

DOI <https://doi.org/10.11603/m.2414-5998.2025.1.15368>
УДК 378.147.1:004

В. Д. Дідух

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5002-0830>

Ю. А. Рудяк

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1836-9132>

А. Б. Горкуненко

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2021-006X>

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України

ІСТОРІЯ СТАНОВЛЕННЯ Й РОЗВИТКУ МЕДИЧНОЇ ФІЗИКИ (КВАНТОВА МЕХАНІКА) (ЧАСТИНА 5)

V. D. Didukh, Yu. A. Rudyak, A. B. Horkunenko

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine

THE HISTORY OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF MEDICAL PHYSICS (QUANTUM MECHANICS) (PART 5)

Анотація. У статті висвітлено історичні етапи розвитку медичної фізики з акцентом на квантову механіку. Розглянуто ключові досягнення й відкриття, які сприяли становленню цієї науки, а також їх вплив на медичну діагностику й терапію. Неможливо переоцінити внесок лауреатів Нобелівської премії з фізики Нільса Бора, Макса Планка, Альберта Айнштейна та інших визначних учених у розвиток квантової механіки. Показано зв'язок між енергетичною світністю абсолютно чорного тіла та його абсолютною температурою, на основі якого розроблено термографи. Розглянуто впровадження квантово-механічних методів у медико-біологічні дослідження. Особлива увага приділена ролі квантової механіки в розробленні методів флуоресцентної мікроскопії та дослідженні молекулярних взаємодій.

Медична фізика є міждисциплінарною наукою, яка на перетині фізики й медицини розглядає фундаментальні принципи, що визначають роботу живих систем. Одним із найважливіших етапів її розвитку стало становлення квантової механіки, яка змінила уявлення про природу елементарних частинок і хвильові процеси. Стаття є продовженням циклу досліджень, присвячених історії медичної фізики, і зосереджується на ролі квантової механіки у формуванні сучасних діагностичних і терапевтичних методів.

У статті розглянуто етапи становлення й розвитку квантової механіки як частини медичної фізики. Розвиток цього напрямку дав поштовх до появи таких технологій, як магнітно-резонансна томографія, фотолюмінесцентний аналіз, електронний мікроскоп тощо. У наступних статтях буде розглянуто історичні аспекти появи радіоактивності, зокрема її відкриття, розказано про винахідників, які за нею стоять, висвітлено наукові досягнення, які розвинуто.

Ключові слова: історія; медична фізика; квантова механіка; хвильово-корпускулярний дуалізм; теорія.

Abstract. The article highlights the historical stages of the development of medical physics with an emphasis on quantum mechanics. It examines key achievements and discoveries that contributed to the establishment of this science, as well as their impact on medical diagnostics and therapy. The contribution of Nobel Prize laureates in physics, such as Niels Bohr, Max Planck, Albert Einstein, and other prominent scientists, to the development of quantum mechanics cannot be overestimated.

The relationship between the energy radiance of a black body and its absolute temperature is demonstrated, forming the basis for the development of thermographs. The introduction of quantum mechanical methods in biomedical research is also considered. Particular attention is paid to the role of quantum mechanics in the development of fluorescence microscopy methods and the study of molecular interactions.

Medical physics is an interdisciplinary science at the intersection of physics and medicine, which explores the fundamental principles governing living systems. One of the most important stages in its development was the emergence of quantum mechanics, which revolutionized the understanding of elementary particles and wave processes. This article continues a series of studies dedicated to the history of medical physics, focusing on the role of quantum mechanics in shaping modern diagnostic and therapeutic methods.

This article examines the stages of the formation and development of quantum mechanics as a part of medical physics. The advancement of this field has led to the emergence of technologies such as magnetic resonance imaging, photoluminescence analysis, the electron microscope, and others. Future articles will explore the historical aspects of radioactivity, including its discovery, the inventors behind it, and the scientific achievements that have been further developed.

Key words: history; medical physics; quantum mechanics; wave-particle duality; theory.

Вступ

*Якщо квантова механіка вас не шокує,
значить ви її ще не зрозуміли.*
Нільс Бор

Медична фізика є міждисциплінарною наукою, яка на перетині фізики й медицини розглядає фундаментальні принципи, що визначають роботу живих систем. Одним із найважливіших етапів її розвитку стало становлення квантової механіки, яка змінила уявлення про природу елементарних частинок і хвильові процеси. Стаття є продовженням циклу досліджень, присвячених історії медичної фізики, і зосереджується на ролі квантової механіки у формуванні сучасних діагностичних і терапевтичних методів.

Мета дослідження – аналіз історичних етапів становлення квантової механіки та її інтеграції у медичну фізику. Дослідження акцентує увагу на ключових відкриттях і концепціях, які стали основою для сучасних медичних технологій, а також на їх впливі на розуміння фізичних основ медичних процесів.

Теоретична частина. У 1879 році австрійський фізик і математик Йозеф Стефан установив залежність між енергетичною світністю платинового дроту R і його абсолютною температурою T :

$$R = \sigma \cdot T^4,$$

де σ – стала Стефана-Больцмана,

$$\sigma = 5,6710 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$



Рис. 1. Йозеф Стефан



Рис. 2. Людвіг Больцман

Теоретично обґрунтував цю залежність, відому як закон Стефана-Больцмана, у 1884 р. учень

Йозефа Стефана австрійський фізик Людвіг Больцман: енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертій степені його температури.

Вільгельм Він дослідив, що довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності, обернено пропорційна абсолютній температурі тіла (закон зміщення Віна):

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

де $\lambda_{\max}$ – довжина хвилі (у метрах), на якій енергія випромінювання максимальна,

T – абсолютна температура,

b – постійна Віна, $b = 2.897 \cdot 10^{-3} \text{ мК}$.

У 1911 р. за відкриття законів теплового випромінювання В. Віну була присуджена Нобелівська премія.

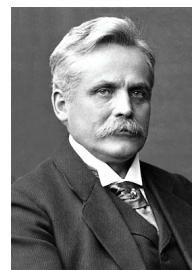


Рис. 3. Вільгельм Він

У Нобелівській лекції Вільгельм Він (1866–1938) сказав: «Як нам відомо, рентгенівські промені створюються при ударі електронів об тверді тіла, так що їх довжина хвилі повинна бути функцією швидкості електронів. Згідно з кінетичною теорією газів, середня кінетична енергія молекул є мірою абсолютної температури. Якщо допустити, як це робиться в теорії електронів, що це правило має місце й для кінетичної енергії електронів, то електрична енергія катодних променів стала б мірою їхньої температури. Якщо обраховану таким чином температуру підставити в закон зміщення, то виявиться, що довжина хвилі максимум інтенсивності вказує на ту ділянку хвиль, де розміщені рентгенівські промені, що узгоджується з довжинами хвиль, знайдених за допомогою інших доказів».

Кірхгоф Густав Роберт (1824–1887) увів поняття абсолютно чорного тіла й відкрив у 1859 р. закон теплового випромінювання (закон Кірхгофа): відношення спектральної густини енергетичної світності до монохроматичного коефіцієнта поглинання для всіх тіл при цій температурі є постійною величиною, яка дорівнює спектральній густині енергетичної світності абсолютно чорного тіла:

$$\left(\frac{r_{\lambda}}{\alpha_{\lambda}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda}}{\alpha_{\lambda}} \right)_2 = \dots = \varepsilon_{\lambda}.$$

З формули випливає, що більше енергії випромінює те тіло, яке більше його поглинає.

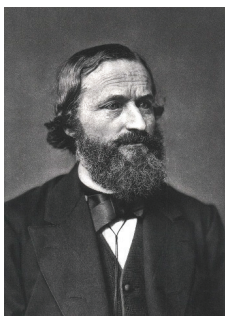


Рис. 4. Кірхгоф Густав Роберт

Про зв'язок між поглинальною та випромінювальною здатністю тіла ще згадував Ісаак Ньютон у лекціях з оптики: «Я знайшов, що всі кольори всіх тіл породжуються не інакше, як із деякої здатності до відбивання одних променів і пропускання інших. Тіло червоне тому, що воно найбільш відбиває промені, здатні до почервоніння, а багато інших пропускає, тіло біле тому, що відбиває всі промені, і чорне тому, що все пропускає й відбиває мізерну частку всіх видів променів».

У класичній фізиці випромінювання й поглинання енергії розглядалися як неперервні процеси.

Наприкінці XIX ст. зроблено низку спроб отримати формулу, що виражає густину енергетичної світності ε_λ абсолютно чорного тіла як функцію довжини хвилі λ і абсолютної температури T :

$$\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T).$$

Формулу, яка добре описує спектральну густину випромінювання абсолютно чорного тіла в ділянці великих довжин хвиль (малих частот), отримав Джон Релей:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}.$$

У науці заговорили про так звану «ультрафіолетову катастрофу», бо саме в ділянці коротких довжин хвиль спостерігалася невідповідність між чинними теоріями.

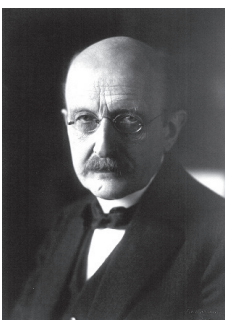


Рис. 5. Макс Планк

Вихід із цієї ситуації знайшов Макс Планк (Нобелівський лауреат 1919 р.), який висунув гіпотезу, що тіла випромінюють і поглинають енергію не неперервно, а певними дискретними порціями – квантами:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}.$$

Зв'язок між енергетичною світністю абсолютно чорного тіла і його абсолютною температурою встановлює закон Стефана-Больцмана: енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степені його температури:

$$E = \sigma T^4.$$

Закони теплового випромінювання становлять основу медичної термографії, яка дає змогу проводити вимірювання температури тіла без фізичного контакту з ним і визначати температуру різних його ділянок із точністю до десятих градуса.

Серед перших, які почали застосовувати тепловізори в медичній практиці, був і професор Тернопільського державного медичного інституту (нині – університет) Михайло Андрейчин (нині – академік НАМНУ) [1].

Георг Буш у 1922 р. висунув ідею створення електронного мікроскопа. Її появі сприяла гіпотеза, запропонована в 1924 р. французьким фізиком Луї Віктором де Бройлем (Нобелівський лауреат із фізики в 1929 р.), що елементарні частинки мають хвильові властивості, а також дослідження німецького фізика Х. Буша, який розробив у 1926 р. магнітну електронну лінзу.

Перший електронний мікроскоп створили в 1931 р. німецькі інженери Ернст Руска (Нобелівський лауреат з фізики в 1986 р.) і Макс Кнолл. Цей пристрій давав змогу досліджувати нанооб'єкти розміром 10 нм.

У камері мікроскопа, яка обладнана посудиною з рідким азотом, створюють високий вакуум (10^{-6} Па) для усунення взаємодії електронів з молекулами повітря. Пучок променів прискорюється різницею потенціалів порядку 200 кВ (для біологічних об'єктів) та управляється системою електромагнітних лінз так, щоб він потрапив на об'єкт, що досліджується. Та частина електронів, що не розсіялася, пройшовши через діафрагму, створює на екрані чи плівці збільшене зображення предмета. Електронні мікроскопи можуть збільшувати зображення у 2 млн разів.

Для електронного мікроскопа:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot u}},$$

де u – прискорювальна напруга, і роздільна здатність:

$$Z = \frac{0,5 \cdot h}{n \sin \varphi \sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot u}}.$$

Широко використовується в науково-дослідних лабораторіях прилад, який поєднує функції електронного мікроскопа й рентгенівського мікроаналізатора. Він дає інформацію про хімічний склад матеріалу дослідного зразка.



Рис. 6. Ернст Руска



Рис. 7. Макс Кнолл

Сканувальний електронний мікроскоп застосовують для дослідження поверхні об'єкта за допомогою вибитих електронним пучком вторинних електронів.

Рефлекторний електронний мікроскоп із відповідною системою детектування рентгенівських променів застосовують для дослідження хімічного складу об'єкта дослідження.

Відкрите Г. Гамовим явище «тунельного ефекту» (1928 р.) стало основою для створення

тунельного мікроскопа, за допомогою якого можна отримувати зображення поверхні твердого тіла на атомному рівні.

Це відкриття пояснює можливість подолання елементарними частинками енергетичного бар'єру й природу альфа-розпаду – тунелювання ядра гелію через потенціальний бар'єр, зумовлений сильною взаємодією, яка утримує нуклони важкого ядра. Лише через 3 роки після відкриття Г. Гамова створені прилади на основі тунельного ефекту: тунельні діоди, транзистори, термометри для вимірювання наднизьких температур, сканувальні тунельні мікроскопи.

Тунельний мікроскоп винайшли Герд Біннінг і Генріх Рорер, за що отримали Нобелівську премію з фізики в 1986 р. разом із винахідником електронного мікроскопа Ернстом Рускою.

Принцип роботи тунельного мікроскопа оснований на проходженні тунельного струму між тонким щупом і поверхнею. Щуп сканує поверхню, переміщуючись у горизонтальній і вертикальній площинах, що дає змогу досліджувати рельєф поверхні й наночастинки розміром 0,5 нм.



Рис. 11. Фріц Церніке

Фріц Церніке (1888–1966) розробив метод фазового контрасту, який оснований на використанні різниці фаз, яка утворюється при проходженні світла через різні структури дослі-



Рис. 8. Георгій Гамов

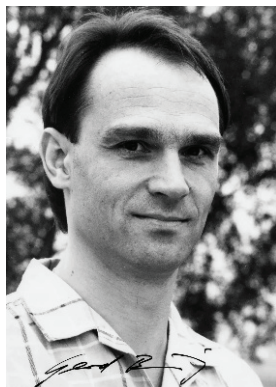


Рис. 9. Герд Біннінг

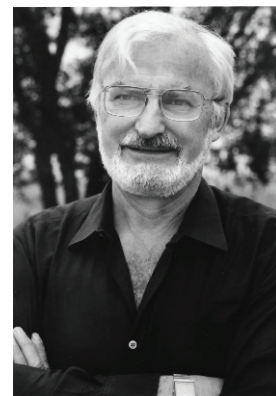


Рис. 10. Генріх Рорер

джуваного об'єкта, і створив фазоконтрастний мікроскоп, за що отримав у 1953 р. Нобелівську премію з фізики.

Фотолюмінесценцію вивчав англійський математик, механік і фізик Джорж Стокс (1819–1903), який установив, що фотолюмінесценціююча речовина випромінює світло, що має, як правило, більшу довжину хвилі, ніж те випромінювання, яке спричиняє люмінесценцію.

На явищі люмінесценції ґрунтується люмінесцентний аналіз, принцип якого такий: речовина або сама собою, або після відповідної дії дає характерне люмінесцентне світіння. За характером цього світіння можна, визначаючи інтенсивність лінії в спектрі, визначити не лише якісний, а й кількісний уміст досліджуваної речовини. Люмінесцентний аналіз дає змогу виявити наявність мізерних домішок порядку 10^{-11} в 13 досліджуваної речовини. Його в медицині застосовують для діагностики захворювань. При злоякісних хворобах люмінесценція уражених тканин, крові й сечі переважно яскравіша, ніж у здорових людей. Низка біологічно функціональних молекул, наприклад молекули мембранних білків, володіє флуоресценцією. Параметри флуоресценції чутливі до структури оточення флуоресціюючої молекули, тому за люмінесценцією можна вивчати хімічні перетворення й міжмолекулярну взаємодію.

Люмінесценція, що спричинюється екзотермічними (з виділенням тепла) хімічними процесами в речовині, називається хемілюмінесценцією. Окремим випадком хемілюмінесценції є біохемілюмінесценція – світіння, що супроводжує хімічні реакції біологічних об'єктів (світіння гнилих дерев, світлячків тощо). Біохемілюмінесценція виникає під час рекомбінації перекисних вільних радикалів ліпідів: збуджений продукт + квант біохемілюмінесценції. Інтенсивність біохемілюмінесценції значно змінюється при внесенні в досліджувані системи солей двовалентного заліза. Наприклад, якщо внести солі двовалентного заліза в плазму крові при апендициті й холециститі, то світіння в першому випадку значно слабшає. Отже, біохемілюмінесценцію можна використовувати як діагностичний метод. У разі опромінення сироватки крові ультрафіолетом біохемілюмінесценція зростає в здорових людей і спадає в онкологічних хворих [6].

Явище люмінесценції використовується в дослідженні хімічних перетворень під час діагностики деяких захворювань. Проникність капілярів шкіри можна визначити, увівши підшкірно люмінесцентні речовини, інтенсивність люмінесценції в суспензії мітохондрій зростає в момент уведення двовалентного заліза, що дає змогу діагностувати холецистит і гнійний апендицит. Люмінесценцію використовують для визначення

часу кровообігу в організмі; установлено, що у хворих на злоякісні хвороби флуоресцеїн виводиться з організму в десятки разів довше.

Широкого застосування набула люмінесцентна мікроскопія під час дослідження структури, біофізико-хімічного й функціонального стану клітин.

Люмінесцентний аналіз мікроскопічних об'єктів проводять за допомогою спеціальних люмінесцентних мікроскопів, у яких, замість звичайних джерел світла, використовуються ртутні лампи високого (150–400 мм рт. ст.) і надвисокого тиску, які мають два світлофільтри.



Рис. 12. Вигляд сучасного флуоресцентного мікроскопа

Один із них, розташований перед конденсором, виділяє ту частину спектра джерела світла, яка спричиняє люмінесценцію об'єкта. Інший, розташований між об'єктивом та окуляром, виділяє світло люмінесценції.

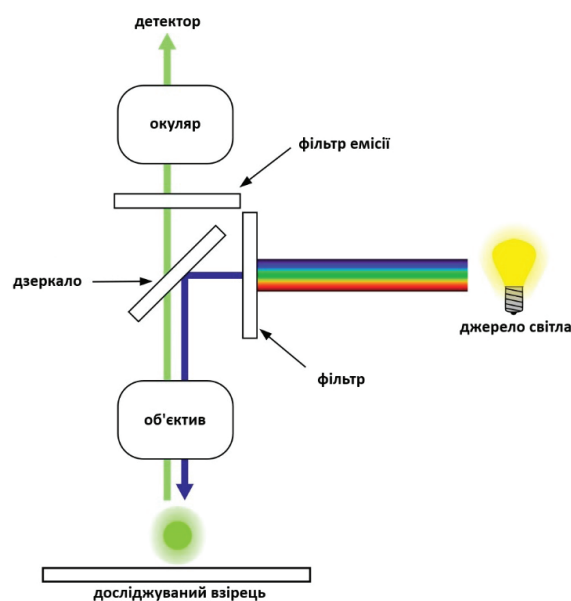


Рис. 13. Будова флуоресцентного мікроскопа

Основний принцип роботи флуоресцентного мікроскопа полягає в опроміненні зразка хвилями певної довжини, які викликають флуоресценцію зразка й дають змогу виділити набагато більш слабке випромінювання флуоресценції.

За створення флуоресцентної мікроскопії американські вчені Ерік Бетціг, Вільям Морнер

і німець Стефан Хелл у 2014 р. отримали Нобелівську премію з хімії.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У статті розглянуто етапи становлення й розвитку квантової механіки як частини медичної фізики. Розвиток цього напрямку дав поштовх появі таких технологій, як магнітно-резонансна



Рис. 14. Нобелівські лауреати 2014 р. (зліва направо: В. Морнер, С. Хелл, Е. Бетціг)

томографія, фотолюмінесцентний аналіз, електронний мікроскоп тощо. У наступних статтях буде розглянуто історичні аспекти появи радіоак-

тивності, а саме її відкриття, винахідники які за нею стоять та наукові досягнення, які було розвинуто.

Список літератури

1. Андрейчин М. Бібліографія. Тернопіль : ТДМУ. 2015. 112 с.
2. Білий М. Атомна фізика. Київ : Знання, 2009. 560 с.
3. Фізичні основи функціонування медичного обладнання / В.Д. Дідух та ін. Тернопіль: ТДМУ, 2015. 283 с.
4. Дідух В. Медична фізика, становлення та розвиток. Тернопіль, 2017. с. 44.
5. Медична та біологічна фізика / В.П. Марценюк та ін. Тернопіль : ТДМУ, 2012. 303 с.
6. Медична та біологічна фізика / В.І. Федів та ін. Чернівці : БДМУ, 2018. 192 с.
7. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. Київ : ВІПОЛ, 2001. 840 с.

8. Asimov I. The history of physics. New York : Walker, 1984. 762 p.
9. Bohr N. Niels Bohr Collected Works. Volume 2: Work on Atomic Physics (1912–1917). Amsterdam : North-Holland, 1981. 647 p.
10. De Broglie L. Sur les sentiers de la science. Paris : Albin Michel, 1960. 417 p.
11. Endo M. History of medical physics. *Radiol Phys Technol.* 2021. № 14 (4). P. 345–357.
12. Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics. Reading : Addison-Wesley, 1963. Vol. 1. 560 p.
13. Laue M. History of Physics. New York : Academic Press, 1950. 150 p.
14. Schrödinger E. What is life? The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press, 1944. 194 p.

References

1. Andreichyn, M. (2015). Bibliohrafiia [Bibliography]. Ternopil: TDMU. 112 p. [in Ukrainian]
2. Bilyi, M. (2009). Atomna fizyka [Atomic Physics]. Kyiv: Znannia. 560 p. [in Ukrainian]
3. Didukh, V.D. et al. (2015). Fizychny osnovy funktsionuvannia medychnogo obladnannia [Physical Basis of Medical Equipment Functioning]. Ternopil: TDMU. 283 p. [in Ukrainian]
4. Didukh, V. (2017). Medychna fizyka, stanovlennia ta rozvytok [Medical Physics, Formation and Development]. Ternopil. 44 p. [in Ukrainian]
5. Martseniuk, V.P. et al. (2012). Medychna ta biolohichna fizyka [Medical and Biological Physics]. Ternopil: TDMU. 303 p. [in Ukrainian]

6. Fediv, V.I. et al. (2018). Medychna ta biolohichna fizyka [Medical and biological physics]. Chernivtsi: BDMU. 192 p. [in Ukrainian]
7. Chalyi, O.V. (2001). Medychna i biolohichna fizyka [Medical and Biological Physics]. Kyiv: VIPOL. 840 p. [in Ukrainian]
8. Asimov, I. (1984). The history of physics. New York: Walker. 762 p.
9. Bohr, N. (1981). Niels Bohr Collected Works. Volume 2: Work on Atomic Physics (1912–1917). Amsterdam: North-Holland. 647 p.
10. De Broglie, L. (1960). Sur les sentiers de la science [On the paths of science]. Paris: Albin Michel. 417 p. [in French]

11. Endo, M. (2021). History of medical physics. Radiol Phys Technol, 14(4), 345–357.

12. Feynman, R.P., Leighton, R.B., & Sands, M. (1963). The Feynman Lectures on Physics (Vol. 1). Reading: Addison-Wesley. 560 p.

13. Laue, M. (1950). History of Physics. New York: Academic Press. 150 p.

14. Schrödinger, E. (1944). What is life? The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press. 194 p.

Отримано 11.02.2025

Електронна адреса для листування: horkunenkoab@tdmu.edu.ua