

► Слово квант происходит от лат. *quantum* — сколько или как много. Вообще, это слово обозначает часть, долю или неделимую порцию. Планк поэтически назвал новую фундаментальную постоянную h — «таинственным посланцем из реального мира».



За работы по определению удельного заряда электрона $\frac{e}{m}$, которые привели к открытию первой элементарной частицы — электрона, Дж. Томсон в 1906 г. был удостоен Нобелевской премии по физике. В 1918 г. Макс Планк был удостоен Нобелевской премии по физике «...в знак признания услуг, которые он оказал физике своим открытием квантов энергии».



1. В чем состоит сущность явления внешнего фотоэффекта? Внутреннего фотоэффекта?
2. Когда и кем было открыто явление внешнего фотоэффекта?
3. Нарисуйте схему экспериментальной установки Столетова и объясните суть проделанных им экспериментов.
4. Объясните особенности вольтамперной характеристики фотоэффекта.
5. Сформулируйте экспериментальные законы фотоэффекта. Какие из них невозможно объяснить с точки зрения волновой теории света?
6. В чем заключается гипотеза Планка?
7. Запишите приближенное значение постоянной Планка.



§ 28. Фотон. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

■ Изучение законов фотоэффекта привело ученых к неожиданному выводу: при взаимодействии с веществом (поглощении или излучении) свет ведет себя подобно движущимся частицам (квантам). Что это за частицы? Каковы их свойства и как они связаны с волновыми характеристиками света?



Электронвольт — энергия, которую приобретет частица с зарядом, равным элементарному, при перемещении между двумя точками с ускоряющей разностью потенциалов 1 В ($1,0 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Развивая идеи М. Планка, А. Эйнштейн в 1905 г. для объяснения экспериментальных законов внешнего фотоэффекта выдвинул гипотезу о дискретности самого электромагнитного излучения — свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов). Он рассмотрел элементарные процессы поглощения и испускания этих квантов.

По гипотезе Эйнштейна монохроматическое электромагнитное излучение частотой ν обладает не только волновыми свойствами, но и свойствами характерными для потока частиц. Каждая такая частица движется со скоростью света c и несет квант энергии $E = h\nu$. Назвать эти частицы **фотонами** предложил в 1928 г. американский физик Артур Комптон.

Энергия фотона может быть выражена через длину волны λ :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$



Масса фотона, движущегося со скоростью света в вакууме, равна нулю.

Таким образом, фотон — удивительная частица, которая обладает энергией $E = h\nu$, импульсом $\vec{p}$. Вследствие того что скорость фотона равна скорости света в вакууме, то его масса равна нулю ($m = 0$). Такие частицы называют *безмассовыми*.

Фотон является элементарной частицей, только в отличие от других элементарных частиц он не имеет массы, а потому «обречен» всегда двигаться со скоростью распространения света.

Таким образом, фотон обладает следующими свойствами:

- существует только в движении;
- является безмассовой частицей ($m = 0$);
- электрически нейтрален ($q = 0$);
- скорость его движения равна скорости распространения света в вакууме ($v = c$) во всех ИСО;
- энергия фотона пропорциональна частоте соответствующего электромагнитного излучения ($E = h\nu$).



Рассмотрим объяснение экспериментальных законов фотоэффекта, предложенное Эйнштейном на основе квантовых представлений. При освещении электрода электромагнитным излучением (см. рис. 171) происходит взаимодействие фотонов с электронами вещества. Если энергия фотона $E = h\nu$ достаточно велика, то какой-либо из электронов после поглощения фотона может получить энергию, достаточную для того, чтобы покинуть облучаемый образец. Электроны, покинувшие образец, имеют некоторую скорость, поэтому даже при отсутствии напряжения между электродами сила фототока не равна нулю. Именно поэтому вольтамперная характеристика фотоэффекта при напряжении, равном нулю, не проходит через нуль (см. рис. 172, в).

Для того чтобы покинуть вещество, электрон должен совершить работу против сил взаимодействия электрона с атомами вещества. Таким

образом, минимальная энергия, необходимая для выбивания электрона с поверхности вещества, называется **работой выхода** и обозначается $A_{\text{вых}}$ ($A_{\text{вых}} > 0$). Для металлов эта работа связана с преодолением сил взаимодействия электронов с положительно заряженными ионами кристаллической решетки, которые удерживают электрон в веществе. Работа выхода для металлов обычно составляет несколько электронвольт (см. табл. 9).

Таблица 9. Фотоэлектрические характеристики некоторых веществ

Вещество	$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	$\nu_{\min} \cdot 10^{-14} \text{ Гц}$	$\lambda_{\text{к}}, \text{нм}$
Цезий	1,9	4,6	650
Калий	2,2	5,3	560
Натрий	2,3	5,6	540
Кальций	2,7	6,5	460
Цинк	3,7	8,9	340
Серебро	4,3	10	260
Вольфрам	4,5	11	280
Никель	5,0	12	250
Платина	5,3	13	230

Оставшаяся часть энергии поглощенного кванта составляет кинетическую энергию освободившегося электрона. Наибольшей кинетической энергией $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ будут обладать те электроны, которые поглотят кванты света вблизи поверхности металла и вылетят из него, не успев потерять энергию при столкновениях с другими частицами в металле.

На основе закона сохранения энергии можно записать следующее уравнение для фотоэлектрона:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$

Это соотношение называют **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

Отметим, что $\frac{mv_{\max}^2}{2} = E_{\kappa}^{\max}$ — это максимальная кинетическая энергия электрона ($v_{\max} \ll c$), которой он может обладать, вылетев из вещества. Из-за различных потерь кинетическая энергия электрона будет меньше расчетного значения.



Используя уравнение Эйнштейна, можно объяснить экспериментальные законы фотоэффекта.

Объяснение первого закона фотоэффекта. Сила фототока насыщения пропорциональна общему числу фотоэлектронов, покидающих поверхность металла за единицу времени. Число таких фотоэлектронов, в свою очередь, пропорционально числу фотонов, падающих на поверхность за это же время. Именно пропорционально, а не равно, так как часть квантов света поглощается кристаллической решеткой, и их энергия переходит во внутреннюю энергию металла. Таким образом, увеличение интенсивности падающего света приводит к росту числа фотоэлектронов, покидающих поверхность металла.

Объяснение второго закона фотоэффекта. Фотоэлектрон вырывается из катода за счет действия одного кванта падающего излучения. Поэтому кинетическая энергия фотоэлектрона зависит не от полной энергии волны, а от энергии одного кванта, т. е. частоты ν . При увеличении частоты ν падающего света максимальная кинетическая энергия $E_{\kappa}^{\max}$ фотоэлектронов возрастает линейно, как следует из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта (2), согласно соотношению:

$$E_{\kappa}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (3)$$

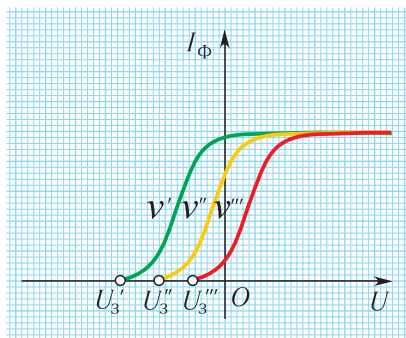


Рис. 176. Вольтамперные характеристики внешнего фотоэффекта при различных частотах падающего излучения ($\nu' > \nu'' > \nu'''$)

Известно, что фототоком можно управлять, подавая на металлические пластины различные напряжения. Если на систему подать небольшое напряжение обратной полярности, «затрудняющее» вылет электронов, то сила тока уменьшится, так как теперь фотоэлектронам, кроме работы выхода, придется совершать дополнительную работу против сил электрического поля.

При некотором отрицательном значении напряжения U_3 электроны затормаживаются и, не достигнув поверхности анода, возвращаются на катод. Сила тока в цепи при этом будет равна нулю (рис. 176).

Величину U_3 , при которой сила тока в цепи равна нулю, называют *задерживающим напряжением*. Следовательно, вся кинетическая энергия электронов затрачивается на работу против сил электрического поля. При этом максимальная кинетическая энергия электронов выражается через задерживающее напряжение следующим образом:

$$E_{\text{к}}^{\text{max}} = eU_3. \quad (4)$$

Объяснение третьего закона фотоэффекта. Если частота ν падающего излучения меньше граничной частоты ν_{min} ($\nu < \nu_{\text{min}}$), при которой $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}}$, то испускания электронов не происходит ($\nu_{\text{max}} = 0$). Таким образом, фотоэффект отсутствует, если частота излучения оказывается меньше некоторой характерной для данного вещества величины ν_{min} .

Следовательно, **красную границу фотоэффекта** можно найти из условия:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (5)$$

Она зависит только от работы выхода электронов, т. е. определяется строением металла и состоянием его поверхности.

Длина волны $\lambda_{\text{к}}$ излучения, соответствующая красной границе фотоэффекта, может быть определена из соотношения:

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{c}{\nu_{\text{min}}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}. \quad (6)$$



► С появлением мощных монохроматических источников света (лазеров) удалось наблюдать процессы многофотонного поглощения. В таких процессах, прежде чем покинуть вещество, электрон может поглотить не один, а несколько фотонов. Поэтому уравнение Эйнштейна для многофотонного фотоэффекта запишется в виде:

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = N h \nu - A_{\text{вых}},$$

где N — число фотонов, за счет поглощения которых вылетел электрон. Следовательно, для многофотонного фотоэффекта частота красной границы уменьшается в N раз, а соответствующая ей длина волны в N раз увеличивается:

$$(\nu_{\text{min}})_N = \frac{A}{Nh}.$$

В настоящее время трудно представить себе современную науку и технику без применения устройств (приемников излучения),



Рис. 177. Фотоэлемент: а — вакуумный (газонаполненный); б — полупроводниковый

в самонаводящихся снарядах, для сигнализации и локации. Инфракрасные фотоэлементы широко используются в пультах дистанционного управления различными бытовыми электронными приборами (телевизор, кондиционер и т. д.).

преобразующих световые сигналы в электрические. Такие устройства называются *фотоэлементами* (рис. 177).

Фотоэлементы используются для контроля пассажиропотока в метро, для включения и выключения освещения на улицах, для управления производственными процессами, в военной технике:

▶ В 1921 г. при присуждении Альберту Эйнштейну Нобелевской премии по физике в решении Нобелевского комитета указывалось, что «премией особенно отмечается объяснение законов фотоэлектрического эффекта». Первый фотоэлемент на внешнем фотоэффекте был создан Столетовым в 1888 г.



1. В чем сущность гипотезы Эйнштейна?
2. Что называется фотоном? Перечислите основные свойства фотона.
3. По какой формуле можно определить энергию фотона?
4. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и назовите все физические величины, входящие в него.
5. Покажите, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта является следствием закона сохранения и превращения энергии.
6. Перечислите условия, необходимые для возникновения фотоэффекта.
7. Что такое задерживающее напряжение?
8. Что называется красной границей фотоэффекта? От чего она зависит?
9. Как квантовая теория объясняет существование граничной частоты фотоэффекта? Запишите формулу для красной границы фотоэффекта.
10. Объясните законы фотоэффекта исходя из квантовой теории света.
11. Почему энергия фотоэлектронов для данного вещества определяется только частотой падающего света?

Примеры решения задач

1. Монохроматический свет длиной волны $\lambda = 450$ нм падает на поверхность натрия. Определите: а) энергию E фотона этого света; б) мо-

дугу импульса p фотона падающего света; в) красную границу $\nu_{\min}$ фотоэффекта для натрия; г) максимальную кинетическую энергию $E_{\kappa}^{\max}$ фотоэлектронов.

Дано:

$$\lambda = 450 \text{ нм} = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

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

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$E - ? \quad p - ? \quad \nu_{\min} - ?$$

$$E_{\kappa}^{\max} - ?$$

Решение

а) Энергия фотона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,8 \text{ эВ}.$$

б) Модуль импульса фотона:

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

в) Красная граница связана с работой выхода соотношением:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}, \quad \nu_{\min} = \frac{3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

г) Из уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта находим, что максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона:

$$E_{\kappa}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}, \quad E_{\kappa}^{\max} = 2,8 \text{ эВ} - 2,3 \text{ эВ} = 0,50 \text{ эВ}.$$

Ответ: а) $E = 2,8 \text{ эВ}$; б) $p = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; в) $\nu_{\min} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$; г) $E_{\kappa}^{\max} = 0,50 \text{ эВ}$.

2. Под действием света длиной волны $\lambda = 400 \text{ нм}$ с поверхности металла вылетают электроны, при этом их энергия равна половине энергии фотонов, вызывающих фотоэффект. Определите длину волны λ_{κ} , соответствующую красной границе фотоэффекта.

Дано:

$$\lambda = 400 \text{ нм} = 4,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

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

$$\lambda_{\kappa} - ?$$

Решение

Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Красную границу фотоэффекта определим из соотношения:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{min}}.$$

По условию задачи:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{h\nu}{2}.$$

Тогда $h\nu = h\nu_{\text{min}} + \frac{h\nu}{2}$, откуда следует, что $\nu_{\text{min}} = \frac{\nu}{2}$.

Так как длина волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$, то

$$\lambda_{\text{к}} = 2\lambda, \quad \lambda_{\text{к}} = 2 \cdot 400 \text{ нм} = 800 \text{ нм}.$$

Ответ: $\lambda_{\text{к}} = 800 \text{ нм}$.

Упражнение 19

1. Определите энергию E фотона для излучения частотой $\nu = 5,4 \cdot 10^{14}$ Гц.
2. Вычислите энергию E_1 фотона видимого света длиной волны $\lambda_1 = 0,60$ мкм и сравните ее с энергиями фотонов ультрафиолетового излучения длиной волны $\lambda_2 = 0,252$ мкм, рентгеновского излучения $\lambda_3 = 0,10$ нкм и γ -излучения $\lambda_4 = 0,10$ пм.
3. Определите красную границу ν_{min} фотоэффекта для некоторого металла, если работа выхода электрона из него $A_{\text{вых}} = 3,3 \cdot 10^{-19}$ Дж.
4. Определите длину волны λ ультрафиолетового излучения, падающего на поверхность цинка, при которой модуль максимальной скорости вылетающих фотоэлектронов составляет $v_{\text{max}} = 800 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
5. Определите работу выхода $A_{\text{вых}}$ электрона из катода, используя вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента (рис. 178). Катод освещается светом с длиной волны $\lambda = 200$ нм. Найдите число N электронов, выбиваемых из фотокатода в единицу времени.
6. Определите количество N фотонов с частотой $\nu = 9,5 \cdot 10^{12}$ Гц, которое содержится в импульсе излучения с энергией $E = 8,8 \cdot 10^{-18}$ Дж.
7. Определите максимальную кинетическую энергию $E_{\text{к}}^{\text{max}}$ и модуль максимальной скорости v_{max} фотоэлектрона, вылетевшего из натрия

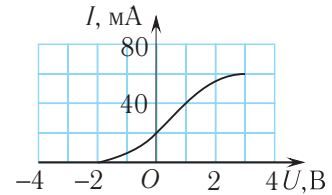


Рис. 178

при облучении его ультрафиолетовым излучением длиной волны $\lambda = 200$ нм.

8. На металлическую пластину падает монохроматический свет длиной волны $\lambda = 413$ нм. Определите работу выхода $A_{\text{вых}}$ (эВ), если задерживающее напряжение $U_3 = 1,0$ В.



§28-1

§ 29. Давление света. Корпускулярно-волновой дуализм

Словечко громкое всегда
Из затрудненья вас выводит!

И. Гёте. Фауст

- После открытия фотона в научном мире с новой силой «вспыхнула» старая дискуссия: так что же такое свет — волна или поток частиц? Как «примирить» друг с другом эти противоречивые представления? Какие из этого следуют выводы?



Давлением называется скалярная физическая величина, численно равная отношению модуля силы, действующей по нормали к площадке, к ее площади $p = \frac{F}{S}$.
В СИ единицей давления является паскаль (Па): $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$.

Из законов механики следует, что тело при ударе о некоторую поверхность оказывает на нее механическое давление, обусловленное изменением импульса тела. Причем давление тела на поверхность оказывается в случае как упругого, так и не упругого удара. А будет ли возникать подобный эффект при отражении и поглощении света некоторой поверхностью? Иными словами, оказывает ли свет давление на поверхность, с которой взаимодействует? После завершения построения Максвеллом волновой теории света ответы на эти вопросы стали очевидными. Свет как электромагнитная волна обладает энергией и импульсом, поэтому оказывает давление на поверхность, на которую он падает.

Русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1899 г. впервые измерил световое давление. Он подвесил на тонкой нити коромысло с парой крылышек на концах (рис. 179): поверхность у одного из них была зачерненной,

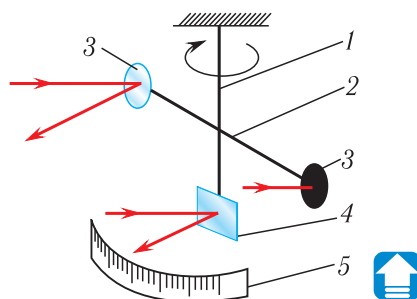


Рис. 179. Схема опыта Лебедева: 1 — подвес; 2 — коромысло; 3 — крылышки; 4 — зеркало; 5 — шкала



обеспечивая почти полное поглощение, а у другого — зеркальной, обеспечивая полное отражение. Подвес с крылышками образовал чувствительные крутильные весы, помещаемые в сосуд, воздух в котором был откачан.

Свет практически полностью отражался от зеркальной поверхности, и его давление на зеркальное крылышко было вдвое больше, чем на зачерненное. Вследствие этого создавался момент сил, поворачивающий коромысло (см. рис. 179). Измеряя угол поворота коромысла, можно было судить о силе, действовавшей на крылышки, а следовательно, определить световое давление.



Факт существования светового давления имеет большое значение, так как доказывает наличие у света не только энергии, но и импульса. Это свидетельствует о материальности электромагнитного излучения, представляющего собой еще одну форму существования материи — в виде электромагнитного поля.

К тому же со времен И. Ньютона и Х. Гюйгенса (XVII в.) представления о природе света были противоречивы. Одни ученые во главе с Ньютоном считали свет потоком частиц — корпускул (от лат. *corpusculum* — маленькая частица), другие вслед за Гюйгенсом полагали, что свет представляет собой не что иное, как волны.

До начала XIX в. обе точки зрения отстаивались с переменным успехом. Так, исходя из гипотезы о корпускулах, можно было объяснить законы прямолинейного распространения и отражения света, а такие явления, как интерференция, дифракция света, объяснялись только его волновыми свойствами.

Однако в XX в. было установлено, что в целом ряде явлений, таких как, например, фотоэффект, свет ведет себя как совокупность частиц с определенной энергией и импульсом. Одновременное наличие у объекта волновых и корпускулярных свойств получило название **корпускулярно-волнового дуализма**.

В одних процессах в большей мере проявляются волновые свойства света, в других — корпускулярные. Долгое время природа этого дуализма была совершенно непонятна, и он казался искусственным объединением противоречивых свойств материи.

Только после создания квантовой механики выяснилось, что «раздвоение личности» света закономерно и представляет собой проявление специфических свойств, присущих микромиру в целом.

Французский физик Луи де Бройль в 1923 г. высказал смелое предположение, что корпускулярно-волновой дуализм должен иметь место для всех микрообъектов.

В 1927 г. гипотеза де Бройля о наличии волновых свойств у электрона и других микро-частиц была проверена экспериментально, когда американские физики Клинтон Дэвиссон и Лю-стер Джермер впервые наблюдали дифракцию электронов на кристалле никеля. Так на рисунке 180 представлена современная фотография дифракции электронов на слюде.

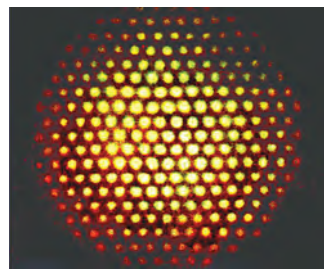


Рис. 180. Картина дифракции электронов на слюде

Современные эксперименты позволяют последовательно наблюдать процесс образования дифракционной картины при увеличении числа электронов, проходящих через щель. Компьютерное моделирование этого процесса представлено на рисунке 181. Из него видно, что при увеличении числа электронов все более отчетливо формируются дифракционные максимумы (см. рис. 181, в).



Рис. 181. Результаты компьютерного моделирования явления дифракции N электронов на двух щелях: a — $N = 27$; $б$ — $N = 70$; $в$ — $N = 735$

Способность к интерференции и дифракции была обнаружена не только у электронов, но и у других частиц — протонов, нейтронов и альфа-частиц.

Волновые свойства частиц нашли свое применение в электронной оптике, занимающейся исследованием, построением и использованием электронных пучков для получения изображений.

Так использование волновых свойств пучка электронов позволило создать новое поколение микроскопов — электронные микроскопы (рис. 182), значительно превосходящие по степени увеличения оптические микроскопы.

Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм присущ не только свету, но и любым частицам, в соответствии с которым используются как волновые, так и корпускулярные представления, в зависимости от конкретной ситуации.



Рис. 182. Электронный микроскоп

► Несмотря на сравнительно малое значение светового давления при обычных условиях, оно играет достаточно существенную роль в природе. В 1604 г. немецкий астроном Иоганн Кеплер объяснил изогнутую форму хвоста кометы (рис. 183) действием сил светового давления со стороны Солнца (рис. 184). Кроме того, именно давление света «изнутри» препятствует гравитационному сжатию звезд, оно сокращает срок службы искусственных спутников Земли вследствие постепенного уменьшения радиуса их орбиты.



Рис. 183. Комета Галлея



Рис. 184. Движение кометы вокруг Солнца (хвост кометы всегда направлен от Солнца)

В настоящее время активно обсуждаются и реализуются проекты космических кораблей — «парусников», которые приводятся в движение «солнечным ветром».

Уже первый электронный просвечивающий микроскоп (Э. Руска, 1933 г.) позволял изучать детали в десять раз меньшие, чем те, которые способны разрешать самые «мощные» оптические микроскопы. Дальнейшие исследования позволили сотрудникам лаборатории фирмы IBM в Цюрихе (Швейцария) Г. Биннингу и Г. Рореру в 1981 г. создать электронный сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий рассмотреть даже «отдельный» атом.

Группа специалистов Токийского университета 4 ноября 2010 г. впервые в истории с помощью электронного микроскопа сумела «сфотографировать» самый легкий и самый маленький атом — атом водорода — (рис. 185).



В 1929 г. Луи де Бройль за открытие волновой природы электрона был удостоен Нобелевской премии по физике.

В 1986 г. Герду Биннингу и Гейнриху Рореру совместно с Эрнстом Руска была присуждена Нобелевская премия по физике за создание электронного микроскопа.

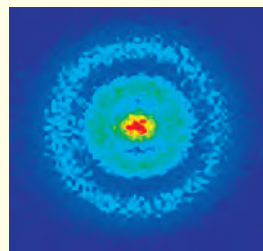


Рис. 185. «Фотография» атома водорода



1. Как электромагнитная теория объясняет давление света?
2. Опишите суть эксперимента Лебедева по измерению светового давления.
3. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм света? Перечислите явления, в которых проявляются волновые свойства света; корпускулярные (квантовые) свойства света.



САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 5

Энергия колебательной системы, совершающей гармонические колебания с частотой ν , может, согласно гипотезе Планка, принимать лишь определенные дискретные значения, отличающиеся на целое число элементарных порций — **квантов энергии**.

Эйнштейн развил гипотезу Планка, представив, что свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов).

Наименьшая порция (**квант**) энергии, которую несет излучение частотой ν , определяется по формуле:

$$E = h\nu,$$

где постоянная h — фундаментальная постоянная — **постоянная Планка**. Ее приближенное значение:

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

Явление испускания электронов веществом под действием падающего на него света получило название **внешнего фотоэффекта**. Испускание веществом каких-либо частиц называется **эмиссией**. Поэтому внешний фотоэффект называют также **фотоэлектронной эмиссией (фотоэмиссией)**, а вылетающие электроны — **фотоэлектронами**.

Экспериментально установлены следующие **законы внешнего фотоэффекта**:

1. Сила фототока насыщения I_n прямо пропорциональна интенсивности I падающего излучения.

2. Максимальная кинетическая энергия $E_k^{\max}$ фотоэлектронов не зависит от интенсивности I падающего излучения и линейно возрастает с увеличением частоты ν падающего излучения.

3. Для каждого вещества существует граничная частота $\nu_{\min}$ такая, что излучение меньшей частоты не может вырывать электроны из его поверхности.

Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Красная граница фотоэффекта — наименьшая частота излучения, при которой наблюдается фотоэффект:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h},$$

зависит только от работы выхода электронов для данного вещества ($A_{\text{вых}} > 0$), т. е. определяется химической природой вещества и состоянием его поверхности.



Под **корпускулярно-волновым дуализмом** понимают тот факт, что всем объектам в природе присущи как волновые, так и корпускулярные свойства. В одних условиях в большей мере проявляются волновые, в других — корпускулярные свойства объектов.

Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (Г. Герц, А. Г. Столетов, М. Планк, П. Н. Лебедев, Луи де Бройль).

2. Подготовьте рефераты на темы: «Применение фотоэлементов в солнечных батареях, для сигнализации и локации, для управления производственными процессами».