

## ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ МІКРОСВІТУ

*У статті розглядаються питання зародження, становлення та розвитку фізики мікросвіту від відкриття катодних променів і до становлення основних властивостей мікросвіту. Такий підхід сприяє усвідомленню логічного зв'язку між поняттями природи електричного струму, носіями електричного заряду в різних середовищах, властивостями елементарних частинок, вихідними з яких були тліючий розряд та катодні промені. Пропонуються елементи методики вивчення такого ланцюжка у профільній школі.*

**Ключові слова:** катодні промені, мікросвіт, дуалізм, властивості мікросвіту, електричний струм, профільна школа, методика навчання фізики.

*В статье рассматриваются вопросы зарождения, становления и развития физики микромира от открытия катодных лучей и до становления основных свойств микромира. Такой подход способствует осмыслению логической связи между понятиями природы электрического тока, носителями электрического заряда в разных средах, свойствами элементарных частиц, исходящими которых были тлеющий разряд и катодные лучи. Предлагаются элементы методики изучения такой цепи в профильной школе.*

**Ключевые слова:** катодные лучи, микромир, дуализм, свойства микромира, электрический ток, профильная школа, методика обучения физике.

*This paper deals with the origin, formation and development of chain concepts of physics of the micro world, which originates from the discovery of cathode rays, to ascertain their nature, the discovery of the electron, X-rays, radioactivity, and other elementary particles and the formation of the basic properties of micro particles. This approach promotes awareness of students of specialized schools logical connection between the concepts of the nature of electric current, electric charge carriers in different environments, properties of elementary particles, which were the source of the glow discharge and cathode rays. We offer the technique for the study of such a chain in profile school.*

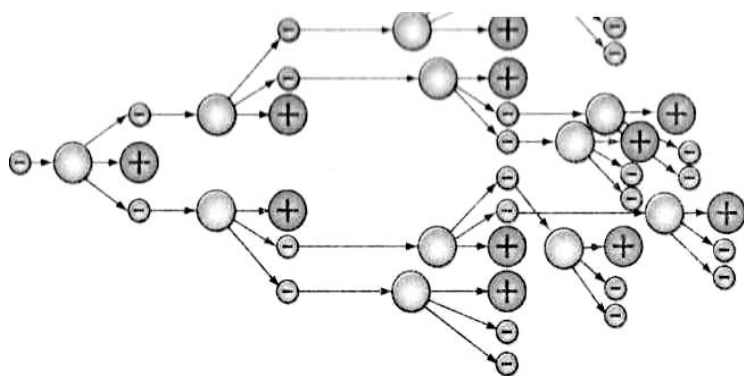
**Key words:** cathode rays, microcosm, duality, the properties of micro, electric current, profile school.

**Постановка проблеми.** Друга половина ХХ – початок ХХІ століття значно наблизила людство до розуміння проблем мікросвіту, теоретичного обґрунтування його явищ, процесів, взаємоперетворень. Основи такого розуміння, безумовно, закладаються у середніх загальноосвітніх навчальних закладах. На нашу думку, вивчення питань фізики атома, ядра, елементарних частинок, Всесвіту доцільно організовувати не на завершальному етапі навчання фізики, а здійснювати пропедевтику цього впродовж всього шкільного курсу фізики. В цьому зв'язку особливого значення набуває тема «Струм у різних середовищах», звідки бере початок відлік етапів розвитку фізики атома, ядра, елементарних частинок. Бо якраз там йдеться мова про першу відкриту в фізиці елементарну частинку – електрон.

Фундамент електроніки було закладено працями фізиків в ХVІІІ–ХІХ ст. Перші в світі дослідження електричних розрядів у повітрі провели 1752 р. академіки М. В. Ломоносов і Г. В. Рихман у Росії та незалежно від нього американський вчений Б. Франкель. Ще раніше у 1743 р. М. В. Ломоносов в оді «Вечірні міркування божому величчю» виклав ідею про електричну природу блискавки й північного сяйва. Він також встановив, що електричні розряди є у повітрі й добував іскри за відсутності грози із використанням «громової машини». Вона має будову Лейденської банки.

Після створення Г. Гейслером вакуумних трубок його товариш використав їх для дослідження спектрів поглинання і випромінювання різних газів. У 1857 році Ю. Плюккер помітив три тонкі спектральні лінії водню так званої серії Бальмера. Його учень І. В. Гитторф провів перші дослідження катодних променів, які продовжив англієць Крукс.

Д. Д. Томсон для продовження дослідження спектрів різних речовин створив Кавендишську лабораторію. Там працювали Д. Таундсен, Ф. Астон, Е. Резерфорд, У. Крукс, О. Річардсон та інші.



*Рис. 1*

Було встановлено, що при тиску до: 50 мм рт. ст. виникає іскровий розряд; 0,5 мм рт. ст. – плазмовий шнур; 0,02 мм рт. ст. – суцільна смужка потоку електронів – тліючий розряд; 10–4 мм рт. ст. виникають катодні промені (потік електронів із катода). За подальшого зниження тиску розряд припиняється, бо довжина вільного пробігу електрона перевищує розміри трубки.

У 1895 році німецький фізик Вільгельм Конрад Рентген (1845–1923), вивчаючи властивості катодних променів відкрив рентгенівське випромінювання.

Після цього здійснено відкриття радіоактивності, електрона, пояснено закони теплового випромінювання, фотоефект, створена планетарна будова атома, а глибоке вивчення властивостей електрона привело у першій чверті ХХ ст. до створення квантової механіки.

В цей же період Г. Лоренц та А. Пуанкаре сформулювали принцип відносності, і вже відома була скінченність швидкості світла.

Відкриття закону збереження маси та електричного заряду ввійшли у фізику в 1919 р. швидко і без заперечень, коли Е. Резерфорд провів перше штучне розщеплення атомного ядра азоту, бомбардуючи його альфа-частинками:  ${}^7\text{N}^{14} + {}^2\alpha^4 \rightarrow {}^8\text{O}^{17} + {}^1\text{p}^1$

Перераховані наукові факти класична фізика пояснити не могла, і вони стали основою для молодих вчених різних країн щодо створення нової фізики, нових математичних моделей, які б могли пояснити нові відкриття й у граничному випадку переходити у класичні.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Розвиток сучасної теорії фізики розпочався з перегляду процесів елементарного обміну енергією. Традиційний неперервний процес обміну енергією в класичній фізиці, в квантовій виявився дискретним. Квантові характер має як випромінювання й поглинання, так і речовина. Протягом першого десятиріччя свого існування квантова теорія розв'язала три фізичні проблеми, де класична фізика було безсила: фотоефект, теорія теплоємності і теорія атома. Відкриті О. С. Столетовим закони фотоефекту були узагальнені теорією А. Ейнштейна та дослідниками І. Ф. Іоффе, П. І. Лукірським, С.С. Прилежаєвим. Квантова теорія узагальнила результати дослідницької роботи П. Дюлонга і А. Пті, Р. Клаузуса, Д. Максвелла, Л. Больцмана, В. Томсона, Д. Джінса, Д. Релея, Г. Лоренца. Теоретичні й експериментальні роботи Е. Резерфорда, Н. Бора, Д. Франка, Г. Герца, М. Планка М. Склодовської-Кюрі та П. Кюрі привели до створення Л. де Бройлем, Е. Шредингером та Г. Гейзенбергом квантової механіки, яка описувала поведінку електрона в атомі.

**Мета статті** полягає у постановці проблеми методики навчання зародження, становлення та розвитку фізики мікросвіту від відкриття катодних променів і до становлення основних властивостей мікросвіту. Такий підхід сприяє усвідомленню логічного зв'язку між поняттями природи електричного струму, носіями електричного заряду в різних середовищах, властивостями елементарних частинок, вихідними з яких були тліючий розряд та катодні промені.

Виклад основного матеріалу. У 1924 р. Л. де Бройль узагальнив дослідження фізичних явищ та процесівучених, починаючи з 1840-х років і у докторській дисертації висунув ідею, яка ґрунтувалася на оптико-механічній аналогії Гамільтона (1834 р.). Сутність її полягалав тому, що траєкторія руху частинки масою  $m$  і енергією  $E$ , яка рухається у потенціальному полі  $\Phi(x, y, z)$  аналогічна траєкторії світлових променів у

середовищі з показником заломлення  $n(x, y, z)$ . Він вбачав, що ця аналогія знаходить свій прояв у математичних моделях фізичних процесів у вигляді диференціальних рівнянь, які описують як рух частинки, так і поширення світлової хвилі. Показник заломлення  $n$  виявляється пропорційним виразу  $\sqrt{2m(E - \Phi)}$ . Л. де Бройль побачив у цій аналогії не лише формальну модельну схожість математичного опису законів руху хвиль і матеріальних частинок, але й глибокий фізичний зміст, що закони руху мікрочастинок повинні бути такими, щоб рівняння, які їх описують, відображали подвійну природу цих частинок – хвильову і корпускулярну, бо такий дуалізм органічно властивий всім без виключення частинкам атомного масштабу. Прикладом може бути фотон, який веде себе і як частика, і як хвиля: «Хвильова механіка народилась в результаті зусилля, спрямованого до того, щоб зрозуміти істинну природу дуалізму хвиль і корпускул, який зовсім визначено проявився експериментально, але залишився незрозумілим теоретично у фотоефекті й в інтерпретації його Ейнштейном. Роздумуючи над цим питанням, я прийшов до думки, що дуалізм хвилі і корпускул є, напевне, загальним і що не повинно бути ніякої суттєвої різниці, в крайньому випадку з цієї точки зору, між фотонами і другими корпускулами. Коротше кажучи, моя відправна ідея полягала в тому, щоб асоціювати поширення хвилі з рухом всякої корпускули; я надіявся, таким чином, що, асоціюючи хвилю з рухом електрона, мені вдасться інтерпретувати квантові умови, які в атомній теорії Бора визначили можливості руху електронів в атомах. Дійсно, в цих умовах виникають цілі числа аналогічні тим, які у хвильових теоріях проявляються в умовах інтерференції і резонансу» [3, с. 8]. Вчений поширив співвідношення між енергією й імпульсом, частотою і довжиною хвилі для фотона на рух будь-якої мікрочастинки.

Проникнення у світ атома, елементарних частинок, яке розпочалось з відкриття катодних променів, привело до виявлення закономірностей прояву їх властивостей. Однією з них є визначення місцезнаходження частинки. У класичній фізиці утвердилось поняття траєкторії руху тіла. У квантовій механіці можна говорити про ймовірність знаходження частинки у даному місці простору. Ця ймовірність рівна  $|\Psi|^2 dV$ , де  $|\Psi|^2$  – амплітуда хвилі, яка зв'язана з рухом електрона. Сама хвильова функція залежить від просторових координат і часу, одержується в результаті розв'язку рівняння Шредінгера.

В. Гейзенберг встановив іншу властивість мікросвіту – співвідношення неозначеностей. Воно стверджує, що не існує такого стану фізичної системи, в якому дві динамічні змінні: координата й імпульс або енергія й час мають певне визначене значення, якщо ці змінні канонічно спряжені у відповідності до вимог рівняння Гамільтона. Таким чином, встановлена квантомеханічна границя точності одночасного вимірювання вказаних пар

величин. «Нерівність Гейзенберга указує границі застосування класичного способу опису. Але вони, безумовно, не ставлять якихось границь для більш досконалих способів опису фізичних явищ і більш повного пізнання властивостей фізичних об'єктів» [11, с. 10–11]. Неозначеність Гейзенберга не зв'язана з недосконалістю вимірювальної техніки, а виражає об'єктивні закономірності мікросвіту і є наслідком відкритого Л. Де Бройлем корпускулярно-хвильового дуалізму матерії.

Наступна властивість – квантування енергії, була встановлена М. Планком. Н. Бор у 1913 р. встановив властивість квантування моменту імпульсу в якості постулату при розгляді поведінки електрона в атомі водню. Відповідно й імпульс має дискретний характер, що було доведено дослідями з ефекту Комптона.

Між змістом поняття енергія та імпульс в класичній і квантовій фізиці є суттєва різниця. Рух тіла у класичній механіці визначається трьома координатами та траєкторією руху і описується диференціальними рівняннями. Інтегралі цих рівнянь дають три класичні закони збереження: енергії, імпульсу, моменту імпульсу.

В квантовій механіці енергія та імпульс мають свій зміст. Енергія та імпульс уже не є функціями координат і швидкостей. Ці величини набувають самостійного значення і мають інше визначення: енергія як  $h\nu$ , а імпульс –  $h/\lambda$ .

Д. Бом писав: «Незалежна фізична властивість речовини, яка в класичній межі визначає потенціальну здатність створювати кількість руху, або, в більш загальному формулюванні, – це величина, однозначно зв'язана з довжиною хвилі де Бойля і статистично з просторово-часовим рухом матерії. Відповідно, коли ми говоримо, що електрон має певний імпульс, то це твердження має таке ж значення, як і твердження, що він займає дане положення. Тому ми повинні вважати, що імпульс і енергія – це властивості, які притаманні матерії, властивості, які не можуть бути безпосередньо представлені, але яким просто дані назви імпульсу й енергії» [1, с. 188].

Якщо у класичній механіці причиною зміни швидкості є сила, то у квантовій першопричиною руху матерії є імпульс. У мікросвіті немає прямого зв'язку між силою і хвильовими властивостями матерії. Звідси фундаментальна роль імпульсу з визначення статистично середнього шляху руху частинки [1, с. 189].

З виникненням квантової фізики виникла проблема справедливості в новій теорії класичного закону збереження енергії. Перші такі сумніви виникли у зв'язку з відкриттям явища радіоактивності. При вивченні властивостей елемента радій помітили, що його температура дещо вища за температуру оточуючого середовища. Виникло непорозуміння утворення енергії з нічого. У 1902 році Е. Резерфорд та Ф. Содді також показали, що при поділі ядра здійснюється виділення енергії.

Наступною проблемою було пояснення явищ інтерференції та дифракції частинок квантовою теорією. Вперше з цією трудностю стикнувся Н. Бор при застосуванні його постулату про випромінювання та поглинання світла атомом. Згідно хвильової теорії електромагнітна енергія переноситься неперервно хвилями, а за постулатом – дискретно. Тому постулат не міг бути приведений до хвильової теорії. Тоді Н. Бор разом з Г. Крамерсом і Д. Слетером у 1924 р. висунули гіпотезу, згідно якої процеси елементарних актів випромінювання і поглинання здійснюються незалежно один від другого, а закон збереження енергії виконується лише для великої кількості випромінювачів як середньостатистичною. Науковий світ з цим не погодився. За рік до висунення гіпотези американський вчений Комптон провів досліди з розсіювання електронів і підтвердив справедливність законів збереження для елементарних актів з точки зору квантового підходу.

У 1928 р. П. Дірак виявив недолік у застосуванні рівняння Шредингера до перетворень Лоренца у теорії відносності, тобто у релятивістських процесах. Для рівняння  $E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4}$  при  $p=0$   $E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4}$  має місце частинка з протилежним до електрона знаком. Цю частинку назвали позитроном. Так теоретично була відкрита перша античастинка. До такого висновку П. Дірак дійшов виходячи з законів збереження енергії та імпульсу. Розвиток ідеї П. Дірака привело до формулювання принципу інваріантності відносно зарядового спряження, наслідком якого є висновок, що для кожної частинки існує зарядово-спряжена частинка або античастинка. Вільний електрон не може повністю поглинути енергію фотона, бо тоді разом з фотоном повинен зникнути і його імпульс. Тому для того, щоб одночасно виконувався закон збереження енергії та імпульсу необхідна присутність третьої частинки. Якщо електрон входить до складу атома, є зв'язаним, то поглинання фотона електроном стає можливим з народженням нової частинки – позитрона. Можливий і зворотній процес, але з виконанням законів збереження. В рідких випадках пара електрон-позитрон може анігілювати на три фотони. Тоді виконуються всі три закони збереження: енергії, імпульсу, моменту імпульсу. Таке можливе, коли електрон і позитрон при зустрічі до анігіляції, деякий час обертається навколо загального центра інерції, утворюючи своєрідний комплекс – позитроній. Тут важливо врахувати напрямки спінів [12, с. 82–85].

Альфа і гамма-розпад радіоактивних речовин без особливих труднощів пояснювався квантовою теорією. При альфа-розпаді з ядра вилітають альфа-частинки (ядро гелію складається із двох протонів та двох нейтронів), і нових частинок не народжується, бо протони й нейтрони в ядрі вже є. При гама-розпаді з ядра вилітає нова  $\gamma$ -частинка (ядро атома звільняється від надлишкової енергії), яка не була раніше в ньому.

Складніше було з бета-розпадом – з ядра вилітає електрон. Н. Бор

зробив спробу пояснити цей розпад випускання ядром електронів, які раніше не були в ньому, обмеженням дії законів збереження. Такий висновок був зроблений на основі того, що енергія, імпульс і момент імпульсу руху початкового ядра не рівні цим величинам продуктів розпаду: нового ядра і електрона. Баланс указаних величин за кожним актом розпаду давав різні величини, ядро одного і того ж радіоактивного ізотопу випромінює електрони різної енергії: від максимальної до нульової, хоч кінцеве ядро завжди має одну й ту ж енергію. Початкове ядро в результаті повного радіоактивного перетворення втрачає в цілому одну і ту ж енергію рівну максимальній енергії випроміненого електрона. Перед вченими виникло запитання: куди дівається енергія у випадку, коли енергія електрона менша максимальної? Такий же висновок було зроблено і для імпульсу, і для моменту імпульсу.

Проблему намагались вирішити Л. Мейтнер у 1922 р. та Ч. Елліс, У. Вустер у 1927 р., але позитивного результату вони не досягли.

Н. Бор у 1930 р. робить висновок, що при бета-розпаді не виконуються всі три закони збереження. Наслідком цього може бути катастрофічний висновок, що ядро не є квантовою системою. Щоб спасти ситуацію Н. Бор пропонує припущення, що закони збереження виконуються лише для статистично великої кількості таких актів, а в елементарних актах вказані закони не виконуються. Заперечив гіпотезу насамперед В. Паулі: «На мій погляд, ця гіпотеза не лише незадовільна, але навіть недопустима. Насамперед, в цих процесах закон збереження заряду виконується, а не бачу обґрунтування вважати збереження заряду більш фундаментальним, ніж збереження енергії і імпульсу» [10, с. 393]. У 1931 році на конференції у Пасадені В. Паулі доповів ученим: «Закони збереження виконуються, так як випромінювання бета-частинок супроводжується проникаючою радіацією із нейтральних частинок... Сума енергій бета-частинки і нейтральної частинки..., випромінюючих ядрами в окремому акті, рівна енергії, відповідній верхній границі бета-спектру. Саме собою розуміється, що ми допускаємо у всіх елементарних процесах не тільки збереження енергії, але й збереження імпульсу і моменту кількості руху» [2, с. 194]. Таким чином, В. Паулі постулював нову елементарну частинку і передбачив деякі її властивості. Пізніше вона була названа нейтрино. Гіпотеза нейтрино дозволила відстояти закон збереження моменту імпульсу руху в ядрі.

Запропонована В. Гейзенбергом та Д.І. Іваненко протонно-нейтронна модель будови ядра не дозволяла електронам бути в ядрі, вони народжуються при бета-розпаді. Теорія ядра говорить, що спін вихідного ядра в одиницях  $\frac{h}{2\pi}$  рівний одиниці, спін електрона дорівнює половині, а орбітальний момент кількості руху електрона може бути лише цілим числом  $\frac{h}{2\pi}$ . Тому в процесі бета-розпаду цілий спін ядра повинен переходити в напівцілий і навпаки. Це означає порушення закону

збереження моменту кількості руху. Дослідження спінів ядра, електронів привели до висновку, що нова частинка повинна мати спін  $\frac{1}{2}$ . Тоді закони збереження повністю виконуються. Нейтрино компенсувало недостачу як енергії так і спіну.

Так у фізиці елементарних частинок стало утверджуватись правило: якщо виявляються процеси, в яких нібито не виконується закон збереження енергії, імпульсу, моменту імпульсу, то необхідно шукати нову, раніше невідому елементарну частинку, яка має компенсаційні властивості.

Гіпотеза Н. Бора про статистичне виконання закону збереження енергії в бета-розпаді була спростована у 1933 р. дослідями Ч. Елліса і Н. Мотта, а у 1934 р. Е. Фермі створив завершену теорію бета-розпаду. У вільному стані американський вчений Ф. Рейнс протягом 1953–1955 рр. виявив нейтрино у вільному стані. У 1934 р. І. Є. Тамм пояснив за допомогою створеної ним бета-теорії природу сил, які утримують разом частинки ядра і дійшов до існування частинки, яку пізніше визначив Х. Юкава.

**Висновки і перспективи.** В ході розгляду проблем навчання фізики мікросвіту ми пропонуємо підхід, який ґрунтується на наскрізному вивченні властивостей елементарних частинок з врахуванням принципу історизму. Розгляд питань мікросвіту ми пропонуємо, починаючи з першого уявлення про електричний струм. В наступному електричний струм стає інструментом дослідження елементарних частинок, починаючи з катодних променів, які є потоком електронів. Такого логічного ланцюжка у шкільних підручниках не простежується. У навчальних програмах на розділ «Електричний струм» відводиться 10 годин для рівня стандарту, 16 – для академічного та 38 – для профільного рівнів, де відводиться час на вивчення струму у повітрі та газах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бом Д. Квантовая теория. / Д. Бом. – М. : Физматгиз, 1961. – С. 188–189.
2. Гельфер Я. М. Законы сохранения. / Гельфер Я. М. – М. : Наука, 1967. – 264 с.
3. Л. де Бройль. Введение в волновую механику. / Л. де Бройль. – Харьков : 1932. – С. 8.
4. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів: Фізика. 7–9 класи. 7–9 класи. – К. : Видавничий дім «Освіта», 2013. – 32 с.
5. Програми для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика. Астрономія. 7–12 класи. – Київ : Ірпінь, 2005. – 80 с.
6. Садовий М. І. Історія фізики з перших етапів становлення до початку ХХІ століття: навч. посібн. [для студ. ф.-м. фак. вищ. пед. навч. закл.] / М. І. Садовий, О. М. Трифонова. – Кіровоград : ПП «Центр оперативної



- поліграфії «Авангард», 2013. – [2-ге вид. переробл. та доп.] – 436 с.
7. Садовий М. І. Окремі питання сучасної та традиційної фізики: [навч. посібн. для студ. пед. навч. закл. осв.]. / М. І. Садовий, О. М. Трифонова. – Кіровоград : Вид-во ПП «Каліч О. Г.», 2007. – 138 с.
  8. Садовий М.І. Співвідношення перервного та неперервного у науці фізика: [посібн. для викл. та студ. пед. вищ. навч. закл., учителів середніх навч. закл. осв.]. / Садовий М. І. – Кіровоград : Сабоніт, 2008. – 160 с.
  9. Садовий М. І. Теоретичні і методичні основи становлення і розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи: дис. ... доктора пед. наук: 13.00.02 / Садовий Микола Ілліч. – К., 2001. – 517 с.
  10. Теоретическая физика 20 века. – М. : Иностранная литература, 1962. – С. 393–396.
  11. Фок В. А. Квантовая физика и строение материи. / В. А. Фок – Ленинград : Издательство ЛГУ, 1965. – С. 10–11.
  12. Щелкин К.И. Физика микромира. / К. И. Щелкин. – М. : Атомиздат, 1965. – С. 82–90.