

Журавель Б.О., Строкач М.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,
email:bohthankaaa6@gmail.com*

КВАНТОВІ ЯВИЩА ПРИ НАДНИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Анотація. У роботі розглядаються ключові квантові явища, що проявляються при наднизьких температурах, зокрема надплинність і надпровідність, Бозе-Ейнштейнівська конденсація, квантова турбулентність та квантові точки. Підкреслено їхнє значення для фундаментальної науки і перспективи застосування в новітніх технологіях – від квантових обчислювачів до досліджень космосу.

Abstract. *The paper examines key quantum phenomena at ultralow temperatures, including superfluidity, superconductivity, Bose-Einstein condensation, quantum turbulence, and quantum dots. It highlights their importance for fundamental science and potential applications in cutting-edge technologies, from quantum computers to space exploration.*

Ключові слова: *БЕК, квантові явища, наднизькі температури, надпровідність, надплинність, квантові точки, квантове тунелювання*

Keywords: *BEC, quantum phenomena, ultralow temperatures, superconductivity, superfluidity, quantum dots, quantum tunneling*

Квантові явища при наднизьких температурах становлять один із найбільш перспективних напрямів сучасної фізики. У безпосередній близькості до абсолютного нуля класичні термодинамічні уявлення поступаються місцем квантовим ефектам, які лежать в основі таких явищ, як надпровідність, надплинність, Бозе-Ейнштейнівська конденсація (БЕК) та інші колективні стани речовини. Їх дослідження має важливе значення як для фундаментальної науки, так і для майбутніх прикладних технологій, зокрема у сфері створення квантових комп'ютерів, надточних сенсорів і квантових симуляторів.

Бозе-Ейнштейнівська конденсація являє собою особливий квантовий стан, у якому значна кількість бозонів займає один і той самий основний енергетичний рівень. Такий стан можливий лише за температур, близьких до абсолютного нуля. Перші експериментальні спостереження БЕК були здійснені у 1995 році на атомах рубідію та натрію, охолоджених до ультранизьких

температур за допомогою лазерних методів. У цьому стані речовина демонструє властивості єдиного когерентного квантового об'єкта, зокрема явища надплинності та надпровідності. Сучасні дослідження БЕК активно застосовуються для моделювання складних квантових процесів, створення квантових симуляторів і вивчення нових фаз речовини [1].

Нині БЕК досліджується в контексті таких галузей, як фізика квантових симуляторів, оптичних решіток, астрофізика нейтронних зір, а також у вивченні супертвердих станів. Створено низку експериментальних реалізацій БЕК, зокрема на основі фотонів, екситонів, поляритонів і навіть молекулярних систем. В Україні експериментальні дослідження у галузі фізики наднизьких температур та квантових конденсатів ведуться, зокрема, в Інституті фізики НАН України та Інституті низьких температур і структурованих матеріалів у Харкові. Серед провідних науковців слід відзначити академіка Анатолія Шевченка, який досліджує квантові фазові переходи та динаміку куперівських пар, а також професора Сергія Нікуліна, що займається вивченням БЕК у пастках та потенціальних ямах [5, с. 785–799].

Окрему увагу в цьому контексті привертає феномен надплинності — здатність рідини текти без тертя та в'язкості, що найяскравіше проявляється у рідкому гелії-4 при температурах нижче 2,17 К. У такому стані рідина демонструє унікальні властивості: проходить крізь вузькі капіляри, піднімається по стінках посудини та утворює сталі коливальні режими без затухання. Надплинний гелій є ідеальним середовищем для експериментального вивчення макроскопічних квантових ефектів. Цей феномен має фундаментальне значення для фізики конденсованого стану та знаходить застосування у кріогенних системах охолодження, розробці надточних гіроскопів і детекторів гравітаційних хвиль [1].

Надпровідність – це квантове явище, за якого електричний струм протікає через матеріал без електричного опору. Воно виникає внаслідок утворення куперівських пар електронів, які, об'єднуючись, поведуться як бозони та не взаємодіють з атомною ґраткою. Це забезпечує необмежене транспортування заряду без втрат енергії. У 1957 році це явище було пояснено в межах квантово-механічної теорії БКШ (Бардіна, Купера та Шріффера), що стало фундаментальним проривом у фізиці твердого тіла. Надпровідники знаходять широке застосування в магнітно-резонансній томографії, високоефективних лініях електропередач, квантових комп'ютерах і транспортних системах з магнітною левітацією. Перспективні дослідження нових класів надпровідників можуть стати основою технологічної революції в енергетиці та електроніці [2, с. 1175–1204].

Квантова турбулентність – це складний динамічний режим, що виникає у надплинних середовищах, таких як гелій-4, та характеризується формуванням квантованих вихорів з дискретними значеннями циркуляції. На відміну від класичної турбулентності, де спостерігається безперервний спектр енергетичного розподілу вихорів, у квантовій турбулентності домінує дискретність і когерентність. Вивчення цього феномену відкриває нові можливості для розуміння нелінійних квантових процесів, нестійких станів та механізмів релаксації у квантових системах. Крім того, квантова турбулентність має важливе значення для астрофізики, зокрема для дослідження внутрішньої структури нейтронних зір. Експериментальні дослідження цього явища здійснюються в умовах наднизьких температур — у діапазоні мілі-Кельвінів — із використанням надточних кріостатів [3, с. 4691–4696].

Квантові точки – це нанорозмірні структури, у яких електрони обмежені в просторі й поведуться як частинки в потенціальній ямі. За наднизьких температур у таких системах спостерігаються виражені квантові ефекти, зокрема тунелювання та кулонівська блокада. Тунельний струм між квантовими точками можна точно контролювати, що робить їх перспективними елементами для реалізації кубітів у квантових обчисленнях. Крім того, квантові точки є платформою для дослідження спінових станів, обмінних взаємодій та когерентності квантових систем. Ефективне охолодження до мілі-Кельвінів є критично важливою умовою таких експериментів, оскільки дозволяє усунути теплові збурення й забезпечити стабільність квантових станів [4].

Умови наднизьких температур дають можливість спостерігати квантове тунелювання частинок під час хімічних реакцій, що у звичайних умовах є майже неможливим. Такі дослідження мають велике значення для астрохімії, адже умови в міжзоряному просторі подібні до лабораторного надохолодження. Зокрема, стало можливим моделювати реакції, які відбуваються на поверхнях космічного пилу. Аналізуючи ці процеси, вчені отримують нові дані про походження молекул у космосі та механізми утворення складних органічних сполук.[4]

Топологічні надпровідники – це новий клас матеріалів, у яких реалізуються стани з топологічним захистом, стійкі до локальних збурень. Однією з найцікавіших властивостей є можливість реалізації майоранівських ферміонів – квазічастинок, які можуть стати основою для топологічних квантових комп'ютерів. Ці частинки мають незвичну симетрію та не піддаються локальній декогеренції, що робить їх перспективними для зберігання квантової інформації. Для спостереження майоранівських мод потрібні низькі температури

та специфічні надпровідні структури. Станом на сьогодні дослідження таких матеріалів є в центрі уваги багатьох лабораторій світу.[1]

Квантові явища при наднизьких температурах виходять за межі традиційної фізики, відкриваючи шлях до глибшого розуміння природи та створення новітніх технологій – від квантових комп'ютерів до надчутливих сенсорів. Розвиток методів охолодження й контролю квантових систем відкриває нові можливості для науки й техніки, що може призвести до проривів у сферах обчислень, енергетики, медицини та космосу. Наднизькі температури дають змогу повністю розкрити суть квантової механіки.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Contributors to Wikimedia projects. (n.d.). *BCS theory* – Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/BCS_theory
- [2] Бардін, Дж., Купер, Л. Н., & Шріффер, Дж. Р. (1957). Теорія надпровідності. *Фізичний огляд*, 108(5), 1175–1204.
- [3] Волмслі, П. М., Змеєв, Д. Є., Пакпур, Ф., & Голов, А. І. (2014). Динаміка квантової турбулентності різних спектрів. *Праці Національної академії наук США*, 111(13), 4691–4696. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1400033111>
- [4] Фоа Торрес, Л. Е. Ф., Левенкофф, С. Х., & Паставські, Х. М. (2003). Когерентне та послідовне тунелювання електронів у квантових точках. *Physical Review Letters*, 91(11), Article 116801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.116801>
- [5] Шевченко, А. Б. (2020). Квантові фазові переходи в надпровідниках. *Фізика низьких температур*, 46(8), 785–799. <https://doi.org/10.1063/10.0001660>