюють новий тип когерентної речовини. У фізиці з'явилося нове поле діяльності – атомна оптика, в якій замість світлового випромінювання (фотонів) використовується пучок атомів, що знаходяться в стані бозе-конденсата, і, тим самим, є когерентними. За аналогією до звичайного світлового лазера був сконструйований атомний лазер, який виявився надзвичайно корисним у нано-технологіях.

Поза сумнівом, дослідження з БАК в атомних системах стали гідним завершенням розвитку експериментальної фізики ХХ століття.

На закінчення автор висловлює вдячність професору Анатолію Свідзинському за численні цінні зауваження та обговорення рукопису статті.

Література

1. Pais A. The science and the life of Albert Einstein.– Oxford Univ. Press, 1982.
2. Gavroglu K. Fritz London: A scientific biography.– Cambridge Univ. Press, 1995.
3. Griffin A. Bose condensation in atomic gases // Proc. of the Intern. School of Physics “Enrico Fermi”.– 1999.– Vol. 140.– P. 1.
4. Griffin A. A brief history of our understanding of BEC: from Bose to Beliaev // arXiv:cond-mat/9901123.
5. Balibar S. The discovery of superfluidity // arXiv:physics/0611119.
6. Bose S. Planck's Law and light quantum hypothesis // Z. Physik.– 1926.– Vol. 26.– P. 178.

7. Einstein A. Quantentheorie des Einatomigen idealen gases I // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys. Math.– 1924.– P. 261.
8. Einstein A. Quantentheorie des Einatomigen idealen gases II // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys. Math.– 1925.– P. 3.
9. Kapitza P. Viscosity of liquid Helium below the λ point // Nature.– 1938.– Vol. 141.– P. 74.
10. Allen J., Misener A. The Fountain Effect // Nature.– 1938.– Vol. 141.– P. 75.
11. Ландау Л. Теория сверхтекучести гелия-II // ЖЭТФ.– 1941.– Вып. 11.– С. 592.
12. Боголюбов Н. К теории сверхтекучести // Известия АН СССР.– 1947.– С. 77.
13. Беляев С. Энергетический спектр неидеального бозе-газа // ЖЭТФ.– 1958.– С. 417.
14. Боголюбов Н., Боголюбов Н. (мл). Введение в квантовую статистическую механику.– М.: Наука, 1984.
15. Свідзинський А. Мікроскопічна теорія надпровідності.– Луцьк: Ред.-вид. від. “Вежа” Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2001.
16. Кеттерле В. Когда атомы ведут себя как волны. Бозе-эйнштейновская конденсация и атомный лазер // УФН.– 2003.– С. 1339.
17. Свідзинський А. Математичні методи теоретичної фізики.– Луцьк: Ред.-вид. від. “Вежа” Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2003.
18. Anderson M., Ensher J., Matthews M., Wieman C., Cornell E. Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor // Science.– 1995.– С. 198.
19. Bradley C., Sackett C., Hulet R. Bose-Einstein Condensation of Lithium: Observation of Limited Condensate Number // Phys. Rev. Lett.– 1995.– P. 1687.

Адреса для листування:

43025 Луцьк, просп. Волі, 13.

Тел. 4-92-61.

Ел. пошта: pashyg@univer.lutsk.ua

Статтю подано до редколегії

24.03.2007 р.