

# ЯВИЩЕ НАДПЛИННОСТІ: ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ

Вишняченко Сергій, Сальник Ірина

*Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені  
Володимира Винниченка, Кропивницький, Україна*

**Анотація.** Явище надплинності має цікаву історію відкриття та дослідження. Властивості матеріалів в надплинному стані мають своє практичне застосування та є перспективним напрямом у розробці наноструктур. У статті розглянуто ретроспективу дослідження надплинного стану, починаючи від Камерлінг-Оннеса, теорії надплинного стану та напрями сучасних досліджень явища. Встановлено, що не зважаючи на тривалу історію дослідження, механізм явища ще до кінця не вивчений.

**Ключові слова:** надплинність, гелій, в'язкість, кріофізика

## ***THE PHENOMENON OF SUPERFLUIDITY: HISTORY OF DISCOVERY AND CURRENT STATE OF RESEARCH***

***Vyshniachenko S., Salnyk I.***

*Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Abstract.** The phenomenon of superfluidity has an interesting history of discovery and research. The properties of materials in the superfluid state have their practical application and are a promising area in the development of nanostructures. The article considers a retrospective of the study of the superfluid state, starting with Kamerling-Onnes, the theory of the superfluid state and the directions of modern research of the phenomenon. It is established that despite the long history of the study, the mechanism of the phenomenon is not yet fully understood.

**Key words:** superfluidity, helium, viscosity, cryophysics

**Постановка проблеми.** Зміни, що відбуваються в розвитку техніки та технологій в останні десятиліття, вражають як своєю науковою новизною, так і швидкістю втілення нових ідей в життя. На очах одного покоління відбуваються кардинальні зміни не лише в технічному переоснащенні високотехнологічних галузей, а й навколишнього середовища буття людини, що цілком спирається на відкриття в науці. Якщо порівнювати розвиток вже самої науки як окремої галузі впродовж її історії, що по суті налічує не більше 300-400 років, то стає очевидним, що він лише прискорюється. Як зазначає академік Локтев В.М., особливо помітним це прискорення стало у другій половині минулого століття, і немає жодних сумнівів, що в найближчому майбутньому воно, як мінімум, не загальмується. [2]

Порівнюючи роль різних природничих наук в розвитку суспільства, досить легко переконатися, що провідне місце серед них, посідає фізика. Відкриті фізиками закономірності лежать в основі усіх інших процесів. Багато фундаментальних відкриттів фізики відноситься до ХХ століття (яке так і

називають «століттям фізики») та початку ХХІ століття. Серед них, на думку багатьох вчених, виділяються такі, як квантова теорія, штучне ділення ядер, транзисторний ефект, винахід лазера, створення напівпровідникових гетероструктур та ін. До явищ, які докорінно змінили розвиток технологій, на нашу думку, відносяться також дослідження надпровідного стану та надплинність.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Теоретичні основи дослідження надплинності були закладені ще у працях нідерландського фізика Г. Камерлінг-Оннеса, більш відомого відкриттям надпровідного стану речовини [8, 9]. Проводячи експериментальні дослідження при низьких температурах він зробив кілька важливих спостережень (1911 р.): виміряв густину гелію, і встановив, що вона є максимальною за температури 2,17 К, а теплоємність рідкого гелію нижче цієї температури дуже сильно змінюється. Пізніше важливі експерименти проводили польські вчені В.Х.Кеєзом та М.Вольфке. Пояснення явища надплинності та дослідження його властивостей проводили П.Еренфест, Д.Ф.Аллен [7], Г.Джонс, Д.Мізенер, П.Капіца, Л.Тисса, Л.Ландау, а також відомі українські фізики І.М.Халатніков, М.М.Боголюбов. Сучасні дослідження пов'язані з іменами Д.Таулеса, Д.Голдейна, Д.Костерліца та нашого земляка В.Березінського.

**Метою статті** є історичний огляд вивчення явища надплинності та сучасного стану досліджень в цій галузі.

**Виклад основного матеріалу.** Теорія надплинності, як і теорія надпровідності була відкрита несподівано. Фізики не очікували на відкриття такого явища. Парадоксальним є й те, що, це явище було відкрито на 27 років пізніше, ніж явище надпровідності, але його тлумачення було здійснено раніше. В цьому заслуга великої кількості науковців, які працювали в галузі фізики низьких температур в різних країнах світу.

Надплинність – це характерна властивість рідини з нульовою в'язкістю, тобто рідини, яка тече без втрати кінетичної енергії. При перемішуванні надтекуча рідина утворює вихори, які продовжують обертатися необмежено довго. Надтекучість спостерігається у двох ізотопів з гелію, коли вони охолодженні до криогенних температур. У надплинному стані гелій безперешкодно витікає крізь найменші тріщини та навіть здатний підійматися

стінками посудини і переливатися через край під дією капілярних сил. Тобто так само як і у надпровідності зникає опір, у надплинності – тертя. Ця властивість також притаманна іншим екзотичним станам матерії, які існують в астрофізиці, фізиці високих енергій і теоріях квантової гравітації.

Дослідження надпровідності та надтекучості безпосередньо пов'язані із розвитком фізики низьких температур – кріофізики. Формування уявлень про низькі температури, їх отримання і вимірювання відносяться до початку XVIII ст. Однак у саме поняття «низькі температури» вкладався інший зміст, який поступово змінювався з роками. Так, наприклад, наприкінці XIX ст. низькими вважалися температури у діапазоні 90–50 К. А зараз за низькі температури прийнято вважати температури нижче точки кипіння рідкого повітря (80 К), наднизькі – нижче 0,3 К.

З другої половини XIX по першу половину XX ст. єдиним значним та провідним центром, де проводилися дослідження під впливом низьких температур, була Лейденська лабораторія, в якій працював видатний науковець, піонер у галузі вивчення низьких температур Г. Камерлінг-Оннес [4, 5, с. 56]. У цій лабораторії він вивчав властивості матеріалів під дією наднизьких температур. 10 липня 1908 р. Г. Камерлінгу-Оннесу вдалося вперше у світі отримати зріджений гелій при температурі 4,2 К.

З 1911 р. Г. Камерлінг-Оннес експериментально вивчав характер залежності густини рідкого гелію від температури. Багаторічні дослідження (до 1924 року) дозволили зафіксувати цікаві властивості, які проявляє речовина при низьких температурах. У 1924 р. у спільних експериментах разом з Дж. Боксом науковцями була зафіксована максимальна густина при температурі 2,19 К. Наступного року вчений у спільних експериментах з Дж.Свеллоу та К. Кромелліним отримав значення критичної густини при критичній температурі. Також було зафіксоване дуже цікаве явище – вільне перетікання рідкого гелію з однієї посудини в іншу (рис.1). Це явище отримало назву ефекту Камерлінг-Оннеса.

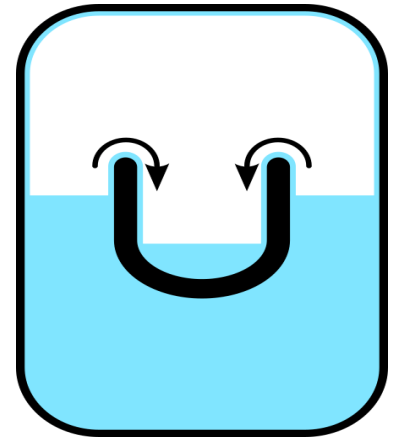


Рис.1. Гелій II буде «повзати» по поверхнях, щоб знайти свій власний рівень — через деякий час рівні в двох контейнерах зрівняються [12].

З 1926 р. директором Лейденської криогенної лабораторії стає В.Х. Кеезом, який продовжив дослідження Г. Камерлінга-Оннеса, та вже у цьому ж році

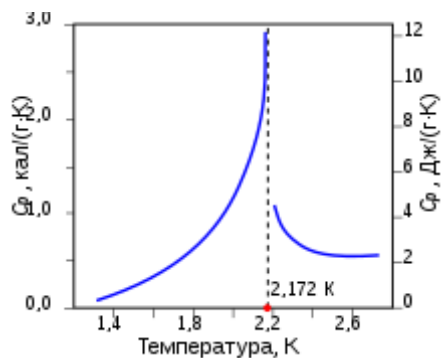


Рис.2. Графік теплоємності рідкого гелію поблизу  $\lambda$ -точки [11]

науковцем було отримано гелій у твердому стані. У 1928 р. ученим разом із М.Вольфке виявлено фазовий перехід рідкого гелію I при температурі 2,19 К, нижче якої він переходить у квантову рідину – гелій II [3, с. 15–16]. Температура, при якій цей фазовий перехід відбувається отримала назву  $\lambda$ -точка, через характерну форму графіків багатьох параметрів у цій точці (рис.2.). Головною

особливістю гелію II Кеезом називав надвисоку теплопровідність, що перевищувала теплопровідність міді при тій же температурі у десятки разів. Проведені вимірювання дали можливість встановити, що такі величини як діелектрична проникність, теплопровідність та теплоємність рідкого гелію роблять різкий стрибок біля критичної температури. Так на базі досліджень та

відкриттів науковців Лейденської лабораторії були закладені основи вивчення нових явищ – надпровідності та надплинності.

Наступним кроком у вивченні явища надплинності стало відкриття ефекту фонтанування гелію II Д.Ф.Алленом та Г.Джонсом у 1938 році.

У 1938 році Петром Капіцою, і, незалежно від нього, Джоном Алленом і Доном Мізенером було показано, що гелій II має нульову, або близьку до нульової, в'язкість. Капіца для цього досліджував протікання через надтонкі щілини, а Аллен і Мізенер – через тонкі капіляри. Обидві статті були опубліковані в одному номері *Nature*. Саме нульовою в'язкістю пояснювалися і надвисока теплопровідність, і інші незвичайні властивості рідкого гелію [12].

В цьому ж році була запропонована перша макроскопічна феноменологічна теорія надплинності розроблена американським фізиком Л.Тиссою та радянськими фізиками Л.Д.Ландау й І.М.Халатніковим, яка стала першою спробою пояснення цього явища. Згідно цієї теорії гелій II є сумішшю двох компонент, звичайної і надплинної. При цьому надплинна компонента має температуру абсолютного нуля, і її кількість зменшується з нагріванням. Перехід з основного в збуджений стан пов'язувався з квазічастинками ротонами і фононами, спектр яких мав мати особливу форму. Теорія Ландау-Халатнікова добре описувала поведінку гелію II. «За його піонерські теорії конденсованих середовищ й особливо рідкого гелію» у 1962 році Л.Д.Ландау отримав Нобелівську премію.

Однак описана теорія не пояснювала внутрішній механізм цього явища. Складність полягала в необхідності врахування взаємодії між частинками, тому за об'єкт дослідження найдоцільніше було взяти неідеальні бозе-системи. За цією ідеєю й була розроблена та представлена у 1946 р. українським вченим М.М.Боголюбовим мікроскопічна теорія надплинності. Ученим було розтлумачено той факт, що надпровідність можна розглядати як надтекучість електронного газу. У 1958 р. на основі цих уявлень він передбачив новий фундаментальний ефект надплинності ядерної матерії, що є суттєвим для сучасної теорії ядра. Важливим був й подальший розвиток даних розробок,

зокрема побудова М.М.Боголюбовим у 1957 р. математично строгого обґрунтування мікроскопічної теорії надпровідності, яку незадовго до цього розробили Дж.Бардін, Л.Купер та Дж.Шриффер (теорія БКШ) [1, 6].

Подальші дослідження були пов'язані із встановленням надплинних властивостей гелію 3 та гелію 4. Температура виродження для рідкого гелію 3 складає лише кілька кельвінів, тому вчені очікували, що за температури у кілька мікрокельвінів гелій 3 може перейти у надплинний стан.

Тільки у 1972 році кріогеніка розвинулася достатньо, щоб підтвердити, що за температури 2,6 мК і тиску у 34 атмосфери гелій 3 переходить в надплинний стан. За це досягнення (відкриття надплинності гелію 3) у 1996 році Дуглас Ошеров, Роберт Річардсон і Девід Лі отримали Нобелівську премію з фізики. Теорія надплинності рідкого гелію 3 була розроблена О.О.Абрикосовим, В.Л.Гінзбургом та Е.Леггетом, за що вони отримали Нобелівську премію 2003 року.

У 2009 році групою вчених з Массачусетського технологічного інституту продемонстровано перехід ультраохолоджених атомів рубідію в стан, що отримав назву надплинне тверде тіло (суперсолід), існування якого було передбачено ще у 1969 році.

2016 року Нобелівську премію з фізики дали за «теоретичне дослідження топологічних фазових переходів і топологічного стану речовини» трьом американським фізиком британського походження – Девіду Таулесу (David J.Thouless), Дункану Голдейну (F.Duncan M. Haldane) та Джону Костерліцю (J.Michael Kosterlitz). Вони показали, що навіть у тонких плівках можна спостерігати надпровідність та надплинність, а не лише в об'ємних, тривимірних системах, як вважали до того. Двовимірні системи чи матеріали – це ті, в яких одна розмірність значно менша за інші, – настільки, що навіть електронам не вистачає місця там рухатися. Як плівка завтовшки кілька атомних шарів. А це перехід до наноструктур.

Сучасні дослідження пов'язані із експериментальним встановленням надплинності гелію 4. Такі пошуки проводять вчені багатьох країн та

університетів, зокрема, Мозес Чен із Пенсільванського державного університету (США) та Юн Шон Кім з Корейського інституту наук і технологій (Теджон, Південна Корея), Джон Реппі з Корнельського університету (США), Юн Шон Кім, Кімітоші Коно з Науково-дослідного інституту RIKEN (Вако, Японія), Себастьян Балібар, фізик із Ecole Normale Supérieure (Париж, Франція) та інші. Отже, напрям залишається актуальним і цікавить фізиків. Це пов'язано також із можливістю практичного використання властивостей таких речовин.

Попри те, що гелій є вельми специфічним матеріалом, його надплинні властивості дають можливість досліджувати, як атоми та молекули поведуться за низьких температур у хімічно інертному середовищі. Наприклад, нанокраплі з нього активно використовуються як основа для експериментів з молекулами і атомами за температур, нижчих одного кельвіна (тобто нижче за  $(-272,15)^{\circ}\text{C}$ ), де ті зможуть утворювати кластери через зіткнення. Також гелієві нанокраплі легко піддаються іонізації, тому фізики можуть використовувати методи від електронної іонізації до фотоіонізації лазерами на вільних електронах [10].

**Висновки.** І надтекучість, і надпровідність – явища, широко поширені в природі. Надтекучість виявлена не тільки в рідинах, але й у вироджених газах, а також в рідкокристалічному рубідії. Існують роботи, в яких обґрунтовується наявність надплинності в нейтронних і кваркових зірках. Незважаючи на багатолітню історію як теоретичних, так і експериментальних досліджень таких явищ, багато їх аспектів чи механізмів досі залишаються недостатньо зрозумілими й слугують предметом запеклих наукових дискусій по всьому світу.

### Список використаної літератури

1. Литвинко А.С. Життєвий та творчий шлях академіка Миколи Миколайовича Боголюбова (до 100-річчя від дня народження). Наука та наукознавство, 2009, № 3. С. 66-79.
2. Локтєв В.М. Фізика у ХХІ столітті. Режим доступу: <https://kpi.ua/931-2-foto#:~:text=%D0%97%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B8%2C%20%D1%89%D0%BE%20%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B1%D1%83%D0%B2%D0%B0%D1%8E%D1%82%D1%8C%D1%81%D1%8F%20%D0%B2%20%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BA%D1%83.%D0%9E%D0%B1%D0%B0%D0%BC%D0%B0%2C%20%D1%8F%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D1%83%20%D0%BA%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%BD%D1%96%20%D1%86>
3. Наука и техника СССР, 1917–1987 гг.: Хроника. Москва : Наука, 1987. 759 с.
4. Овчаренко Ю. С. Історія кріофізики в Україні : монографія / НААН, ННСГБ ; наук. ред. В. А. Вергунов. Харків : ФОП Панов А. М., 2019. 168 с.
5. Овчаренко Ю.С. Становлення та розвиток кріофізики в Україні (30-ті рр. ХХ ст. – початок ХХІ ст.). Дис. на здобуття ступеня канд. іст. наук. Київ, 2018. 262 с.

6. Творець теоретичної і математичної фізики: до 110-річчя від дня народж. акад. М. М. Боголюбова / [Д. В. Аносов та ін. ; редкол.: Б. Є. Патон (голова) та ін.] ; НАН України, Ін-т теорет. фізики ім. М. М. Боголюбова, Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського. Київ: Академперіодика, 2019. 530 с.

7. Allen J. F., Misener A. D. Flow of Liquid Helium II. *Nature* volume 141, page 75 (1938) <https://www.nature.com/articles/141075a0>

8. Kamerlingh Onnes H., Further experiments with liquid helium, B. On the change of resistance of pure metals at very low temperatures, etc. Communication No. 119 from the Physical Laboratory at Leiden, Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Proceedings of the Section of Sciences, volume XII (1911), pp. 1107-1113. - <https://web.archive.org/web/20101108175847/http://www.knaw.nl/waals/kamerlingh.html>

9. Kamerlingh Onnes H., The liquefaction of helium (image-pdf of the original article 1.423 Kb). Communication No. 108 from the Physical Laboratory of Leiden, Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Proceedings of the Section of Sciences, volume XI (1908), pp. 168-185. - [https://web.archive.org/web/20070607010649/http://www.knaw.nl/waals/pdf/kamerlingh\\_proc11\\_helium.pdf](https://web.archive.org/web/20070607010649/http://www.knaw.nl/waals/pdf/kamerlingh_proc11_helium.pdf)

10. Martini P., Albertini S., Laimer F., Meyer M., Gatchell M., Echt O., Zappa F., and Scheier P. Splashing of Large Helium Nanodroplets upon Surface Collisions. *Phys. Rev. Lett.* 127, 263401, 2021. - <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.263401>

11. <https://wp-uk.wikideck.com/%D0%9D%D0%B0%D0%B4%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C>

12. <https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Надплинність.html>