



СЛЮСАРЕНКО

Юрій Вікторович —

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, начальник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України (ННЦ ХФТІ) slusarenko@kipt.kharkov.ua



СОТНИКОВ

Андрій Геннадійович —

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля ННЦ ХФТІ a_sotnikov@kipt.kharkov.ua

УНІКАЛЬНІ ЕФЕКТИ ВІДГУКУ УЛЬТРАХОЛОДНИХ ГАЗІВ АТОМІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ У СТАНІ З БОЗЕ-ЕЙНШТЕЙНІВСЬКИМ КОНДЕНСАТОМ НА ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ

У статті наведено деякі показові результати, пов'язані з явищем відгуку ультрахолодних квантових газів у стані з бозе-ейнштейнівським конденсатом. Показано, що на основі загального теоретичного підходу, запропонованого авторами, можна послідовно описати уповільнення сигналів не лише оптичного, а й мікрохвильового діапазонів до надзвичайно низьких показників групової швидкості. Явище сильного уповільнення електромагнітних хвиль може бути використане для детектування магнітних полів з високою точністю, дуже якісної фільтрації сигналів та більш детального вивчення особливостей енергетичного спектра атомів. Як іще один яскравий приклад можливого «куриозного» застосування проаналізовано принципову можливість прискорення релятивістських частинок ультрахолодними газами за наявності інверсної заселеності квантових станів.

Ключові слова: бозе-ейнштейнівський конденсат, ультрахолодні квантові гази, уповільнення та фільтрація сигналів, прискорення частинок.

Вступ

Здатність систем, які складаються з великої кількості частинок із бозе-статистикою, за певних умов перебувати в когерентному квантово-механічному стані (бозе-ейнштейнівський конденсат — БЕК) була передбачена А. Ейнштейном ще у 1925 р. на основі ідеї Ш. Бозе. За 90 років дослідження, присвячені явищу БЕК, пройшли кілька знакових етапів [1, 2]. Досить тривалий час (майже 70 років після передбачення А. Ейнштейном!) існування такого фізичного об'єкта з дивовижними властивостями, як бозе-ейнштейнівський конденсат, могло бути доведено лише за побічними ознаками, оскільки прямого експериментального спостереження явища не існувало. Наприклад, вважалося, що проявом БЕК на макроскопічному рівні є не тільки експериментально спостережені, а навіть застосовані у «народному господарстві» явища надплинності й надпровідності.

Основний доказ справедливості теоретичних розрахунків і передбачень — безпосереднє спостереження явища бозе-ейнштейнівської конденсації в газі атомів, став можливим лише в 1995 р. завдяки роботам двох експериментальних груп із США. Команда під керівництвом Еріка Корнелла (E.A. Cornell) і Карла Вімана (C.E. Wieman) з університету Боулдера (University of Colorado Boulder) та група Вольфганга Кеттерле з Массачусетського технологічного інституту (Massachusetts Institute of Technology) незалежно одна від одної продемонстрували цей ефект у парах атомів рубідію [3] та натрію [4]. Слід зазначити, що поставити такі експерименти стало можливим завдяки досягненням техніки лазерного охолодження та полонення атомів, що дозволило отримати необхідні наднизькі температури — порядку сотень нанокельвінів.

Упродовж тривалого часу після цього триумфу експериментальні дослідження спрямовувалися переважно на досягнення режимів БЕК в інших фізичних системах — в інших газах атомів лужних металів (і не тільки!), молекулярних газах і навіть у системах квазічастинок або фотонів у речовині. Крім того, велика кількість досліджень і справжня лавина публікацій експериментальних і теоретичних результатів була пов'язана з вивченням і передбаченнями цілої низки унікальних ефектів та явищ, пов'язаних із дивовижними властивостями систем із БЕК, а також із «пророцтвом» відносно майбутнього їх застосування в технічних приладах.

На сьогодні, на думку багатьох учених-фізиків, через свої оригінальні властивості конденсат Бозе-Ейнштейна [1, 2] цілком заслуговує на його визнання як п'ятого особливого стану речовини (після твердого, рідкого, газоподібного та плазми) і навіть включення його до викладання основних понять у загальній системі освіти. Як уже йшлося вище, це зумовлено цілою низкою передбачених та нещодавно спостережених фізичних ефектів, пов'язаних із властивостями, аналогів яких немає у речовини в чотирьох інших станах. Такими ефектами, наприклад, є явища надплинності, надпровідності, квантові вихори, стрімкий колапс газів

за наявності сил притягання між атомами, що зовні нагадує вибух наднової зорі, але в мікроскопічних масштабах. На особливу увагу заслуговують ефекти взаємодії таких систем з електромагнітними полями і насамперед явище сильного уповільнення та «замороження» світла у бозе-ейнштейнівських конденсатах. Ці та інші унікальні феномени ми обговоримо в наступних розділах.

Перші успішні експерименти з уповільнення світла в БЕК

У 1999 р. було опубліковано результати експериментів [5], у яких спостерігали уповільнення світла до швидкості 17 м/с, тобто майже у 20 млн разів (рис. 1). І це вдалося зробити не в якійсь дуже густій рідині чи кристалі, а навпаки — у розріджених парах натрію. Ці розріджені гази є практично прозорими для світла всього оптичного діапазону за винятком окремих частот, де світло резонансно взаємодіє з речовиною, ініціюючи переходи між внутрішніми квантовими станами атомів. В області цих частот показник заломлення також близький до одиниці, але він дуже сильно залежить від частоти, тобто система має значну дисперсію (рис. 1). Це істотно впливає на групову швидкість сигналу, оскільки чим більша дисперсія, тим сильніше уповільнюється сигнал. В областях із сильною дисперсією зазвичай спостерігається значне поглинання сигналу, проте в експерименті цьому вдалося запобігти за допомогою явища електромагнітно-індукованої прозорості [6].

Важливою необхідною умовою в експерименті з уповільнення світла в газі є ультранизькі температури, за яких цей газ перебуває у стані з бозе-ейнштейнівським конденсатом. При цьому всі атоми газу реагують зі світлом як єдине ціле, а не відокремлено чи маленькими групами, як у звичайних матеріалах. Кількість атомів у стані БЕК у сучасних експериментальних установках зазвичай налічує від часток мільйона до кількох десятків мільйонів, тому й ефект уповільнення посилюється пропорційно.

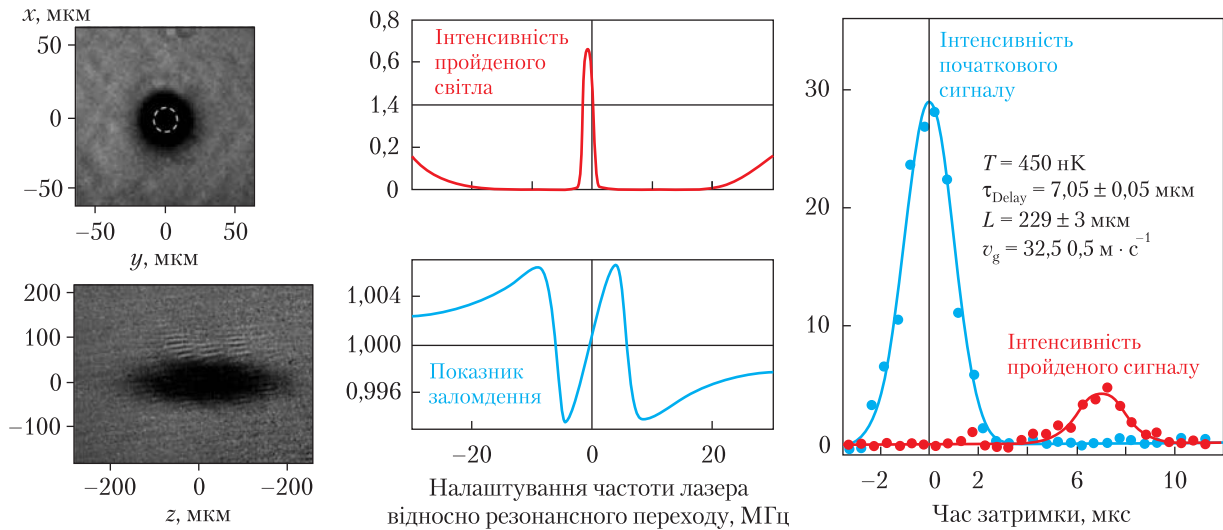


Рис. 1. Деталі експерименту з уповільнення світла: фотознімки атомної хмари у стані з БЕК, дисперсійні властивості та реєстрація уповільнення світла. Адаптовано з [5]

Більш того, та сама експериментальна група з Гарварда довела можливість «зупиняти» світло [5]. Для цього використовували додатковий лазер, який за потреби робить газ атомів прозорим чи непрозорим для основного лазера (явище електромагнітно-індукованої прозорості [6]). Далі, коли вже сигнал основного лазера рухається крізь газ і дуже сильно сповільнюється, додатковий лазер вимикають і газ стає непрозорим. Сповільнене світло всередині системи при цьому ефективно «вморожується» у квантові стани атомів, оскільки поширюється воно тільки за наявності додаткового лазера. Потім, через певний проміжок часу, додатковий лазер вмикають, внаслідок чого газ знову стає прозорим і світловий сигнал «визволяється».

Теоретичний опис електромагнітного відгуку газів з БЕК

Для того щоб послідовно і максимально точно описати подібні системи, необхідно залучати сучасні теоретичні підходи. Серед них доволі ефективним є метод вторинного квантування за наявності зв'язаних станів частинок, запропонований у роботі [7]. Використовуючи надалі методи лінійної теорії відгуку та формалізм

функцій Гріна [8], можна вивести загальну формулу для діелектричної проникності ідеальних розріджених квантових газів, що складаються з атомів (зв'язаних станів більш елементарних частинок):

$$\epsilon^{-1}(\mathbf{k}, \omega) \approx 1 + \frac{4\pi}{k^2} \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{p}} \sum_{\alpha, \beta} |\sigma_{\alpha\beta}(\mathbf{k})|^2 \frac{f_{\alpha}(\mathbf{p}-\mathbf{k}) - f_{\beta}(\mathbf{p})}{\omega + E_{\alpha}(\mathbf{p}) - E_{\beta}(\mathbf{p}-\mathbf{k}) + i\gamma_{\alpha\beta}},$$

де $\sigma_{\alpha\beta}$ — матричний елемент, пов'язаний з перерозподілом густини заряду в атомі при переході атома з квантового стану α в стан β , що може бути спричинене зовнішнім електромагнітним полем з частотою ω та хвильовим вектором \mathbf{k} . Зазначений матричний елемент можна записати в термінах хвильової функції атомів, а це означає, що він є внутрішньою мікроскопічною характеристикою окремих частинок, як і повна енергія атома $E_{\alpha}(\mathbf{p})$ з імпульсом \mathbf{p} у стані α та природна ширина спектральної лінії $\gamma_{\alpha\beta}$. Іншою важливою складовою формули є бозе-ейнштейнівська функція розподілу $f_{\alpha}(\mathbf{p})$ газу атомів (що займає у просторі об'єм V) з імпульсом \mathbf{p} у стані α . Саме ці функції відповідальні за колективні ефекти відгуку системи на збудження зовнішнім електромагнітним полем, а також включають усі необхідні складові для точного аналізу поведінки системи за наявності стану з БЕК у атомів в окремих внутрішніх квантових станах.

Слід зазначити, що розроблений теоретичний опис побудовано в рамках лінійної теорії відгуку, яка справедлива за наявності слабого збурення зовнішнім полем. Із цього приводу могли б виникнути певні сумніви у застосовності теорії в умовах, коли використовується додатковий лазер, що забезпечує явище електромагнітно-індукованої прозорості [6]. Дійсно, цей лазер призводить до значного перерозподілу атомів по квантових станах, тобто його інтенсивність не можна вважати малою в рамках теоретичної моделі. Однак у роботі [8] показано, що для явища значного уповільнення світла у БЕК додатковий лазер не є ключовою складовою. Такий лазер важливий насамперед для реалізації явищ «замороження» та «звільнення» світла з атомної хмари. Проте слід зазначити, що недавно у роботі [9] було запропоновано інший можливий механізм «зупинки світла», як наслідок співіснування БЕК атомів і фотонів. Розроблений же теоретичний підхід [8] демонструє великий потенціал і дозволяє дослідити багато важливих і вражаючих ефектів, притаманних квантовим газам у стані з конденсатом.

Уповільнення мікрохвиль

При детальному аналізі явища уповільнення сигналів оптичного діапазону з теоретичної точки зору є істотне обмеження. Резонансні лазерні сигнали налаштовують на переходи між атомними станами, що відрізняються дипольними моментами. Атоми лужних металів в основному стані не мають дипольного моменту, але при взаємодії з резонансним випромінюванням такий момент може бути індукований завдяки наявності збуджених станів у спектрі. Атоми перебувають у таких внутрішніх станах дуже короткий час і перевипромінюють сигнал далі. Звісно, когерентний колективний стан атомів з БЕК дає змогу істотно зменшити ефекти дисипації, але час життя атомів у збуджених станах напряму впливає на групову швидкість сигналу. Отже, для існуючих на сьогодні експериментів з дослідження бозе-ейнштейнівської конденсації в парах лужних металів нижньою

межею є групова швидкість сигналів оптичного діапазону порядку 100 м/с без використання додаткових лазерів [8] і порядку 10 м/с, якщо такі лазери використовують для забезпечення ефекту електромагнітно-індукованої прозорості [5].

Якщо подивитися на енергетичний спектр атомів лужних металів, то можна бачити, що вони мають також такі квантові стани, при переході між якими дипольний момент атома не змінюється. Насамперед це рівні розщеплення основного стану з урахуванням надтонкої структури, спричиненої взаємодією магнітних моментів ядра та валентного електрона. У цьому контексті важливим є те, що атоми в таких станах доволі легко експериментально утримувати в магнітних пастках і що час життя збуджених станів надтонкої структури здебільшого набагато перевищує часові проміжки експериментів. Незважаючи на відсутність дипольних моментів усіх рівнів надтонкої структури, розвинутий теоретичний підхід [8] дозволяє послідовно отримати поправки більш високих порядків для матричних елементів $\sigma_{\alpha\beta}$ і кількісно оцінити масштаб уповільнення електромагнітних сигналів.

Беручи як приклад розріджений газ атомів цезію у стані з БЕК та зовнішнє електромагнітне випромінювання мікрохвильового діапазону, налаштоване близько до резонансних переходів між квантовими станами надтонкої структури, сигнали можна сповільнити до значень групової швидкості порядку 0,01 см/с [8]. Тобто це на чотири-п'ять порядків менше, ніж досягнуті та розраховані значення швидкості уповільнених сигналів оптичного діапазону. Одним із вагомих факторів, що заважають прямому експериментальному спостереженню уповільнених мікрохвиль (наприклад, для цезію резонансними є довжини хвиль, що приблизно дорівнюють 3,3 см) у парах з БЕК, є поки що замалі розміри атомних хмар (характерні довжини становлять порядку 1 мм за необхідності мати приблизно в 10 разів більші), але цей напрям досліджень є цілком реальним і перспективним для розвитку в майбутніх експериментах.

Використання сповільненого світла для керування швидкістю світла та вимірювання магнітних полів

Одним із яскравих прикладів використання явища уповільнення світла є можливість побудови надчутливих детекторів магнітних полів. Наявність додаткового сталого магнітного поля приводить до так званого ефекту Зеємана – розщеплення рівнів залежно від магнітного моменту атомів. Отже, якщо енергія рівнів сильно залежатиме від напруженості зовнішнього магнітного поля, то і бозе-конденсат у цілому може посилювати ефект за рахунок колективних ефектів відгуку [10]. Як приклад, на рис. 2 зображено залежність енергії рівнів атомів натрію та залежність групової швидкості й інтенсивності пройденого крізь атомну хмару сигналу від напруженості магнітного поля.

Ми бачимо, що, змінюючи напруженість лише на кілька гаусів (до речі, магнітне поле Землі становить 0,25–0,65 Гс залежно від місця спостереження), можна змінювати швидкість сигналів у кілька десятків разів. Тобто, розглядаючи обернену задачу, за часом затримки сигналу, що пройшов крізь атомну хмару з БЕК, можна обчислювати з високою точністю (0,001 Гс або навіть менше) напруженості магнітних полів.

Фільтрація оптичних сигналів за допомогою БЕК

Сильну залежність характеристик пройдених сигналів від особливостей енергетичного спектра атомів можна також вдало використовувати для фільтрації електромагнітних сигналів. Важливою особливістю системи з БЕК є та обставина, що заздалегідь визначену частку (корисний сигнал із цілого пакета) вдається вилучити лише за одне-два проходження набору хвиль крізь атомні хмари з БЕК [11]. При цьому інтенсивність корисного сигналу знижується лише на кілька процентів, що вважається дуже високою характеристикою серед наявних аналогів. Ідея такої фільтрації полягає у використанні явища сильного уповільнення світла в БЕК – оскільки різні частотні складові пакета мають різну групову швидкість, то, приймаючи пройдений сигнал лише у вузький (заздалегідь визначений) проміжок часу, можна легко відсікти, наприклад, слабко уповільнені складові, а також складові, що сильно поглинаються і розсіюються середовищем. Частотні характеристики швидкості та інтенсивності сигналу з початковим гаусівським профілем інтенсивності при першому та другому проходженні показано на рис. 3.

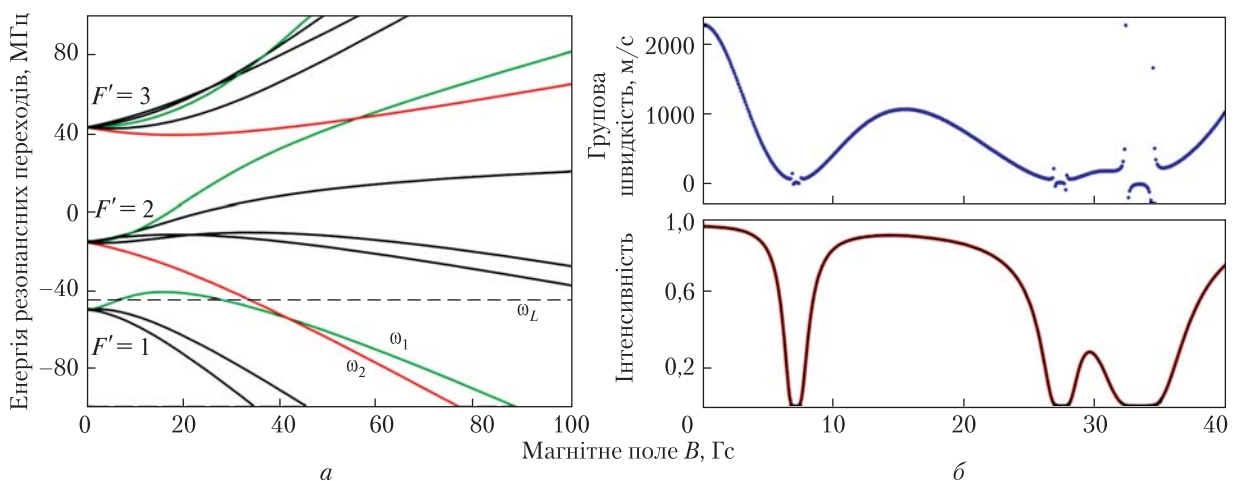


Рис. 2. Залежності резонансних частот переходів з лінійною поляризацією від сталого магнітного поля для атома натрію (а) та залежності характеристик сигналу, пройденого крізь атомну хмару атомів натрію у стані з БЕК (б)

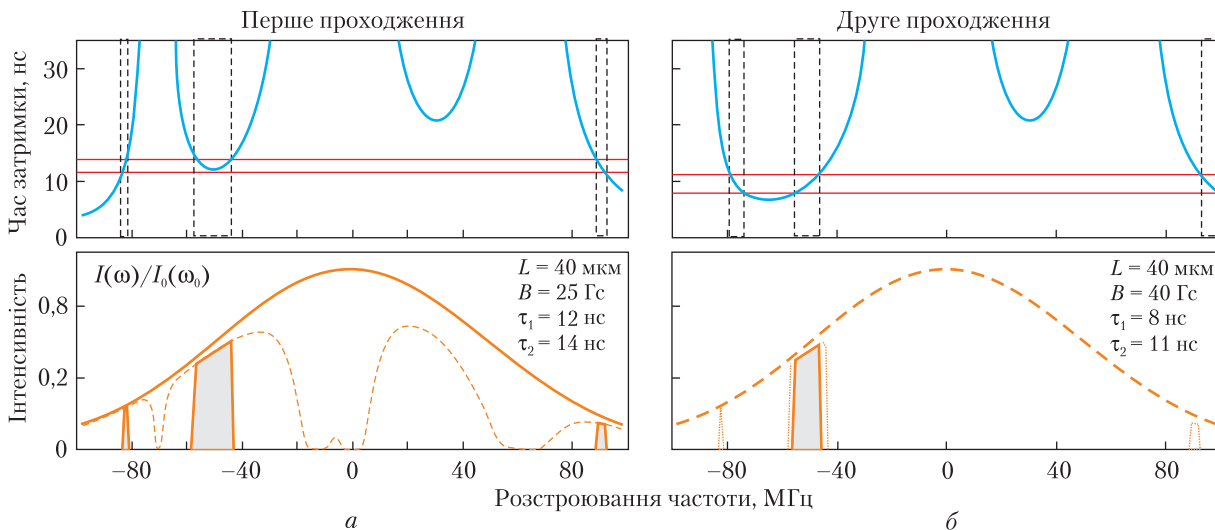


Рис. 3. Залежності часу затримки та профілю інтенсивності пройдених сигналів від частоти при проходженні крізь атомні хмари у стані з БЕК з різною напруженістю зовнішнього сталого магнітного поля: *a* – перше проходження, *б* – друге проходження

Звісно, такі методи фільтрації мають переваги не лише у зв'язку з високими показниками співвідношення сигнал/шум, а й з унікальністю системи як такої, що високо цінується у методах захисту та передачі інформації (квантовій криптографії).

Прискорення заряджених частинок атомними хмарами з БЕК

Доволі оригінальним прикладом застосування ультраохолодних квантових газів є пропозиція їх використання для прискорення релятивістських частинок. Для цього, як було встановлено у роботі [12], необхідно мати квантові стани з інверсною заселеністю — кількість частинок у деяких станах з більшою енергією повинна перевищувати кількість частинок з меншою енергією, тобто таку саму заселеність, яка необхідна для роботи лазерів. Охолоджені атоми лужних металів також можна доволі вдало застосовувати, бо вони мають рівні надтонкої структури основного стану з великим часом життя. Сучасний рівень експериментів з БЕК дозволяє готувати і контролювати гази у цих квантових станах із потрібною заселеністю. Надалі, охолодивши атомну хмару до стану з БЕК і маю-

чи хоча б одну інверсну заселеність рівнів, заряджену частинку можна прискорювати, якщо вона рухається крізь атомну хмару із достатньою швидкістю. Цей феномен ґрунтується на релятивістському ефекті Черенкова і, попри деякі незвичності з точки зору звичайної термодинаміки (адже енергія переходить від дуже холодного до дуже гарячого об'єкта), не має протиріч, оскільки саме надлишкова енергія газу, запасена в інверсній заселеності, переходить до частинки, тоді як теплова енергія газу (що є надзвичайно низькою за цих умов) майже не змінюється. На рис. 4 як приклад зображено чотирирівневу систему в стані з БЕК, де можливе прискорення зарядженої частинки, що рухається крізь атомну хмару зі швидкістю $v = 0,99c$, де c — швидкість світла у вакуумі.

Слід зазначити, що останнім часом системи, що складаються з ультраохолодних газів з інверсною заселеністю квантових станів, привертають ще більшу увагу в контексті від'ємних температур [13], що приводить до оригінальних наслідків при застосуванні в термодинаміці (але, звісно ж, не до вічного двигуна, попри спекуляції, що регулярно з'являються у псевдонаукових колах). Такі ефекти, безсумнівно, дають істотний поштовх для нових ідей щодо

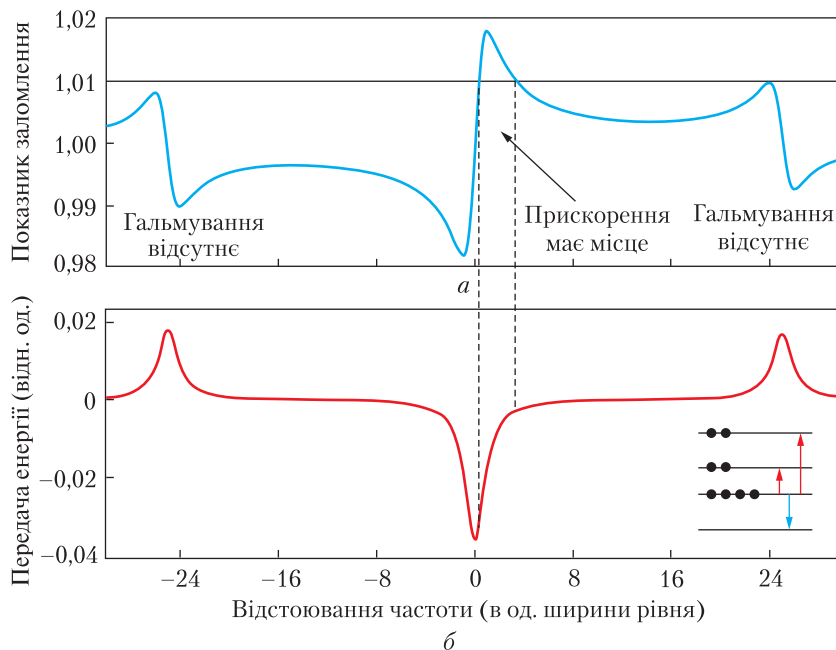


Рис. 4. Залежності показника заломлення атомної хмари (атоми у трьох верхніх станах перебувають у БЕК, на нижньому рівні атоми відсутні) та залежності напряму й інтенсивності можливого обміну енергією між релятивістською частинкою і конденсатом. При заданій швидкості частинки (їй відповідає горизонтальна лінія на верхньому рисунку) можливе прискорення частинки без гальмування на інших резонансних переходах

можливого застосування та новітніх технологій. Стосовно ж дослідженого ефекту Черенкова в газах з БЕК [12] слід зазначити, що додатково він є перспективним альтернативним методом визначення натуральної ширини енергетичних рівнів (навіть за нормальної заселеності), що й досі мало вивчено у випадку рівнів надтонкої структури основного стану більшості атомів лужних металів.

Висновки

У роботі розглянуто кілька показових прикладів застосування когерентної поведінки атомів (у стані з БЕК) при їх взаємодії із зовнішнім електромагнітним збуренням. Особливості внутрішньої енергетичної структури внаслідок такої поведінки переходять від мікроскопічних до макроскопічних масштабів, що надає можливість для спостереження унікальних

ефектів. Наприклад, групова швидкість електромагнітних сигналів може зменшуватися не в декілька разів, як у звичайних матеріалах, а в кілька мільйонів разів. Більш того, звичні параметри залежностей макроскопічних характеристик від магнітного поля та параметри фільтрації можна значно поліпшити завдяки вдалому застосуванню колективних ефектів. Розглянуті системи є також досить цікавими з точки зору незвичних термодинамічних властивостей, коли високоенергетичні частинки, що проходять крізь атомну хмару за наднизьких температур, можуть додатково прискорюватися нею.

Інтенсивність теоретичних і експериментальних досліджень систем із бозе-ейнштейнівським конденсатом з року в рік зростає, що дає обґрунтовані надії на отримання найближчим часом нових чудових і «незвичних» результатів.

REFERENCES

1. Pethick C.J., Smith H. *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases*. (Cambridge University Press, 2002).
2. Pitaevskii L.P., Stringari S. *Bose-Einstein Condensation*. (Clarendon Press, Oxford, 2003).
3. Anderson M.H., Ensher J.R., Matthews M.R., Wieman C.E., Cornell E.A. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science*. 1995. **269**(5221): 198.
4. Davis K.B., Mewes M.O., Andrews M.R., van Druten N.J., Durfee D.S., Kurn D.M., Ketterle W. Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms. *Phys. Rev. Lett.* 1995. **75**: 3969.
5. Hau L., Harris S., Dutton Z., Behroozi C. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. *Nature*. 1999. **397**: 594.
6. Fleischhauer M., Imamoglu A., Marangos J.P. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media. *Rev. Mod. Phys.* 2005. **77**(2): 633.
7. Peletminskii S.V., Slyusarenko Y.V. Second quantization method in the presence of bound states of particles. *J. Math. Phys.* 2005. **46**: 022301.
8. Slyusarenko Y., Sotnikov A. Green-function method in the theory of ultraslow electromagnetic waves in an ideal gas with Bose-Einstein condensates. *Phys. Rev. A*. 2008. **78**(5): 053622.
9. Boychenko N.P., Slyusarenko Y. Coexistence of photonic and atomic Bose-Einstein condensates in ideal atomic gases. *Condens. Matter Phys.* 2015. **18**(4): 43002.
10. Slyusarenko Y., Sotnikov A. Magnetic ordering of three-component ultracold fermionic mixtures in optical lattices. *Phys. Lett. A*. 2009. **373**: 1392.
11. Slyusarenko Y.V., Sotnikov A.G. Feasibility of using Bose-Einstein condensates for filtering optical pulses. *Low Temp. Phys.* 2010. **36**(8): 671.
12. Slyusarenko Y., Sotnikov A. Propagation of relativistic charged particles in ultracold atomic gases with Bose-Einstein condensates. *Phys. Rev. A*. 2011. **83**(2): 023601.
13. Braun S., Ronzheimer J.P., Schreiber M., Hodgman S.S., Rom T., Bloch I., Schneider U. Negative absolute temperature for motional degrees of freedom. *Science*. 2013. **339**(615): 52.

Стаття надійшла 05.02.2016.

Yu.V. Slyusarenko^{1,2}, *A.G. Sotnikov*^{1,2}

¹ Akhiezer Institute for Theoretical Physics, National Science Center
«Kharkov Institute of Physics and Technology» (Kharkiv)

² Karazin Kharkiv National University (Kharkiv)

UNIQUE EFFECTS IN A RESPONSE OF ULTRACOLD ATOMIC GASES OF ALKALI-METAL ATOMS IN THE STATE WITH A BOSE-EINSTEIN CONDENSATE TO THE PERTURBATION BY AN EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

We demonstrate some peculiar results in the phenomenon of a response of ultracold quantum gases in the state with a Bose-Einstein condensate. It is shown that, basing on the general theoretical approach proposed by authors, it is possible to study not only slowing of optical but also microwave electromagnetic pulses to extremely low values of the group velocity. The phenomenon of ultraslow electromagnetic waves can be used for detection and precise measurements of magnetic fields, high-quality filtering of pulses and more detailed analysis of atomic spectra. As a remarkable example of a potential “curious” application, we analyze a principal possibility of acceleration of relativistic particles by ultracold gases in the presence of inverse occupancy of quantum states.

Keywords: Bose-Einstein condensate, ultracold quantum gases, slowing and filtering of pulses, acceleration of particles.