



## СОТНИКОВ

**Андрій Геннадійович** — доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

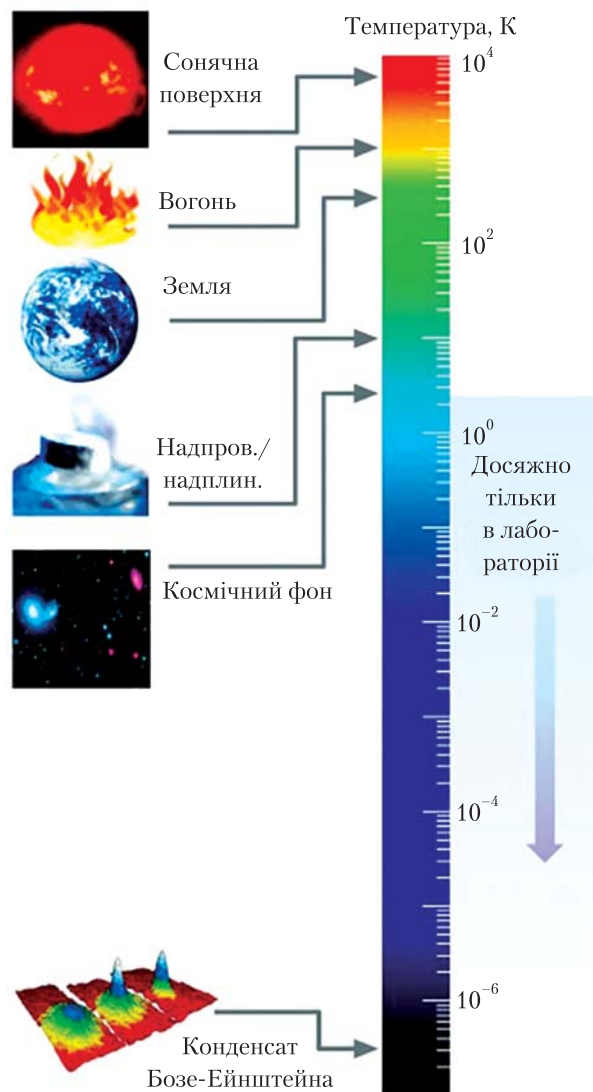
## ХОЛОДНІ ГАЗИ НЕЙТРАЛЬНИХ АТОМІВ У ЛАЗЕРНИХ ПОЛЯХ — НОВІТНІ СИСТЕМИ ДЛЯ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ, РОЗУМІННЯ ТА ПЕРЕДБАЧЕНЬ УНІКАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 10 липня 2024 р.

*У доповіді наведено огляд прогресу в дослідженнях унікальних ефектів у квантових газах атомів за низьких температур. Особливу увагу приділено явищу конденсації Бозе—Ейнштейна, а також окреслено широке коло систем, у яких це явище проявляється і зумовлює важливі фізичні ефекти. Зазначено, що за наявності додаткових лазерних полів, що формують просторово-періодичні стоячі хвилі, можна моделювати складні для опису системи, пов'язані з фізикою конденсованого стану, в яких спостерігаються явища надплинності, магнетизму, зарядового й орбітального впорядкування, надпровідності тощо. Вказано на все частіше використання систем холодних атомів як універсальних квантових симуляторів, а також окреслено перспективи новітніх теоретичних підходів тензорних мереж для застосувань у квантових обчисленнях.*

**Ключові слова:** квантові гази, нейтральні атоми, конденсація Бозе—Ейнштейна, лазерні поля, уповільнення електромагнітних хвиль, оптичні ґратки, магнетизм, орбітальне впорядкування, універсальні квантові симулятори.

Чому нас цікавлять холодні гази нейтральних атомів у лазерних полях? Звичні для нас системи — сонячна поверхня або вогонь, атмосфера Землі, навіть надпровідники, які потребують додаткового криогенного охолодження, — це об'єкти з відносно високими температурами. Температури ж ультрахолодних газів, зокрема конденсатів Бозе—Ейнштейна або квантових газів з проявом статистики Фермі—Дірака, дуже близькі до абсолютного нуля ( $-273,15$  °C) і вимірюються у мікро-, нано- та пікоkelвінах. Таких температур можна досягти лише в лабораторних умовах, оскільки навіть у космосі поза масивними



**Рис. 1.** Температурна шкала в логарифмічному масштабі, яка характеризує відомі фізичні об'єкти

об'єктами все пронизано так званим реліктовим випромінюванням з температурою, близькою до 3 К (рис. 1).

Наскільки ультрахолодна матерія є важливою для наукових досліджень? Напевно, всі знають, що фотони можуть бути або корпускулою (частинкою), або хвилею. Та насправді кожен атом і кожна молекула — це також і хвиля, і частинка. Відповідно, за низьких температур можна виміряти хвильові властивості матерії,

тобто дослідити квантові ефекти на макроскопічному рівні в максимально «чистому» вигляді. Для цього й використовують такі макроскопічні об'єкти, як холодні гази нейтральних атомів.

І хоча перші, доволі екзотичні фізичні характеристики квантових газів, у яких виникають прояви перекриття хвильових функцій індивідуальних частинок, було передбачено ще в 20-х роках минулого століття, шлях до безпосередньої їх реалізації в лабораторних умовах виявився доволі складним. Зокрема, це зумовлено тим, що, якщо звичайні гази нейтральних атомів охолоджувати криогенними способами, вони переходять в інші агрегатні стани до того моменту, коли з'являються суттєві квантові ефекти. Тому потрібно було додатково розріджувати гази, а відомі тоді криогенні техніки охолодження не дозволяли досягти квантових ефектів у таких системах.

Лише на межі 1980-х — 1990-х років науковці змогли ефективно використати лазери для доплерівського, сизифового та випарювального охолодження атомів, а також застосувати спеціальні просторові розташування лазерів для створення оптичних пасток.

Найзручнішими для застосування технік лазерного охолодження та утримання атомів є атоми першої групи періодичної системи, тобто атоми лужних металів, спектральні характеристики яких добре вивчено. Проте перелік газів, які можна в такий спосіб ефективно охолоджувати, не обмежується лише ними. Наразі за допомогою лазерів дослідники охолоджують також атоми лужноземельних металів, деякі елементи групи лантану (диспрозій, ербій, ітербій), окремі елементи перехідних металів (хром), благородних газів (гелій, неон) тощо.

Однак саме в газах лужних металів, зокрема у двох окремих експериментальних реалізаціях з розрідженими парами атомів натрію і рубідію в магніто-оптичних пастках, у 1995 р. вперше експериментально спостерігали явище конденсації Бозе—Ейнштейна [1, 2], що було теоретично передбачено ще 70 років тому. Феномен конденсації цікавий тим, що речовина, сформована в цих експериментах сотнями ти-

сяч або навіть кількома мільйонами атомів, поводить, як макроскопічна хвиля матерії, — її можна описати єдиною хвильовою функцією, оскільки переважна більшість атомів перебувають в одному й тому самому квантовому стані з найнижчою енергією. Тому такий стан і називають *конденсатним станом системи багатьох частинок*.

**Явище сильного уповільнення світла в конденсатах атомів.** Одним із яскравих проявів квантової природи матерії на макроскопічному рівні є особливості взаємодії світла з бозе-конденсатами атомів за наднизьких температур. В одному з експериментів американські вчені змогли досягти швидкості світла в речовині — у бозе-конденсаті — 17 м/с [3]. Це менше за швидкість велосипедиста на велотреку, хоча за звичайних умов світло рухається з найвищою у нашому Всесвіті швидкістю (її значення є фундаментальним обмеженням). У цих досліджах використовували два лазерні поля. Автори дослідження спеціально створили так звану електромагнітно-індуковану прозорість системи і завдяки високим значенням дисперсії, тобто залежності показника заломлення речовини від частоти випромінювання, досягли значного уповільнення світла. Нульова швидкість світла неможлива, але є експерименти з його «замороження»: світло спочатку уповільнюють, а потім вимикають зовнішнє лазерне поле, яке створювало ефект прозорості, тобто система перестає бути прозорою, і світло «вмерзає»; в такому стані воно може залишатися кілька секунд, після чого знову вмикають лазерне поле — тоді світло «розморожується» і проходить далі.

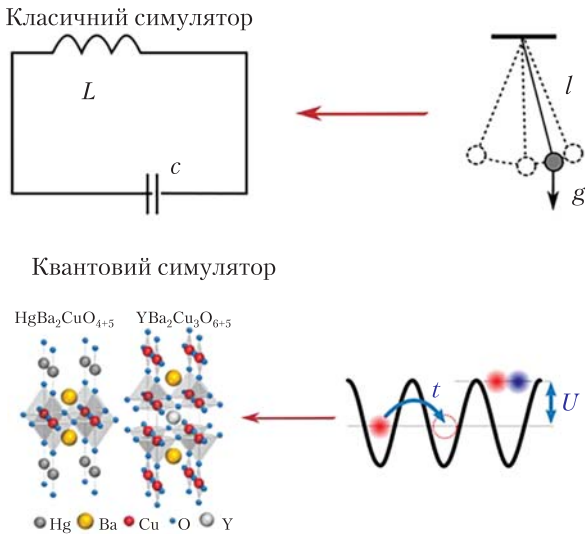
Наша дослідницька група в ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» досліджувала уповільнення мікрохвиль у конденсатах атомів, а також сильні залежності швидкості електромагнітних сигналів від магнітних полів та можливість фільтрування електромагнітних сигналів [4]. Усі ці ефекти важливо вивчати з метою створення нових оптичних пристроїв — оптичних ліній затримки, пристроїв когерентної оптичної пам'яті, надчутливих детекторів тощо. Результати наших теоретичних досліджень узагальнено в монографії «Теорія

екзотичних станів у квантових фермі- та бозе-системах», опублікованій минулого року у видавництві «Наукова думка» [5].

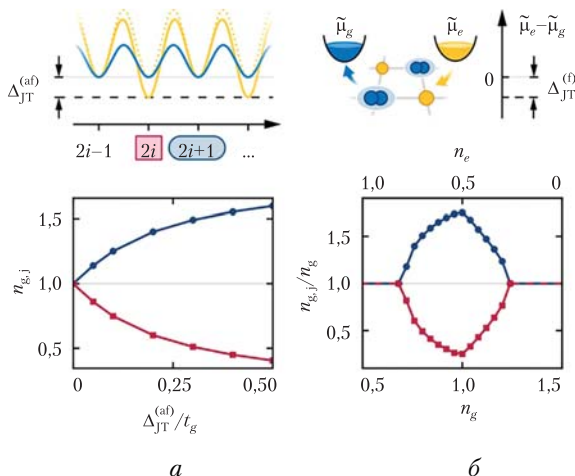
**Конденсати квазічастинок.** Бозе-конденсати не обмежуються лише атомарними газами, їх спостерігають у газах квазічастинок, так званих магнонах (наприклад, у магнетиках). До їх вивчення доклалися, зокрема, науковці з Київського національного університету імені Тараса Шевченка [6]. Спостерігають конденсати й інших квазічастинок: екситонних поляритонів [7] і навіть фотонів [8]. Останнє дуже незвично, оскільки вважалося, що це заборонено зважаючи на класичні ознаки фотонів. Однак, як виявилось, в розчині барвника або в ультрахолодних газах атомів можна досягти бозе-конденсатів фотонів. І цей феномен також є предметом фундаментальних досліджень нашого Інституту [5, 9].

Ми вперше показали можливість конденсації спін-триплетних екситонів, тобто зв'язаних станів із ненульовим спіном [10]. Це важливо для побудови дуже стабільних магнітних пристроїв, нечутливих до флуктуації зовнішніх магнітних полів. Такий ефект можна використовувати в пристроях зберігання інформації.

**Квантові гази атомів в оптичних ґратках.** Ще один важливий напрям наших досліджень — побудова так званих оптичних ґраток, придатних для застосування в обчислювальній фізиці. Ці роботи ґрунтуються, зокрема, на ідеї, яку Річард Фейнман висловив на початку 1980-х років: можна побудувати універсальні квантові симулятори і в такий спосіб моделювати поведінку надскладних квантових систем, які мають багато ступенів вільності й важливі характеристики яких (наприклад, параметр спарювання) неможливо з достатньою точністю обчислити на класичних комп'ютерах [11]. Завдяки цим дослідженням ми зможемо просунути далі в побудові надпровідників, які працюватимуть за кімнатних температур, адже щодо цього немає фундаментальних обмежень. Річард Фейнман наголошував, що наша природа є не класичною, а квантовою. А щоб дослідити квантові системи багатьох частинок, потрібно будувати квантові симулятори (рис. 2).



**Рис. 2.** Графічна візуалізація ідеї Фейнмана. Класичним симулятором для досліджень коливань в електричному контурі може слугувати математичний маятник, а квантовим симулятором процесів надпровідного спарювання в надпровідниках — нейтральні атоми в оптичних ґратках



**Рис. 3.** Графічна візуалізація реалізації ефекту Яна—Теллера для газів нейтральних атомів в оптичних ґратках: антифероорбітального — за допомогою додаткової модуляції лазерного поля (а) і фероорбітального — за допомогою заміни одного типу атомів іншим (б) [15]

Додатковим стимулом для досліджень з побудови квантових симуляторів став розвиток квантових комп'ютерів. Для таких симуляторів з холодних атомів використовують спеціальні лазери з червоним розгладженням частоти (атоми зосереджуються на ділянках максимумів лазерного випромінювання) або синім (атоми можуть фокусуватися в ділянках мінімумів потенціалу). За умови стоячої хвилі можна створити оптичний кристал з одно-, дво- чи тривимірною геометрією, щоб дослідити його та використати як симулятор. Це дасть змогу реалізувати відому в теоретичній фізиці модель Габбарда, нерозв'язну на класичних комп'ютерах, якщо вимірність простору більша за одиницю. На сьогодні це є додатковим викликом для квантових обчислень [12].

Крім того, ми використовуємо системи з холодних атомів із додатковими ступенями вільності. Це так звані ядерні ступені вільності — проєкції ядерного спіну в атомах. Якщо атом має замкнену електронну оболонку, можна вільно вибирати проєкції магнітного моменту і втілювати дуже екзотичні системи на кшталт кольорових (багатокомпонентних) квантових сумішей, які фактично є аналогом кварк-глюонної плазми. Все це дає змогу в лабораторних умовах реалізовувати стани, близькі до тих, що були властиві раннім етапам існування нашого Всесвіту, зокрема досліджувати явища спарювання між атомами, за які при побудові аналогії відповідають глюони в ядерній матерії. За підсумками цих досліджень ми також опублікували низку статей [5, 13, 14].

Інші напрями нашої роботи пов'язані з вивченням орбітальних ефектів, які дають змогу моделювати поведінку в кристалах. У такий спосіб можна регулювати параметри зовнішніх лазерів в оптичних ґратках, щоб створювати просторові деформації кристалів, зокрема отримувати ефекти на зразок ефекту Яна—Теллера, який полягає в спонтанному порушенні симетрії внаслідок деформації кристалів (рис. 3). Отже, за допомогою лазерів можна виокремлювати різні ефекти і досліджувати їх, що, власне, ми й запропонували, а отримані результати опублікували у журналі «Physical Review Research» [15].

**Теоретичні підходи тензорних мереж.** Крім того, з 2022 р. наша дослідницька група працює над розвитком сучасних підходів тензорних мереж до опису квантових систем багатьох частинок. Це напрям є дуже важливим з огляду на розвиток квантових комп'ютерів. Такі теоретичні підходи передбачають моделювання ґраткових систем із квантовими спінами або з холодними атомами за допомогою математичного апарату тензорних мереж [16]. Наразі підходи тензорних мереж дають змогу зробити більше, ніж наявні на сьогодні квантові комп'ютери [17]. До речі, над розробленням власних квантових комп'ютерів зараз працюють практично всі технологічні гіганти (Intel, IBM, Google, Amazon, Microsoft та ін.) та сотні стартапів по всьому світу. Така жорстка конкуренція стимулює розвиток теоретичних підходів і сприяє вдосконаленню технологій. Сподіваємося, зрештою квантові комп'ютери зможуть досягти очікуваної «квантової переваги».

**Висновки.** За два десятиліття ХХІ ст. квантові гази нейтральних атомів стали потужною платформою для подальшого поглибленого вивчення хвильових характеристик матерії. Ці гази характеризуються гнучкістю в добірї ключових фізичних параметрів, таких як густини компонентів, діапазони міжчастинкової взаємодії, типи атомів, можливості додавання зовнішніх потенціалів тощо. Ці системи важливі не лише з фундаментальної точки зору, а й з практичної — їх уже активно використовують для побудови квантових комп'ютерів, а також квантових симуляторів більш складних систем багатьох частинок. Перелік фізичних ефектів, що можуть спостерігатися в квантових газах, далеко ще не вичерпаний, а тому цей напрям є полем для активності багатьох дослідницьких груп у провідних світових лабораторіях. Отже, маємо обґрунтовані сподівання щодо можливості спостереження найближчим часом нових унікальних явищ і побудови більш досконалих теорій.

## REFERENCES

## [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. 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**: 198. <https://doi.org/10.1126/science.269.5221.198>
2. 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. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.3969>
3. Hau L., Harris S., Dutton Z. et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. *Nature*. 1999. **397**: 594. <https://doi.org/10.1038/17561>
4. Slyusarenko Yu.V., Sotnikov A.G. 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. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2016. (7): 19–26. <https://doi.org/10.15407/visn2016.07.019>  
[Слюсаренко Ю.В., Сотніков А.Г. Унікальні ефекти відгуку ультрахолодних газів атомів лужних металів у стані з бозе-ейнштейнівським конденсатом на збудження електромагнітним полем. *Вісник НАН України*. 2016. № 7. С. 19–26.]
5. Peletmynskiy O.S., Slyusarenko Yu.V., Sotnikov A.G. *Theory of exotic states in quantum Fermi and Bose systems*. Kyiv, Naukova Dumka, 2023 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1851-8>  
[Пелетминський О.С., Слюсаренко Ю.В., Сотніков А.Г. *Теорія екзотичних станів у квантових фермі- та бозе-системах*. Київ: Наукова думка, 2023.]
6. Demokritov S., Demidov V., Dzyapko O., Melkov G.A., Serga A.A., Hillebrands B., Slavin A.N. Bose-Einstein condensation of quasi-equilibrium magnons at room temperature under pumping. *Nature*. 2006. **443**: 430. <https://doi.org/10.1038/nature05117>
7. Kasprzak J., Richard M., Kundermann S., Baas A., Jemabrun P., Keeling J.M.J., Marchetti F.M., Szymańska M.H., André R., Staehli J.L., Savona V., Littlewood P.B., Deveaud B., Dang L.S. Bose-Einstein condensation of exciton polaritons. *Nature*. 2006. **443**: 409. <https://doi.org/10.1038/nature05131>
8. Klaers J., Schmitt J., Vewinger F., Weitz M. Bose-Einstein condensation of photons in an optical microcavity. *Nature*. 2010. **468**: 545. <https://doi.org/10.1038/nature09567>

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. <https://doi.org/10.5488/CMP.18.43002>
10. Sotnikov A., Kuneš J. Field-induced exciton condensation in  $\text{LaCoO}_3$ . *Sci. Rep.* 2016. **6**: 30510. <https://doi.org/10.1038/srep30510>
11. Feynman R.P. Simulating physics with computers. *Int. J. Theor. Phys.* 1982. **21**: 467. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
12. Gross C., Bloch I. Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices. *Science.* 2017. **357**: 995. <https://doi.org/10.1126/science.aal3837>
13. Sotnikov A., Hofstetter W. Magnetic ordering of three-component ultracold fermionic mixtures in optical lattices. *Phys. Rev. A.* 2014. **89**: 063601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.063601>
14. Sotnikov A. Critical entropies and magnetic-phase-diagram analysis of ultracold three-component fermionic mixtures in optical lattices. *Phys. Rev. A.* 2015. **92**: 023633. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.023633>
15. Sotnikov A., Darkwah Oppong N., Zambrano Y., Cichy A. Orbital ordering of ultracold alkaline-earth atoms in optical lattices. *Phys. Rev. Research.* 2020. **2**: 023188. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.023188>
16. Lukin I., Sotnikov A., Leamer J., Magann A., Bondar D. Spectral gaps of two- and three-dimensional many-body quantum systems in the thermodynamic limit. *Phys. Rev. Research.* 2024. **6**: 023128. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.023128>
17. Patra S., Jahromi S., Singh S., Orús R. Efficient tensor network simulation of IBM's largest quantum processors. *Phys. Rev. Research.* 2024. **6**: 013326. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.013326>

Andrii G. Sotnikov

National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3632-4790>

COLD GASES OF NEUTRAL ATOMS IN LASER FIELDS –  
NEW SYSTEMS FOR QUANTUM COMPUTING, UNDERSTANDING  
AND PREDICTIONS OF UNIQUE PHYSICAL PHENOMENA

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, July 10, 2024

The report provides an overview of the progress in the research on unique effects in quantum gases of atoms at low temperatures. Particular attention is paid to the phenomenon of Bose-Einstein condensation and a wide range of systems where this phenomenon emerges and leads to important physical effects, consequences and applications. In the presence of additional laser fields that form spatially-periodic standing waves, it is possible to model complex quantum systems from condensed matter, where the phenomena of superfluidity, magnetism, charge and orbital ordering, superconductivity, etc. are observed. We indicate the more frequent realizations of cold atom systems as universal quantum simulators, as well as the prospects of the latest theoretical approaches of tensor networks for applications in quantum computing.

**Keywords:** quantum gases, neutral atoms, Bose-Einstein condensation, laser fields, ultraslow light, optical lattices, magnetism, orbital ordering, universal quantum simulators.

**Cite this article:** Sotnikov A.G. Cold gases of neutral atoms in laser fields – new systems for quantum computing, understanding and predictions of unique physical phenomena. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (9): 59–64. <https://doi.org/10.15407/visn2024.09.059>