

БЕРДЯНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет фізико-математичної, комп'ютерної та технологічної освіти
Кафедра фізики, математики та методики навчання

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедрою
д.п.н., проф. Олександр ШКОЛА
«12» грудня 2025 р.

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДІВ З КВАНТОВОЇ ОПТИКИ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

Кваліфікаційна робота магістра

Виконавець: здобувач другого рівня вищої освіти,
групи м2фі-з

Галузь знань: 01 Освіта

Спеціальність: 014 Середня освіта (фізика та
астрономія)

Освітньо-професійна програма: Середня освіта
(фізика та астрономія)

ПІБ: Сергій ГОЛДАЄВ

Керівник: д.п.н., професор Олександр ШКОЛА

Рецензент: д.п.н., професор Олена КУЗНЄЦОВА

Запоріжжя – 2025

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Голдаєв Сергій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Методичні особливості вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики у шкільному курсі фізики»

Керівник роботи: Школа О.В., д. пед. н., професор
затверджені наказом по університету від «02» грудня 2025 року № 712с.

2. Строк подання студентом роботи: 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: аналіз фізичної сутності і дидактичного потенціалу вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики в шкільному курсі фізики та розробка методичних рекомендацій з їх системного використання у шкільній практиці, що сприятиме підвищенню пізнавального інтересу, рівня та якості предметних знань учнів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- проаналізувати взаємозв'язок теорії та експерименту як провідний дидактичний принцип навчання шкільного курсу фізики;
- висвітлити методичні особливості викладання квантової оптики у шкільному курсі фізики;
- розкрити фізичну сутність і дидактичний потенціал вивчення фундаментальних дослідів квантової оптики у шкільному курсі фізики;
- висвітлити методичні особливості проведення віртуального експерименту при вивченні квантової оптики та розробити рекомендації з вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) (за необхідністю):

6. Консультанти розділів роботи (якщо передбачені):

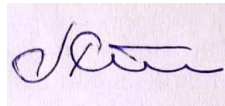
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 28.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Формулювання теми кваліфікаційної роботи, підготовка вступу, складання плану роботи.	жовтень – грудень 2024 р.	
2.	Аналіз літературних джерел за темою дослідження, уточнення базових понять дослідження. Підготовка підрозділів 1.1, 1.2.	лютий – квітень 2025 р.	
3.	Підготовка підрозділу 1.3 та висновків розділу 1 кваліфікаційної роботи.	травень – вересень 2025 р.	
4.	Підготовка підрозділів 2.1 – 2.2 кваліфікаційної роботи та висновків 2 розділу.	жовтень – листопад 2025 р.	
5.	Оформлення підсумкового варіанту кваліфікаційної роботи відповідно до чинних вимог.	08.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти:



(підпис)

Сергій ГОЛДАЄВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи:



(підпис)

Олександр ШКОЛА

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.	3
Розділ 1. Теоретична частина.	8
1.1. Взаємозв'язок теорії та експерименту як провідний дидактичний принцип навчання шкільного курсу фізики.	8
1.2. Методичні особливості викладання квантової оптики у шкільному курсі фізики.	14
1.3. Фундаментальні дослідження квантової оптики у шкільному курсі фізики. .	16
<i>Висновки до першого розділу.</i>	<i>26</i>
Розділ 2. Практична частина.	28
2.1. Віртуальний експеримент при вивченні квантової фізики.	28
2.2. Методичні рекомендації з проведення фундаментальних дослідів з квантової оптики.	34
2.3. План-конспект уроку фізики вивчення нового матеріалу на тему: «Явище і закони фотоефекту» (11 клас).	42
<i>Висновки до другого розділу.</i>	<i>50</i>
Висновки.	51
Список використаних джерел.	55

Вступ

Актуальність дослідження. Квантова фізика виникла на початку 20 століття як результат досліджень поведінки атомів та елементарних частинок. У 1900 році Макс Планк запропонував гіпотезу про квантування енергії, яка полягає в тому, що енергія випромінювання не поширюється рівномірно, а передається порціями, які називаються квантами. Кожен квант має певне значення енергії, залежить від частоти випромінювання. В 1905 Альберт Ейнштейн висунув гіпотезу світлових квантів і показав, що вона природно пояснює закони фотоефекту, абсолютно незрозумілі в рамках хвильової теорії світла. У 1913 році Нільс Бор розробив модель атома, засновану на квантуванні енергії і рівнях енергії електронів. Усе це докорінно змінило уявлення про природу всесвіту і надало поштовх на виникнення нового напрямлення в фізиці-квантової фізики. Вже в 20 столітті шкільні уроки фізики стали включати такі питання як фотоефект, струм у напівпровідниках, теорія відносності, атомна фізика, відомості про елементарні частки.

На сьогоднішній день квантова фізика вважається однією з основних областей фізики та знаходить широке застосування у різних технологіях. Вона також продовжує викликати зацікавленість у вчених, які прагнуть розкрити дедалі глибші закони мікросвіту та зрозуміти його зв'язок із макросвітом. Незважаючи на суттєвий розвиток у дослідженні квантової фізики, у науці залишаються численні невирішені проблеми та питання. У будь-якому випадку, квантова фізика не припиняє бути однією з найцікавіших і найзначніших галузей науки.

Фізика – фундаментальна наука експериментального характеру, що вивчає загальні закони природи, вона також є науковою основою більшості технологій. Саме тому питанню викладання фізики у школах нині відводять значної ролі. Однією зі складних методичних завдань викладання фізики у шкільництві є запровадження основ квантової фізики. Методичні проблеми, які зустрічаються у процесі навчання, не наочність квантово-механічних об'єктів (частка-хвиля), складність математичного апарату, незвичність її вихідних ідей і понять. У зв'язку із цим питання квантової фізики акуратно вводять у шкільний курс. Основні

пізнавальні завдання цього розділу - ознайомлення учнів зі специфічними законами, що діють у галузі мікросвіту, та завершення формування уявлень про закони і будову всесвіту, з огляду сучасної науки.

Багато явищ і об'єктів у мікросвіті є не візуальними, а представлення механізмів їх проявів дуже важко, тому необхідно впровадження комп'ютерних засобів навчання, які відіграють важливу роль у вдосконаленні методів викладання квантової фізики. Комп'ютерне моделювання та інтерактивні програми можуть допомогти учням візуалізувати та зрозуміти абстрактні концепції такі, як корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітних хвиль.

Важливо заохочувати учнів ставити запитання та засвоювати навчальний матеріал у галузі квантової фізики. Цього можна досягти за допомогою групових дискусій, дослідницьких проектів та презентацій, які дозволяють учням глибше заникати у конкретні теми та розвивати навички критичного мислення. Вивчення фізики сприяє розумінню учням навколишнього світу, його явищ і процесів, а вже надалі ці знання впливають на формування мислення учнів та їх світогляду.

Питаннями методичних особливостей вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики в шкільному курсі фізики займалися наступні українські вчені: П.Атаманчук, С.Давиденко, С.Величко, Л.Кнорозок, А.Кух, В.Мендерецький, О.Ніколаєв, М.Руденко та інші.

Мета дослідження – аналіз фізичної сутності і дидактичного потенціалу вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики в шкільному курсі фізики та розробка методичних рекомендацій з їх системного використання у шкільній практиці, що сприятиме підвищенню пізнавального інтересу, рівня та якості предметних знань учнів.

Об'єкт дослідження – освітній процес з фізики у старшій школі.

Предмет дослідження – методичні особливості проведення фундаментальних дослідів з квантової оптики в шкільному курсі фізики.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати взаємозв'язок теорії та експерименту як провідний дидактичний принцип навчання шкільного курсу фізики.

2. Висвітлити методичні особливості викладання квантової оптики у шкільному курсі фізики.

3. Розкрити фізичну сутність і дидактичний потенціал вивчення фундаментальних дослідів квантової оптики у шкільному курсі фізики.

4. Висвітлити методичні особливості проведення віртуального експерименту при вивченні квантової оптики та розробити рекомендації з вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики.

Для досягнення мети та розв'язання поставлених завдань використано комплекс взаємопов'язаних **методів дослідження**: аналіз літературних джерел (психолого-педагогічна і навчально-методична література, нормативні освітні документи) з метою виявлення стану вивчення досліджуваної проблеми, усвідомлення основних понять та головних аспектів і напрямків її розв'язання, формулювання висновків; педагогічне спостереження за процесом навчання фізики у старшій школі ЗЗСО під час виробничої (педагогічної) практики, бесіди з учнями і вчителями фізики з метою аналізу актуальних питань і шляхів вирішення проблеми дослідження, аналіз поточних і підсумкових освітніх результатів учнів з математики і фізики.

Теоретична новизна дослідження полягає в опрацюванні та узагальненні науково-методичного доробку щодо висвітлення фізичної сутності фундаментальних дослідів з квантової оптики в шкільному курсі фізики.

Практичне значення дослідження полягає у розробці методичних матеріалів до уроків з квантової оптики курсу фізики загальноосвітньої школи, що сприятиме підвищенню рівня та якості знань учнів.

Випускна кваліфікаційна робота складається із вступу, двох розділів, висновків, списку використаних джерел (23 позицій). Загальний обсяг роботи – 56 с., з яких 52 с. – основна частина. Робота містить 18 рисунків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Взаємозв'язок теорії та експерименту як провідний дидактичний принцип навчання шкільного курсу фізики

Навчальне та наукове пізнання об'єктів, процесів та явищ природної та технологічної дійсності ґрунтується на постановці та реалізації фізичних експериментів майбутніми та справжніми дослідниками у системі безперервної освіти учнівської молоді [6].

Фундаментальна і прикладна наука фізика має безліч власних експериментів, що проектуються і реалізуються в умовах школи, дозволяють виявляти властивості досліджуваних об'єктів, процесів і явищ і перевірити справедливність висунутих робочих гіпотез або побудованих моделей фрагментів дійсності [2].

Формування та поглиблення наукових знань, розвиток практичних умінь та навичок школярів стає успішним, якщо навчання базується на фізичному експерименті. Експеримент є результатом взаємодії людини за допомогою експериментальних засобів із реальним світом [5].

Сучасний етап розвитку освіти вимагає від учнів оволодіння як предметними знаннями і вміннями, а й досвідом їх застосування у соціокультурному середовищі. Даний підхід відображає компетентнісний рівень сформованості дослідницьких якостей, що у свою чергу свідчить про міцне засвоєння матеріалу, готовність та здатність використовувати його для вирішення професійних та побутових завдань. Навчання учнів фізики включає у собі досвід застосування дослідницьких методів, насамперед у вигляді експерименту пізнання об'єктів і явищ навколишнього світу і формування в учнів поглядів на методологічні основи пізнання.

З позицій компетентнісного підходу рівень освіченості учнів визначається здатністю вирішувати проблеми різної складності з урахуванням наявних знань. Цей підхід не заперечує значення знань, але акцентує на можливості використовувати отримані знання практично, характеризує функціональну

грамотність учня. При такому підході цілі освіти описуються в термінах, що відображають нові можливості учнів, зростання їхнього особистісного потенціалу. Проводячи самостійно фізичний експеримент, учні виявляють: вміння планувати свою роботу, ставити цілі та завдання, пояснювати результати спостережень та експерименту, виробляють уміння керувати власною освітньою діяльністю на рефлексивній основі, опановують діагностичні навички самоконтролю та самооцінки. Накопичені вміння свідчать про сформованість дослідницької компетентності. Дослідницька компетентність учнів є результатом освоєння досвіду дослідницької діяльності та включає систему методологічних знань, дослідницьких умінь, досвід постановки та вирішення дослідницьких завдань із різними умовами.

Демонстраційні досліді займають особливе місце в методиці викладання фізики. Демонстраційні досліді, які проводяться викладачем, можливі на всіх видах занять. На сьогоднішній день, дати конкретні знання не актуально. Необхідне перетворення цих знань на інструмент пізнання навколишнього світу.

На заняттях з фізики вивчення учнями нового матеріалу може здійснюватися мовою демонстрацій. Наприклад, досліді використовуються законів механічного руху, понять траєкторії, в'язкості, дії сили Ампера, сили Лоренца, понять електричного кола, спектра і т.д.

У таких прикладах мовою демонстраційного експерименту можна переказати зміст понять, теоретичного матеріалу.

Викладач, виконуючи демонстраційні досліді, керує їх сприйняттям, формулює результати та проводить аналіз [5, с. 38-40].

Всі демонстраційні досліді, які можуть бути показані у зв'язку з вивченням учнями нового матеріалу, можна поділити на три основні групи:

- Демонстраційні досліді, що дають початкове уявлення про явище;
- Демонстраційні досліді, що дозволяють досліджувати властивості тіл, явищ;
- демонстраційні досліді, що показують застосування явищ чи властивостей.

Розглянемо кожну із цих груп докладніше.

1. Подібно до науки, де демонстрації є основою наукової думки, у викладацькій діяльності демонстрації, що є джерелом первинних уявлень учнів про нові для них поняття, є фундаментом накопичених знань.

Як приклад згадаємо про досліди Ерстеда, що дав поштовх до народження електродинаміки, які знайомляться з новим їм фізичним явищем.

Наступний приклад зв'яжемо з вивченням явища в'язкості рідин або газів.

Класичних дослідів з фізики, які відіграли визначальну роль у науці, порівняно небагато, і далеко не всі вони можуть бути поставлені на занятті. назвати фундаментальними такі досліди, як демонстрації механічного руху, взаємодії провідників зі струмом, закону Ампера, сили Лоренца, гармонійних коливань та ін. Одним словом вивчення майже кожної теми починається з постановки головної, вихідної, фундаментальної демонстрації.

2. Наступний крок - це всебічне дослідження нового поняття, його зв'язків із раніше вивченими поняттями [2, с. 19-25].

Повернемося до досвіду, що розкриває фізичну природу в'язкості (внутрішнього тертя). Для вимірювання швидкості падіння кульки необхідно визначити сили, під дією яких знаходиться кулька в рідині.

3. Зі встановлених законів протікання досліджуваного явища, впливає припущення про можливі шляхи їх використання в практиці, техніку.

Досліди можуть демонструватися на одному занятті, але подібне можливо далеко не завжди. Пояснюється це тим, що в курсі фізики процес вивчення деяких фізичних явищ нерідко продовжується протягом декількох років навчання. додаткові закономірності [4, С. 88-89].

Можливі політехнічні демонстрації викладач підбирає сам і за інших рівних умов віддає перевагу тим з них, які спонукають учнів до творчого підходу у застосуванні набутих знань.

Повертаючись до досвіду про фізичну природу в'язкості (внутрішнього тертя), розкриємо можливі шляхи його використання в практиці, техніці. На основі аналізу результатів досвіду можна пояснити роль парашута. Опір руху

різко збільшився. Це призвело до зменшення встановленої швидкості в десятки разів.

Що стосується дощових крапель, то швидкість їх падіння не залежить від висоти хмар над поверхнею Землі.

Фундаментальний, дослідний, чи політехнічний - обирається викладачем залежно від обраної методики можливої послідовності.

Звідси видно, що незмінна за обсягом навчальної інформації сукупність дослідів, дозволяє викладачеві варіювати методику викладу курсу фізики в широких межах: від пояснювально-ілюстративної до проблемної [5, с. 79-80].

Безумовно, зміст курсу фізики не можна повністю перекласти на мову демонстраційних дослідів.

Як вираз єдності абстрактної та конкретної представляє малюнок.

Розвиваючись на базі великого досвіду навчання, сформульовано ряд рекомендацій до проведення демонстраційних дослідів. Інші викладачі - ті, хто систематично використовує замальовки, - переконані в необхідності малюнків.

У практиці застосовуються такі методи демонстраційного експерименту.

1. Безпосередній, що дозволяє включати в роботу психологічні особистісні якості того, хто навчається.

2. Опосередковане проведення експерименту. Наприклад, про виникнення електрорушійної сили в термопарі, про появу фотоструму, судять за показанням вольтметра, амперметра.

3. Демонстрація аналогів фізичних явищ, Такий експеримент називає модельним. Він принципово не відрізняється від малюнка.

Розглянуті способи зароджують чуттєве пізнання. Але воно розкриває лише зовнішню сторону речей і понять. В подальших замальовках викладач може ускладнювати умови. У результаті може статися так, що учні можуть перейти в малюнку від розгляду механічного процесу до механічного процесу в усьому його різноманітті.

Наступний приклад. На рисунку зображена принципова схема електричного кола. Представляючи цю схему, викладач здійснює поступовий перехід у

свідомості тих, хто навчається від чуттєво-конкретного до абстрактного. У малюнку представлені прилади, предмети, що зорово спостерігаються в натурі. Електрична схема вже не схожа з виглядом установки, що демонструється. Місце предметів, приладів у ньому займають знаки. При цьому ступінь абстрагування у процесі розгляду схеми зростає настільки, що учні починають сприймати відносини елементів ланцюга на схемі навіть краще, ніж на «живій» - демонстраційній установці. Відбувається це оскільки інформація про даної електричної ланцюга на принциповій схемою зазнала цілеспрямований відбір, систематизацію, узагальнення.

Вміння малювати принципові електричні схеми установок, що демонструються, дозволяє:

- ознайомити учнів із прийнятими умовними графічними зображеннями;
- виробити в учнів навички читання принципових схем, що саме собою цінно з метою політехнічної освіти учнів та підготовки їх до майбутньої професійної діяльності;
- Чинити позитивний вплив на вивчення курсу фізики.

Хоча замальовки, що супроводжують демонстрацію дослідів, не завжди дають негайний дидактичний ефект, але, будучи засобом встановлення єдності абстрактної та конкретної, вони допомагають якісно вивчати весь матеріал курсу фізики.

Не забудемо і проблемне навчання [5, 3. 79-80]. Розглянемо його організацію під час вивчення питання роботи і енергії з допомогою демонстраційної установки з кулями. На нитках підвішено ряд сталевих кульок. Якщо відхилити один шар, то після його зіткнення з цим рядом відскакує з протилежного боку ряду один шар; якщо відхиляються дві кулі, то й відскакують дві кулі. Пропонується учням пояснити результати досвіду.

При включенні учнів у проведення відеоексперименту актуалізується здатність виявляти проблеми, визначати цілі та завдання їх вирішення, дослідити фізичні процеси, зафіксовані під час відеозйомки явищ навколишнього світу. Дослідницька компетентність учнів розуміється нами як інтегральна якість

особистості, яка включає такі компетенції: розуміння технічної та соціальної значущості дослідження фізичного процесу; здатність виявляти проблеми, визначати цілі та завдання їх вирішення за допомогою експерименту; здатність проектувати теоретичну модель проведення експерименту

У шкільному курсі фізики при вивченні явищ, процесів, законів необхідна опора на зорові образи, і сучасна тенденція комп'ютеризації шкіл і оснащення фізичних кабінетів мультимедійною технікою, створюють реальну основу для ширшого використання інформаційно-комунікаційних технологій у навчанні, зокрема і відеокomp'ютерного експерименту. умовами експерименту; самостійно конструювати моделі установок та спостерігати за їх роботою; проводити розрахунки в автоматичному режимі.

Цілі організації роботи:

1. Освоєння методики фізичних досліджень, оволодіння навичками правильного спостереження та технікою фізичного експерименту.

2. Організація самостійної роботи з різною літературою та іншими джерелами інформації, збирання, аналіз та узагальнення матеріалу на тему бдослідної роботи.

3. Активізація роботи з учнями щодо застосування наукових знань для пояснення фізичних явищ.

4. Розвиток пізнавального інтересу учнів, концентрація їхньої уваги на розумінні законів природи, а чи не на механічному їх запам'ятовуванні.

5. Накопичення методичного матеріалу та поповнення кабінету фізики саморобними відповідними установками та приладами, виготовленими з підручних матеріалів.

Схема організації роботи з проведення та відеозйомки досліду:

1) Постановка проблеми.

2) Вивчення інформації з різних джерел із цієї проблеми.

3) Вибір методів дослідження та практичне оволодіння ними.

4) З'ясування умов досвіду, збір приладів та матеріалів -комплектування та проведення дослідів.

5) Аналіз та узагальнення.

6) Формулювання висновків.

За допомогою дослідів, спостережень та вимірювань можуть бути досліджені:

- механічні явища;
- звукові явища;
- магнітні явища;
- електричні явища;
- теплові явища;
- світлові явища.

Отже, демонстраційний експеримент на фізиці є інструментом дослідження навколишньої природи. Він пробуджує в учнів розвиток здібностей до своїх роздумів, до творчості. Учні переконуються у цьому, що світ пізнаємо. Учні починають опановувати елементи наукового дослідження.

1.2. Методичні особливості викладання квантової оптики у шкільному курсі фізики

Квантова оптика є розділом квантової фізики, яка розглядає і досліджує властивості світла з огляду квантової теорії Макса Планка (1858-1947 рр.). Квантова оптика включена, як розділ квантової фізики в курсі загальноосвітньої школи. Опанування учнями квантової оптики, а точніше її елементів відбувається в старшій школі. У цьому розділі учні знайомляться з властивостями світла, які мають квантову природу. Учні знайомляться з гіпотезою квантів Планка, з таким новим поняттям як «фотон», принципом корпускулярно-хвильового дуалізму світла. Уявити це і засвоїти допомагають вивчення дослідів явища фотоефекту, явища тиску світла, ефекту Комптона, які змінили уявлення людства про фізичну сутність світла і поміняли наукову картину сучасної фізики.

Якщо явища інтерференції, дифракції, дисперсії, поляризації показують хвильову сутність світла, то уявлення про квантову сутність світла почалося в

1675 році, коли Ісаак Ньютон запропонував квантову теорію світла. За якою світло уявлялося потоком дрібних частинок-«корпускул». На основі цієї теорії він пояснював частину оптичних явищ, але виявити ці частинки і зрозуміти їх властивості він не зміг.

Наприкінці 19 століття, ряд вчених досліджуючи випромінювання «абсолютно чорного тіла», експериментально, отримали графіки залежності енергії електромагнітних хвиль випромінюваних за секунду з одиниці площі (W), від довжини хвилі (λ) рисунок

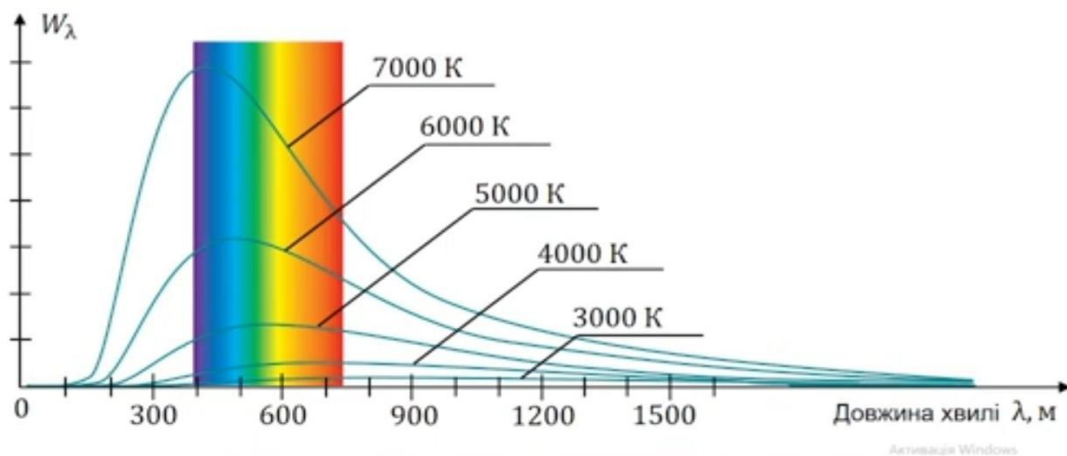


Рис. 1.1 Залежність енергії W електромагнітних хвиль, що випромінюються за 1 секунду з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла від довжини хвилі λ

Водночас, по теоретичним розрахункам, ґрунтуючись на безперервний характер випускнення електромагнітних хвиль, значення енергії випромінювання W було пропорційне значенню абсолютної температури взятому в четвертому ступені. Отримані графіки експериментально, не підтверджувались теоретичними розрахунками. Дослідження теплового випромінювання показало, що в рамках класичної фізики не можливо пояснити цю суперечність. Ця ситуація з невдалим поясненням законів випромінювання отримала назву «ультрафіолетова катастрофа».

У 1900 році видатний німецький вчений М.Планк висунув припущення, згідно якого електромагнітне випромінювання випромінюється не безперервно, а дискретними порціями – «квантами». М.Планк ввів поняття «кванту», як дискретної, неподільної, елементарної частинки певної величини, заклавши

основи квантової фізики. Спираючись на це він висунув гіпотезу згідно якої випромінювання електромагнітних хвиль відбувається дискретно ,а не безперервно,тобто окремими порціями. Енергія (E), кожної з них, прямо пропорційна частоті (ν) їх випромінювання.

$$E=h\nu, \quad (1.1)$$

де h -стала Планка ($h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж*с)

Планк думав, що світло поширюється і поглинається безперервно,а тільки випромінюється дискретно, це спростував А.Ейнштейн (1879-1955 рр.), дійшовши висновку в своїх працях,що будь-яке електромагнітне випромінювання складається з незалежних одна від одної частинок-квантів, з енергією $h\nu$ у кожної. Пізніше у 1926 році було введено поняття «фотон» (від грецької «fotos»-світло). Фотон мінімальна дискретна величина світлової енергії в частинці,який має такі властивості:

- маса в спокої окремого фотона дорівнює нулю ($m=0$);
- заряд дорівнює нулю ($q=0$);
- швидкість дорівнює швидкості світла ($c=3 \cdot 10^8$ м/с);
- енергія фотону $E=h\nu$;
- імпульс фотону $p=E/c=h\nu/c=h/\lambda$.

Усі ці гіпотези про існування частинок світла-«фотонів» мали бути підтверджені експериментально.

1.3. Фундаментальні досліді квантової оптики у шкільному курсі фізики

Явище тиску світла. Ще у сімнадцятому столітті Іоган Кеплер (1571-1663 рр.), спостерігаючи за кометами, помітив,що їх хвости завжди були спрямовані від сонця. Пояснюючи це явище він припускав існування тиску світла. Це тиск,який створює електромагнітна хвиля,що падає на поверхню тіла, але обґрунтувати це не зміг.

У 1873 році, розвиваючи свою електромагнітну теорію світла Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879 рр.) розрахував цей тиск теоретично,а вперше дослідив на

практиці О.Лебедєв (1886-1912 рр.). З точки зору хвильової теорії, тиск світла можна пояснити таким чином: електромагнітна хвиля, падаючи на поверхню тіла, створює електромагнітне поле з напруженістю E , поле буде збуджувати електрони речовини і створювати електричний струм. Цей струм прямує вздовж лінії напруженості електричного поля E , рисунок 1.2.

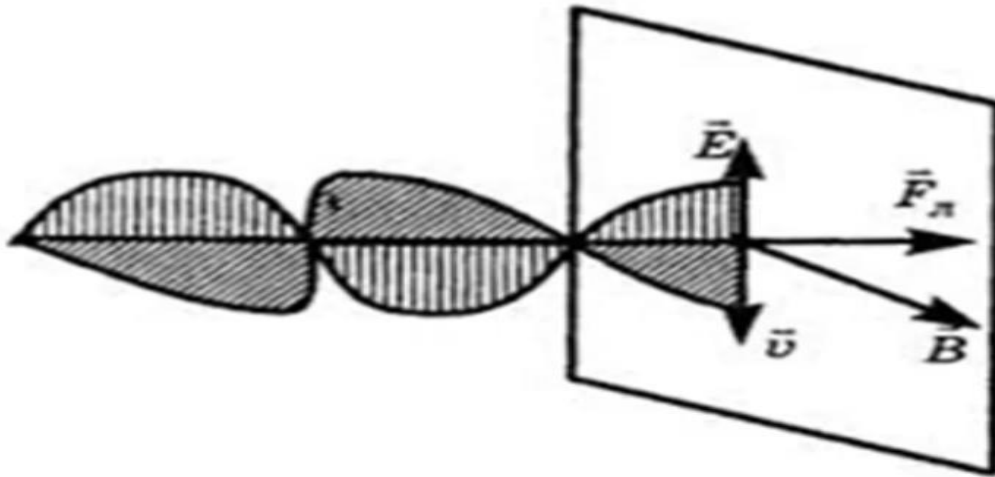


Рис. 1.2. Моделювання поширення електромагнітних хвиль (світла) простором за теорією Д.К.Максвелла

Електрони будуть рухатись в протилежну сторону зі швидкістю u , одночасно на ці електрони діє магнітне поле з індукцією B . Сила Лоренца F_L за правилами «лівої руки» буде спрямована вздовж електромагнітної хвилі, а значить тиснути в напрямку падіння світла.

У фотонній теорії тиск світла пояснюють зіткненням фотонів з поверхнею, що опромінюється. Фотон не має маси спокою, зате має імпульс p і енергію E і при зіткненні передають свій імпульс атомам речовини. Згідно теорії відносності Ейнштейна імпульс з енергією пов'язані формулою (1.2):

$$E^2 = p^2 c^2 + m c^4, \quad (1.2)$$

де c - швидкість світла.

У фотона маса спокою дорівнює нулю, з цього виходить $E=pc$, а $p=E/c$, поєднуючи $E=h\nu$ і $p=E/c$ виходить $p=h\nu/c$ для поверхні, яка буде його поглинати, а для дзеркальної поверхні з повним відбиванням фотона імпульс буде

подвійний цьому, а саме $p=2h\nu/c$. Зазвичай частина фотонів відбивається від поверхні, а частина поглинається, тому тиск буде дорівнювати:

$$P = F/S, \quad (1.3)$$

де F - сила тиску світла, а S - площа яку опромінює світло за одиницю часу.

$$P=F/S=(1+R)Nh\nu/cSt=(1+R)W/V=(1+R)\omega, \quad (1.4)$$

де R - коефіцієнт відбивання фотонів, N - кількість фотонів, $W/V=\omega$ - об'ємна густина випромінювання. Для чорної поверхні $R=0$, згідно формули (1.3) отримуємо тиск:

$$P=Nh\nu/cSt, \quad (1.5)$$

Для дзеркальної поверхні $R=1$, за формулою (1.5) отримуємо тиск:

$$P=2Nh\nu/cSt \quad (1.6)$$

Ці теоретичні розрахунки були підтверджені ретельно спланованими і проведеними дослідями А.Лебедева в 1900 році. Ускладнювало цей експеримент дуже мале значення тиску світла, яке треба було чітко зафіксувати.

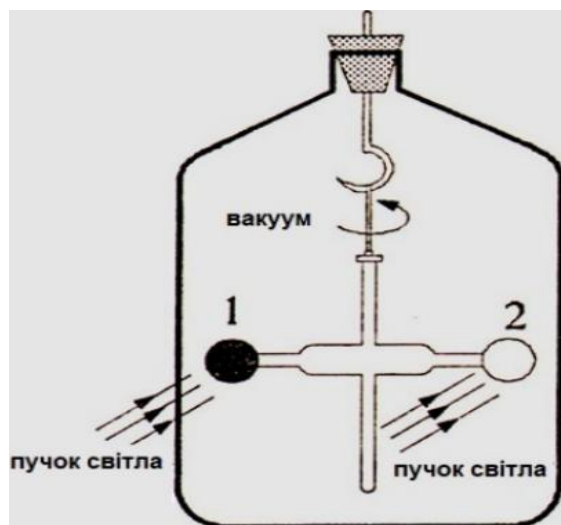


Рис. 1.3. Схема дослідів А.Лебедева, явища тиску світла

Він у вакуумну колбу (рис. 1.3) помістив крутильні терези, які були підвішені на тонкій кварцевій нитці. До терезів прилаштували тонкі крильця-пластинки з металевої фольги 1 і 2. Одну сторону крилець намостили сажею, друга була дзеркальна. На ці крильця подавалося інтенсивне освітлення через систему лінз і дзеркал. Періодично воно вимикалось для резонансу, завдяки якому

збільшувався кут закручення нитки. Пластика отримувала поштовх від світла і закручувала нитку.

Вимірюючи кут закручування нитки, Лебедев обчислював силу тиску. Значення тиску були дуже малі, порядку 40 нПа, але майже точно підтверджували обчислювання Д.К.Максвелла. Опромінюючи крильця, фотони передавали свій імпульс, від дзеркальних відбивались, а чорними поглинались. Оскільки дзеркальні крильця отримували імпульс вдвічі більший за чорні, то це зумовлювало закручення нитки.

У ході цього досліду виникали труднощі з нерівним нагріванням крилець, це вирішувалось виготовленням однакових, дуже тонких крилець з товщиною до 0,01 мм. Для зменшення конвекційних потоків Лебедев брав дуже велику колбу; в якій були терези і направляв пучки світла, то з одного, то з іншого боку, завдяки цьому сили діючі на крильця врівноважувалися. Цим дослідом Лебедев першим наочно довів корпускулярну природу електромагнітного випромінювання світла.

Фотоефект і його закони. У 1887 році Г.Герц (1857-1894 рр.) відкрив явище фотоефекту. Надаючи електromетру позитивного заряду (рис 1.4) і опромінюючи його кулю світлом, то заряд на електromетрі під дією світла змінюватись не буде. Але, якщо електromетр отримає негативний заряд і його кулю освітити, то електromетр зафіксує зменшення заряду-кількість електронів які були на ньому зменшується. Цей дослід Г.Герца показав, що електрони під дією світла можуть виходити з речовини. Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується виходом, або переміщенням електронів в речовині називають фотоефектом.



Рис. 1.4 Схема дослід фотоефекту Г.Герца.

Фотоефект буває зовнішній (коли електрони виходять за межі речовини) і внутрішній, коли електрони переміщуються всередині речовини. У 1889-1895 роках О.Столетов (1839-1896 рр.) провів детальні досліді впливу світла на метали. Він використовував вакуумну трубку (рис 1.5), в якій знаходилися два електроди - катод і анод, а також металева сітка, що пропускає світло.

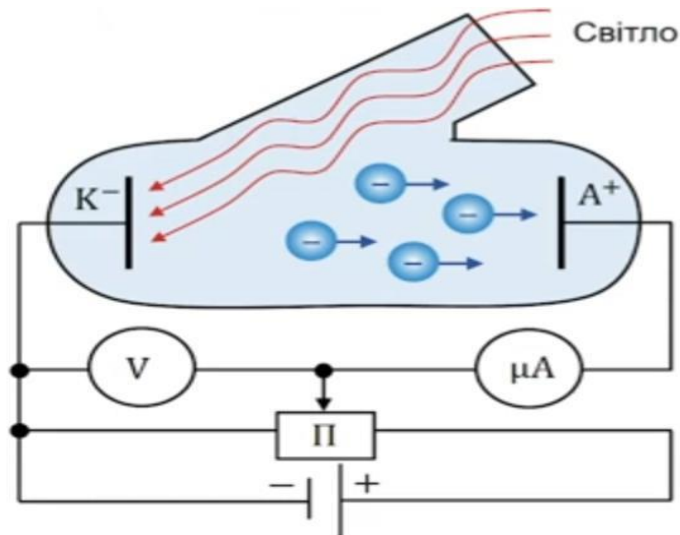


Рис. 1.5. Схема досліді О.Столетова з вивчення явища фотоефекту.

Електроди були під'єднані до батареї таким чином, щоб за допомогою опору (П) можна було змінювати значення і полярність напруги. У верхній частині вакуумній трубці було обладнане, напівпрозоре кварцове віконце через яке освітлювався катод. При освітлюванні катоду в ланцюзі з'являвся струм-фотострум, який реєструвався амперметром. Цей струм був обумовлений виходом електронів-фотоелектронів з катоду під дією його опромінювання. Ці фотоелектрони починають рухатись до аноду, створюючи фотострум. Спочатку сила фотоструму зростає за законом Ома, поки не досягає максимального значення сили струму, і далі залишається незмінним (рис 1.6). Це відбувається, коли всі електрони, які випромінює катод досягають анода. Найбільше значення фотоструму-це сила струму насичення I_n , яке можна виразити так:

$$I_n = q / t = N [e] / t, \quad (1.7)$$

де q - заряд перенесений фотоелектронами, t - час спостереження, N - кількість фотоелектронів, e - заряд електрона.

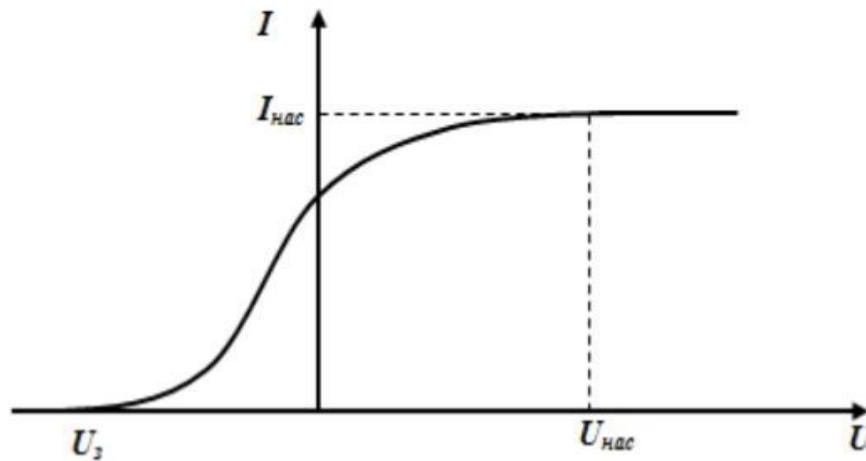


Рис. 1.6. Вольт-амперна характеристика вакуумного фотоелементу (зовнішній фотоефект).

Зменшуючи напругу між катодом і анодом сила фотоструму також зменшується, а при повному знятті напруги між катодом і анодом повного зникнення фотоструму не спостерігається. Це пояснюється наявністю кінетичної енергії у фотоелектронів E_k , яку вони отримують, поглинувши енергію фотонів.

Якщо поміняти полярність між катодом і анодом, то фотострум припиниться при певній напрузі, яка буде затримувати фотоелектрони затримуюча напруга U_z :

$$|e|U_z = \frac{mv_{max}^2}{2} \quad (1.8)$$

де m - маса електрону, v - швидкість фотоелектрону в момент виходу з катоду, $|e|$ - заряд електрону.

Опромінюючи катод різною довжиною хвиль і різною інтенсивністю світла, Столетов дослідив такі закономірності:

1. При незмінній частоті падаючого світла фотострум насичення пропорційний падаючому світловому потоку.
2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів не залежить від інтенсивності світла і збільшується зі збільшенням частоти опромінювання катода.

3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі $\lambda_{\text{ч}} - \text{червона межа фотоефекту}$, за якої починається фотоефект.

Для вибивання фотоелектрону з речовини необхідно передати йому енергію, ця енергія називається роботою виходу $A_{\text{вих}}$.

Робота виходу - це фізична величина, яка дорівнює енергії, яку треба надати електрону, щоб він міг вирватися з поверхні металу.

$$A_{\text{вих}} = h \nu_{\text{мін}} = h c / \lambda_{\text{мах}}, \quad (1.9)$$

Для більшості металів ця робота обчислена і є довідковим матеріалом. Тобто, якщо енергія передана фотоном електрону менша роботи виходу, то електрон не зможе вийти з речовини, а таке буде спостерігатися збільшення температури речовини. Якщо енергія фотону буде більше роботи виходу, то електрон зможе вирватись з речовини і залишок енергії використати на отримання кінетичної енергії, тобто початкової швидкості руху. Це припущення зробив Ейнштейн і вивів рівняння для зовнішнього фотоефекту (2.10):

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{мах}}^2}{2} \quad (1.10)$$

Рівняння Ейнштейну пояснює всі закони зовнішнього фотоефекту:

1. Чим більше інтенсивність світла, тим більше фотонів падає на катод, чим змушує більше електродів виходити з речовини.

2. Електрон може поглинути тільки один фотон, тому максимальна кінетична енергія електрону визначається тільки енергією фотона і не залежить від їх кількості.

3. Максимальна довжина електромагнітної хвилі або мінімальна частота відповідає мінімальній енергії електрона за якої можливий вихід електрона з речовини.

За пояснення явища фотоефекту в 1921 році Ейнштейн отримав Нобелівську премію.

Ефект Комптона. Квантове явище розсіювання фотонів, яке ефективно доводить фотонну структуру світла – є ефект Комптона. Його відкрив

американський фізик А.Комптон (1892-1962 рр.), а також навів теоретичне обґрунтування.

Комптон дослідив розсіювання рентгенівського випромінювання на вільних електронах. Рентгенівський промінь з довжиною хвилі λ , сфокусований діафрагмами (рис. 1.7), опромінює досліджувану речовину в вигляді тонкої пластини. Рентгенівський спектрограф складений з кристала Кр і детектора Д,

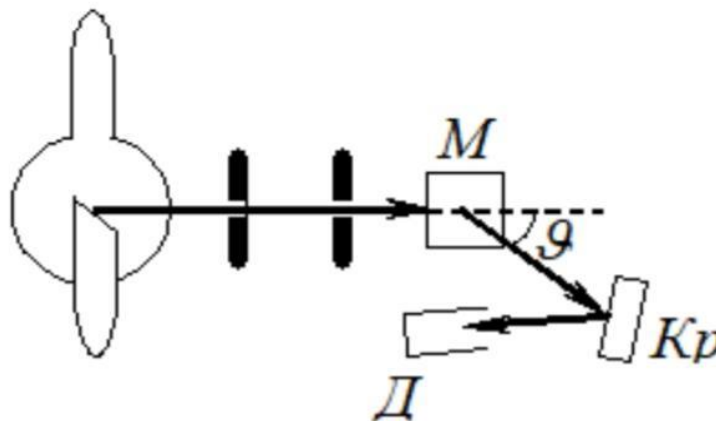


Рис. 1.7. Схема дослідів розсіювання випромінювання А.Комптоном.

А.Комптон експериментально вимірював склад розсіяного випромінювання. Спектрограф дозволяв вимірювати розподіл інтенсивності випромінювання при будь-якому заданому куті розсіювання θ . Вимірюючи довжину хвилі під різними кутами Комптон виявив, що в розсіяному пучку рентгенівського випромінювання з'являється випромінювання зі зміщеною довжиною хвилі λ' , причому довжина хвилі λ' була більше довжини хвилі опромінення речовини λ , і ставала тим більше, чим збільшувався кут розсіювання θ (рис. 2.10).

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (2.11)$$

Дослідивши це явище за різних кутів розсіювання і на різних речовинах, Комптон зробив висновок, що зміна довжини хвилі не залежить від роду речовини, а залежить тільки від кута розсіювання згідно формули (2.11).

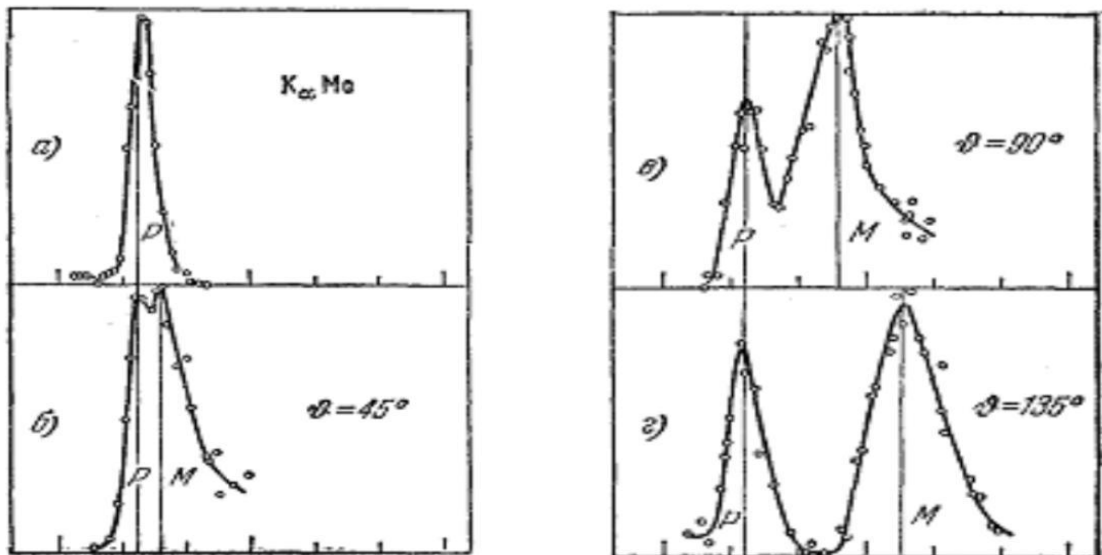


Рис. 1.8. Розсіювання довжини хвилі на графіті: а) при куті $\theta=0^\circ$, б) при куті $\theta=45^\circ$, в) при куті $\theta=90^\circ$, г) при куті $\theta=135^\circ$.

Величину, що дорівнює $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda$, назвали Комптоновським зсувом, а $\lambda_c=2,43$ Пм - константа, Комптонівська довжина хвилі електрону. Ефект Комптона пояснюють згідно квантової теорії. Розсіювання випромінювання (в даному випадку рентгенівського відбувається в наслідок зіткнень, як бильярдних шарів, фотонів з електронами речовини. У випадку рентгенівського випромінювання, енергія фотонів на порядок більша за енергію зв'язку електронів з ядром атома на зовнішньому енергетичному рівні, тому при зіткненні фотонів з валентними електронами відбувається, в більшості випадків, пружні зіткнення, при яких електронам передається частина імпульсу і енергії фотонів. Із-за чого фотони гублять свою енергію, а довжина хвилі при цьому збільшується, порівняно з падаючим випромінюванням.

Розрахунок зміни довжини хвилі можна зробити з огляду що процес зіткнення між фотонами і електронами дійсний для законів збереження енергії та імпульсів. Якщо фотон з енергією ϵ та імпульсом p стикається з нерухомим електроном речовини, який має нульовий імпульс і енергію спокою $E = mc^2$, то далі після зіткнення фотон відскакує під кутом θ з енергією ϵ' та імпульсом p' , а

електрон відлітає в протилежний бік з імпульсом p та енергією $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$. Згідно закону збереження імпульсу:

$$\begin{cases} \vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e, \\ \varepsilon + mc^2 = \varepsilon' + \sqrt{(p_e c)^2 + m^2 c^4}, \end{cases} \quad (2.12)$$

Розв'язавши цю систему отримаємо:

$$mc(p - p') = pp'(1 - \cos \vartheta). \quad (2.13)$$

Замість $p = h/\lambda$, $p' = h/\lambda'$ отримаємо:

$$mc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = \frac{(1 - \cos \vartheta)}{\lambda \lambda'} \Rightarrow \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \vartheta),$$

де

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = \frac{2\pi\hbar}{mc}. \quad (2.14)$$

Підставляючи в (2.14) константи, отримуємо: $\lambda_c = 2,43$ пм, що збігається з результатами дослідження, Комптонівській довжині хвилі електрону. Електрони, які вибиваються з речовини внаслідок зіткнення з фотонами називають електронами віддачі. Спираючись на хвильові уявлення випромінювання пояснити ефект Комптона неможливо. Причиною розсіювання за хвильовою теорією є вторинне випромінювання в атомах речовини, виникаюче із-за вимушених коливань атомів під дією електромагнітного поля падаючого випромінювання. Частота вторинних коливань повинна збігатись з частотою первинних, а значить і довжина хвилі повинна бути у них однаковою, а це суперечить результатам досліду Комптона. Дослід ефекту Комптона і пояснення його механізму з огляду квантової теорії, існування фотонів було визнано, як незаперечний факт.

Результати дослідів Комптона, Лебедева, Столетова підтвердили квантову гіпотезу М.Планка і довели корпускулярно-хвильову теорію електромагнітного випромінювання. Ці досліді змінили уявлення фізичної сутності Всесвіту з огляду сучасної науки, завдяки цьому вони є фундаментальними.

Висновки першого розділу

На основі проведеного теоретичного аналізу проблеми навчання квантової оптики у шкільному курсі фізики можна зробити такі висновки:

1. У підрозділі «1.1. Взаємозв'язок теорії та експерименту як провідний дидактичний принцип навчання шкільного курсу фізики» було проаналізовано взаємозв'язок теорії та експерименту і встановлено, що він є фундаментальним дидактичним принципом навчання фізики, який набуває особливого значення при вивченні квантової оптики. Експеримент виступає як джерело знань (емпірична основа теорії), засіб перевірки теоретичних положень та ілюстрація практичного застосування квантових явищ. Реалізація цього принципу забезпечує формування наукового світогляду учнів, розуміння методології фізичного пізнання та усвідомлення процесу розвитку наукових теорій від експериментальних фактів до теоретичних узагальнень.

2. У підрозділі «1.2. Методичні особливості викладання квантової оптики у шкільному курсі фізики» висвітлено, що викладання квантової оптики у шкільному курсі фізики має низку методичних особливостей, зумовлених складністю та абстрактністю квантових понять, відсутністю безпосереднього чуттєвого досвіду учнів у цій галузі, необхідністю подолання класичних уявлень про природу світла. Ефективна методика навчання має базуватися на: історико-генетичному підході (розгляд еволюції поглядів на природу світла), поєднанні якісного та кількісного аналізу явищ, використанні аналогій та моделей, опорі на експериментальні факти як вихідний пункт формування квантових уявлень.

3. У підрозділі «1.3. Фундаментальні дослідження квантової оптики у шкільному курсі фізики» визначено, що фундаментальні дослідження квантової оптики (дослід Столетова з фотоефекту, дослід Ленарда та Міллікена, дослід Боте з корпускулярними властивостями світла, дослід Комптона, дослід з інтерференцією одиничних фотонів) відіграють ключову роль у формуванні квантових уявлень учнів. Кожен з цих дослідів демонструє певний аспект квантової природи світла та має чітке методичне призначення: від виявлення суперечностей класичної теорії до побудови корпускулярно-хвильової моделі

світла. Систематичне вивчення цих дослідів забезпечує логічну послідовність формування квантових понять та розуміння дуалістичної природи електромагнітного випромінювання.

Аналіз шкільних підручників та навчальних програм виявив, що фундаментальні дослід квантової оптики представлені переважно у теоретичному викладі, без достатньої експериментальної підтримки. Демонстраційні експерименти обмежуються, як правило, лише дослідом з фотоефекту, тоді як інші ключові дослід розглядаються описово або через історичні відомості. Це створює розрив між теоретичними положеннями та їх емпіричним обґрунтуванням, ускладнює розуміння учнями експериментальних основ квантової теорії. Тому існує об'єктивна потреба у розробці методики демонстрування фундаментальних дослідів квантової оптики з використанням сучасних технічних засобів, адаптованих до умов шкільного кабінету фізики. Така методика має забезпечити наочність квантових явищ, можливість кількісних вимірювань основних характеристик процесів, формування в учнів цілісного розуміння експериментальних основ квантової оптики. На нашу думку, поєднання реальних демонстраційних експериментів з віртуальними лабораторіями, комп'ютерним моделюванням та відеоматеріалами історичних дослідів створює оптимальні умови для формування квантових уявлень, забезпечує різнобічне сприйняття матеріалу та враховує індивідуальні особливості учнів. Результати проведеного теоретичного дослідження створюють основу для розробки методики демонстрування фундаментальних дослідів квантової оптики у шкільному курсі фізики, про що піде мова у другому розділі роботи.

РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Віртуальний експеримент при вивченні квантової фізики

Сучасний стан в нашій країні, а також потреба удосконалення методики шкільного викладання, потребує впровадження нових прийомів та методів в викладанні навчальних дисциплін. Особливо це стосується фізики, яка є базовою природничою дисципліною, що потребує глибокого розуміння явищ та процесів які відбуваються у природі навколо нас, під час проведення експериментів і досліджень. Розглядаючи у цьому контексті квантову оптику, яка вивчає різноманітні явища, що не мають аналогів в макросвіті і важко наочно продемонструвати, тому використання в методиці викладання віртуального фізичного експерименту за допомогою сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, надає нові можливості у свідомому і міцному засвоєнні та розумінні учнями сутності цих явищ.

Явища, які неможливо спостерігати наочно з різних причин можуть бути змодельовані на комп'ютерній техніці у вигляді симуляцій різних експериментів, досліджень або явищ, за якими можна буде не тільки спостерігати, а й брати безпосередньо участь у виконанні цього експерименту. Комп'ютерні симуляції - це максимально наближена до реальності емітація фізичних процесів. За допомогою навчальних інтерактивних симуляцій можна проводити дослідження демонструвати експерименти та явища, тренувати різноманітні практичні уміння і навички учнів. Використання таких симуляцій відбувається, переважно для:

- інтерактивних демонстрацій фізичних явищ і процесів, проведення навчальних досліджень;
- для виконання віртуальних лабораторних робіт;
- при проектуванні явищ, механізмів та конструкцій;

Використання навчальних інтерактивних симуляцій у шкільному курсі фізики має як переваги, так і недоліки. Перевагами комп'ютерних симуляцій є:

- відсутність у потребі коштовного лабораторного устаткування (в умовах обмеженого фінансування нашої освіти - це дуже доречно);

- безпечність в використанні (техніку безпеки практично порушити неможливо);

- можливість вивчення і спостереження абстрактних процесів, які важко або неможливо спостерігати (особливо це доречно при дослідженні мікросвіту, зокрема в квантовій оптиці);

- можливість повторювати експеримент безліч разів (для повторювання реальних експериментів необхідні витрати різноманітних ресурсів на відновлення обладнання, досліджуваних речовин тощо);

- можливість учню працювати індивідуально, у зручний для себе час.

До недоліків використання навчальних інтерактивних симуляцій у шкільному курсі фізики можна віднести:

- неможливість отримання навичок збирання лабораторних стендів і устаткування;

- можливість технічних негараздів з комп'ютерною технікою і програмним устаткуванням.

Як ми бачимо переваг значно більше і вони більш вагомі за недоліки. Особливо зручно використовувати віртуальний експеримент в вигляді комп'ютерних симуляцій при онлайн навчанні, коли маючи методологічні вказівки з використання завдання, учень або студент, може в будь-який зручний для нього час зробити лабораторну роботу, або відвідати якесь дослідження, або використовуючи симуляцію дослідити якесь явище. Також навчання з допомогою симуляцій підвищує в учнів зацікавленість і мотивацію в учбовому процесі. Навчання перетворюється у фізичну інтерактивну гру, що заохочує дітей до освоєння навчального матеріалу. Бо, зазвичай, симулятори розробляються з привабливою візуалізацією та дозволяють змінювати широкий спектр параметрів експерименту. Учні мають можливість самостійно експериментувати, бачити наслідки своїх досліджень, спостерігати ненаочні явища в реальному часі.

Найбільш зручними і доступними є такі програмні продукти як:

- PhET Interactive Simulations – це найпопулярніший симуляційний інструмент з викладання фізики. Це програмне забезпечення розроблене в

Університеті Колорадо. Його симуляції охоплюють, практично всі теми фізичної науки. Перекладені на багато мов, розробники надають безкоштовну можливість інтерактивно провести більше 150 експериментів і досліджень, з можливістю впливу на параметри досліджень;

- ROQED Science – ця платформа надає можливість проведення віртуальних лабораторних робіт на 3D-симуляторах для природничих наук, у тому числі і для фізики;

- gocodile Physics – ця платформа надає можливість створювати симуляції електричних схем, технічних пристроїв та установок, теплових процесів;

- Algodoo – надає можливість досліджувати і моделювати експерименти на закони збереження імпульсу та енергії, дозволяє моделювати механічні процеси з різними складними сценаріями руху.

Також багато видавництв та компаній, розробляючи програмне забезпечення для навчання, пропонують симуляцію, як частину своїх продуктів, згідно каталогів. Навчальні платформи, такі як Moodle, Google Classroom містять посилання на різні освітні симулятори. Зважаючи на це, використання віртуального експерименту ідеально підходить для більш успішного розуміння сутності і засвоювання, як теоретичного, так і практичного матеріалів з квантової оптики. В якості прикладу продемонструємо, як можна наочно дослідити явище фотоефекту і інтерактивно пояснити закони фотоефекту за допомогою камп'ютерної симуляції “Фотоефект” на платформі PhET Interactive Simulations.

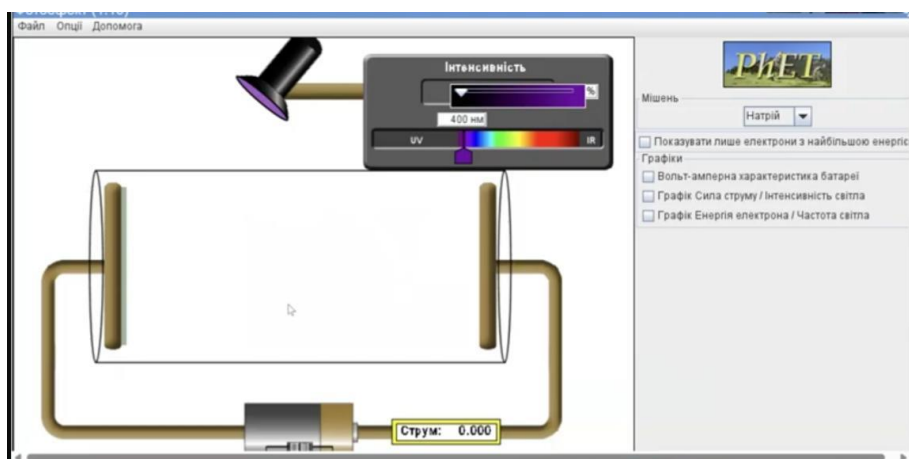


Рис. 2.1. Симуляція “Фотоефект” на платформі PhET Interactive Simulations

За допомогою цієї симуляції з дуже зручною візуалізацією є можливість побачити це складне для уявлення фізичне явище. Ця симуляція нагадує вакуумний фотоелемент для дослідження фотоефекту в досліді О.Столетова (рис. 2.1). Ми бачимо прозору колбу з електродами - катодом і анодом, до яких під'єднано батарею постійного струму з можливістю зміни значення струму і полярності (рис. 2.2). Катод має шар речовини на яку буде направлене освітлення. Речовину на катоді в цій симуляції можна змінювати, по замовчуванню стоїть натрій. Світло ми можемо вмикати, вимикати і міняти його інтенсивність, також можемо міняти довжину хвилі освітлення (рис. 2.2).

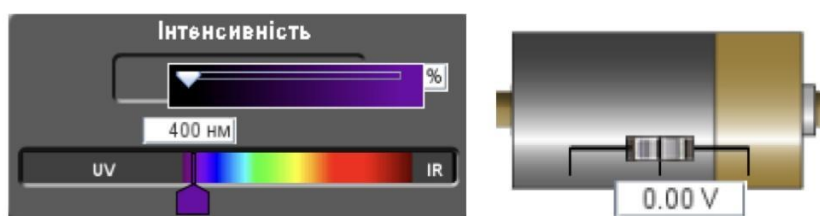


Рис. 2.2. Перемикачі в симуляції PhET (інтенсивності світла, довжини хвилі опромінення, напруги між електродами)

Візуалізуємо явище фотоефекту, ввімкнувши освітлення катоду за допомогою перемикача інтенсивності світла. Ми бачимо вихід фотоелектронів з катоду, під впливом світла (рис. 2.3) та їх рух (фотоелектронів) від катоду до аноду (заряджених частинок), а значить фотострум. Ми спостерігаємо завдяки цій симуляції явище фотоефекту.

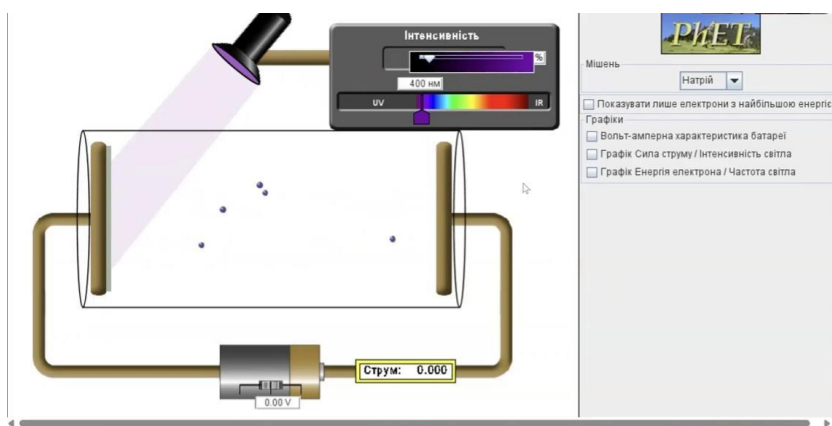


Рис. 2.3. Візуалізація явища фотоефекту на симуляції PhET.

За визначенням: фотоефект – явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випромінюванням електронів. Перевіримо за допомогою цього стимулятора перший закон фотоефекту і продемонструємо його сутність. Його можна сформулювати таким чином: кількість фотоелектронів, що випромінює катод за одиницю часу прямо пропорційна інтенсивності світла. За допомогою перемикача інтенсивності світла в симуляції додаємо інтенсивності світла і бачимо збільшення фотоелектронів, які виходять з катоду (рис. 2.4). Чим більше додаємо інтенсивності освітлення, тим більше електронів вилітають з катоду.

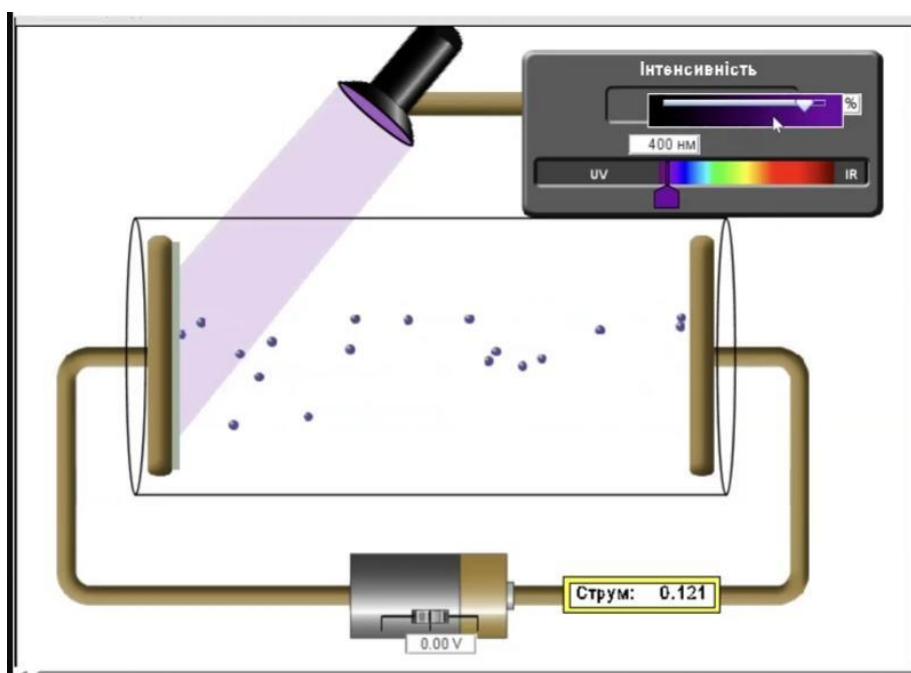


Рис. 2.4. Візуалізація першого закону фотоефекту на симуляції PhET.

При збільшенні інтенсивності освітлення катоду, збільшується кількість фотонів, які поглинаються електронами речовини на катоді, чим спонукають більшу кількість фотоелектронів виходити з речовини.

Проаналізуємо за допомогою цього симулятора другий закон фотоефекту, який можна сформулювати так: максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується при збільшенні частоти падаючого світла і не залежить від інтенсивності світла. За допомогою перемикача зміни довжини хвилі, зменшуємо значення довжини хвилі, а значить збільшуємо частоту випромінювання. На симуляції бачимо збільшення швидкості фотоелектронів. За

допомогою перемикача зміна інтенсивності освітлення, змінюємо його значення і бачимо, що це ніяк не міняє швидкість електронів (рис. 2.5).

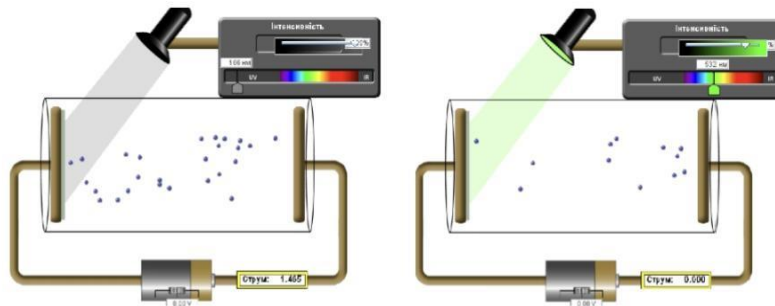


Рис. 2.5. Візуалізація другого закону фотоефекту на візуалізації PhET.

Це пояснюється тим, що електрон може поглинути лише один фотон, тому його максимальна кінетична енергія залежатиме тільки від енергії фотону. Розберемо за допомогою симуляції третій закон фотоефекту про існування для кожної речовини червоної межі фотоефекту, з якої воно починається. Якщо речовина освітлювати більшою довжиною хвилі, то явища фотоефекту не відбувається. За допомогою перемикача довжини хвилі освітлення доводимо довжину хвилі до 541 нм на симуляції, явище фотоефекту не відбувається (рис. 2.6), отже $\lambda=540$ нм – це червона межа фотоефекту для натрію. Пояснити це можна так: максимальна довжина світлової хвилі відповідає мінімальній енергії фотона, якщо $h\nu = A_{\text{вих}}$, то електрони не вилітатимуть з речовини.

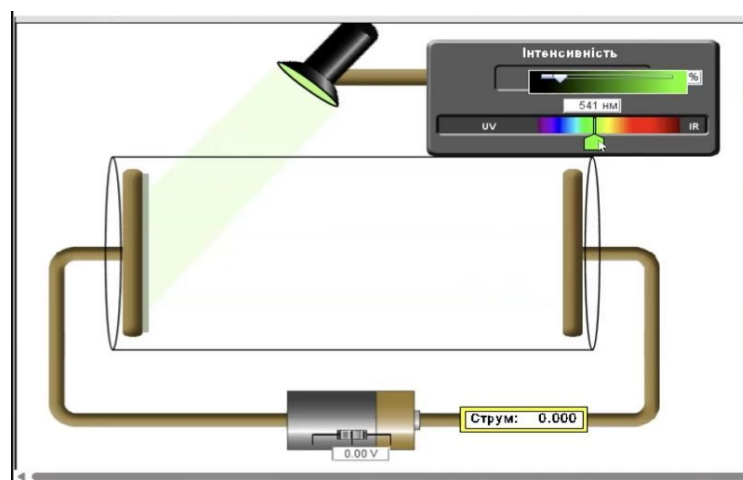


Рис. 2.6. Візуалізація третього закону фотоефекту на симуляції PhET.

Таким чином, за допомогою цього симулятора можна наочно пояснити суть явища фотоефекту і продемонструвати сутність його законів. Комп'ютерні симуляції дають змогу суто теоретичне навчання, навіть фундаментальних досліджень в квантовій фізиці, перетворити у дослідницький процес. Це надає змогу підвищити якість освітнього процесу, рівень пізнавального інтересу і навчальних досягнень учнів за відповідною темою.

2.2. Методичні рекомендації з проведення фундаментальних дослідів з квантової оптики

Важливим завданням для вчителів при розкритті тем квантової фізики є якісний відбір фізичного змісту уроку. Існує кілька факторів, які змінюють зміст шкільної фізичної освіти. До них відносяться: ступінь розвитку фізики, потреба суспільства у фізичних знаннях, що визначається ступенем технічного розвитку, рівень розвитку методики викладання фізики, стан матеріально-технічної бази навчання фізики у школі.

Необхідним елементом викладання фізики є модернізація та розробка нового обладнання для демонстрації експерименту, фізичного практикуму. Вчитель має бути підготовлений всебічно як з теоретичних питань, і у практичному плані. Роль об'єктної візуалізації знижується через зменшення кількості годин, відведених на природничо-наукові предмети. На допомогу вчителям надходять інформаційні технології. Засоби інформаційних технологій дозволяє провести експерименти з будь-якої галузі фізики: механіки, електрики, молекулярної, ядерної, атомної фізики та інших розділів, скорочуючи при цьому час проведення даного дослідження [3].

Інформаційні технології розширюють традиційні засоби навчання на етапі освіти і разом із формують систему засобів навчання, спрямовану використання нових інформаційних технологій, застосування яких створює умова навчання фізиці в навчально-інформаційному середовищі [2].

Подібна система засобів навчання разом із навчально-методичною літературою, програмним забезпеченням навчального курсу фізики та засобами наукової організації роботи педагога та учнів складає навчально-методичний комплекс, що застосовує засоби новітніх інформаційних технологій [1].

Світло, а саме, електромагнітна хвиля – важливий матеріальний об’єкт природи, яке має дію на всі живі і неживі об’єкти Всесвіту. У великій мірі завдяки розумінню сутності цього об’єкта (явища) і технічному використанню його властивостей, закономірностей поширення простором наша цивілізація рухається вперед технологічно. У шкільному курсі фізики саме оптика – це важливе явище вивчає. Формування уявлення про сутність цього явища учнями в школі має дуже велике значення в формуванні світогляду устрою всесвіту.

У шкільному курсі фізики оптика викладають у три етапи: в основній школі учні вивчають геометричну оптику (основою, якої є закон прямолінійного поширення світла), у старшій школі геометрична модель переходить в хвильову і в кінці вивчення шкільного курсу фізики учні знайомляться з квантовою оптикою і опановують корпускулярно-хвильові властивості світла. Це викликає труднощі в сприйнятті учнями природи цього явища, не як трьох окремих оптик, а сформувати уявлення про світло як явище, яке має сутність як хвильову, так і корпускулярну. Виходячи з цього, дослідження особливостей методики вивчення квантової оптики в шкільному курсі фізики є дуже важливою. Також трудностю у вивченні квантової оптики є обмежена наочність досліджуваних явищ і процесів (квантування, корпускулярно-хвильовий дуалізм), які не мають аналогів в макросвіті. Тому особливість вивчення квантової оптики є в своїй більшості застосування теоретичних методів навчання. Мислення теоретично формує вміння аналізувати різноманітні моделі і використовувати їх на практиці.

Основними задачами при вивченні квантової оптики є формування уявлень про специфічні будову і закони мікросвіту на основі яких розкрити сучасне уявлення про будову речовини. Розуміння фізичної сутності учнями квантової гіпотези Планка, поняття «фотон» та його властивостей, природа корпускулярно-хвильового дуалізму електромагнітних хвиль, явища та законів

фотоефекту, явища тиску світла-передбачає методика вивчення квантової оптики в шкільному курсі фізики. Досліди які розглядаються в цьому розділі докорінно змінили існуючі уявлення про сутність світла і сформували нову науково-фізичну картину світу, тому вони відносяться до фундаментальних.

Застосування - факти - модель - наслідки - експеримент – така можлива схема викладання послідовності навчального матеріалу теми «Квантова оптика». У підрозділі «Застосування» наводять приклади застосування технологій, які ми використовуємо у повсякденному житті завдяки освоєння явищ і законів квантової оптики, щоб спонукати зацікавленість учнів до засвоєння цієї теми. Від фотоелементу, який у кожного є вдома на побутових пристроях, надворі в системі освітлення, до сонячних вітрел і батарей на супутниках в космосі.

У підрозділі «факти» можна розглянути суперечності, які неможливо було пояснити і розв'язати за допомогою попередньої теорії, наприклад, ті що увійшли в історію під назвою «ультрафіолетова катастрофа», (за допомогою хвильової теорії не було можливості пояснити рівноважне теплове випромінювання або сутність фотоефекту), які стали підґрунтям для виникнення нової теорії.

У підрозділі «моделі» учні знайомляться з квантовою гіпотезою Планка, головною тезою якої є випромінювання світла окремими квантами, енергія яких $E=h\nu$; та теорією Ейнштейна, за якою світло поглинається окремими квантами з тією ж енергією. Дуже важливо для розуміння фізичної сутності цього навчального матеріалу є формування базових понять, на яких будується квантова оптика, це поняття «кванту», «фотона», «роботи виходу», «червоної межі фотоефекту».

У підрозділі «наслідки», звертаємо увагу учнів на тому, що явище тиску світла згідно хвильової теорії пояснюється наявністю у фотонів імпульсу (за недостатньої інтенсивності світла – флуктуацій фотонів), що підтверджувало б корпускулярну природу світла.

Таким чином переходячи до «експерименту», наводимо докази існування таких наслідків, а саме – фундаментальних дослідів Лебедева, Комптона,

Столетова з квантової оптики, які наявно доводять існування «світлових цеглинок», за допомогою яких пояснюють корпускулярну сутність світла. На рисунку (2.7) зображена схема методики розгляду теми «Квантова оптика»



Рис. 2.7. Схема методики розгляду теми «Квантова оптика».

У зв'язку з труднощами технічної організації експериментальних досліджень з теми «Квантова оптика» на рівні шкільного кабінету фізики, лабораторних робіт з демонстраційними фізичними експериментами не передбачено, але «знахідкою» у цьому плані є застосування віртуального комп'ютерного експерименту. На різноманітних електронних симуляціях, які дозволяють проводити досліди без безпосереднього контакту з установками та обладнанням для проведення експерименту.

Починати вивчення квантових властивостей світла варто з наведення прикладів використання в повсякденному житті приладів та механізмів, які працюють на основі явищ і законів квантової оптики, щоб зацікавити учнів до розглядання і засвоювання даної теми. У якості прикладів можна навести роботу фотоеlementів, які використовують у побутових приладах, у системах освітлення, сонячних батареях, якими обладнують як побутові прибори, так і великі

електростанції, космічні кораблі, явище фотосинтезу – завдяки якому існує біосфера на нашій планеті. Після чого варто викласти історичні передумови виникнення вивчення в фізиці як оптики, так і квантової оптики. Загострити увагу на ситуації, яка виникла в фізичній науці наприкінці дев'ятого століття, так звану «ультрафіолетовою катастрофою», коли виникла ситуація неможливості пояснення за допомогою класичної теорії випромінювання властивостей абсолютно чорного тіла. Пояснити учням передумови, які підштовхнули Планка висунути нову, на той час революційну теорію, яка пояснювала сутність електромагнітного випромінювання. Ключовим моментом, якої були в дискретності енергії випромінювання світла. Залежності енергії електромагнітних хвиль від їх частоти ($E=h\nu$). Зрозуміти учням сутність цієї теорії допомагають фундаментальні дослідження з квантової оптики.

Спочатку розглянемо явище фотоефекту. Його першими винайшов Герц і Гальвакс освітлюючи позитивний і негативний заряд на кулі електromетру і експериментально, виявивши зменшення негативного заряду при його опромінюванні. Зробивши припущення, що такий наслідок можливий за умови вильоту електронів з опроміненого елемента, причому це явище спостерігалось не на всіх речовинах. Дослід В. Гальвакса є можливість відтворити в шкільних умовах. Для цього потрібно мати генератор УФ-випромінювання, електromетр і цинкову пластину з негативним зарядом. Цей дослід наочно показує існування явища фотоефекту. Більш розгорнутий дослід фотоефекту, який проводив О. Столетов можна розглянути за допомогою комп'ютерної симуляції PhET Interactive Simulations (рис. 2.8).

Ця симуляція надає змогу візуалізувати цей фізичний процес, переконатися завдяки самостійному змінюванню інтенсивності освітлювання катоду, змінюванню затримуючої напруги, матеріалу, який опромінюється у справедливості законів фотоефекту, визначити самостійно «червону межу фотоефекту». Це дозволить учням краще наочно зрозуміти складні фізичні явища, значно підвищить їх зацікавленість. Експериментально, досліджуючи фотоефект учні переконуються у виконанні його законів.

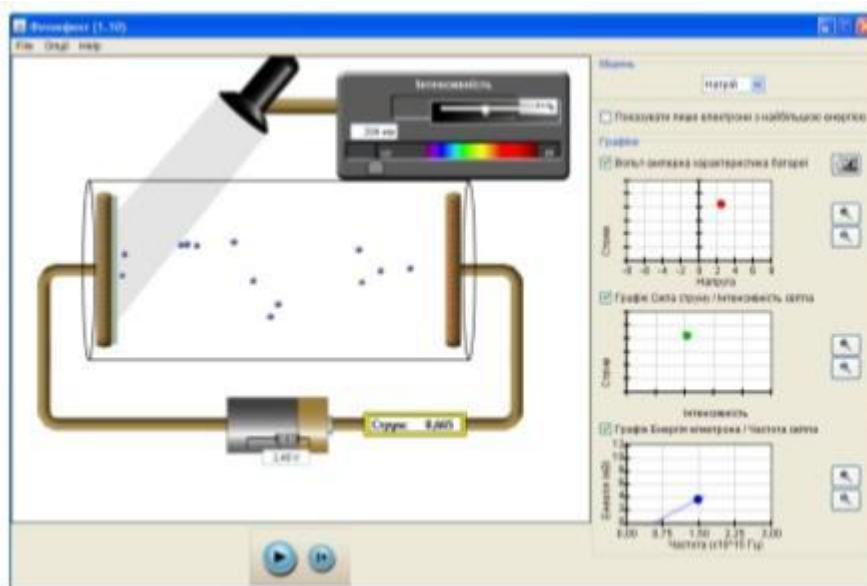


Рис. 2.8. Симуляція PhET для дослідження фотоефекту.

1. Енергія фотоелектронів залежить від частоти, а не від інтенсивності опромінювання.
2. Кількість фотоелектронів пропорційно інтенсивності опромінювання речовини і не залежить від частоти опромінювання.
3. Кожному металу властива певна довжина хвилі (червона межа фотоефекту), вище від якої явище фотоефекту не спостерігається.

Важливо звернути увагу учнів на рівнянні Ейнштейну для зовнішнього фотоефекту, за допомогою якого він пояснив це явище: $h\nu = A_{\text{вих}} + (m v_{\text{мах}}^2)/2$, а також зв'язок маси і енергії фотона: $E = mc^2 = h\nu$. Чим більшою є енергія фотона, тим більша його маса, при цьому маса спокою у фотона нульова. Практичному закріпленню цього матеріалу буде допомагати вирішення задач з використанням цих формул.

Переконатися в існуванні фотонів допомагає ознайомлення учнів з фундаментальним дослідом квантової фізики – ефектом Комптона. Комптон експериментально довів наявність фотонів завдяки їх пружньому розсіюванню на вільних електронах, фіксуванням зміни довжини хвилі відбитого

випромінювання, одержавши формулу для розрахунку зміни довжини хвилі розсіяного випромінювання : $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=(1-\cos\theta)h/mc$.

На основі хвильової теорії світла неможливо дати пояснення явищу зміни довжини хвилі при розсіюванні на вільних електронах. Для спрощення сприймання учнями цього явища, його треба змодюлювати, як пружнього зіткнення двох бильярдних шарів, де в якості шарів виступають фотони і вільні електрони (рис. 2.9).

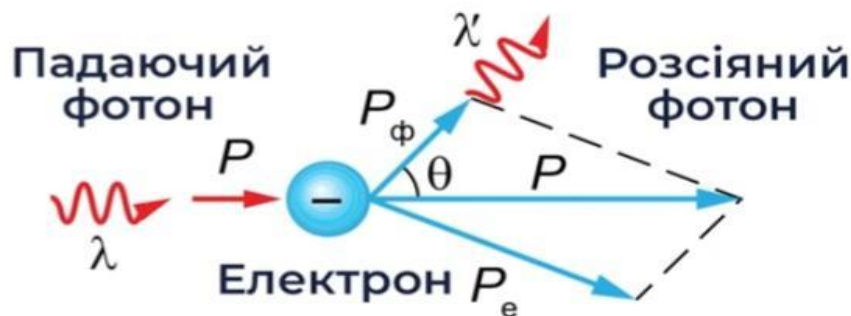


Рис. 2.9. Схема зіткнення фотонів з вільними електронами в досліді Комптона.

Тому доречно, перед вивченням цієї теми, нагадати учням тему пружних та непружних ударів з класичної механіки. Також треба зауважити, що ефект Комптона наочно важко продемонструвати у шкільному кабінет фізики (дуже важко спостерігати, бо він дуже малий) при опромінюванні видимим спектром світла, бо енергія атома співвідносна з енергією фотона в цьому випадку. Для спостереження цього ефекту потрібно застосування рентгенівського або гамма-випромінювання, яке має високу енергію. Аналізуючи ці два фундаментальні досліди треба зауважити, що явище фотоефекту і ефекту Комптона – це явища взаємодії фотонів і електронів. Але в явищі фотоефекту фотони поглинаються зв'язаними електронами, а в ефекті Комптона розсіюються при взаємодії з вільними електронами.

Розуміти сутність корпускулярно-хвильового дуалізму природи світла, дуже допомагає розуміння фундаментального дослідів проведеного П.Лебедєвим, яке доказує наявність тиску світла. Для кращого розуміння явища учнями, доречно

навести аналогію, наприклад, з тиском газу у молекулярно-кінетичній теорії. Таке дуже наочне явище, як відхилення хвостів комет від сонця, ще в середні віки намагалися пояснити вчені. Явище тиску світла на нашій планеті спостерігати дуже важко, бо воно дуже мале із-за його нівелювання опором навколишнього середовища, але в астрофізичному плані під дією великих температур і випромінюванням зірок, воно стає досить відчутним. У якості прикладу можна вказати проекти сонячних «вітрил» для пересування у космосі. Пояснити явище тиску світла можливо як з боку електромагнітної теорії (як дії сили Лоренца електромагнітної хвилі у напрямку поширення хвилі, яку розрахував ще Дж.К.Максвелл); так і з боку квантової теорії Планка, показуючи, що фотони мають імпульс і здатні чинити тиск на перешкоду. Ці пояснення доводять, що світло має як властивості хвиль, так і властивості частинок, які доповнюють одна одну.

Сучасна фізика встановила, що такі ж властивості мають всі елементарні частинки речовини – їм теж властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм. Після засвоєння цієї теми, в учнів повинні остаточно сформуватись уявлення про будову Всесвіту, в якому матерія проявляє властивості як речовини, так і поля. Закріплення отриманих теоретичних знань з цієї теми можливо втілити у формі вирішення задач і виконання лабораторних робіт. Зазвичай через складнощі експериментальних досліджень у квантовій фізиці, лабораторні роботи з демонстрацією експериментів не проводять, увагу звертають на закріплення матеріалу учнями за допомогою вирішення тематичних задач різного типу і рівня складності. Але й у цьому випадку знов можна звернутися до комп'ютерних симуляцій, за допомогою яких можна провести і практичні і лабораторні роботи з цієї теми. І, звичайно, спонукає до більш якісного засвоєння знань – контроль засвоєння навчального матеріалу. Для перевірки засвоєння знань учнів використовуємо контрольні роботи, самостійні роботи, фізичні диктанти, виконання творчих робіт, тестування учнів.

Методика проведення контрольних робіт є в виділенні на це окремого заняття, в ході якого учням надається декілька тематичних завдань, які

потребують розуміння фізичного змісту теми. У випадку самостійних робіт, учням надається дві-три задачі, які пропонується розв'язати за час не більший за половину учбового заняття. Теми типових задач з квантової оптики:

- визначення енергії фотонів;
- знаходження імпульсів фотонів;
- обчислення тиску світла;
- розрахунок червоної межі фотоефекту для заданої речовини;
- оцінка роботи виходу з певної речовини;
- розрахунок швидкості фотоелектронів.

Фізичний диктант проводиться впродовж декількох хвилин в вигляді бліц-опитування, відповіді на яке, учні фіксують на окремому аркуші, або у робочих зошитах. Вчитель ставить питання, на які можна надати короткі відповіді текстові або числові або пропонує певні твердження, які учням потрібно підтвердити або вибрати з декількох одне правильне.

Тестові завдання, зазвичай, використовують з іншими типами контролю, як завдання простого рівня. Взагалі краще використовувати всі типи контролю, для більш глибокого розуміння рівня засвоєння матеріалу учнями.

2.3. План-конспект уроку фізики вивчення нового матеріалу на тему: «Явище і закони фотоефекту» (11 клас)

Тема уроку: явище і закони фотоефекту.

Мета уроку:

навчальна: переконатися в корпускулярних властивостях електромагнітних хвиль, вивчивши явище фотоефекту, засвоїти закони фотоефекту, здобути вміння і навички до розв'язання задач, застосовуючи рівняння Ейнштейну;

розвивальна: розвивати понятійне, логічне, образне, критичне та креативне мислення, творчу уяву, практичні уміння і навички із застосування набутих знань під час вирішення практичних завдань;

виховна: виховувати почуття відповідальності, уважності, активності, самостійності, позитивне ставлення до вивчення фізики.

Тип уроку: вивчення нового матеріалу.

Методи уроку: пояснювально-ілюстративний, проблемно-пошуковий, робота з ІКТ, евристична бесіда.

Хід уроку:

1. Повторення і перевірка домашнього завдання. Проведення фізичного диктанту (На окремих аркушах коротко надати відповіді на питання, з подальшою перевіркою):

– коли і хто вперше висунув припущення про випромінювання світла порціями? (Планк, 1900 році).

– як ці порції світла були названі? (Квант).

– елементарна частинка, що характеризує квант світла? (Фотон)

– за якою формулою обчислюється енергія кванту? ($E = h\nu$).

– за якою формулою можна знайти масу фотону? ($m = h\nu/c^2$).

– за якою формулою можна знайти імпульс фотона? ($p = h\nu/c = h/\lambda$).

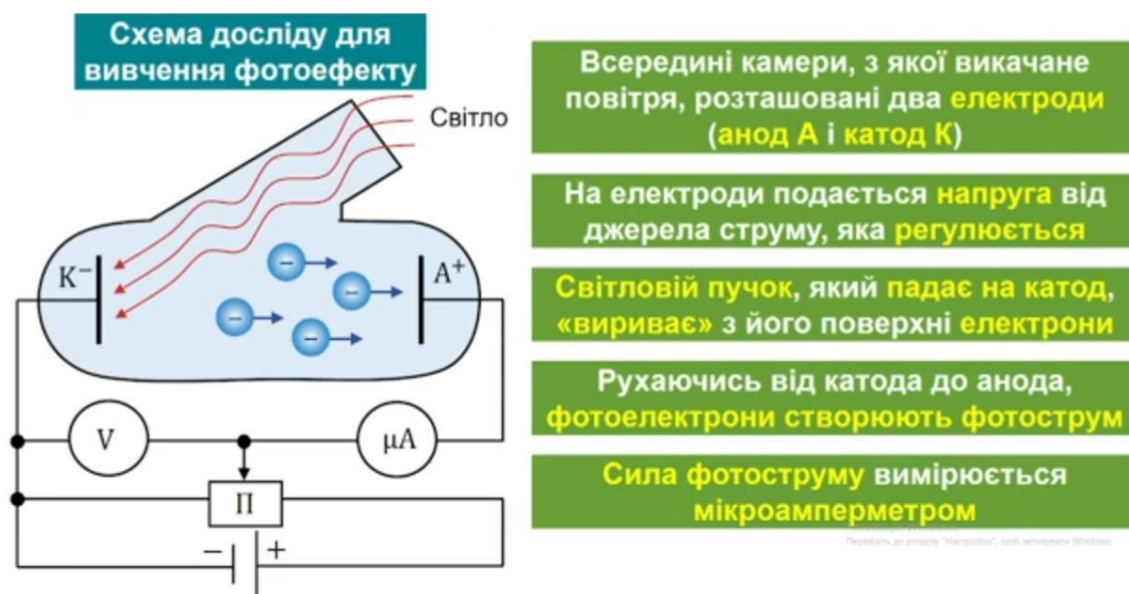
– які властивості має фотон? (немає маси спокою, існує в русі).

– пояснити вислів корпускулярно-хвильовий дуалізм світла (має властивості як хвилі, так і потоку частинок).

2. Вивчення нового матеріалу. Наприкінці 19 століття було відкрито оптичні явища, які не виходило обґрунтувати з допомогою електромагнітної теорії світла, одним з таких явищ є фотоефект.

Фотоефект – вибивання електронів з поверхні речовини під дією світла. У 1887 році Г.Герц вперше спостерігав явище розрядження зарядженої кулі електromетру під дією опромінення ультрафіолетовим випромінюванням, яке дало поштовх розвитку квантових уявлень про природу світла.

Упродовж 1888-1892 О.Столетов на основі експериментальних досліджень більш досконало вивчив явище зовнішнього фотоефекту, визначивши три його закони.



Розрізняють декілька видів фотоефекту:

- зовнішній (вихід електронів з речовини під впливом світла);
- внутрішній (збільшення електропровідності напівпровідника або діелектрика за рахунок електронів вирваних з атомів під дією світла).

Висвітлення фізичного змісту явища фотоефекту передбачає такі етапи:

- завдяки освітленню речовини, один з електронів речовини поглинає фотон, внаслідок чого його енергія збільшується;
- цей електрон рухається до поверхні речовини;
- виходить з неї (якщо йому вистачає енергії) в інше середовище і стає фотоелектроном (електрон, який вийшов із речовини під дією світла).

Дослідивши зовнішній фотоефект О.Столетов визначив три закони:

- за незмінної довжини хвилі падаючого світла кількість фотоелектронів, що виривається з катода за одиницю часу пропорційна інтенсивності світла (демонструємо це за допомогою комп'ютерної симуляції «Фотоефект» PhET);
- максимальна початкова швидкість фотоелектронів залежить лише від частоти світла і не залежить від його інтенсивності, зі збільшенням частоти швидкість зростає (демонструємо це за допомогою цієї самої симуляції);
- для кожної речовини існує «червона межа» фотоефекту, тобто мінімальна частота (або максимальна довжина хвилі), за якої він спостерігається, залежить від хімічної природи речовини (демонструємо за допомогою цієї самої симуляції).

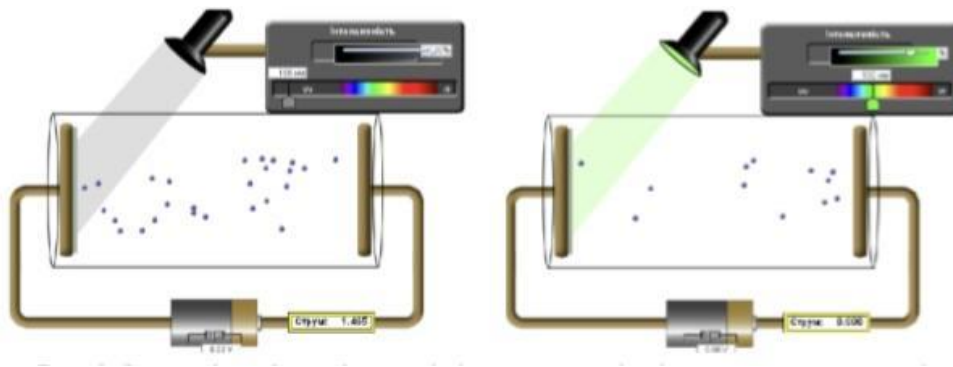


Рис. 2.10. Навчальна комп'ютерна інтерактивна симуляція «Фотоефект» PhET

Рівняння Ейнштейну для фотоефекту. У 1905 році, А.Ейнштейн одержав рівняння фотоефекту, застосувавши закон збереження енергії до взаємодії фотона з електроном.

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv^2}{2} \quad \text{рівняння Ейнштейна для фотоефекту.}$$

3. Закріплення матеріалу проводимо шляхом розв'язування задач.

Задача 1. Якої швидкості отримують вирвані з калію електрони внаслідок опромінення його фіолетовим світлом з довжиною хвилі 0,42 мкм, якщо робота виходу електронів з калію $A = 2$ еВ?

Дано:

$$\lambda = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$A = 2 \text{ еВ} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$v = ?$$

Розв'язок:

Запишемо рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вих}}\right)}{m_e}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,42 \cdot 10^{-6}} - 3,2 \cdot 10^{-19}\right)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 5,57 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $v = 5,57 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$

Акцентуємо увагу учнів на важливих результатах, що виходять з рівняння Ейнштейна за таких умов, якщо:

- $h\nu < A$ – явище фотоефекту не спостерігається;
- $h\nu > A$ – фотоефект відбувається;
- $h\nu_{\min} = A$ – фотоефект можливий ($\nu_{\min} = A_{\text{вих}}/h$ – «червона межа фотоефекту», мінімальна частота випромінювання за якої можливий фотоефект).

Задача 2. Визначте довжину хвилі світла, яким освітлюється поверхня срібла, якщо фотоелектрони мають кінетичну енергію $4,5 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Дано:

$$A = 4,3 \text{ еВ} = 6,88 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$E_k = 4,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\lambda = ?$$

Розв'язок:

Записуємо рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2}$$

$$\lambda = \frac{hc}{A + W_k}$$

Розраховуємо λ :

$$\text{Відповідь: } \lambda = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{6,88 \cdot 10^{-19} + 0,45 \cdot 10^{-19}} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

4. Підводимо підсумки уроку. Обговорення таких питань:

- хто і коли відкрив явище фотоефекту?
- у чому сутність явища фотоефекту?
- пояснити закони фотоефекту;
- пояснити умову існування фотоефекту;
- що таке «червона межа фотоефекту»?
- пояснити фізичну суть формули фотоефекту Ейнштейна.

5. Домашнє завдання: параграф 41, вправа 14 (2,3); підготовка до виконання лабораторної роботи.

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ ПЛАНКА

Мета роботи: дослідження залежності фотоструму від напруги, що прикладена до фотоелемента та освітленості фотокатода; встановлення червоної межі фотоефекту; визначення роботи виходу електронів та сталої Планка.

Обладнання: стенд (на стіні), макет (на столі), набір світлофільтрів.

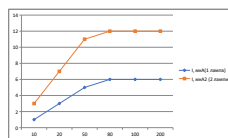
Теоретичні відомості

Фотоелементи широко використовують у сучасній науці та техніці. Це прилади, в яких світлова енергія перетворюється на енергію електричного струму. Дія таких приладів ґрунтується на явищі фотоелектричного ефекту (фотоефекту). Фотоефект встановлює безпосередній зв'язок між електричними та оптичними явищами. Фотоефект буває зовнішнім, внутрішнім та в запірному шарі.

1. Вольт-амперна характеристика вакуумного фотоелемента СЦВ-3 за двох різних рівнів освітленості.

U , В	I , мкА (1 лампа)	I , мкА (2 лампи)
10	1	3
20	3	7
50	5	11
80	6	12
100	6	12
200	6	12
300	6	12

Ю

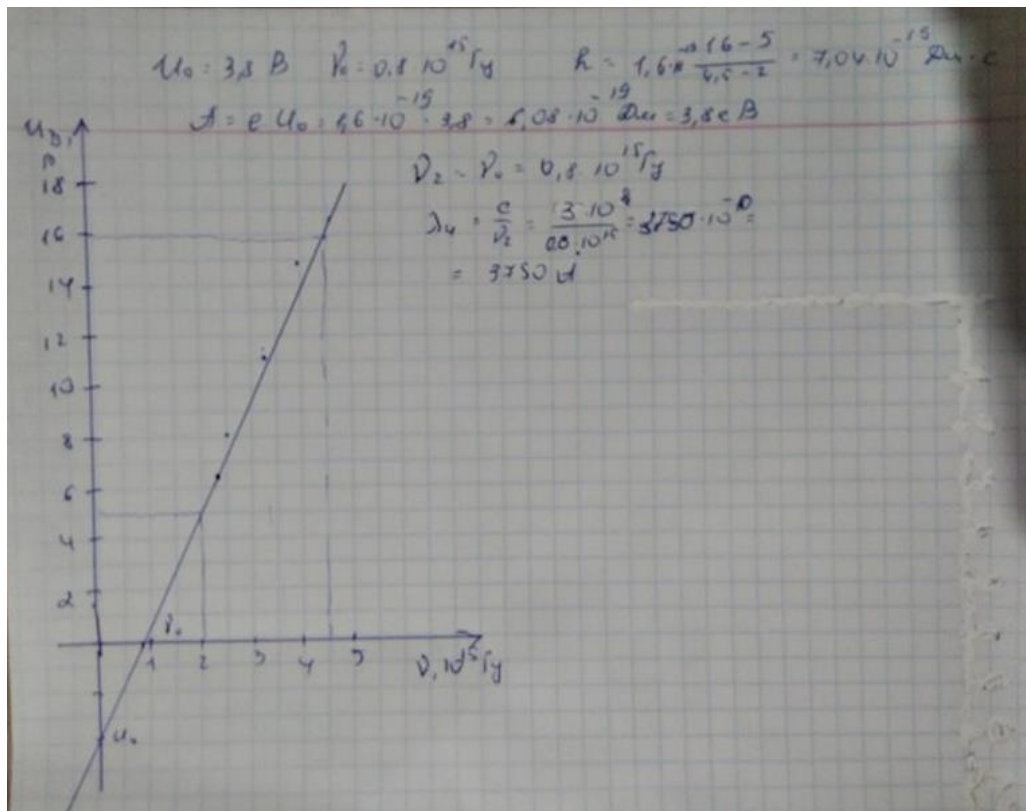


За графіком ВАХ фотоелемента знаходимо значення струму насичення в обох випадках: $I_{н1}=6$ мкА, $I_{н2}=12$ мкА.

2. Залежність напруги, що забезпечує відсутність фотоструму, від частоти зовнішнього випромінювання.

ν , Гц	$2,20 \cdot 10^{15}$	$2,52 \cdot 10^{15}$	$3,39 \cdot 10^{15}$	$4,12 \cdot 10^{15}$	$4,60 \cdot 10^{15}$
U_3 , В	6,60	8,05	11,25	15,00	16,50

2. Проводимо відповідні розрахунки:



3. Особливість змісту квантової фізики також накладає відбиток на методику вивчення. У цьому розділі учнів знайомлять зі своєрідністю властивостей та закономірностей мікросвіту, які суперечать багатьом уявленням класичної фізики. Від школярів його засвоєння потрібно не просто високий рівень абстрактного, а й діалектичне мислення. Суперечності хвиля – частка, дискретність – безперервність розглядають із позицій діалектичного матеріалізму. Тому при вивченні цього розділу вчителю важливо спиратися на ті філософські знання, які отримали учні в курсі суспільствознавства, частіше нагадувати їм, що

метафізичного протиставлення (чи так, чи ні) діалектика протиставляє твердження: і так, і ні (в одних конкретних умовах – так, в інших – ні). Тому немає нічого дивного в тому, що світло в одних умовах (інтерференції, дифракції) поводить як хвиля, в інших – як потік частинок.

Число демонстраційних дослідів, які можна поставити щодо цього розділу, у середній школі дуже невелика. Тому, крім експерименту, широко використовують малюнки, креслення, графіки, фотографії треків, плакати, діапозитиви та комп'ютерні моделі. Насамперед необхідно ілюструвати фундаментальні дослідів (досвід Резерфорда з розсіювання α -частинок, дослідів Франка та Герца та ін.), а також роз'яснити принцип улаштування приладів, що реєструють частинки, прискорювачів, атомного реактора, атомної електростанції тощо. п. При вивченні цього розділу широко використовують навчальні кінофільми «Фотоефект», «Фотоеlementи та їх застосування», «Тиск світла», «Радіоактивність та атомне ядро», «Ядерна енергетика в мирних цілях», кінофрагменти «Дискретність енергетичних рівнів атома» (досвід Франків – Герца водню», діафільми «Трекові прилади в ядерній фізиці», «Прискорювачі заряджених частинок», «Цей мирний добрий атом», «Будова атома та атомного ядра», а також діапозитиви «Атомне ядро» та настінні таблиці («Атомна електростанція» та ін.).

Одним із найбільш перспективних напрямів використання інформаційних технологій у фізичній освіті є комп'ютерне моделювання фізичних явищ та процесів. Комп'ютерні моделі легко вписуються в традиційний урок, дозволяючи вчителю продемонструвати на екрані комп'ютера багато фізичних ефектів, а також дозволяють організовувати нові, нетрадиційні види навчальної діяльності учнів. Комп'ютерні моделі дозволяють користувачеві керувати поведінкою об'єктів на екрані монітора, змінюючи початкові умови експериментів і проводити різноманітні фізичні дослідів. Відеозаписи натурних експериментів роблять курс привабливішим і дозволяють зробити заняття живими та цікавими.

Висновки другого розділу

У другому розділі магістерської роботи висвітлено методичні особливості продуктивного викладання квантової оптики на основі поєднання віртуального експерименту та фундаментальних дослідів, на основі зроблено такі висновки:

1. Віртуальний експеримент є ефективним засобом навчання квантової фізики, оскільки дозволяє візуалізувати явища мікросвіту, недоступні для безпосереднього спостереження, змінювати параметри процесів у широких межах, багаторазово відтворювати досліди та формувати в учнів наочні уявлення про квантові закономірності.

2. Аналіз сучасних віртуальних лабораторій (PhET Interactive Simulations, ROQED Science, crocodile Physics, Algodoo) показав їхній значний дидактичний потенціал для вивчення фотоефекту, Комптон-ефекту, тиску світла, дуалізму світла, що особливо важливо в умовах обмеженості матеріально-технічного забезпечення шкільних кабінетів фізики.

3. Визначено методичні умови ефективного використання віртуального експерименту: обов'язкове попереднє знайомство учнів з історією відкриття явища та реальною експериментальною установкою, чітка постановка дослідницьких завдань, організація самостійної роботи учнів з віртуальною моделлю, обговорення результатів та їх теоретична інтерпретація, поєднання віртуального і реального експерименту (де це можливо).

4. Розроблено детальні методичні рекомендації з проведення фундаментальних дослідів квантової оптики (досліди Столетова, Лебедева, Комптона), які включають: опис експериментальної установки, методику віртуальної демонстрації, систему питань для аналізу результатів, завдання для самостійної роботи учнів.

5. Розроблено план-конспект уроку вивчення нового матеріалу на тему «Явище і закони фотоефекту» для 11 класу профільного рівня, який реалізує діяльнісний підхід через поєднання історичного екскурсу, віртуального експерименту, проблемних ситуацій та самостійної дослідницької роботи учнів. Структура уроку включає всі необхідні етапи формування нових знань:

мотиваційний (створення проблемної ситуації через суперечність між класичною теорією та експериментальними фактами), операційний (віртуальний експеримент з дослідження законів фотоефекту, введення поняття фотона, виведення рівняння Ейнштейна), рефлексивний (усвідомлення корпускулярних властивостей світла, оцінка власного розуміння матеріалу). На уроці передбачено використання інтерактивної симуляції фотоефекту з PhET, яка дозволяє учням самостійно встановити залежність фотоструму від інтенсивності світла, частоти випромінювання та роботи виходу, що забезпечує активну пізнавальну діяльність та формування дослідницьких умінь.

Запропоновані методичні розробки готові до впровадження у навчальний процес закладів загальної середньої освіти та можуть бути використані вчителями фізики для підвищення ефективності викладання квантової оптики в умовах сучасної цифрової освіти.

ВИСНОВКИ

У підготовки кваліфікаційної роботи було виконано такі основні завдання дослідження:

1. Проаналізували досліді і їх значення при вивченні фізики. Фізичний експеримент у навчанні розглядається з кількох позицій: як основний метод вивчення явищ навколишнього світу, як спосіб зв'язку теорії з практикою, як необхідний елемент змісту фізичної освіти, як методичний засіб, що забезпечує наочність навчання, що розвиває інтерес до фізики, а також спосіб організації самостійної, творчої, дослідницької діяльності учнів. Проведення домашніх дослідів та спостережень, а також можливість продовження експерименту за допомогою комп'ютерних технологій дають можливість розширити сферу зв'язку теорії з практикою: доповнюють демонстраційний експеримент вчителя та фронтальні лабораторні роботи, що проводяться у класі; розвивають інтерес до фізики та техніки; народжують творчу думку та розвивають здатність до винахідництва; привчають учнів до самостійної дослідницької роботи; виробляють у них спостережливість, увагу, наполегливість та акуратність.

2. Описали особливості вивчення квантової оптики в шкільному курсі фізики. Фізика – наука, що вивчає загальні закони природи, вона також є науковою основою більшості технологій. Саме тому питанню викладання фізики у школах нині відводять значної ролі. Однією зі складних методичних завдань викладання фізики у шкільництві є запровадження основ квантової фізики. Методичні проблеми, які зустрічаються у процесі навчання, не наочність квантовомеханических об'єктів (частка-хвиля), складність математичного апарату, незвичність її вихідних ідей і понять. У зв'язку із цим питання квантової фізики акуратно вводять у шкільний курс. Основні завдання цього розділу – ознайомлення учнів зі специфічними законами, що діють в галузі мікросвіту, і завершення формування уявлень про будову атома і атомного ядра.

Багато явищ і об'єктів у мікросвіті є візуальними, а представлення механізмів їх проявів дуже важко, тому необхідно впровадження комп'ютерних засобів навчання, які відіграють важливу роль у вдосконаленні методів викладання квантової фізики. Комп'ютерне моделювання та інтерактивні програми можуть допомогти учням візуалізувати та зрозуміти абстрактні концепції, такі як квантова заплутаність та суперпозиція. Важливо заохочувати учнів ставити запитання та досліджувати свої власні інтереси у галузі квантової фізики. Цього можна досягти за допомогою групових дискусій, дослідницьких проєктів та презентацій, які дозволяють учням глибше вникати у конкретні теми та розвивати навички критичного мислення. Вивчення фізики сприяє розумінню учням навколишнього світу, його явищ і процесів, а вже надалі ці знання впливають на формування мислення учнів та їх світогляду.

3. Висвітлили віртуальний експеримент при вивченні квантової оптики. При вивченні квантової фізики, пов'язаної з будовою речовини та поведінкою мікрочастинок, немає можливості проводити експерименти на реальному обладнанні з наступних причин: мізерно малі розміри досліджуваних систем, час протікання експерименту, що не укладається в рамки навчального процесу; фінансова недоступність експериментальних установок, підвищені вимоги до техніки безпеки тощо. Виходом із цієї ситуації є комп'ютерний експеримент –

віртуальна модель реального фізичного досліду. Вивчення цього розділу є складним для тих, хто навчається через його математичний апарат і відсутність наочності. Тому автори вважають, що для досягнення кращого результату навчання з квантової фізики натурний експеримент лабораторного практикуму доцільно доповнити комп'ютерним моделюванням тих лабораторних робіт, виконання яких у реальному режимі скрутне. Виконання віртуальних лабораторних робіт дозволить краще зрозуміти суть фізичних процесів, які у експерименті.

4. Розробили методичні рекомендації з вивчення фундаментальних дослідів з квантової оптики. При вивченні фізики необхідно приділяти увагу як змістовному, так і операційному компоненті навчання. Тільки спираючись на діяльнісний підхід у навчанні, вчитель зможе розвивати інтелектуальні здібності, пізнавальний інтерес, експериментальні вміння, дослідницькі навички учнів, що дозволяють пізнавати навколишню дійсність, що призведе до формування наукової картини світу. Експеримент є одним із найважливіших елементів навчання фізики. Основні принципи навчання, такі як наочність, системність, послідовність, і особливо науковість та зв'язок теорії з практикою, визначають необхідність застосування шкільного фізичного експерименту у навчанні. Введення у навчально-пізнавальну діяльність учнів виконання лабораторних робіт різного формату сприяють розвитку інтелектуальних та практичних експериментальних умінь, що включають в себе з одного боку вміння визначити мету експерименту, висувати гіпотези, підбирати прилади, планувати експеримент, обчислювати похибки, аналізувати результати, оформляти звіт про виконану роботу, і, з іншого боку, збирати експериментальну установку, спостерігати, вимірювати. Необхідно акцентувати увагу на тому, що теоретичне навчання не протиставляється навчанню за допомогою експериментів, а є частиною інтегрованого процесу.

Декларація використання ГШІ (GAIDeT)

Розкриття факту делегування завдань генеративному ШІ.

Автори заявляють про використання генеративного ШІ у процесі дослідження та підготовки рукопису. Відповідно до таксономії GAIDeT (2025), наведені нижче завдання були делеговані інструментам генеративного ШІ за повного людського нагляду:

- визначення мети дослідження;
- оцінювання новизни дослідження та виявлення прогалин;
- переклад;
- рекомендації.

Використаний інструмент генеративного ШІ: Claude.

Повну відповідальність за фінальний рукопис несуть автори.

Інструменти генеративного ШІ не зазначаються як автори та не несуть відповідальності за кінцеві результати.

Декларацію подав(ла): Сергій Голдаєв.

Додаткова примітка: ми використали Claude у визначенні мети дослідження, перекладі і редагуванні окремих фрагментів тексту роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Атаманчук П.С., Семерня А.Н., Практичні заняття з методики навчання фізики (старша школа) : навч. посібник. Кам'янець-Подільський : ПП Буйницький О.А., 2014. 272 с.
2. Буйницька О. Використання інформаційно-комунікаційних технологій у шкільному курсі фізики. Фізика та астрономія в школі. 2005. №4. С. 24- 29.
3. Войтків Г. Навчальний фізичний експеримент як основне джерело активізації пізнавальної діяльності учнів з фізики. Наукові записки. «Педагогічні науки». Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В.Винниченка. 2009. Вип. 82. Ч.2. С. 303–307.
4. Войтків Г. Формування дослідницьких умінь здобувачів освіти засобами шкільного фізичного експерименту. Фізика та астрономія в рідній школі. 2019. №1. С.11-20.
5. Головка М.В. Тенденції модернізації змісту шкільної фізичної та астрономічної освіти. Збірник наукових праць «Педагогічна освіта: теорія і практика». Кам'янець-Подільський: КПНУ, 2015. Вип. 18. С. 237–242.
6. Головка С. В., Крячко І .П., Мельник Ю. С. Фізика та астрономія (рівень стандарту): підручник для 11 класу ЗЗСО. Київ: Педагогічна думка, 2019. 288 с.
7. Дементієвська Н.П., Соколюк О.М. Віртуальні лабораторні роботи з фізики з використанням інтерактивних комп'ютерних моделювань: збірник навч. матеріалів. Київ: ЩО НАПН України, 2022. 157 с.
8. Збірник phet-симуляцій. Збірник наукових праць Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасна освіта і наука: проблеми, перспективи, інновації» / Демкова В.О., Кузьминський О.В., Мисліцька Н.А. К., 2021. С. 134-138.
9. Дубова Галина, Гаркун Ірина. Роль демонстраційного експерименту в мотивації пізнавальної діяльності здобувачів освіти під час викладання фізики. Фізика та астрономія в рідній школі. 2020. №1. С. 19-23.
10. Експеримент на екрані комп'ютера / авт. кол. Ю.О.Жук, С.П.Величко, О.М.Соколюк та ін.; за ред.: Жука Ю.О. Київ: Педагогічна думка, 2012. 180 с.
11. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика і астрономія (рівень стандарту): підр. для 11 кл. закладів загальної середньої освіти. Київ: Оріон, 2019. 272 с.
12. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. у 3-х т. Навч. посібник. Т.3: Оптика. Квантова фізика. К.: Техніка, 2001. 518 с.

13. Мухін В. І. Особливості використання інформаційно-комунікативних технологій на роках фізики. Фізика в школах України. 2007. №8. С. 25-28.
14. Навчальні програми для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти «Фізика та астрономія»/ за ред. Ляшенко О. І. та ін. 2017. 55 с.
15. Непорожня Л. В. Методична система навчання хвильової і квантової оптики із застосуванням комп'ютерних технологій у ЗЗСО: дис... на здобуття наук. ступеня к.пед.н.: 13.00.02. Київ : НПУ імені М.П.Драгоманова. 2009. 187 с.
16. Остапчук Микола. Методика вивчення оптики в школі природничо-математичного профілю. Фізика та астрономія в рідній школі. 2017. №3. С. 10-19.
17. Павленко А.І. Методи типології і класифікації у дослідженнях і дидактиці фізики. Науково-дослідна в системі підготовки фахівців-педагогів у природничій, технологічній і комп'ютерній галузях: матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф. (19-20.09.2019 р., м.Бердянськ). Бердянськ: БДПУ, 2019. С.197-198.
18. Пасько О.О., Однорець Л.В. Фундаментальний фізичний експеримент у навчанні фізики : навч. посібник. Суми : Сумський держ. ун-т, 2021. 121 с.
19. Савченко В.Ф., Бойко М.П., Дідович М.М., Закалюжний В.М., Руденко М.П. Навчальний фізичний експеримент (методичний практикум): навч. посібник для студентів. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2011. 540 с.
20. Садовий М. Навчальний експеримент у системі вивчення фізики в загальноосвітній школі. Наукові записки Кіровоградського держ. пед. ун-ту імені В.Винниченка. Серія : Педагогічні науки. 2012. Вип. 109. С. 3-10.
21. Соловійова О.Ю. Використання комп'ютерних технологій у курсі фізики. Фізика в школах України. Харків: Вид. група «Основа». 2009. №11. с.12-14.
22. Шинкарьова А.О., Кадченко В.М. Експериментальні дослідження з оптики у цифровій лабораторії Vernier. Збірник наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні тренди в освіті та науці: від теорії до практики» / Відп. редактор проф. Т.Ю. Дудка. К., 2022. С.87-91.
23. Школа О.В., Голдаєв С.О. Інноваційні підходи українських учителів-новаторів у викладанні фізики. Зб. тез наук. доповідей здобувачів вищої освіти БДПУ на Днях науки 13 травня 2025 р. Запоріжжя : БДПУ, 2025. Т.3: Природничі науки. С.79-82.