

**Міністерство освіти і науки України**  
**Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна**  
**Фізичний факультет**

**Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця**

«Допущено до захисту»

Оцінка « \_\_\_\_\_ »

Зав. кафедри теоретичної фізики

Голова ЕК

імені академіка І. М. Ліфшиця

\_\_\_\_\_ Рашба Г. І.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

\_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

Клим Марта Романівна

**Формування уявлень квантової фізики в інтегрованому курсі**  
**"Природничі науки" для 10-11 класів закладів загальної середньої**  
**освіти**

Кваліфікаційна робота на здобуття  
освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр»  
спеціальність 104-«фізика та астрономія»  
освітньо-наукова програма «фізика»

\_\_\_\_\_

*(підпис студента)*

Науковий керівник – професор кафедри  
теоретичної фізики імені академіка  
І.М.Ліфшиця, д-р фіз.-мат.н., доц. З.Майзеліс

\_\_\_\_\_

*(підпис керівника)*

**Харків 2025**

## Анотація

Клим М.Р. Формування уявлень квантової фізики в інтегрованому курсі "Природничі науки" для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти. – Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за спеціальністю 104 – фізика та астрономія. Харків: ХНУ імені В.Н.Каразіна, 2025.- 38с.- Іл.5

У роботі обґрунтовано актуальність вивчення елементів квантової фізики як фундаментальної основи сучасної науково-технічної картини світу. Проаналізовано зміст чинних навчальних програм і виявлено ключові методичні труднощі, пов'язані з високим рівнем абстракції матеріалу, відсутністю наочних аналогів і необхідністю адаптації складного математичного апарату.

Розроблено методику пояснення ключових понять (квантування енергії, фотоефект, корпускулярно-хвильовий дуалізм, тунельний ефект) із застосуванням якісного підходу та мінімально необхідних кількісних співвідношень. Обґрунтовано доцільність використання інтерактивних симуляцій PhET Interactive Simulations як основного засобу візуалізації невидимих явищ мікросвіту та інструменту для проведення віртуальних досліджень (фотоефект, інтерференція електронів).

Систематизовано навчальні задачі різного рівня складності. Для обдарованих учнів розроблено методику розв'язування задач підвищеної складності (зокрема, оціночні задачі на принцип невизначеності та Ефект Комптона), що сприяє розвитку наукового мислення та підготовці до участі в олімпіадах. Запропонована методика відповідає вимогам компетентнісного підходу та забезпечує формування цілісного світогляду старшокласників.

**Ключові слова:** квантова фізика, інтегрований курс, методика навчання, PhET симуляції, візуалізація, корпускулярно-хвильовий дуалізм, принцип невизначеності, дослідницька компетентність.

## Abstract

Klym M. Developing Students' Understanding of Quantum Physics within the Integrated "Natural Sciences" Course for Grades 10–11 in General Secondary Education. – Manuscript.

The thesis is for getting Master of Science degree, speciality 104 – «Physics and Astronomy». Kharkiv: – V.N.Karazin Kharkiv National University, 2025. –38p. - Fig.5.

This work substantiates the relevance of studying elements of quantum physics as a fundamental basis for the modern scientific and technological worldview. The content of the current educational programs was analyzed, and key methodological difficulties related to the high level of material abstraction, the lack of visual analogies, and the necessity of adapting complex mathematical formalism were identified.

A methodology for explaining key concepts (energy quantization, photoelectric effect, wave-particle duality, tunneling effect) was developed using a qualitative approach and the minimum necessary quantitative relations. The expediency of using PhET Interactive Simulations was substantiated as the main tool for visualizing invisible phenomena of the microworld and as an instrument for conducting virtual experiments (photoelectric effect, electron interference).

The educational problems were systematized by complexity level. For gifted students, a methodology for solving advanced problems (including estimation problems based on the Uncertainty Principle and the Compton Effect) was developed, contributing to the growth of scientific thinking and preparation for Olympiads. The proposed methodology complies with the requirements of the competency-based approach and ensures the formation of a holistic worldview for high school students.

**Keywords:** quantum physics, integrated course, teaching methodology, PhET simulations, visualization, wave-particle duality, uncertainty principle, research competence.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>Розділ 1. Огляд літератури</b>	
<b>1.1.</b> Роль квантових уявлень у формуванні сучасної природничо-наукової картини світу учнів.....	8
<b>1.2.</b> Місце квантової фізики в шкільній освіті та інтегрованому курсі «Природничі науки».....	9
<b>1.3.</b> Аналіз навчальних програм і методичних підходів до вивчення квантової фізики.....	12
<b>Розділ 2. Методика формування уявлень про квантову фізику</b>	
<b>2.1.</b> Особливості методики пояснення основних понять квантової фізики.....	15
<b>2.2.</b> Використання типових задач у процесі засвоєння теми .....	18
<b>2.3.</b> Організація навчального процесу під час вивчення квантової фізики в інтегрованому курсі.....	23
<b>Розділ 3. Практичні аспекти викладання квантової фізики</b>	
<b>3.1.</b> Приклади задач і демонстрацій для формування уявлень про квантові явища.....	26
<b>3.2.</b> Методика роботи з обдарованими учнями: факультативні заняття та розв’язування олімпіадних задач .....	29
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	34
<b>Список використаних джерел</b> .....	35

## Вступ

Квантова фізика є одним із найдинамічніших напрямів сучасної науки, що формує основу розвитку високотехнологічних галузей – від мікроелектроніки й нанотехнологій до квантових сенсорів, лазерної техніки, медичного обладнання та систем захищеного зв'язку. Її ідеї докорінно змінюють уявлення про природу матерії, а стрімкий прогрес у галузі квантових обчислень, матеріалознавства та спектроскопії підтверджує значення квантової механіки як ключового компонента сучасної наукової картини світу [1]. У цих умовах особливої актуальності набуває завдання формування в учнів базових уявлень про квантові явища та їх застосування.

Система освіти сьогодні має оперативно реагувати на виклики суспільства, що вимагає розвитку критичного мислення, творчості, уміння моделювати складні системи та працювати з абстрактними поняттями. Концепція «Нової української школи» орієнтує педагогів на формування компетентностей, необхідних у XXI столітті, зокрема наукової грамотності, здатності до дослідницької діяльності та розуміння сучасних технологічних процесів [2]. Упровадження інтегрованого курсу «Природничі науки» у 10-11 класах робить питання викладання квантової фізики ще актуальнішим, оскільки саме в цьому курсі учні вперше системно знайомляться з основами мікросвіту.

Попри важливість теми, формування уявлень про квантову фізику в учнів старшої школи супроводжується низкою методичних труднощів. Квантові явища не мають безпосередніх аналогій у повсякденному досвіді, що ускладнює їх інтуїтивне сприйняття. Брак навчальних годин, інтегрований характер курсу та необхідність узгодження змісту з іншими природничими дисциплінами можуть призвести до фрагментарності знань. Тому особливого значення набуває обґрунтування ефективної методики пояснення ключових понять квантової фізики, вибір дидактично доцільних задач і демонстрацій, а також форм організації навчального процесу, що відповідають віковим та когнітивним можливостям учнів[3].

Інтеграція природничих дисциплін створює широкі можливості для формування цілісних уявлень про квантові явища. Так, у хімії квантові моделі пояснюють будову атома й природу хімічного зв'язку; у біології – механізми фотосинтезу та роботу візуальних рецепторів; у астрономії – спектри зір та процеси в космічних об'єктах; у технічних і інженерних напрямках – принципи роботи напівпровідникових лазерів, сонячних батарей і квантових сенсорів. Такий міжпредметний підхід сприяє розвитку цілісного світогляду й показує практичне значення квантової фізики для сучасної людини [4].

Важливою складовою навчання є також використання навчальних і ключових задач, що дозволяють учневі не лише засвоїти теоретичний матеріал, а й навчитися застосовувати його на практиці. Систематичне розв'язування задач на хвильові властивості частинок чи принцип невизначеності сприяє розвитку логічного мислення та формує вміння аналізувати нові ситуації за допомогою засвоєних моделей [5].

У зв'язку з цим **актуальним** стає комплексне дослідження методики формування уявлень про квантову фізику в умовах інтегрованого курсу старшої школи.

**Об'єкт дослідження:** складова квантової фізики в процесі навчання в старшій школі.

**Предмет дослідження:** методи реалізації змісту квантової фізики та система адаптованих задач, що забезпечують формування уявлень про квантові явища в інтегрованому курсі «Природничі науки».

**Мета дослідження:** розробити та обґрунтувати методику формування початкових уявлень про квантову фізику, яка враховує специфіку інтегрованого курсу та когнітивні можливості учнів.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1. проаналізувати зміст чинних навчальних програм щодо викладання квантової фізики;
2. визначити особливості методики пояснення основних понять квантової механіки на рівні шкільної освіти;

3. обґрунтувати ефективні форми й методи організації навчання в інтегрованому курсі;
4. розробити приклади задач, демонстрацій та навчальних ситуацій для засвоєння квантових явищ.

**Гіпотеза** дослідження полягає в тому, що формування уявлень про квантові явища буде ефективнішим за умови використання структурованих пояснень, міжпредметних зв'язків, проблемно-дослідницьких методів та системи ключових задач, адаптованих до рівня навчальних досягнень учнів.

**Методи дослідження:** аналіз навчальних програм і методичних джерел, порівняльно-педагогічний аналіз, узагальнення практичного досвіду, розроблення навчальних матеріалів.

Наукова **новизна** полягає в складанні адаптованих задач підвищеної складності, розв'язання яких можливе шкільними методами та забезпечує глибше розуміння принципів квантової фізики в межах шкільної програми.

**Практичне значення** полягає в можливості використання запропонованої методики і задач учителями фізики, авторами навчально-методичних матеріалів та закладами освіти, що реалізують інтегроване навчання природничих наук.

## 1. Огляд літератури

### 1.1 Роль квантових уявлень у формуванні сучасної природничо-наукової картини світу учнів

Сучасний етап розвитку науки характеризується глибоким переосмисленням фундаментальних уявлень про природу, значною мірою зумовленим становленням і розвитком квантової механіки. Від початку ХХ століття її здобутки докорінно змінили природничо-наукову картину світу, запропонували нові моделі будови матерії, принципи взаємодії частинок і фізичний зміст енергії та простору [6]. Квантова фізика стала не лише окремою галуззю знань, а й методологічною основою сучасної фізики, хімії, матеріалознавства, біофізики, астрофізики та нанотехнологій. Це зумовлює потребу інтегрувати її ключові ідеї в зміст шкільної освіти [3].

Розвиток квантових уявлень став можливим завдяки низці фундаментальних відкриттів: відкриттю квантів енергії М. Планком, обґрунтуванню фотоефекту А. Ейнштейном, моделі атома Н. Бора, хвильовій механіці Е. Шредінгера та принципу невизначеностей В. Гайзенберга. Подальші дослідження пов'язані з формуванням квантової теорії поля, вивченням спіну, статистик Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна, відкриттям квантової природи надпровідності та надплинності [7]. Усе це не лише розширило межі фізики, а й вплинуло на формування інтегрованої картини світу – такої, що поєднує фізичні, хімічні, біологічні та астрономічні процеси на єдиній теоретичній основі.

У сучасному науковому пізнанні квантова фізика стала спільною платформою для різних природничих дисциплін. Так, у хімії квантова механіка пояснює природу хімічного зв'язку, електронну будову атомів і молекул, механізми реакцій. У біології квантові ефекти виявлені у фотосинтезі, процесах трансферу енергії, стабільності ДНК та роботі ферментів. Астрофізика використовує закони квантової статистики для опису зоряної еволюції, а геофізика – для моделювання властивостей матеріалів у надекстремальних умовах. Така наукова інтеграція свідчить про те, що сучасна

природнича освіта не може існувати без включення базових квантових концепцій[3].

На рівні шкільної освіти інтеграція природничих наук зумовлена також реалізацією Концепції «Нова українська школа», яка орієнтує навчальний процес на формування цілісних уявлень про природу, розвиток компетентностей і міжпредметних зв'язків [2]. Запровадження інтегрованого курсу «Природничі науки» у 10-11 класах створює умови для вивчення квантових явищ не ізольовано, а в контексті взаємозв'язку фізичних, хімічних, біологічних та географічних процесів. Такий підхід дозволяє не лише розширити зміст навчання, а й формувати міжпредметні вміння учнів: аналізувати складні системи, працювати з моделями, застосовувати знання у нових ситуаціях.

У старшій школі така інтеграція дає змогу формувати у школярів науковий світогляд, що відповідає сучасному рівню розвитку науки. Учні отримують можливість розуміти, що на мікрорівні діють закони, відмінні від класичних, і саме вони визначають властивості макрооб'єктів. Це сприяє розвитку системного мислення, інтересу до наукової діяльності та підвищенню природничої грамотності [5].

Таким чином, інтеграція природничих наук у старшій школі невіддільна від представлення основ квантової фізики. Включення квантових уявлень у зміст курсу «Природничі науки» забезпечує цілісність навчального процесу, створює умови для міжпредметної взаємодії та сприяє формуванню компетентностей, пов'язаних із критичним мисленням, моделюванням, аналізом і застосуванням наукового знання. Усе це визначає актуальність подальших досліджень методичних підходів до формування уявлень з квантової механіки у старшокласників.

## **1.2 Місце квантової фізики в шкільній освіті та інтегрованому курсі «Природничі науки».**

У системі шкільної освіти старших класів вивчення елементів квантової фізики набуває все більшої методичної та світоглядної ваги. По-перше, квантова фізика як розділ науки виступає своєрідним мостом між класичною фізикою й сучасними технологіями, тому вона має бути інтегрована до навчального змісту [6].

Методично важливо, що поняття квантової фізики дозволяють піднести навчальний зміст на рівень абстрактного мислення, що особливо відповідає потребам старшої школи. Для учнів старшої школи вагомим значення набуває розвиток формального теоретичного мислення, у зв'язку з вивченням квантових явищ [8].

Квантова механіка має надзвичайно глибоку та нетривіальну теоретичну структуру. Її центральні ідеї – дискретність, невизначеність, хвильово-корпускулярний дуалізм – суперечать повсякденному досвіду, що створює значні когнітивні бар'єри для школярів [9]. Ці особливості ускладнюють формування адекватних уявлень навіть за якісного викладу, оскільки більшість явищ мікросвіту не має класичних аналогів.

Популярні фільми, література і медіа часто використовують терміни «паралельні світи», «квантовий стан», «суперпозиція» у некоректних значеннях. Такі уявлення формують у школярів спотворені очікування – від надмірної романтизації до хибних інтерпретацій [9]. Замість того щоб ігнорувати це явище, потрібно використовувати інтерес до наукової фантастики як мотиваційний ресурс.

Місце квантової фізики в старшій школі визначається також її виховним потенціалом. Її вивчення формує в учнів науковий світогляд, що ґрунтується на усвідомленні закономірностей природи, об'єктивності наукового пізнання та ролі експерименту в розвитку науки. Через ознайомлення з історією становлення квантової теорії учні розуміють, як змінювалися наукові уявлення, як відбувається пошук істини, як людство долає межі пізнання [6].

Це має велике значення для виховання поваги до науки, її гуманістичних і культурних цінностей.

Інтеграція елементів квантової фізики в курс «Природничі науки» відповідає сучасним освітнім цілям. Учні не лише засвоюють нові знання, а й навчаються мислити системно, розглядати природні явища у взаємозв'язку, застосовувати наукові підходи до розв'язання реальних проблем. Знайомство з ідеями квантової фізики формує готовність до сприйняття нових технологічних досягнень, сприяє професійній орієнтації на науково-технічну сферу.

Водночас важливо забезпечити поступовість і доцільність включення квантової фізики до навчального процесу. Вивчення має базуватись на ґрунтовному засвоєнні класичних розділів фізики – механіки, електродинаміки, термодинаміки, адже саме вони формують поняттєвий апарат, необхідний для розуміння квантових явищ [5]. Учні мають осягнути, що квантова фізика не заперечує класичну, а розширює її межі, описуючи ті явища, де класичні закони вже не діють. Таке розуміння сприяє усвідомленню еволюції наукових знань і єдності природничої картини світу [5].

Історично вивчення квантової механіки розпочиналося студентами-фізиками лише на старших курсах університету, оскільки для опанування її апарату необхідна ґрунтовна математична підготовка. Повноцінне розуміння квантовомеханічного формалізму неможливе без знання диференціальних рівнянь у частинних похідних, роботи з комплексними числами та засад лінійної алгебри в гільбертових просторах [1]. Такий обсяг математичних засобів не входить до шкільної програми, тому в закладах загальної середньої освіти неможливо будувати навчання на строгому математичному описі квантових явищ. З цієї причини для шкільного рівня використовують ширший термін «квантова фізика», який акцентує увагу не на формалізмах, а на фундаментальних ідеях та якісних закономірностях [1].

В світі сучасні курси квантової фізики для старшої школи за структурою наближені до університетських вступних дисциплін, орієнтованих на

студентів нефізичних спеціальностей. У них основний зміст складають історія становлення квантової теорії, базові експерименти та ключові концепції. [1]

З практичного погляду, квантова фізика у шкільній освіті сприяє формуванню прикладних навичок, які можуть бути корисними в майбутній професійній діяльності. Вона знайомить учнів із технологіями, що лежать в основі сучасної електроніки, лазерної техніки, медицини, зв'язку, енергетики. Таким чином, вивчення квантових явищ має не лише теоретичне, а й практичне значення, адже демонструє, як фундаментальні знання перетворюються на реальні інновації, що змінюють життя суспільства [8].

Отже, квантова фізика займає важливе місце в шкільній освіті, зокрема в інтегрованому курсі «Природничі науки» для 10-11 класів. Вона поєднує у собі пізнавальну, світоглядну та виховну функції, розвиває інтелектуальні здібності учнів і формує цілісне бачення природничо-наукової картини світу. Її вивчення сприяє підготовці молоді до життя в умовах науково-технічного прогресу та формує основу для подальшої освіти у сфері науки і технологій. Квантова фізика не лише розкриває глибші рівні природи, але й допомагає учням зрозуміти власне місце у світі, який стає дедалі більше заснованим на наукових знаннях.

### **1.3 Аналіз навчальних програм і методичних підходів до вивчення квантової фізики.**

Вивчення основ квантової фізики у межах курсу «Природничі науки» у старшій школі України регламентується чинними навчальними. На сьогодні однією з діючих програм є програма, затверджена наказом Міністерства освіти і науки України № 1407 від 23 жовтня 2017 року, автором якої є авторський колектив під керівництвом Тетяни Засекіної [10]. З 2027 навчального року планується впровадження профільної старшої школи, однією з затверджених програм є програма, автором якої є Світлана Бабій [11]. Обидва документи спрямовані на формування в учнів наукового світогляду та цілісного розуміння закономірностей природи, проте відрізняються підходами до

структурування змісту, методики подання матеріалу та ролі учня у процесі пізнання.

Програма авторського колективу під керівництвом Тетяни Засекіної визначає курс «Природничі науки» як інтегрований, призначений переважно для учнів, для яких природничі дисципліни не є профільними[10]. Основна мета курсу полягає у формуванні наукової картини світу, розуміння зв'язків між фізичними, хімічними, біологічними та географічними процесами. Квантова фізика в межах цієї програми представлена фрагментарно – як складова теми «Світло», де розглядаються хвильові та квантові властивості, явище фотоефекту та значення світла для життя. Зміст подається переважно на якісному рівні, без розв'язування складних кількісних задач. Методичні рекомендації орієнтують учителя на пояснювально-ілюстративний підхід, демонстрації, міжпредметні зв'язки та формування уявлень про єдність природних явищ. Таким чином, роль учня в освітньому процесі залишається переважно пасивною – як спостерігача та реципієнта знань.

Модельна навчальна програма інтегрованого курсу «Природничі науки», авторкою якої є Світлана Бабій [11] створена відповідно до положень Державного стандарту профільної середньої освіти [4] і ґрунтується на принципах компетентнісного, діяльнісного та інтегративного навчання. Мета курсу полягає у формуванні критичного та системного мислення, дослідницьких умінь, екологічної свідомості та технологічної грамотності. На відміну від програми 2017 року, нова модель передбачає активну участь учнів у пізнавальному процесі – через застосування наукового методу, інженерного дизайну, проєктної діяльності та дебатів. Особливу увагу приділено формуванню умінь самостійно ставити запитання, висувати гіпотези, аналізувати дані та робити наукові висновки. Це створює принципово іншу методичну основу для вивчення квантової фізики, яка може бути реалізована через цифрове моделювання, віртуальні лабораторії, дослідницькі міні-проєкти.

Як і попередня програма, нова модель інтегрує елементи квантової фізики у ширший контекст природничої освіти. Зокрема, у темі «Енергетика» розглядаються фотоелектричний ефект, лазери та сонячні елементи, а у темі «Інновації» – квантові технології, наноматеріали, принципи роботи квантових комп'ютерів. Проте, якщо у програмі 2017 року такі поняття подавалися як ознайомчі, то у програмі 2025 року вони виступають як об'єкти для дослідження, що сприяє формуванню більш глибокого розуміння сутності квантових явищ. Таким чином, зміщення акценту від репродуктивного до дослідницького навчання є ключовою відмінністю нової програми.

Ще однією важливою зміною є поява системи методичних орієнтирів для вчителя. Програма С. Бабій передбачає наявність так званого «гачка» – мотиваційного етапу уроку, який викликає зацікавлення учнів (наприклад, демонстрація відео про квантові технології чи аналіз актуальних наукових новин). Важливу роль відіграє також рефлексія – оцінювання власного навчального поступу, що сприяє усвідомленню складності наукового пізнання. Такі прийоми наближають навчання до сучасних світових освітніх практик і дають можливість сформувати у старшокласників початкове квантове мислення [11].

Порівняльний аналіз свідчить, що обидві програми є послідовними етапами розвитку природничої освіти в Україні. Програма 2017 року закладає основи інтегративного підходу та формування природничо-наукової грамотності, тоді як програма 2025 року розвиває ці засади, адаптуючи зміст і методи навчання до вимог Нової української школи. Вона забезпечує ширші можливості для формування дослідницьких компетентностей, застосування інформаційних технологій і розуміння сучасних наукових досягнень, зокрема квантової фізики.

## Розділ 2. Методика формування понять квантової фізики

### 2.1 Особливості методики пояснення основних понять квантової фізики

Формування уявлень про квантові явища в інтегрованому курсі «Природничі науки» вимагає від учителя особливого підходу, який поєднує якісний опис явищ із необхідним мінімумом кількісних співвідношень. Оскільки квантова фізика оперує об'єктами, які неможливо безпосередньо спостерігати, ключовим методичним прийомом стає моделювання та використання математичного апарату для підтвердження теоретичних гіпотез.

Центральним поняттям, з якого доцільно розпочинати вивчення теми, є гіпотеза Макса Планка про квантування енергії. Методично важливо показати перехід від неперервного випромінювання (класична теорія) до дискретного.

Для кількісного опису вчитель вводить формулу енергії кванта:

$$E = h\nu, \quad (2.1)$$

де  $h$  – стала Планка ( $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с), а  $\nu$  – частота випромінювання. Враховуючи зв'язок частоти з довжиною хвилі  $\nu = c/\lambda$ , формулу (2.1) доцільно представити у вигляді, зручному для розв'язування задач спектрального аналізу:

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \quad (2.2)$$

Пояснення фотоефекту є наступним критично важливим етапом. Тут методика має базуватися на поєднанні експериментальних фактів (досліди О. Столетова та Г. Герца) з їх теоретичною інтерпретацією. Під час розгляду дослідів учителю варто акцентувати увагу на законах фотоефекту, які суперечать класичній хвильовій теорії: існування мінімальної частоти («червоної межі»), нижче якої ефект неможливий, та залежність максимальної

кінетичної енергії електронів саме від частоти світла, а не від його інтенсивності. Теоретичне обґрунтування, надане А. Ейнштейном, розв'язує ці суперечності через корпускулярну концепцію. Учитель пояснює, що світло не лише випромінюється, а й поглинається порціями (квантами). Взаємодія фотона з електроном розглядається як зіткнення двох частинок, під час якого енергія фотона передається електрону повністю. Рівняння фотоефекту математично виражає закон збереження енергії для цього процесу:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + E_{\text{к.мах}} , \quad (2.3)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вих}} + \frac{m_e v^2}{2} , \quad (2.4)$$

де  $A_{\text{вих}}$  – робота виходу електрона з металу,  $m_e$  – маса електрона,  $v$  – швидкість фотоелектрона.

Методична особливість пояснення цієї формули полягає в аналізі граничних умов. Учитель повинен акцентувати увагу на понятті «червона межа фотоефекту» ( $\lambda_{\text{мах}}$ ), яка визначається умовою, коли кінетична енергія дорівнює нулю ( $m_e v^2/2 = 0$ ). Тоді математичний вираз (2.4) набуває вигляду:

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{мах}}} = A_{\text{вих}} \Rightarrow \lambda_{\text{мах}} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}} . \quad (2.5)$$

Такий підхід дозволяє учням зрозуміти фізичний зміст явища: якщо енергія кванта менша за роботу виходу, явище не відбувається, незалежно від інтенсивності світла.

Ще одним важливим аспектом є введення корпускулярно-хвильового дуалізму через гіпотезу де Бройля. Для учнів старшої школи це поняття є

складним, тому його слід ілюструвати розрахунками довжини хвилі для макро- та мікрооб'єктів, використовуючи формулу:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}. \quad (2.6)$$

Це дозволяє наочно показати, чому хвильові властивості не помітні у повсякденному житті (для макротіл  $\lambda$  є надзвичайно малою), але є визначальними для електронів.

Окремим важливим методичним етапом є перехід від планетарної моделі Резерфорда, яка суперечила класичній електродинаміці, до квантової моделі Бора. Пояснення має базуватися на двох ключових постулатах: стаціонарних станах та частотній умові випромінювання. Математично це варто закріпити через умову квантування моменту імпульсу, яка пояснює стабільність орбіт:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad \text{де } n = 1, 2, 3 \dots \quad (2.7)$$

Та умови частот, що пов'язує енергію кванта зі зміною енергетичного стану атома:

$$h\nu = E_k - E_m. \quad (2.8)$$

Це рівняння є базовим для пояснення лінійчастих спектрів випромінювання, що демонструється на лабораторних роботах. Експериментальне підтвердження хвильових властивостей: дифракція електронів. Щоб гіпотеза де Бройля не залишалася для учнів абстракцією, необхідно розглянути дослід Девіссона-Джермера. Методично доцільно провести аналогію з дифракцією світла (рентгенівського випромінювання) на кристалічній ґратці.

Учитель має показати, що електрони, проходячи крізь кристал, поводяться не як кульки, а як хвилі, створюючи інтерференційну картину (кільця або плями). Для розрахунків використовується формула Вульфа-Брегга, адаптована для електронного пучка:

$$2d \sin \theta = k , \quad (2.9)$$

де  $d$  – відстань між площинами кристала,  $\theta$  – кут ковзання. Це є прямим доказом того, що  $\lambda$  у формулі де Бройля – це реальна фізична характеристика.

Для формування сучасного наукового світогляду важливо ознайомити учнів з тунельним ефектом – явищем, яке абсолютно неможливе в класичній механіці. Пояснення будується на аналогії: «м'яч не може перекотитися через високу гору, якщо йому не вистачає енергії». Проте в квантовій фізиці, через невизначеність координати та імпульсу, існує ненульова ймовірність знаходження частинки за потенціальним бар'єром. Це явище не потребує складних розрахунків у школі, але обов'язково ілюструється енергетичними діаграмами, де повна енергія частинки  $E$  менша за висоту потенціального бар'єра  $U (E < U)$ . Практичний вихід цієї теми – пояснення принципу роботи скануючого тунельного мікроскопа та альфа-розпаду ядер.

## 2.2 Використання типових задач у процесі засвоєння теми

Розв'язування задач у курсі квантової фізики виконує не лише контролюючу, а й навчальну функцію. Воно дозволяє «матеріалізувати» абстрактні поняття. В умовах інтегрованого курсу задачі повинні мати прикладний характер або демонструвати міжпредметні зв'язки (фізика-хімія, фізика-біологія). Розглянемо методику розв'язування задач, які формують базові компетентності учнів.

Розрахунок енергії фотонів (зв'язок з біологією та медициною).  
Задача: Порівняти енергію фотона червоного світла ( $\lambda_1 = 700 \text{ нм}$ ) та

рентгенівського випромінювання ( $\lambda_2 = 10^{-10}$  м), яке використовується в медицині. Пояснити різницю у впливі на організм.

Методика розв'язання: учитель демонструє алгоритм обчислення.

Записуємо формулу енергії (2.2)  $E = hc/\lambda$ . Обчислюємо енергію для червоного світла:

$$E_1 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{700 \cdot 10^{-9}} \approx 2,84 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} . \quad (2.10)$$

Переводимо в електрон-вольти ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ):

$$E_1 = \frac{2,84 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 1,77 \text{ eV} . \quad (2.11)$$

Обчислюємо енергію рентгенівського кванта:

$$E_2 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-10}} \approx 1,99 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} . \quad (2.12)$$

Знову переводимо і цей результат у eV:

$$E_2 = \frac{1,99 \cdot 10^{-15}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 12400 \text{ eV} . \quad (2.13)$$

Аналіз результату: Отримане співвідношення з (2.11) та (2.13)  $\frac{E_2}{E_1} \approx 7000$  разів. Учитель робить висновок, що вплив випромінювання на речовину визначається не сумарною інтенсивністю, а енергією одного окремого кванта. Навіть надпотужний потік червоного світла не зможе зруйнувати ДНК, оскільки енергії одного фотона (1,77 eV) недостатньо для розриву хімічного зв'язку. Натомість, один рентгенівський квант (12400 eV) діє як "енергетична куля", викликаючи іонізацію. Це демонструє дискретний характер взаємодії світла з речовиною.

Перейдемо до аналізу фотоефекту та визначення характеристик металів у задачах курсу.

Задача: Якою має бути довжина хвилі ультрафіолетового випромінювання, щоб вибити з поверхні цинку електрони з максимальною швидкістю 1000 км/с? Робота виходу електронів з цинку  $A = 4,24$  еВ. Методика розв'язання: це класична задача, що вимагає вміння виражати величини з рівняння Ейнштейна. Переводимо дані в систему СІ:  $v = 10^6$  м/с;  $A = 4,24 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,78 \cdot 10^{-19}$  Дж. Записуємо рівняння Ейнштейна (2.4)  $hc/\lambda = A + m_e v^2/2$ . Спочатку обчислюємо кінетичну енергію електрона ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг):

$$E_k = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^6)^2}{2} = 4,55 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} . \quad (2.14)$$

Знаходимо загальну енергію кванта:

$$E = 6,78 \cdot 10^{-19} + 4,55 \cdot 10^{-19} = 11,33 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} . \quad (2.15)$$

Виражаємо та обчислюємо довжину хвилі:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{11,33 \cdot 10^{-19}} \approx 1,75 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 175 \text{ нм} . \quad (2.16)$$

Висновок: Отримана довжина хвилі відповідає далекому ультрафіолету. Такі задачі демонструють учням реальні фізичні параметри взаємодії світла з речовиною. Задача ілюструє корпускулярний механізм: фотон повністю віддає свою енергію одному електрону. Це підтверджує, що в цьому явищі світло поводить себе не як хвиля, що розмиває енергію по поверхні, а як потік частинок.

Розглянемо тепер якісні задачі-оцінки на принцип невизначеності. Для розуміння принципів квантової механіки важливо розв'язувати задачі на

оцінку меж застосовності класичних законів. Приклад: Чому ми не помічаємо хвильових властивостей футбольного м'яча? Використовуємо формулу де Бройля (2.6) . Нехай маса м'яча 0,4 кг, швидкість 20 м/с.

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{0,4 \cdot 20} \approx 8,3 \cdot 10^{-35} \text{ м} . \quad (2.17)$$

Учитель пояснює, що ця величина на багато порядків менша за розмір атомного ядра ( $10^{-15}$  м), тому хвильові властивості макрооб'єктів неможливо зареєструвати. Цей результат визначає межі застосовності квантової фізики: хоча квантові закони є універсальними, для макрооб'єктів (через малість сталої Планка) хвильові властивості нівелюються. Це дозволяє учням зрозуміти, що класична механіка є лише граничним випадком квантової.

Спектральний аналіз і постулати Бора. Задача: Обчислити довжину хвилі світла, що випромінюється атомом водню при переході електрона з третьої орбіти ( $n = 3$ ) на другу ( $n = 2$ ). До якої серії спектру належить ця лінія? Методика розв'язання: це базова задача для розуміння будови атома. Використовуємо енергетичні рівні атома водню, що задаються формулою:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ еВ} . \quad (2.18)$$

За формулою (2.18) находимо енергію на 3-му та 2-му рівнях:

$$E_3 = -\frac{13,6}{3^2} \approx -1,51 \text{ еВ} ; \quad (2.19)$$

$$E_2 = -\frac{13,6}{2^2} = -3,4 \text{ еВ} . \quad (2.20)$$

Знаходимо енергію випроміненого фотона (різницю енергій):

$$\Delta E = E_3 - E_2 = -1,51 - (-3,4) = 1,89 \text{ еВ} . \quad (2.21)$$

Переводимо в Джоулі:

$$E = 1,89 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \approx 3,02 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} . \quad (2.22)$$

Обчислюємо довжину хвилі:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,02 \cdot 10^{-19}} \approx 6,58 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 658 \text{ нм} . \quad (2.23)$$

Висновок: Довжина хвилі 658 нм відповідає червоному кольору. Це відома лінія  $H_\lambda$  серії Бальмера (видимий діапазон) є прямим доказом квантування енергії атомів. На відміну від класичної антени, яка може випромінювати будь-яку частоту, атом випромінює світло лише строго визначеними порціями (квантами) при «стрибку» електрона між стаціонарними орбітами.

Дифракція електронів і прискорююча напруга. Задача: Електронний мікроскоп має роздільну здатність, що визначається довжиною хвилі електронів. Яку прискорюючу напругу треба подати на електроди, щоб довжина хвилі електрона дорівнювала 0,1 нм (розмір атома)? Методика розв'язання: задача демонструє зв'язок електричних параметрів (напруга) з хвильовими (довжина хвилі). Використовуємо закон збереження енергії. Робота електричного поля переходить у кінетичну енергію:

$$eU = \frac{m_e v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} . \quad (2.24)$$

Підставляємо швидкість (2.24) у формулу де Бройля(2.6):

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} . \quad (2.25)$$

Виражаємо напругу  $U$ :

$$\lambda^2 = \frac{h^2}{2m_e e U} \Rightarrow U = \frac{h^2}{2m_e e \lambda^2} . \quad (2.26)$$

Виконуємо розрахунок:

$$U = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (10^{-10})^2} \approx 150 \text{ В.} \quad (2.27)$$

Висновок: Цей розрахунок демонструє фундаментальний принцип квантової механіки: частинка (електрон), що має масу і заряд, поводить себе як хвиля, довжиною якої ми можемо керувати, змінюючи напругу. Це є практичним втіленням ідеї дуалізму матерії, що лежить в основі роботи сучасних нанотехнологій.

### **2.3 Організація навчального процесу під час вивчення квантової фізики в інтегрованому курсі**

Організація навчального процесу під час вивчення квантової фізики в інтегрованому курсі вимагає відходу від традиційної трансляції знань на користь діяльнісного підходу, де учень виступає в ролі дослідника. Оскільки вивчення мікросвіту пов'язане з високим рівнем абстракції, методично доцільним є побудова навчання навколо візуалізації невидимих процесів та аналізу експериментальних даних. Це дозволяє компенсувати відсутність безпосереднього чуттєвого досвіду учнів щодо квантових явищ.

Ключовим елементом сучасного уроку з квантової фізики стає робота з інтерактивними моделями та віртуальними лабораторіями. В умовах шкільного кабінету, де проведення натурних експериментів часто обмежене технікою безпеки або відсутністю дороговартісного обладнання (наприклад, для демонстрації дифракції електронів), комп'ютерне моделювання стає єдиним способом наочно продемонструвати досліджувані закономірності. Робота з симуляціями дозволяє учням самостійно змінювати параметри

експерименту, а саме інтенсивність світла, матеріал фотокатода чи напругу на електродах, і спостерігати за реакцією системи в реальному часі.

Важливою складовою такої роботи є перехід від якісного спостереження до кількісного аналізу через побудову та інтерпретацію графіків. Наприклад, під час вивчення фотоефекту учні мають побудувати вольт-амперну характеристику (ВАХ) фотоелемента. Аналіз графіка дозволяє наочно визначити струм насичення та запірну напругу. На графіку учні фіксують, що при певній негативній напрузі ( $U_3$ ) струм припиняється, що дає змогу обчислити максимальну кінетичну енергію фотоелектронів. Це перетворює абстрактну формулу Ейнштейна на інструмент для аналізу реальної залежності.

Ще одним важливим аналітичним етапом є побудова графіка залежності запірної напруги від частоти падаючого світла. Ця вправа має фундаментальне значення, оскільки дозволяє учням «перевідкрити» сталу Планка. Лінійний характер цього графіка ( $U_3 \sim \nu$ ) є прямим експериментальним підтвердженням квантової природи світла. Кут нахилу прямої на цьому графіку пропорційний сталій Планка  $h$ , а точка перетину з віссю частот вказує на «червону межу» фотоефекту  $\nu_{min}$ . Така графічна робота розвиває в учнів навички наукового моделювання та критичного аналізу даних.

Особливе місце в організації навчання займає інтеграція з інформатикою та цифровими технологіями. Сучасна квантова фізика є основою для розвитку квантових обчислень, тому на уроках доцільно розглядати принципи моделювання квантових станів. Співпраця з учителем інформатики дозволяє реалізувати навчальні проєкти зі створення простих комп'ютерних моделей руху частинки в потенціальній ямі або візуалізації хвильових функцій. Також важливо ознайомити учнів з поняттям кубіта та принципом суперпозиції, що лежить в основі роботи квантових комп'ютерів. Це демонструє учням, що квантова механіка – це не лише фундаментальна теорія минулого століття, а й прикладна база для ІТ-технологій майбутнього.

Зважаючи на обмежену кількість навчальних годин в інтегрованому курсі, ефективною організаційною формою є технологія «перевернутого класу». Ознайомлення з історичними аспектами, біографіями вчених та базовими визначеннями доцільно виносити на самостійне опрацювання за допомогою відеоматеріалів. Це вивільняє аудиторний час для розв'язування парадоксальних задач, проведення віртуальних досліджень та дискусій щодо інтерпретації квантових явищ. Такий підхід забезпечує глибоке занурення в тему та сприяє формуванню наукового світогляду старшокласників.

## Розділ 3. Практичні аспекти викладання квантової фізики

### 3.1 Приклади задач і демонстрацій для формування уявлень про квантові явища

Ефективне викладання квантової фізики неможливе без візуалізації, оскільки досліджувані об'єкти (фотони, електрони, атоми) недоступні для прямого спостереження. Найдоцільнішим методичним інструментом в умовах сучасної школи є використання інтерактивних симуляцій PhET Interactive Simulations (Університет Колорадо в Боулдері), які дозволяють учням виконувати віртуальні лабораторні роботи, змінюючи параметри експерименту в реальному часі. Нижче наведено методику проведення трьох досліджень, які доцільно включити до інтегрованого курсу.

Дослід 1. Віртуальна лабораторна робота: «Дослідження закономірностей фотоефекту» Інструмент: Симуляція PhET «Фотоефект». Метою якого, буде експериментальна перевірка рівняння Ейнштейна та встановлення залежності енергії фотоелектронів від частоти світла. Учні мають змогу провести якісний аналіз. Вони обирають матеріал катода (наприклад, натрій) і вмикають джерело світла. Змінюючи інтенсивність випромінювання, фіксують, що кількість вибитих електронів (сила струму) зростає, але їхня швидкість залишається незмінною. Це спростовує класичні уявлення про енергію хвилі.

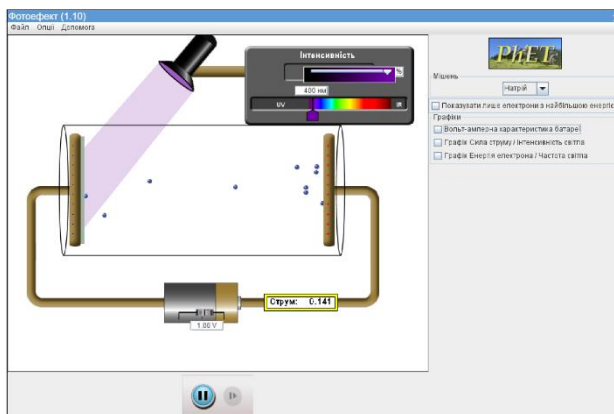


Рисунок 3.1 – Інтерфейс симуляції PhET «Фотоефект»: демонстрація вибивання електронів під дією світла

Також проводять кількісний аналіз, а саме розрахунок сталої Планка. Для цього учні встановлюють довжину хвилі (наприклад, 400 нм) і підбирають таку негативну напругу на джерелі струму (запірна напруга  $U_3$ ), при якій струм у колі стає рівним нулю. Експеримент повторюють для 3-4 різних довжин хвиль. На основі отриманих даних будується графік залежності  $U_3$  від частоти  $\nu$ . За кутом нахилу отриманої прямої учні визначають значення сталої Планка.

Дослід 2. Дослідницький практикум: «Будова атома та походження спектрів». Інструмент: Симуляція PhET «Models of the Hydrogen Atom». Завдяки цьому учні мають зрозуміти механізм виникнення лінійчастих спектрів та зв'язок між переходом електрона та випромінюванням фотона. Учні порівнюють моделі, запускають симуляцію в режимі «Передбачення» (Prediction). Спочатку активується модель Бора. Учні «обстрілюють» атом водню фотонами білого світла.

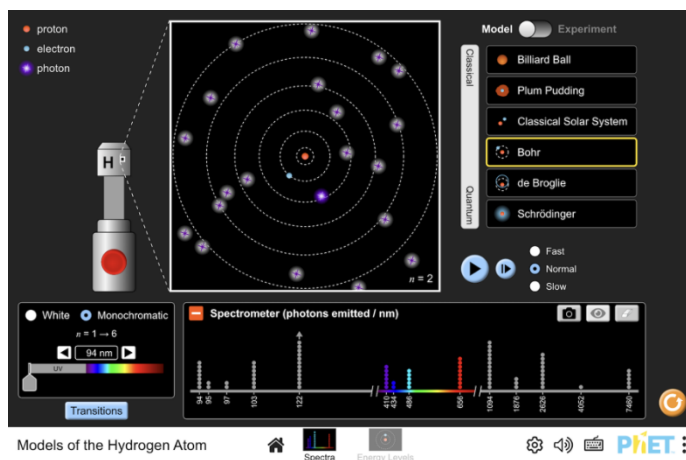


Рисунок 3.2 – Візуалізація квантових переходів у моделі атома Бора (симуляція PhET)

Спостерігають квантові переходи, фіксують, що атом поглинає лише фотони конкретних кольорів (енергій), при цьому електрон «стрибає» на вищу орбіту. Через короткий час електрон повертається на нижній рівень, випромінюючи фотон. Знизу екрана автоматично формується спектрометрична смуга. Учні бачать, як окремі акти випромінювання поступово створюють відомі серії (Лаймана, Бальмера, Пашена).

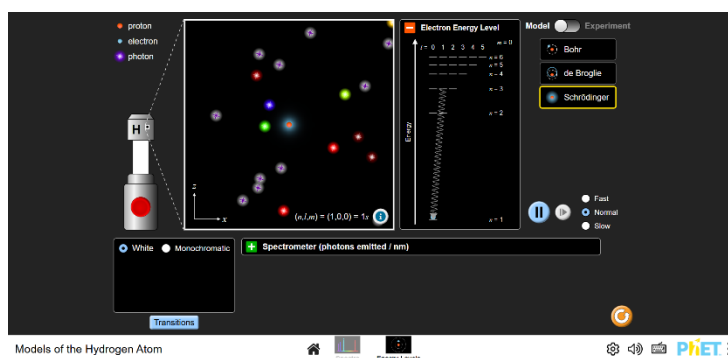


Рисунок 3.3 – Візуалізація моделі Шредінгера (симуляція PhET)

Перемикання в режим моделі Шредінгера демонструє учням, що в сучасній науці орбіта – це не чітка лінія, а хмара ймовірності. Це є важливим світоглядним моментом для переходу від напівкласичних до сучасних квантових уявлень.

Дослід 3. Демонстрація корпускулярно-хвильового дуалізму: «Інтерференція поодиноких електронів» (Двощілинний дослід). Цей експеримент є «серцем» квантової механіки, як зазначав Річард Фейнман.

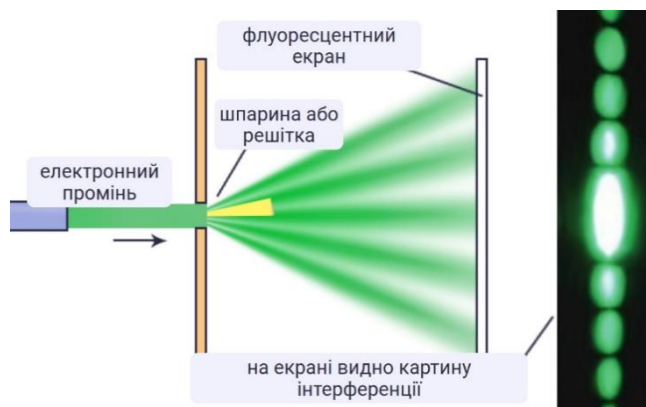


Рисунок 3.4 – Формування інтерференційної картини при проходженні електронів крізь дві щілини

Оскільки провести його з реальними електронами в школі неможливо, використовується симуляція PhET «Quantum Wave Interference» (вкладка «Particles»). Метою є можливість продемонструвати учням, що частинки (електрони) можуть поводитися як хвилі.

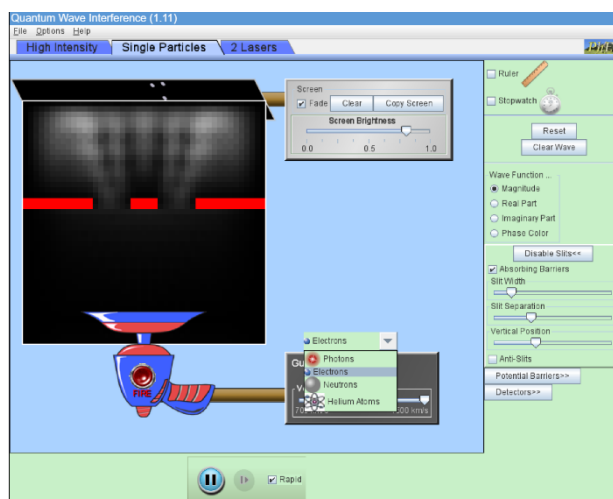


Рисунок 3.5 – Інтерфейс симуляції PhET «Quantum Wave Interference»

Учитель обирає джерело електронів і встановлює перешкоду з двома щілинами. Електрони випускаються по одному. На екрані-детекторі з'являються окремі точки (сліди влучання частинок). На цьому етапі розподіл здається хаотичним. Учитель пришвидшує процес. Коли кількість точок стає великою (тисячі), учні бачать, що вони лягають не у дві смуги (як очікувалося б для класичних кульок), а формують чітку інтерференційну картину з максимумами та мінімумами.

Цей дослід демонструє парадокс: кожен електрон проходить через установку як ціла частинка (реєструється в одній точці), але ймовірність його влучання розподіляється за хвильовим законом. Це ілюструє поняття хвильової функції  $\Psi$  та ймовірнісний характер мікросвіту.

### 3.2 Методика роботи з обдарованими учнями: факультативні заняття та розв'язування олімпіадних задач

В умовах інтегрованого курсу неможливо охопити глибину квантової механіки для всіх учнів. Однак для школярів, які виявляють інтерес до точних наук та планують вступ на технічні спеціальності, необхідна організація факультативу або спецкурсу «Основи сучасної фізики». Мета такого курсу – навчити учнів застосовувати фундаментальні закони збереження та принципи квантової механіки для розв'язання нестандартних задач, зокрема рівня учнівських олімпіад.

Нижче наведено приклади тем і задач високого рівня складності, що розглядаються в рамках такої роботи.

Тема 1. Ефект Комптона та закони збереження (Релятивістська механіка). Ця тема поєднує квантову теорію та теорію відносності. Олімпіадна задача: Фотон із довжиною хвилі  $\lambda$  розсіюється на нерухомому вільному електроні під кутом  $90^\circ$ . Визначити імпульс електрона віддачі. Методика розв'язання: ця задача вимагає векторного аналізу та застосування закону збереження імпульсу. Записуємо закон збереження імпульсу у векторній формі:

$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}_e, \quad (3.1)$$

де  $\vec{p}_\gamma$  – імпульс фотона до зіткнення,  $\vec{p}'_\gamma$  – після,  $\vec{p}_e$  – імпульс електрона.

Оскільки кут розсіювання  $90^\circ$ , вектори  $\vec{p}_\gamma$  та  $\vec{p}'_\gamma$  перпендикулярні. З трикутника імпульсів за теоремою Піфагора:

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + (p'_\gamma)^2. \quad (3.2)$$

Виразимо імпульси через довжини хвиль ( $p = h/\lambda$ ):

$$p_e = \sqrt{\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2} = h \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{(\lambda')^2}}. \quad (3.3)$$

Довжину розсіяної хвилі  $\lambda'$  знаходимо з формули Комптона (для  $90^\circ$ ,  $\cos \theta = 0$ ):

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos 90^\circ) = \Lambda_c; \quad (3.4)$$

$$\lambda' = \lambda + \Lambda_c, \quad (3.5)$$

де  $\Lambda_c = h/m_e c \approx 2,43$  пм – комптонівська довжина хвилі електрона.

Остаточний вираз для обчислення імпульсу електрона:

$$p_e = h \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{(\lambda + \lambda_c)^2}} . \quad (3.5)$$

Тема 2. Оціночні задачі та принцип невизначеності. Одним із найскладніших типів олімпіадних задач є задачі-оцінки, де потрібно отримати результат, не маючи точних даних, лише на основі фундаментальних принципів. Задача: Використовуючи співвідношення невизначеностей Гейзенберга, оцініть мінімальну енергію електрона в атомі водню та радіус атома. Доведіть, чому електрон не падає на ядро. Логіка розв'язання: нехай невизначеність координати електрона  $\Delta x$  порядку радіуса атома  $r$ . Тоді невизначеність імпульсу:

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{r} . \quad (3.6)$$

Повна енергія електрона  $E$  складається з кінетичної та потенціальної енергії кулонівської взаємодії:

$$E = E_k + E_p = \frac{p^2}{2m_e} - \frac{ke^2}{r} . \quad (3.7)$$

Замінімо імпульс  $p$  у формулі (3.7) на його оцінку через невизначеність ( $\hbar/r$ ):

$$E(r) \approx \frac{\hbar^2}{2m_e r^2} - \frac{ke^2}{r} . \quad (3.8)$$

Отримали функцію енергії від радіуса. Система прагне до стану з мінімальною енергією. Знайдемо мінімум функції, взявши похідну по  $r$  і прирівнявши до нуля:

$$\frac{dE}{dr} = -\frac{2\hbar^2}{2m_e r^3} + \frac{ke^2}{r^2} = 0. \quad (3.9)$$

Звідси виражаємо радіус (Борівський радіус):

$$\frac{\hbar^2}{m_e r^3} = \frac{ke^2}{r^2}; \quad (3.10)$$

$$r_{min} = \frac{\hbar^2}{km_e e^2}. \quad (3.11)$$

Цей розрахунок показує учням глибинну фізичну суть стабільності речовини. Електрон не падає на ядро ( $r \rightarrow 0$ ), бо при зменшенні радіуса кінетична енергія (перший доданок,  $\sim 1/r^2$ ) зростає швидше, ніж спадає потенціальна ( $\sim -1/r$ ). Принцип невизначеності «штовхає» електрон від ядра.

Тема 3. Тиск світла та фотонний вітрильник. Задачі на тиск світла дозволяють поєднати механіку Ньютона з квантовою теорією.

Задача: Ідеальне дзеркало масою  $m = 10$  мг підвішене у вакуумі. На нього перпендикулярно падає лазерний промінь потужністю  $P = 1$  кВт. Яке прискорення отримає дзеркало в початковий момент часу? Зміна імпульсу фотона при відбиванні:

$$\Delta p_\gamma = 2p = \frac{2E}{c}. \quad (3.12)$$

Сила тиску світла за II законом Ньютона дорівнює зміні імпульсу за одиницю часу ( $E/t = P$ ):

$$F = \frac{\Delta p_{sum}}{\Delta t} = \frac{2P}{c}. \quad (3.13)$$

Прискорення дзеркала:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2P}{mc} ; \quad (3.14)$$

$$a = \frac{2 \cdot 1000}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 0,67 \text{ м/с}^2 . \quad (3.15)$$

Учні бачать, що світло створює реальну механічну силу, що є основою проєктів космічних вітрильників.

Впровадження таких задач у спецкурс дозволяє сформувати в учнів навички фізичного моделювання, розвинути математичну культуру та підготувати їх до успішної участі в етапах Всеукраїнської учнівської олімпіади з фізики.

## Висновки

У кваліфікаційній роботі здійснено теоретичне обґрунтування та практичну розробку методики формування уявлень про квантову фізику у учнів старшої школи в умовах інтегрованого курсу «Природничі науки». За результатами дослідження зроблено такі висновки:

1) Аналізуючи навчальні програми та стан проблеми, встановлено, що викладання квантової фізики в інтегрованому курсі має стратегічне значення для формування сучасної наукової картини світу. Аналіз чинних програм засвідчив переорієнтацію освітнього процесу з інформативно-репродуктивного на компетентнісний та діяльнісний підходи. Виявлено, що головними методичними труднощами є високий рівень абстракції матеріалу, відсутність наочних класичних аналогій та обмеженість математичного апарату в учнів, що вимагає впровадження нових засобів візуалізації та моделювання.

2) Визначено, що формування понять квантової механіки (дискретність енергії, корпускулярно-хвильовий дуалізм, ймовірнісний характер процесів) найефективніше відбувається через поєднання якісних пояснень із адаптованим математичним апаратом. Обґрунтовано доцільність використання міжпредметних зв'язків (хімія, біологія, медицина) для демонстрації практичного застосування рівняння Ейнштейна та формули Планка, що сприяє подоланню формалізму в знаннях учнів.

3) Доведено, що в умовах відсутності доступу до складного експериментального обладнання, ключовим інструментом навчання стають інтерактивні симуляції (PhET Interactive Simulations). Використання цих засобів дозволяє візуалізувати недоступні для прямого спостереження об'єкти мікросвіту, експериментально підтвердити теоретичні гіпотези та реалізувати дослідницький підхід під час уроку.

4) Розроблено та систематизовано приклади задач різного рівня складності. Для базового рівня запропоновано типові задачі прикладного змісту, що ілюструють прояв квантових законів у техніці та живій природі.

Для поглибленого вивчення запропоновано методику розв'язування адаптованих олімпіадних задач. Показано, що розв'язання таких задач можливе методами шкільної алгебри та геометрії, що дозволяє залучати обдарованих учнів до наукового пошуку та участі в олімпіадах.

Таким чином, використання структурованих пояснень, віртуальних симуляцій та дворівневої системи задач дозволяє сформувати в учнів стійкі уявлення про квантові явища, подолати когнітивні бар'єри та забезпечити глибоке розуміння фізичних основ сучасних технологій.

### Список використаних джерел

1. Stadermann H. K. E., van den Berg E., Goedhart M. J. Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*. 2019. Vol. 15, no. 1. P. 010130. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>.
2. Концепція «Нова українська школа» / упоряд. Л. Гриневич та ін. ; за заг. ред. М. Грищенка. Київ : МОН України, 2016. 40 с.
3. Грищенко А. С. Методика формування відомостей про структурну організацію матерії на уроках фізики в 10 класі. *Освіта та наука: пам'ятаючи про минуле, творимо майбутнє : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, 2020. С. 67–70.
4. Про затвердження Державного стандарту профільної середньої освіти : Постанова Кабінету Міністрів України від 25 лип. 2024 р. № 851. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-derzhavnoho-standartu-profilnoi-serednoi-osvity-851-250724> (дата звернення: 01.12.2025).
5. Бойко В. А. Розв'язування учнями ключових фізичних задач як засіб підвищення рівня вивчення фізики в школі. *Освіта та наука: пам'ятаючи про минуле, творимо майбутнє : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, 2020. С. 34-38.
6. Lawrence I. Quantum physics in school. *Physics Education*. 1996. Vol. 31, no. 5. P. 278. DOI: 10.1088/0031-9120/31/5/016.
7. Compendium of Quantum Physics: Concepts, Experiments, History and Philosophy / ed. by D. Greenberger, K. Hentschel, F. Weinert. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. 902 p.
8. Сірик Е. П., Сальник І. В. Роль мисленневого експерименту у вивченні основ квантової фізики в умовах профільної школи. *Наукові записки. Серія: Проблеми природничо-математичної, технологічної та професійної освіти*. 2025. Вип. 1(5). С. 158.

9. Bonacci E. On Teaching Quantum Physics at High School. Athens Journal of Education. 2020. Vol. 7, iss. 3. P. 313-330.
10. Природничі науки. 10-11 класи : модельна навч. програма для закл. заг. серед. освіти / Т. М. Засекіна та ін. ; затвердж. наказом МОН України від 23.10.2017 № 1407.
11. Бабій С. В. Інтегрований курс природничої освітньої галузі. Природничі науки 10-11 класи. Основний рівень : модельна навч. програма для закл. заг. серед. освіти. Київ, 2023.
12. Гельфгат І. М., Ненашев І. Ю. Фізика. 11 клас : збірник задач. Харків : Ранок, 2022. 176 с.
13. Антонова О. Є., Ващук О. В. Інтегративний підхід до побудови моделі формування готовності вчителів до розвитку академічної обдарованості учнів. Професійна освіта в умовах інтеграційних процесів: теорія і практика : зб. наук. пр. / за заг. ред. С. С. Вітвицької, Н. Є. Колесник. Житомир : Н. М. Левковець, 2017. Ч. 1. С. 174-182.
14. Барановська О. В. Технології інтегрованого навчання в старшій школі в умовах її профілізації. Дидактика: теорія і практика: зб. наук. пр. / за ред. Г. О. Васьківської. Київ : Ін-т обдаров. дитини НАПН України, 2017. С. 45-49.
15. Божко Н. Інтегративний підхід до навчання в контексті реформування системи освіти України. Молодь і ринок. 2018. № 7. С. 84-89
16. Гільберг Т. Г., Засекіна Т. М., Лашевська Г. А., Стадніченко С.М. Природничі науки : експеримент. електрон. навч.-метод. посіб. для 11 кл. закл. заг. серед. освіти : у 2 ч. Київ : УОВЦ «Оріон», 2020. URL: <https://www.orioncentr.com.ua/e-knyhy/17-natural-science-10-11-forms/32-digital-metodposybnu-11-form-natural-science> (дата звернення: 04.12.2025)
17. Засекін Д. О. Навчально-методичне забезпечення поглибленого вивчення фізики в основній школі (гімназії). Проблеми сучасного підручника : зб. наук. пр. / Ін-т педагогіки НАПН України. Київ : Пед. думка, 2019. Вип. 23. С.98-108.

18. PhET Interactive Simulations. University of Colorado Boulder. URL: <https://phet.colorado.edu/uk> (дата звернення: 05.12.2025).
19. Wieman C. E., Perkins K. K., Adams W. K. Oersted Medal Lecture 2007: Interactive simulations for teaching physics: What works, what doesn't, and why. *American Journal of Physics*. 2008. Vol. 76. No. 4. P. 393-399.
20. McKagan S. B., et al. Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*. 2008. Vol. 76. P. 406.