

О РЕАЛЬНОСТИ ФОТОНОВ

Среди разнообразных оптических явлений, которые обусловлены взаимодействием света с веществом, важное место занимает фотоэлектрический эффект. Именно анализ этого явления привел к представлению о световых квантах – фотонах. В предлагаемой статье приводится пример альтернативной интерпретации этого явления.

Ключевые слова: фотоны, фотоэффект, полуклассическая теория.

Как известно, изучение природы света имеет многовековую историю, начало которой можно отнести еще к периоду античного мира. Первоначальная «тактильная» теория (человеческое зрение – способность глаз «касаться» внешних предметов) со временем заменяется принципиально другой теорией, которая объясняет факт зрения освещением объектов; освещенный объект испускает энергию, которая улавливается нашими глазами. В качестве объяснения механизма распространения этой энергии были предложены две гипотезы: корпускулярная (Ферма, Ньютон) и волновая (Гюйгенс). Труды Френеля и Юнга была доказана волновая природа света (интерференция, дифракция), которая окончательно оформилась в конце 19-го столетия в работах Максвелла и...оказалась бессильной в попытках объяснения некоторых физических явлений: природа теплового излучения (ультрафиолетовая катастрофа), фотоэффект, эффект Комптона и т.д. Возникает квантовая механика, которая радикально меняет представления об окружающем мире. И, в частности, теория света как потока частиц получает «второе дыхание».

Именно в подобном русле происходит изложение материала по волновой и квантовой оптике во многих учебниках по физике. И, в частности, второе рождение квантовой природы света (понятие «фотон») непременно связывается с теорией фотоэффекта Эйнштейна, который позаимствовал гипотезу квантов Планка (Планк предположил квантование энергии осцилляторов) и постулировал, что свет испускается дискретными порциями $E = \hbar\omega$. Полученное им уравнение

$$\hbar\omega = A_g + W_k,$$

полностью объясняла основные закономерности фотоэффекта: 1. Линейная зависимость тока фотоэлектронов относительно интенсивности света; 2. Величина запирающего потенциала линейно увеличивается относительно частоты падающего излучения и указывает на существование определенной пороговой частоты (красная граница фотоэффекта). И на основании того, что классическая теория была не в состоянии объяснить вышеизложенные закономерности, явление фотоэффекта предстает как доказательство существования фотонов. Подобный вывод представлен во многих учебниках как очевидный и давно доказанный факт.

Однако еще в 1969 году было показано, что теория Эйнштейна не единственно возможная [1]. Вовсе не обязательно прибегать к квантованию поля излучения (т.е. обращаться к корпускулярной теории света), чтобы выявить природу фотоэффекта. А, значит, фотоэффект вовсе не является доказательством существования фотонов. Сам фотоэффект рассматривается в рамках «полуклассической» теории, в которой свет представлен как чисто классическая электромагнитная волна, без корпускулярных свойств, и только вещество квантовано (квантуется энергетический спектр атомов), т.е. волновая теория света (уравнения Максвелла) объединяются с волновым уравнением Шредингера для вещества. Центральной моделью «полуклассической» теории является двухуровневый атом, который взаимодействует с классической синусоидальной электромагнитной волной. Сама волна рассматривается как возмущение, потенциал взаимодействия которого с атомом записывается в дипольном приближении $V(t) = -\vec{d}\vec{E}$ (атомное электронное облако $\psi^* \psi$ поляризуется внешним полем и действует подобно колеблющейся плотности заряда с переизлучением классического поля). Используя стандартные методы

нестационарной квантовой теории возмущений, было получено выражение для вероятности того, что поле возмущения вызовет переход с основного уровня g в возбужденное состояние k (в бесконечность) [2]:

$$P_{kg} \sim d_{kg}^* d_{kg} E_0^2 \delta\left(\frac{\hbar\nu - (E_k - E_g)}{h}\right),$$

где d_{kg} – матричный элемент дипольного момента между начальным и конечным состоянием, а E_0^2 – квадрат амплитуды падающей волны. Данный результат отражает резонансное условие возбуждения: возбуждение происходит только, когда внешняя частота ν близка к значению, соответствующему разнице энергий между уровнями, т.е.

$\nu = \frac{E_k - E_g}{h}$. Пока частота света не достигнет этого значения, ни одного электрона не будет выбито, в то время как при частотах, больших этого значения, электроны будут появляться. Этим объясняется существование пороговой частоты (красная граница фотоэффекта), которая соответствует работе выхода. Записав энергию $E_k - E_g = A_g + W_k$,

сразу получается известное уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, которое можно интерпретировать, как естественное следствие условия резонанса для возбуждения электромагнитной волной, а не как отражение закона сохранения энергии света, существующего в виде дискретных фотонов. В свою очередь, пропорциональность фототока интенсивности света также явно вытекает из представленного выражения для вероятности перехода P_{kg} ($P_{kg} \sim E_0^2$).

Таким образом, все особенности фотоэффекта получили свое объяснение в рамках «полуклассической» теории, без дополнительного предположения о существовании фотонов. Кроме того, на основе «полуклассической» теории можно успешно объяснить и комптоновское рассеяние, которое также обычно представляется доказательством существования фотонов [3].

Разумеется, в реальности фотонов не приходится сомневаться, но подтверждать их реальность следует экспериментами, которые убедительно это доказывают, и которые не допускают альтернативных интерпретаций. И естественно возникает вопрос о существовании таких экспериментов. Каким должен быть эксперимент, доказывающий корпускулярную природу света? Ответ заключается в различии самих основ понятий «частица» и «волна»: частица занимает определенное место в пространстве, она может быть «там» или «здесь», но не в обоих местах одновременно; волна, наоборот, занимает некоторую протяженную область в пространстве. Соответственно, эксперимент должен показать, может ли свет регистрироваться одновременно в двух разных местах. Отрицательный ответ подтверждает корпускулярную теорию света.

Впервые подобный опыт был осуществлен в 1956 году [4]. Свет падает на полупрозрачное зеркало, которое действует как делитель луча (использовался ртутный источник света). После прохождения этого зеркала полученные лучи попадают на соответствующие детекторы, и, проследив за временной зависимостью откликов детекторов, можно сделать соответствующий вывод о природе света. В частности, результаты эксперимента были представлены в виде значения так называемого антикорреляционного параметра A :

$$A = \frac{N_c}{N_1 N_2} \left(\frac{T}{\Delta t} \right),$$

где N_1 і N_2 – число срабатываний от двух детекторов и N_c – число совпадений за время эксперимента T , Δt – разрешающая способность приборов по времени. Волновая теория показывает, что независимо от интенсивности света, падающего на делитель, луч разделится поровну между направлениями и, соответственно, $A = 1$. Квантовая теория приводит к другому значению ($A = 0$) в силу того, что отдельные фотоны, попадающие на делитель луча, не делятся.

Полученные результаты не согласовались ни с квантовой природой излучения, ни с классической теорией (было получено значение $A = 2$). И здесь снова выходит «на арену» полуклассическая теория. Детальный анализ эксперимента на ее основе дал полное согласие экспериментальных данных с теоретическими расчетами (используемый источник излучал свет, интенсивность которого колебалась вокруг среднего значения с большой частотой, что характерно для многих источников света). Таким образом, свет от естественных источников может рассматриваться на основе чисто классической теории, если учитывать квантовую природу света. Более того, с изобретением лазера подобный эксперимент был повторен, и было получено, что $A = 1$, что соответствует предсказанию полуклассической теории для света с уже постоянной интенсивностью [5]. Значит, лазерный луч также можно рассматривать как стабильную электромагнитную волну с незначительными флуктуациями интенсивности.

И только в 1986 году было убедительно доказано существование фотонов [6]. Было показано, что эксперименты, призванные продемонстрировать квантовую природу света, будут успешными только тогда, когда изучаемый свет состоит из точно определенного количества фотонов, например, одного. Т.е. свет должен пребывать в собственном состоянии оператора количества фотонов, что не было выполнено в предшествующем опыте (свет был в квантовом состоянии, являющемся линейной суперпозицией большого числа собственных состояний оператора количества фотонов). Таким образом, важен характер используемых

источников света. А сама схема эксперимента практически не изменилась. Было получено, что $A = 0$, что соответствует абсолютной антикорреляции. Наконец-то, было получено прямое доказательство существования фотонов!

Полагаем, что в современные учебники по общей физики следовало бы внести подобные комментарии, даже на уровне приложений к соответствующему разделу. И вообще, думается, что следует больше внимания уделить «полуклассической» теории, поскольку ее успехи весьма впечатляют. Она позволяет получить точное описание многих явлений, включая свойства лазерного излучения [7].

Список использованной литературы:

1. Lamb W.E. Jr. and Scully M.O. The photoelectric effect without photons. In *Polarisation, Matiere et Rayonnement*. Presses University de France, 1969.
2. Lamb W.O. Jr. and Scully M.O. in *Polarization, matter and radiation* (Jubilee volume in honor of Alfred Kastler), Presses University de France, Paris, 1969.
3. Schrodinger E. *Annalen der Physik*. Vol. 28. Pp. 257-264, 1927.
4. Hanbury-Brown R. and Twiss R.Q. Correlations between photons in two coherent beams of light. *Nature*. Vol.177. P. 27-29, 1956.
5. Clauser J.F. Experimental distinction between the quantum and classical field theoretic predictions for the photo-electric effect. *Phys. Rev. D*. Vol. 9. Pp. 853-860, 1974.
6. Grangier P., Roger G. and Aspect A. Experimental evidence for a photon anti-correlation effect on a beamsplitter. *Europhys. Lett*. Vol. 1. Pp. 173-179, 1986.
7. Sargent M., Scully M.O. and Lamb W.E. Jr., *Laser Physics*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1974.

Among the various optical phenomena which are caused by interaction of light with substance, the important place borrows photo-electric effect. The analysis of this phenomenon has led to representation about light quanta – photons. In offered clause the example of alternative interpretation of this phenomenon is resulted.

Key words: photons, photoeffect, semiclassical theory.

Отримано: 28.06.2009

УДК 53(07)

В. Л. Бузько

Спеціалізована загальноосвітня школа I-III ступенів № 6, Кіровоград

ИНТЕГРАЦИЯ ПРИРОДНИЧИХ ЗНАНЬ ПРИ ВИВЧЕННІ ПОНЯТТЯ ДИФУЗІЇ

У статті розглянуто важливість інтеграції знань для формування ключових компетентностей учнів на прикладі формування поняття дифузії.

Ключові слова: інтеграція знань, міжпредметні зв'язки, дифузія.

Тенденції розвитку сучасного суспільства висувають нові вимоги до навчального процесу, у тому числі і до предметів природничо-математичного циклу. З одного боку, змінюється зміст освіти – збільшується навантаження на учня, з іншого боку – виникає необхідність якісно нових методик викладання, які дозволили б не тільки зібрати різноманітні знання в єдину систему, але й сформувати у дітей компетенції, необхідні для життя в сучасному світі.

Компетентнісний підхід – це спроба привести у відповідність систему освіти й потреби сучасного суспільства. Він забезпечується діяльним підходом, активними формами навчання, організацією навчального процесу на основі системи навчальних завдань, реалізацією принципів розвиваючого навчання. На мою думку, ефективно реалізувати цей напрямок можна за допомогою інтегрованого навчання на уроках фізики. У статті розглядається розвиток компетенцій учнів у процесі вивчення фізики на основі міжпредметних зв'язків із біологією та хімією.

Мета статі – розглянути умови для розвитку компетенцій учнів на основі реалізації міжпредметних зв'язків у процесі навчання фізики.

Завдання зводяться до того, щоб вивчити механізм формування в учнів компетенцій у процесі навчання; розглянути теоретичні положення міжпредметної інтеграції на уроках фізики; розробити й апробувати моделі реалізації міжпредметної інтеграції в шкільному курсі фізики на основі компетентнісного підходу.

Різноманіття міжпредметних зв'язків у свій час розкривав ще І.Г.Песталоцці, виходячи з вимоги: «Приведи у своїй свідомості усі власне кажучи взаємозалежні між собою предмети в той саме зв'язок, у якому вони перебувають у природі» [1, с.175]. Він відзначав небезпеку відриву одного предмета від іншого, особливо в старших класах.

Першу спробу обґрунтувати в психології міжпредметні зв'язки зробив І.Г.Герbart, відзначивши, що «область розумового середовища» виявляється в здатності відтворити раніше засвоєні знання у зв'язку з тими, які засвоюються у даний час; у цих умовах створюються можливості застосування знань на практиці.

Найбільш повне в класичній педагогіці обґрунтування дидактичної значущості міжпредметних зв'язків дав К.Д.Ушинський. Він виводив міжпредметні зв'язки з різних асоціативних зв'язків. К.Д.Ушинський підкреслював,