

Ю. С. Мельник

Інститут педагогіки Національної академії педагогічних наук України

ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ КВАНТОВОЇ ОПТИКИ В СТАРШІЙ ШКОЛІ

Анотація: У статті обґрунтовано особливості вивчення квантової оптики відповідно до вимог Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти в умовах профільної школи. Здійснено ретроспективний аналіз змісту і структури навчального матеріалу з оптики в шкільних програмах і підручниках. З'ясовано, що в розділі розглядається значна кількість нових понять і явищ, які не мають аналогів у макросвіті. Встановлено, що під час навчального експерименту недостатньо розкриваються особливості і кількісні закономірності явищ мікросвіту та можливості їх практичного використання. Обґрунтовано, що в програмах потрібно більшої уваги надавати розв'язуванню експериментальних задач, які спонукали б до творчого мислення та самостійності в процесі навчання. Розглянуто методичні підходи до вивчення квантових властивостей світла в старшій школі, розкрито циклічний принцип побудови навчального матеріалу.

Ключові слова: корпускулярно-хвильовий дуалізм, фотон, елементарні частинки, квантова оптика, фотоефект, методи пізнання, моделювання, наукова картина світу, старша школа.

Постановка проблеми. Аналіз змісту і структури навчального матеріалу з оптики в сучасних шкільних програмах і підручниках та дидактичні особливості його засвоєння свідчать про те, що подальшого вирішення потребує проблема усунення суперечностей між необхідним науковим рівнем вивчення квантових властивостей світла й відповідним методичним забезпеченням.

Першою науковою теорією, на основі якої намагалися пояснити фізичну природу світла, була теорія світлових частинок, розроблена і описана І.

Ньютоном в трактаті «Оптика». Згідно з корпускулярними уявленнями про речовину і поле вчений обґрунтував більшість відомих оптичних явищ: прямолінійне поширення, відбиття й заломлення світла тощо [7].

На початку ХХ століття уявлення про природу світла значно змінилися. Німецький фізик М. Планк припустив, що атоми речовини поглинають і випромінюють енергію окремими порціями – квантами. А в 1905 р. А. Ейнштейн висловив думку, що світло не лише випромінюється, а й поширюється у вигляді дискретних об'єктів.

Виникла надзвичайна ситуація, коли явища інтерференції й дифракції можна було пояснити, вважаючи світло хвилею, а випромінювання й поглинання – потоком частинок. Так народилася сучасна теорія світла, що є синтезом корпускулярної й хвильової. В її основу покладено ідею про те, що світло одночасно має хвильові й корпускулярні властивості.

Дуалізм властивий не лише фотонам світла, а й усім елементарним частинкам взагалі – електрону, протону, нейтрону та ін. Луї де Бройль висунув гіпотезу, що будь-яка елементарна частинка має хвильові властивості, а будь-яка хвиля – корпускулярні.

На основі положень корпускулярно-хвильового дуалізму природи світла й елементарних частинок, їх взаємоперетворюваності розкривається матеріальна єдність навколишнього світу та підтверджується діалектичний зв'язок дискретного і неперервного, реального і ймовірного, необхідного й випадкового, визначеного й невизначеного, а підпорядкування ядерних процесів фундаментальним законам збереження слугує ілюстрацією принципу руху і незнищеності матерії.

Квантова фізика є вищою сходинкою пізнання природи. Її елементи, без яких уявлення про будову і властивості навколишнього світу будуть неповними і невідповідними сучасному науковому знанню, мають вивчатися в загальноосвітній школі.

Оволодіння сучасним змістом та методикою вивчення квантової оптики відповідно до вимог Державного стандарту базової і повної загальної середньої

освіти в умовах профільної школи, синтез і подальший розвиток інноваційних методів навчання фізики, формування наукового світогляду є актуальною дидактичною проблемою [4].

Аналіз актуальних досліджень. Значний внесок у розвиток квантової фізики зробили такі видатні вчені, як Н. Бор, Луї де Бройль, У Гейзенберг, П. Кюрі, Л. Ландау, М. Лауе, В. Паулі, Е. Резерфорд, Е. Фермі, Е. Шредінгер та ін.

Питання навчання фізики в умовах профільної школи, особливості методичних аспектів вивчення квантової оптики висвітлено в працях Л. Благодаренко, О. Бугайова [1], С. Величка [2], М. Головка [3], С. Гончаренка, С. Каменецького, Є. Коршака, І. Кучерука [5], О. Ляшенка, М. Мартинюка, Л. Непорожньої [6], В. Розумовського, А. Усової, Ю. Широкова, М. Шута та ін.

Мета статті – виявити та обґрунтувати особливості вивчення квантової оптики відповідно до вимог Державного стандарту в умовах профільної школи.

Виклад основного матеріалу. Існує три підходи до опису системи «електромагнітне поле – речовина»: класичний, напівкласичний та квантовий.

Класичний – розглядається в загальному курсі оптики та електродинаміки. Напівкласичний – знаходить обґрунтування в розділах квантової механіки і застосовується в загальному курсі атомної фізики. Квантовий – дає змогу здійснити повний і об'єктивний аналіз властивостей як речовини, так і електромагнітного поля. Його застосовують до дослідження явищ, що супроводжують взаємодію світла з речовиною.

Квантовою оптикою називають розділ фізики, що вивчає властивості світла з огляду квантової теорії М. Планка. До них належать фотоефект, фотохімічні процеси, ефект Комптона, спонтанні та вимушені переходи тощо.

Особливості вивчення квантової оптики визначаються місцем розділу в курсі фізики загальноосвітньої школи, а також специфікою навчального матеріалу. Її елементи вивчають в окремому розділі «Квантова фізика» в старшій школі (квантові властивості світла, гіпотеза М. Планка, закони фотоефекту, маса та імпульс фотона, корпускулярно-хвильовий дуалізм, гіпотеза де Бройля, постулати Бора, спектральні серії випромінювання атомів

водню, спонтанне й індуковане випромінювання, квантові генератори та їх застосування тощо) [8]. Досліди з фотоефекту, розсіювання альфа-частинок, ефект Комптона та ін. належать до фундаментальних, тобто таких, що докорінно змінили існуючі фізичні уявлення і відіграли важливу роль у формуванні сучасної наукової картини світу.

Основні пізнавальні завдання нового розділу – ознайомити учнів із специфічними законами, що діють в мікросвіті, і продовжити формування уявлень про будову речовини. На основі корпускулярно-хвильового дуалізму природи світла на якісному рівні обґрунтувати своєрідність поведінки мікрочастинок, неможливість зафіксувати їх положення в просторі в певний момент часу, визначити траєкторію руху тощо.

Друге завдання – розкрити сучасні уявлення про будову речовини. У курсі фізики основної школи її структура розглядається лише на молекулярному рівні, достатньому для розуміння таких явищ, як електризація та електричний струм, обґрунтування будови і властивостей газів, рідин і твердих тіл. У новому розділі учнів ознайомлюють з будовою речовини на атомному та субатомному рівнях.

Основний зміст розділу становлять поняття про фотон і його властивості, фотоефект, корпускулярно-хвильовий дуалізм, атом як складну квантову систему. Особливе місце в історії фізики займає вивчення явища фотоефекту, з розглядом законів і закономірностей якого в старшій школі формуються уявлення про світлові кванти.

Сутність явища зовнішнього фотоефекту полягає в тому, що під дією електромагнітного випромінювання здійснюється емісія електронів з металів. Їх кількість визначається інтенсивністю, а швидкість – частотою падаючого світла. При частоті – меншій певної (характерної для кожного металу) фотоефект не спостерігається. Ці закономірності встановлено експериментально задовго до створення квантової теорії, але спроби їх обґрунтування на основі хвильових уявлень про світло були невдалими.

У навчальній літературі вони представлені у вигляді законів фотоефекту:

1. Сила фотоструму насичення пропорційна інтенсивності світла, а кількість електронів, що вириваються з катода за 1 с, – енергії світлової хвилі.

2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою світла і не залежить від його інтенсивності.

3. Для кожної речовини існує «червона межа», тобто така найменша частота випромінювання ν_0 , нижче якої ($\nu < \nu_0$) фотоефект неможливий. Її значення залежить від хімічної природи речовини і стану опромінюваної поверхні.

Засвоєння законів фотоефекту здійснюють, використовуючи установку, представлену на рисунку (рис. 1). З її допомогою досліджують залежність сили фотоструму від прикладеної напруги, інтенсивності та спектрального складу випромінювання.

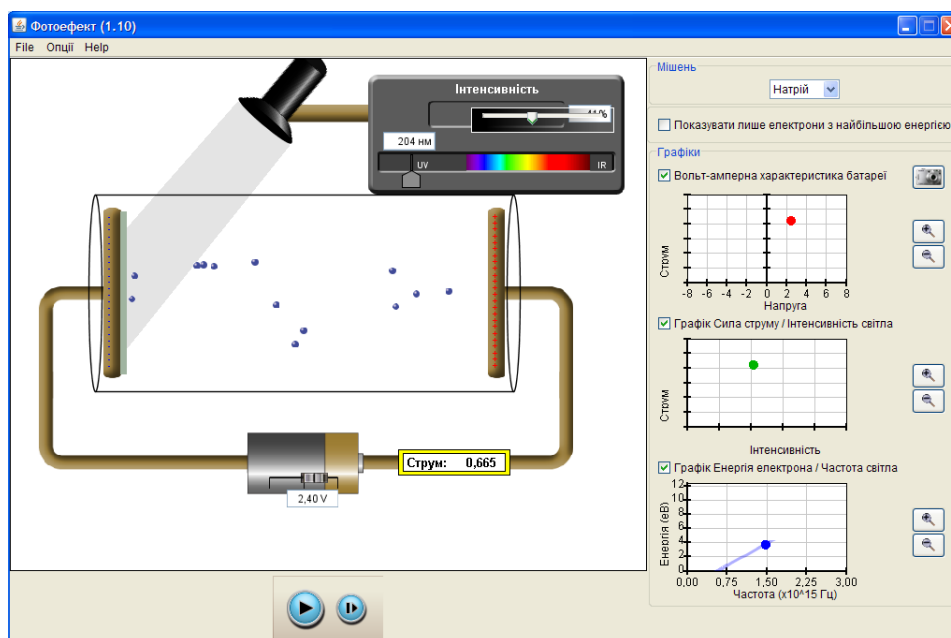


Рис. 1. Модель для дослідження явища фотоефекту

За допомогою моделі (рис. 1) можна представити типову вольт-амперну характеристику вакуумного фотоелемента – залежність сили фотоструму I , що проходить через нього, від прикладеної напруги U . Із збільшенням прискорюючої (на катод подається «-», анод «+») напруги фотострум I зростає, досягаючи постійного значення – струм насичення. Насичення настає тоді, якщо всі вивільнені світлом електрони досягають анода.

Опромінюючи фотоелемент світлом певної частоти, вимірюють напругу з метою визначення максимальної швидкості фотоелектронів. Змінюючи

світлофільтри, демонструють, що максимальна швидкість вильоту електронів залежить від частоти падаючого світла і не залежить від його інтенсивності.

Обґрунтування існування енергетичного порогу фотоефекту («червоної межі»), незалежність максимальної початкової швидкості (кінетичної енергії) фотоелектронів від інтенсивності світла, а також пояснення безінерційності цього явища не може бути здійснено на основі хвильової електромагнітної теорії.

У межах квантової теорії монохроматичне світло – це потік елементарних частинок, що рухаються із швидкістю світла. Корпускулярні характеристики фотона – маса, імпульс, енергія пов'язані з хвильовими – частотою світла.

Кожний світловий квант (фотон) взаємодіє лише з одним електроном. Енергія падаючого фотона $E = h\nu$ витрачається на здійснення роботи виходу фотоелектрона A з речовини та надання йому кінетичної енергії $\frac{mv^2}{2}$.

На основі закону збереження енергії запишемо рівняння Ейнштейна для елементарного акту взаємодії фотона з електроном $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$, з якого обчислюються швидкості фотоелектронів, «червона межа» фотоефекту та робота виходу з конкретного металу.

Ґрунтуючись на положеннях квантової теорії, сила фотоструму насичення пропорційна кількості електронів, що вилітають за 1 с з освітлювальної поверхні, а інтенсивність світла – кількості падаючих фотонів. Так як кожен фотон може вибити з поверхні металу лише один електрон, то сила фотоструму насичення – пропорційна інтенсивності світла.

У процесі вивчення явища фотоефекта, розв'язують задачі такого типу:

Задача 1. Катодна пластинка опромінюється світлом. Напруга в ланцюзі збільшується в 2 рази. У скільки разів збільшиться максимальна кінетична енергія фотоелектрона $h\nu$. Варіанти відповідей: а) не зміниться; б) зменшиться в 2 рази; в) збільшиться в 2 рази; г) зменшиться в 4 рази; д) збільшиться в 4 рази.

Задача 2. При освітленні матеріалу фотокатода світлом з довжиною хвилі $\lambda_1=514$ нм затримуюча напруга складає $U_1=0,4$ В, при $\lambda_2=589$ нм, $U_2=0,1$ В. а) здійснити комп'ютерний експеримент і знайти затримуючі напруги, відповідні

таким довжинам хвиль: 514 нм і 589 нм; б) знайти постійну Планка; в) обчислити максимальну довжину хвилі й перевірити відповідь експериментально.

Важливим доказом існування частинок світла (фотонів), що мають певний імпульс, енергію і масу, є ефект Комптона, вивчення якого передбачено шкільною програмою.

За законами класичної електродинаміки неможливо обґрунтувати природу лінійчатих спектрів й стабільність існування будь-якого атома. Скориставшись ідеями М. Планка й А. Ейнштейна про те, що світло випромінюється квантами, Н. Бор створив ядерну модель атома і сформулював такі постулати: атомна система може перебувати лише в стаціонарних станах, не випромінюючи електромагнітні хвилі; кожному з них відповідає певна енергія й орбіта руху електронів, де вони мають дискретні, квантовані значення моменту імпульсу; під час переходу атома із рівня з більшою енергією на рівень з меншою випромінюється фотон і навпаки.

Енергію випромінюваного (поглинутого) кванта знаходять за формулою $h\nu = E_k - E_n = \Delta E$, де E_k і E_n – енергія атома під час руху електрона на k -ій та n -ій орбітах; ΔE – енергія випромінюваного кванта; ν – частота електромагнітної хвилі.

Модель атома водню за Бором – це ядерна модель, у якій електрон перебуває лише на певних орбітах, що відповідають стаціонарним станам. Енергія електрона має дискретний характер, тобто квантується (рис. 2).

Збуджений атом може мимовільно (спонтанно) переходити на один з нижчих енергетичних рівнів, випромінюючи квант світла. Властивості атома випускати фотони під час переходів із збудженого стану в основний покладено в основу роботи генераторів електромагнітних випромінювань оптичного діапазону. Пристрій для генерування або підсилення монохроматичного світла, створення вузького пучка, здатного поширюватися на великі відстані без розсіювання називається лазером.

Безпосередньому застосуванню одержаних фізичних знань на практиці сприяє ознайомлення учнів із будовою і принципом дії фотоелементів,

прикладями їх використання в техніці, фізичними основами спектрального аналізу, лазерного випромінювання тощо.

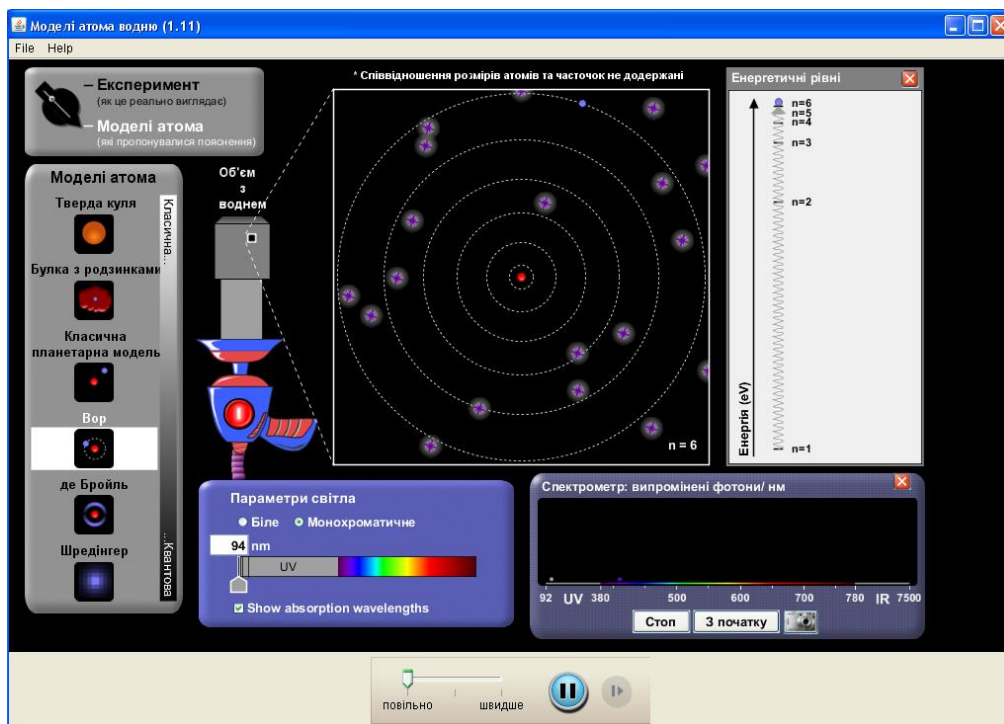


Рис. 2. Моделі атома водню

Вивчаючи квантову оптику, учні ознайомлюються з різноманітними «ненаочними» явищами, ідеєю квантування, корпускулярно-хвильовим дуалізмом, поняттями, які не мають аналогів в макросвіті. Тому особливістю засвоєння навчального матеріалу є домінуюче застосування теоретичних методів навчання. Теоретичний спосіб мислення передбачає вміння аналізувати різноманітні моделі і використовувати їх на практиці.

У процесі навчання здійснюється формування гносеологічного аспекту наукового світогляду, розглядаються такі важливі питання, як роль ідеальних моделей у пізнанні реальної дійсності і межі їх застосування. Модельні уявлення використовують під час вивчення взаємодії електромагнітного поля й речовини, розкриття механізму випромінювання та ін.

Використання моделей дає змогу виявляти і відображати характерні зв'язки між природними явищами і процесами, які неможливо спостерігати безпосередньо. На основі моделювання розкривається зміст фізичних понять,

здійснюється ознайомлення із сучасною експериментальною базою, оволодіння системою знань і наукових методів пізнання.

Розвитку мислення учнів сприяє виконання таких розумових операцій, як порівняння, систематизація та класифікація. Порівнювати можна властивості фотона з характеристиками інших елементарних частинок, ядерних сил з особливостями гравітаційних і електромагнітних. Корисно зіставляти енергії фотонів й інших елементарних частинок, наприклад кінетичну енергію квантів світла з енергією теплового руху молекул.

Засвоєння навчального матеріалу розділу надає значні можливості для самостійної діяльності учнів. У процесі розв'язування задач доцільно використовувати систематизовані таблиці роботи виходу електронів з різних металів і на їх основі самостійно визначати «червону межу» фотоефекту, максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, потужність індукованого випромінювання тощо. Визначення різних фізичних характеристик світлових квантів є змістом самостійної діяльності, а аналіз отриманих результатів – ефективна школа розвитку мислення учнів.

Історія розвитку учіння про світло і будову атома свідчить про нескінченність процесу пізнання та його діалектичний характер. Квантова оптика є глибокою науковою теорією, на основі якої розкривається сутність значного кола фізичних явищ. Але її положення не заперечують класичні уявлення про речовину і поле, а лише обмежують область їх застосування. Закони класичної механіки та електродинаміки залишаються непорушними. У граничних випадках висновки квантової фізики збігаються з результатами класичної, дискретність нівелюється і процес стає квазінеперервним. На відміну від класичної квантова фізика досліджує такі фрагменти реальності, які недоступні безпосередньому сприйманню, а їх теоретичне обґрунтування усереднено класичними уявленнями і методами.

На основі ретроспективного аналізу вивчення квантової оптики в старшій школі з'ясовано, що в розділі розглядається значна кількість нових понять і явищ, які не мають аналогів у макросвіті. У процесі розвитку квантової фізики

як науки встановлено складні функціональні залежності між відповідними величинами, що не дає змоги використовувати їх в шкільному курсі. Недостатньо уваги в навчальних програмах надається розв'язуванню експериментальних задач, які спонукали б до творчого мислення та самостійності в процесі навчання. Тому навчальний матеріал засвоюється переважно на якісному рівні, описово. Виникає потреба у вдосконаленні існуючих та пошуку нових методів і засобів навчання, які забезпечували б високий рівень вивчення елементів квантової фізики. Перспективними є інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ), які передбачають використання потужних можливостей сучасної комп'ютерної техніки.

Висновки. Під час вивчення явищ мікросвіту учні оволодівають загальнонауковими методами пізнання – спостереженням, абстрагуванням, ідеалізацією, моделюванням, мисленнєвим експериментом тощо. Аналіз навчального матеріалу з квантової оптики свідчить, що його можна подати відповідно до гносеологічного циклу пізнання і на прикладі розвитку квантових уявлень проілюструвати виникнення нових наукових фактів, накопичення експериментальних даних, висунення гіпотез, відкриття невідомих явищ.

Список використаних джерел:

1. Бугайов О. І. Квантова фізика / О. І. Бугайов, Л. Г. Горбунцова, В. І. Савченко // Дидакт. матеріал. – К.: Рад. шк., 1988. – 87 с.
2. Величко С. П. Вивчення основ квантової фізики / С. П. Величко, Л. Д. Костенко // Посібник для студентів ВНЗ. – Кіровоград: РВЦ КДПУ ім. В. Винниченка, 2002. – 274 с.
3. Головка М. В. Тенденції модернізації змісту шкільної фізичної та астрономічної освіти / М. В. Головка // Збірник наукових праць «Педагогічна освіта: теорія і практика». – Кам'янець-Подільський: КПНУ, 2015. – Вип. 18. – С. 237–242.
4. Державний стандарт базової і повної загальної середньої освіти [Електронний ресурс] // Постанова Кабінету Міністрів України від 23 листопада 2011 р. № 1392. – Режим доступу: [http://mon.gov.ua/content/Освіта/post-derzh-stan-\(1\).pdf](http://mon.gov.ua/content/Освіта/post-derzh-stan-(1).pdf).
5. Кучерук І. М. Загальний курс фізики. У 3-х т. Т.3: Оптика. Квантова фізика / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук // Навч. посібник: [ред. І. М. Кучерук]. – К.: Техніка, 1999. – 518 с.
6. Непорожня Л. В. Методична система навчання хвильової і квантової оптики із застосуванням комп'ютерних технологій у загальноосвітніх навчальних закладах / Л. В. Непорожня // Дис... канд. наук: 13.00.02 – 2009. – 187 с.
7. Ньютон И. Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света / И. Ньютон // Пер. с англ. С. И. Вавилов. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 365 с.

8. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика (10–11 класи): профільний рівень [Електронний ресурс] // Київ, 2010. – Режим доступу: – <http://mon.gov.ua/content/Освіта/fiz-pr.pdf>.

Anotation: Features of study of quantum optics in accordance with the requirements of the State standard of base and complete universal middle education in the conditions of profile school grounded in the article. The retrospective analysis of maintenance and structure of educational material from an optics comes true in the school programs and textbooks. Far of new concepts and phenomena that does not have analogues in a macrocosm examined in a division. During the educational experiment of feature and quantitative conformities to law of the phenomena of microscopic bodies and possibility them the practical use open not enough up. In the programs greater attention gets to untiing of experimental tasks that would induce to the creative thinking and independence in the process of studies. The methodical going near the study of quantum properties of light at senior school is examined. Cyclic principle of construction of educational material opens up.

The study of educational material of quantum physics mainly comes true at quality level, descriptive, as complication of modern mathematical vehicle does not give an opportunity of him to apply at school. Forming of gnosiological aspect of scientific world view comes true in the process of studies. Such important questions, as a role of ideal models in cognition of the real reality and limit of their application examined.

During the study of the phenomena of microscopic bodies students seize the scientific methods of cognition – supervision, abstracting, idealization, analogies, design, by a mental experiment and others like that. Consideration of methodological questions has the special value in the process of forming of scientific world view, understanding of logic of process of cognition of surrounding reality. The analysis of educational material testifies from a quantum optics, that he can be expounded in accordance with the gnosiological cycle of cognition. On the example of development of quantum presentations of origin of new scientific facts, accumulation of experimental data, advancement of hypotheses, leadingout of consequences, construction of other successive theory about light and opening on her basis of new, not known earlier processes and phenomena illustrated.

Keywords: wave-corpucle dualism, photon, elementary particles, quantum optics, photoeffect, methods of cognition, design, scientific picture of the world, senior school.

Аннотация: В статье обоснованы особенности изучения квантовой оптики в соответствии с требованиями Государственного стандарта базового и полного общего среднего образования в условиях профильной школы. Осуществлен ретроспективный анализ содержания и структуры учебного материала из оптики в школьных программах и учебниках. Выяснено, что в разделе рассматривается значительное количество новых понятий и явлений, которые не имеют аналогов в макромире. Установлено, что во время учебного эксперимента недостаточно раскрываются особенности и количественные закономерности явлений микромира и возможности их практического использования. Обоснованно, что в программах нужно большего внимания уделять решению экспериментальных задач, которые побуждали бы к творческому мышлению и самостоятельности в процессе обучения. Рассмотрены методические подходы к изучению квантовых свойств света в старшей школе, раскрыт циклический принцип построения учебного материала.

Ключевые слова: корпускулярно-волновой дуализм, фотон, элементарные частицы, квантовая оптика, фотоэффект, методы познания, моделирование, научная картина мира, старшая школа.

Yu. Melnik

Institute of Pedagogics National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine
Features of study of quantum optics are at senior school.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Мельник Юрій Степанович – кандидат педагогічних наук, старший науковий співробітник відділу біологічної, хімічної та фізичної освіти Інституту педагогіки Національної академії педагогічних наук України.

Коло наукових інтересів: проблеми методики навчання фізики.