

МОДЕЛЮВАННЯ КВАНТОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СВІТЛА НА ПОДВІЙНІЙ ЩІЛИНІ

Анна Ткаченко, Валерій Грищенко

В статті запропоновані модельні комп'ютерні демонстрації, що слугують засобом активізації пізнавального інтересу студентів на лекційних заняттях.

The article focuses attention on computer model demonstrations, which serve as devices to activate students' educational interest on lectures.

В умовах входження нашої держави до єдиного європейського освітнього простору особливої уваги набуває пошук оптимальних форм, методів та засобів організації навчально-пізнавальної діяльності студентів, використання найбільш ефективних та перспективних методів навчання у вищій школі.

Одним із важливих засобів активізації пізнавальної діяльності студентів є, на нашу думку, навчальний фізичний експеримент. У зв'язку з розвитком технічних засобів та інформаційних технологій навчання структура навчального фізичного експерименту постійно вдосконалюється та доповнюється. Так, наприклад, лекційний демонстраційний експеримент може бути представлений як за допомогою реальних приладів, так і з використанням модельного його представлення. Тобто у випадку відсутності можливості показу протікання фізичних явищ і процесів у реальних умовах ми намагаємось відтворити необхідні досліди за допомогою комп'ютерного моделювання, доповнивши ними словесний виклад на лекціях теоретичного матеріалу. Зокрема, при вивченні дифракції світла, для максимально ефективного засвоєння студентами сутності цього явища ми використовуємо модельні комп'ютерні демонстрації.

У вивченні властивостей світла особливе місце належить пристрою, який вперше запропонував Ф. Гримальді, а удосконалив його Т. Юнг. Цей пристрій одержав назву подвійної щілини Юнга, він являє собою дві паралельно розташовані на малій відстані одна від одної дуже вузькі щілини.

Якщо на таку систему щілин спрямувати світло від протяжного джерела, що попередньо пройшло через ще одну вузьку щілину, розташовану паралельно подвійній, то на екрані одержимо дивний, парадоксальний результат. Його сутність полягає у наступному.

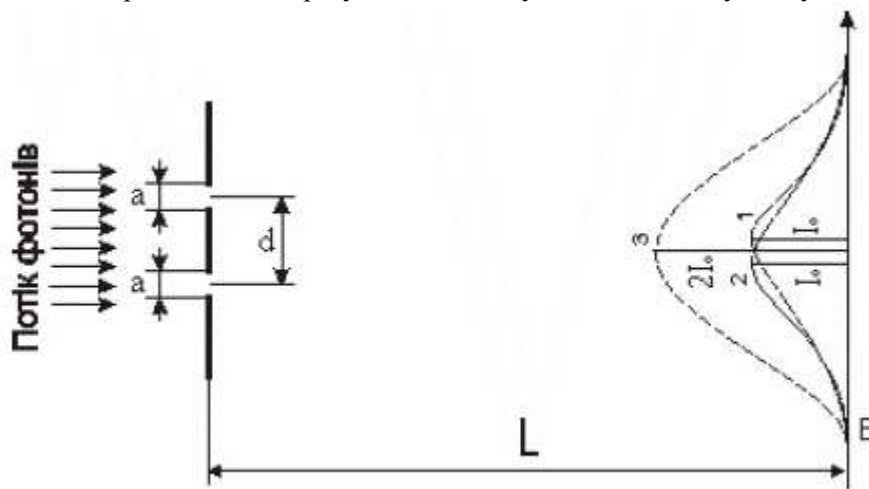


Рис. 1. Розподіл інтенсивності фотонів згідно класичних уявлень: 1 - відкрита лише верхня щілина; 2 - відкрита лише нижня щілина; 3 - відкриті обидві щілини.

Параметри a і d значно збільшені.

Якщо одну із подвійних щілин Юнга, наприклад, нижню закрити, то на екрані одержимо типову дифракційну картину від однієї щілини - систему максимумів і мінімумів. Оскільки центральний максимум удвічі ширший, ніж побічні, і на нього припадає біля 85% всієї енергії, то у подальшому будемо розглядати саме його (рис. 1, крива 1). При пропусканні світла лише через нижню щілину форма центрального максимуму не зміниться (за умови рівності розмірів подвійних щілин), проте сам він дещо зміститься (рис. 1, крива 2). Таке зміщення дуже незначне, воно відповідає зміщенню щілин. Якщо позначити інтенсивність кожної із смуг через I_0 , то слід було б чекати, що при відкритті обох щілин одночасно смуги накладуться одна на одну й інтенсивність результуючої смуги буде рівною сумі інтенсивностей від кожної щілини окремо, тобто $I=2I_0$ (рис.1, крива 3). Необхідно зауважити, що зазвичай так воно і є - якщо увімкнути дві електричні лампочки, то освітленість дорівнює сумі освітленостей від кожної лампочки. Проте зараз нас цікавить особливий випадок, який здійснюється за цілком певних умов, а саме таких, коли параметри пристрою задовольняють нерівність $dD < XI$, де d - відстань між щілинами, D - ширина щілини, через яку освітлюється подвійна щілина (на рисунку вона не показана), X - довжина світлової хвилі, I - відстань між одиночною та подвійною щілинами. Ця нерівність характеризує умови когерентності.

У випадку когерентності двох одержаних уявних джерел, по-перше, спотворюється форма результуючої кривої 3, на ній з'являються додаткові максимуми і мінімуми (рис. 2), утворюється своєрідна картина, яка одержала назву інтерференційної. По-друге, інтенсивність центрального максимуму буде дорівнювати не $2I_0$, а $4I_0$. Кількість нових максимумів залежить від співвідношення між d і a . Із рис.2 випливає, що $\frac{a}{d} = 4$. По-третє, встановлено, що у новоутворені мінімуми енергія не потрапляє.

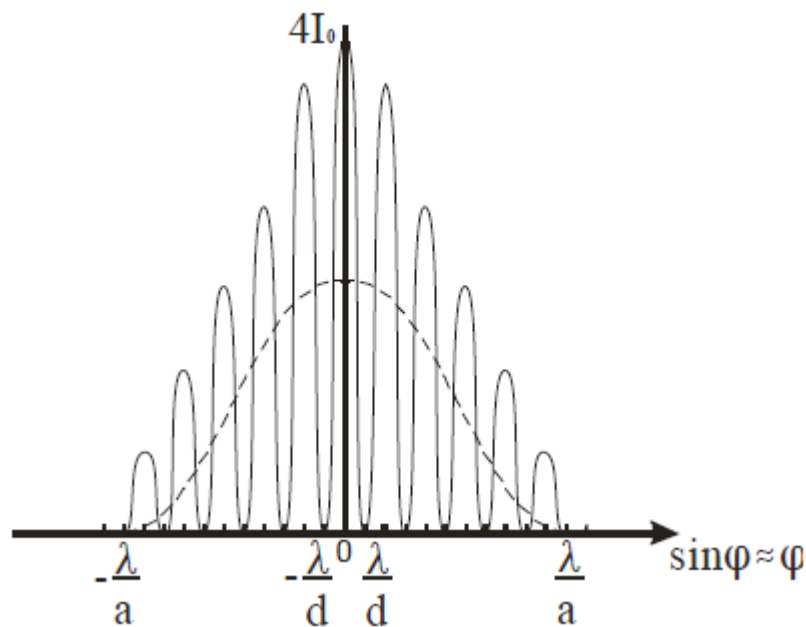


Рис. 2. Розподіл інтенсивності фотонів згідно квантових уявлень.
Пунктирна крива відповідає кривій 3 рис. 1.

Демонстраційний досвід Юнга достатньо ілюструє утворену інтерференційну картину [1, с. 57-58], а розподіл світлової енергії при інтерференції від двох когерентних пучків, кожний з яких має інтенсивність I , аналізується у збірнику статей за редакцією Є. В. Коршака [4, с. 129-134] або у тому ж посібнику [1, с. 114-116], що правда це пропонується на прикладі інтерференції світла у повітряному клині.

Класична теорія стверджує, що має місце перерозподіл світлового потоку - зменшення освітленості в одних місцях викликає збільшення її в інших місцях. Дійсно, сума енергій, що пройшла через кожну щілину, дорівнює енергії, яка проходить через обидві щілини одночасно. Проте, у рамках класичних уявлень питання про механізм такого перерозподілу залишається

відкритим. З точки зору цих уявлень світло являє собою електромагнітну хвилю. Дві хвилі, що виходять з двох щілин, за умови їх узгодження інтерферують між собою, що й створює результуючу картину. Проте у грудні 1900 року Макс Карл Ернест Людвіг Планк (1858-1947 р.р.) зробив доповідь, у якій показав, що закономірності теплового випромінювання знаходять логічне пояснення, якщо припустити, що атоми випромінюють енергію не безперервно, а порціями - квантами. "Це відкриття стало основою всіх досліджень у фізиці ХХ сторіччя і з того часу майже повністю обумовило її розвиток. Воно зруйнувало кістяк класичної механіки та електродинаміки і поставило перед наукою задачу: віднайти нову пізнавальну основу для всієї фізики" [2, с.257].

У 1905 році ідею Планка розвинув Альберт Ейнштейн (1879-1955 р.р.), пояснивши на її основні явище фотоефекту. У своїй праці "Про одну евристичну точку зору, що стосується виникнення і перетворення світла" [2, с.92] Ейнштейн теоретично передбачає існування фотона, вводить уяву про дискретну структуру світлового випромінювання, розглядаючи останнє як потік корпускул (фотонна теорія світла). Ці міркування пізніше знайшли експериментальне підтвердження, зокрема у дослідженнях Артура Холлі Комптона (1892-1962 р.р.). Тоді виникає нова дилема: якщо світло потік частинок, то у досліді з двома щілинами частинка світла може пройти або через одну щілину, або через другу щілину - інтерференційна картина принципово не повинна виникати. Може здатись, що частинки-фотони, які пройшли через одну щілину, якимось чином взаємодіють з частинками - фотонами, що проходять через другу щілину, а результат такої взаємодії і є інтерференційна картина. Щоб перевірити це припущення слід випускати фотони один за одним із проміжком часу, що значно перевищує час, який потрібен фотону для прольоту всього пристрою. Розрахунки показують, що для виконання цієї умови джерело повинно випускати не більше 10^8 фотонів за секунду. Такі експерименти були виконані і на фотопластинці, яка відіграла роль екрану, після достатньої її експозиції та проявлення одержали таку саму інтерференційну картину. Можна також уявити, що окремий фотон здатний розділитися на дві частини з подальшою інтерференцією цих частин. Однак виявилось, що не лише фотони після проходження подвійної щілини утворюють інтерференційну картину, а й електрони та інші мікрочастинки. Поряд з цим, в усіх фізичних явищах ніколи не спостерігається половина, чи якась інша частина електрона. Електрон виявився неподільним при взаємодії з іншими матеріальними об'єктами. Природно стверджувати, що і фотон є неподільним. Тобто, слід констатувати, що ні хвильовий, ні корпускулярний підхід не дає можливості у повному обсязі з'ясувати механізм таких явищ, які відбуваються при проходженні світла через подвійну щілину. До того ж, як показав Вернер Карл Гейзенберг (1901 - 1976 рр.), мікрооб'єкти, у тому числі і фотони, не володіють повним набором властивостей частинок, чи повним набором властивостей хвиль (принцип невизначеності).

Причина виявилася в іншому. У 1924 р. Луї де Бройль (1892 - 1987 р.р.) висловив думку, що потік будь-яких частинок повинен утворювати на відповідній подвійній щілині інтерференційну картину, схожу на ту, яку спостерігав Юнг. Де Бройль припускав, що кожна рухома частинка повинна мати і хвильові властивості, тобто рух частинки де Бройль зіставив з поширенням хвилі. Довжина цієї хвилі залежить від маси і швидкості частинки:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}.$$

Це рівняння одержало назву співвідношення де Бройля. Сама ж ідея була підтверджена експериментально. Таким чином, виявилось, що корпускулярно-хвильовий дуалізм притаманний як світлу, так і будь-яким рухомих частинкам - співвідношення де Бройля має універсальний характер.

Ідею про всеохоплюючий характер корпускулярно-хвильового дуалізму використав Ервін Шредінгер (1887-1961 р.р.) для побудови хвильової механіки, в основу якої поклав рівняння, що носить зараз його ім'я. Разом з Максом Борном (1882-1970 р.р.), Гейзенбергом (1901-1976 р.р.), Полем Діраком (1902 - 1984 р.р.) та іншими вченими Шредінгер розробив квантову механіку, в якій кожному мікрооб'єкту ставиться у відповідність амплітуда ймовірності $\psi(x, y, z, t)$, що одержала назву хвильової функції. Якщо амплітуда ймовірності

проходження фотона лише через верхню щілину (нижня закрита) ψ_1 , а лише через нижню (верхня закрита) ψ_2 , то амплітуда ймовірності проходження частинки через обидві відкриті щілини $y = \psi_1 + \psi_2$ (принцип суперпозиції).

Безпосередньо виміряти значення y - функції неможливо, фізичного змісту вона не має. Це деякий математичний формалізм, певний допоміжний символ. Фізичний зміст, як з'ясувалося, має квадрат модуля ψ - функції $|\psi|^2$. $|\psi(x, y, z, t)|^2$ – це ймовірність знаходження мікрооб'єкта у довільний момент часу t у точці з координатами x, y, z . Тобто, при дослідженні поведінки фотонів слід мати на увазі, що ця поведінка описується ймовірнісними законами. Неможливо з достовірністю передбачити через яку з щілин пролетить фотон, можна визначити лише ймовірність його прольоту через ту чи іншу щілину. Фотон та інші мікрочастинки не локалізовані у якійсь точці простору у певний момент часу, тому говорити про їхню траєкторію не має сенсу.

Ймовірнісні властивості елементарних частинок проявляються лише тоді, коли їх або велика кількість, або експерименти з однією частинкою повторюються багаторазово, тобто квантова теорія має статистичний характер. Про певні ознаки поведінки частинок можна говорити лише тоді, коли досліджена значна їх кількість. Множину досліджуваних частинок називають квантовим ансамблем. Рух окремої частинки підпорядкований статистичним закономірностям, характеристикою такого руху є певний розподіл ймовірностей, який визначається в результаті спостереження за багатьма частинками. Ймовірність знаходження частинки у певному місці пропорційна інтенсивності хвилі де Бройля у цьому місці, тобто хвилі де Бройля слід уявляти як хвилі ймовірності. Така інтерпретація хвиль де Бройля поєднує атомізм частинок і їх хвильові властивості.

Виходячи з квантово-механічних уявлень, проходження світла через подвійну щілину пояснюється на основі принципу суперпозиції хвильових функцій: хвильова функція ψ_1 , яка характеризує хвилю, що пройшла через верхню щілину, перекривається з хвильовою функцією ψ_2 , яка описує хвилю, що пройшла через нижню щілину. У результаті такого перекриття на екрані з'являється типова інтерференційна картина від подвійної щілини.

Оскільки y - функція вводиться формально і вона сама по собі фізичного змісту не містить, то таке пояснення з точки зору "здорового" глузду здається дивним, виникає потреба відшукати глибші і чіткіші механізми. На що Річард Феллінс Фейнман (1918 - 1988 р.р.) зауважує "Нікому ніякого механізму віднайти не вдалося. Ніхто у світі не зможе вам "пояснити" ні на краплину більше того, що "пояснили" ми. Ніхто не надасть вам ніякого більш глибокого уявлення про стан речей. У нас їх немає, немає уявлень про більш фундаментальну механіку, із якої можна одержати ці результати"[3, с. 217].

Проходження фотонів через подвійну щілину і роль у цьому процесі квантових ансамблів можна змоделювати за допомогою генератора випадкових чисел, що задовольняє розподіл ймовірностей виду $\sin^2 x$. Комп'ютерна програма генерує полярні координати фотонів. Після кожного спрацьовування генератора випадкових чисел відбувається корекція радіальної координати у наслідок чого точка, що моделює фотон, відображаючись на екрані, з'являється на центральній смугі, або на побічних

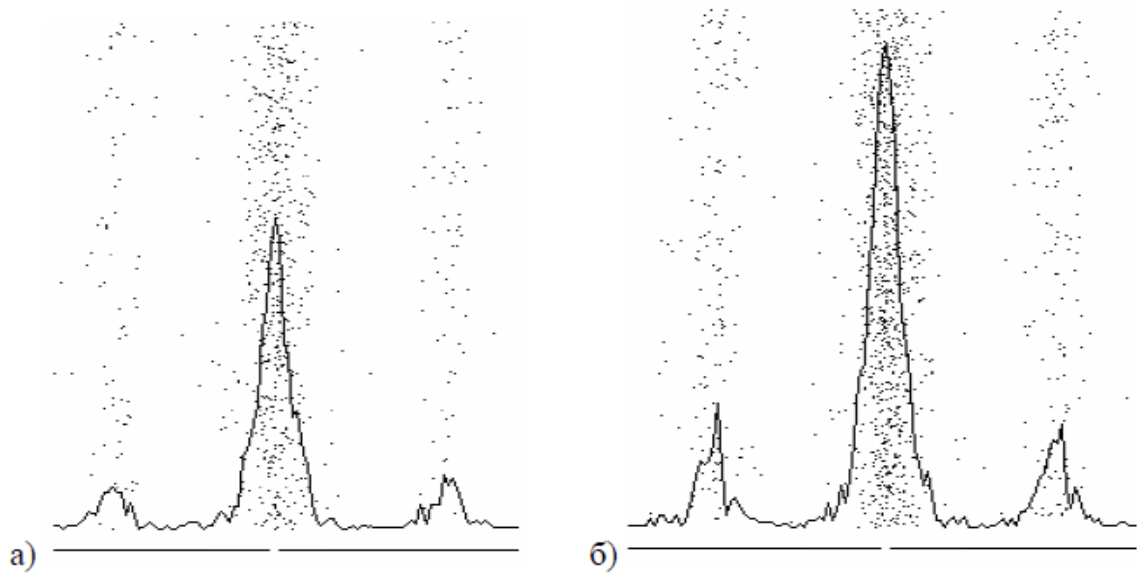


Рис. 3. Моделювання дифракції фотонів на одній щілині:
а) 1 000 фотонів; б) 2 000 фотонів.

смугах. Точки, які потрапили на центральну смугу відповідають фотонам, що не дифрагували, а лише зазнали незначного розсіювання. Після проходження через щілину достатньо великої кількості фотонів на екрані утворюється дифракційна картина (рис.3).

Якщо на шляху фотонів розмістити перешкоду з двома поряд розташованими щілинами, то на екрані поступово з'являються інтерференційні смуги (рис. 4).

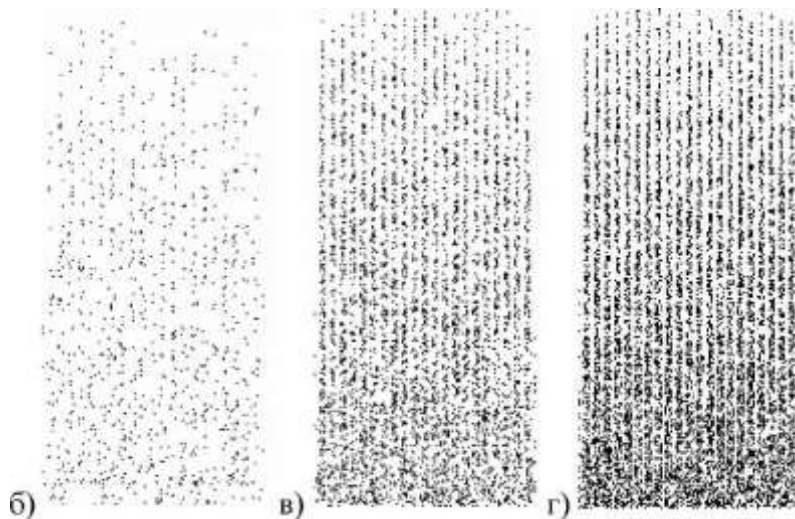


Рис. 4. Моделювання дифракції фотонів на подвійній щілині: а) 5 000 фотонів; б) 10 000 фотонів; в) 50 000 фотонів; г) 100 000 фотонів.

Як свідчить досвід, така форма представлення навчального матеріалу на лекційних заняттях сприяє глибшому розумінню студентами сутності фізичних явищ і процесів і значною мірою активізує їх пізнавальну діяльність та забезпечує принцип дотримання міжпредметних зв'язків.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Величко С. П., Ковальов І. З. Лазер у шкільного курсі фізики: Посібник для вчителя. - К.: Рад, шк., 1987. - 143 с.
2. Ейнштейн Альберт. Собрание научных трудов. Т.4. - М.: Наука, 1967. - 599 с.

3. Ейнштейн Альберт. Собрание научных трудов. Т.3. - М.: Наука, 1966. - 632 с.
4. Удосконалення форм і методів вивчення фізики. - Зб. статей / За ред. Є. В. Коршака. Упорядник В. Г. Нижник. - К.: Рад. шк., 1982. - 143 с.
5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып.3. - М.: Мир, 1965.- 217 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Ткаченко Анна Валеріївна - аспірантка кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького.

Гриценко Валерій Григорович - доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького.

Наукові інтереси: використання ІКТ у навчанні фізики.