

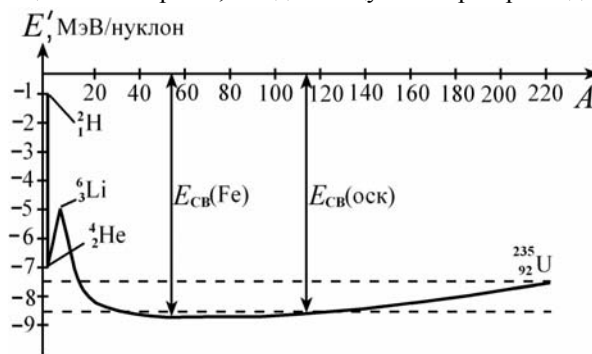
## ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

### § 9. Атомная энергетика. Термоядерный синтез

Всякая физическая система стремится занять состояние с наименьшей потенциальной энергией. Это общий принцип; в физике он столь же важен как и принцип Ферма в оптике. Согласно этому принципу протону и электрону энергетически «выгодно» объединиться в атом водорода, согласно ему же атомы объединяются в молекулы, легкие ядра сливаются в более тяжелые, ядра тяжелых элементов (уран, плутоний, радий) распадается на более легкие осколки. При этом выделяется энергия, равная дефекту массы исходной системы (выраженному в энергетических единицах).

Ниже на рис. 9.1 приведена зависимость энергии связи (приходящейся, в среднем, на один нуклон атомного ядра) от числа нуклонов в ядре. Нуклон – это общее название для протонов и нейтронов. Именно из них состоят ядра всех химических элементов.

**Задача 9.** Пользуясь диаграммой, представленной на рис. 9.1, укажите, ядрам каких элементов «выгодно» распасться на два осколка, а каких – слиться образовав новое ядро. Оцените энергию, выделяющуюся при распаде



**Рис. 9.1**

ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  на два примерно равных осколка (здесь и далее подстрочный индекс указывает число протонов, а надстрочный – число нуклонов в ядре).

**Решение.** Наибольшая (по абсолютной величине) энергия связи, приходящаяся на нуклон, соответствует ядру железа. Иными словами, железо находится на дне потенциальной ямы. Следовательно, ядра тяжелее железа склонны к распаду, а более легкие – к синтезу. Другими словами, если после распада исходного «материнского ядра» осколки будут иметь большую (по абсолютной величине) энергию связи, т.е. на диаграмме энергий окажутся ниже исходного ядра, то такой процесс может произойти. Аналогичные рассуждения справедливы и для синтеза (слияния) ядер.

Предположим, что уран распадается на два примерно равных осколка. Согласно энергетической диаграмме, приведенной на рис. 9.1, в продуктах деления урана на один нуклон приходится энергия связи  $F_{\text{св}} = 8,5$  МэВ/нукл. Мы получим

$$E_{\text{св}}(U) = E'_{\text{св}}(U) \cdot A$$

или численно

$$E_{\text{св}}(U) \approx 7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}} \cdot 235 \text{ нукл.} = 1786 \text{ МэВ.}$$

Для продуктов деления урана

$$\begin{aligned} E_{\text{св}}(\text{оск}) &\approx 2(E_{\text{св}} \cdot A_{\text{оск}}) \Rightarrow \\ \Rightarrow E_{\text{св}}(\text{оск}) &\approx 2 \left( 8,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}} \right) 117 \text{ нукл.} \approx 1990 \text{ МэВ.} \end{aligned}$$

Следовательно, при распаде ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется энергия

$$\Delta E = E_{\text{св}}(\text{оск}) - E_{\text{св}}(U) \approx 200 \text{ МэВ.}$$

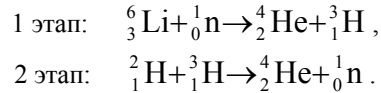
В пересчете на нуклон это составит приблизительно 0,84 МэВ.

Кажется, все просто и ясно. Но в таком случае, почему до сих пор не распались элементы тяжелее железа? Почему легкие ядра не объединились в более тяжелые?

Дело в том, что выше мы рассматривали только принципиальную возможность слияния или распада ядер. Сам же механизм этой реакции нас не интересовал. А весь секрет как раз и состоит в том, чтобы запустить этот механизм.

**Задача 10.** Оцените энергию, выделяющуюся при слиянии ядер лития  ${}^6_3\text{Li}$  и дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  (изотопа водорода, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона).

Процесс слияния ядер дейтерия и лития идет в два этапа:



Нейтроны, подобно катализаторам в химических реакциях, используются только как промежуточное звено и, прореагировав в одном цикле, могут вступать в другой.

**Решение.** Оценим энергию связи исходных (1) и конечных (2) продуктов:

$$\begin{aligned} E_{\text{св}}(1) &= E_{\text{св}}(\text{Li}) + E_{\text{св}}({}^2_1\text{H}) \Rightarrow \\ \Rightarrow E_{\text{св}}(1) &\approx 5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}} \cdot 6 \text{ нукл.} + 1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}} \cdot 2 \text{ нукл.} = 32 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{св}}(2) &= E_{\text{св}}(\text{He}) + E_{\text{св}}(\text{He}) \Rightarrow \\ \Rightarrow E_{\text{св}}(2) &\approx 2 \cdot 7 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}} \cdot 4 \text{ нукл.} = 56 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

$$\Delta E_{\text{св}} = 56 \text{ МэВ} - 32 \text{ МэВ} = 24 \text{ МэВ},$$

или в пересчете на нуклон 3 МэВ. Это в три с половиной раза больше, чем в реакции деления урана. По сравнению с химическими реакциями оба процесса (и распад, и синтез ядер) дают колоссальный выигрыш в энергии, высвобождающейся из единицы массы вещества.

### § 10. $\beta$ -распад. Нейтрино

Распад ядра некоторого элемента  $X$  на два осколка  $Y$  и  $W$  можно схематически показать с помощью диаграммы



где  $A_1 + A_2 = A$ ,  $Z_1 + Z_2 = Z$ .

Наиболее типично при такой схеме распада – появление в качестве одного из осколков  $\alpha$ -частицы (ядра атома гелия:  ${}^4_2\text{He}$ ). Однако, в некоторых реакциях вещество излучает легкие заряженные частицы –  $\beta$ -лучи. Вскоре после обнаружения этого явления  $\beta$ -лучи отождествили с электронами. В ходе  $\beta$ -распада изменялось число протонов (число нуклонов в ядре сохранялось) и бесследно исчезала часть энергии.



На первый взгляд из этого факта следовало два совершенно неожиданных вывода:

- 1) В ядерных реакциях может нарушаться закон сохранения энергии!
- 2) Нейтрон в ядре  $\beta$ -активного элемента распадается на протон и электрон:



Следовательно, нейтрон – не элементарная частица, а все вещество состоит только из двух типов частиц – протонов и электронов! Сразу скажем, что оба вывода оказались поспешными и не соответствовали действительности. Последующие эксперименты и теоретические исследования показали, что протон ни чуть не более элементарен, чем нейтрон.

Для спасения закона сохранения энергии немецкий физик Вольфганг Паули выдвинул гипотезу: в ходе распада нейтрона рождается еще одна частица. Она электрически нейтральна, а ее масса на несколько порядков меньше массы протона. По предложению Энрико Ферми эту частицу назвали «нейтрино» (в переводе с итальянского это означает – "нейтрончик"). Именно нейтрино «повинны» в исчезновении энергии при распаде нейтрона. «Исправленная» реакция (10.3) должна выглядеть так:

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e_- + \tilde{\nu}. \quad (10.4)$$

В дальнейшем было установлено, что в свободном состоянии, т.е. «вне коллектива», нейтрон существовать не может и через несколько минут одиночества распадается по схеме (10.4). Долгое время считали, что нейтрино из-за его нейтральности вообще невозможно обнаружить. Но экспериментаторы справились с этой трудной задачей. К 1956 году существование нейтрино было доказано экспериментально. Сейчас детекторы нейтрино есть во многих развитых странах. Дело идет к возникновению целых научных направлений – нейтринной астрономии и нейтринной геофизики.

### § 11. Элементарная частица по имени «фотон»

К концу прошлого века казалось бесспорно доказанным фактом, что свет – суть электромагнитные волны. Даже виртуозные опыты Петра Николаевича Лебедева (1899 г.), в которых он доказал, что свет оказывает давление на вещество, прекрасно вписывались в волновую теорию. На этом фоне сообщение немецкого физика Макса Карла Эрнста Людвиг Планка, сделанное 14 декабря 1900 года (последний месяц уходящего века), прозвучало явным диссонансом. Планк показал, что энергия излучается веществом только порциями (квантами), причем, величина кванта прямо пропорциональна частоте колебаний электромагнитного поля волны:

$$E = h\nu. \quad (11.1)$$

Здесь  $h$  – коэффициент пропорциональности, получивший в последующем название «постоянная Планка»:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с или  $4,14 \cdot 10^{-15}$  эВ·с.

**Примечание 1.** Точно такое же название применяют к коэффициенту  $\hbar = h/(2\pi)$ , поэтому будьте внимательны, когда встречаете в формулах эти обозначения. Постоянная Планка  $\hbar = 6,58 \cdot 10^{-16}$  эВ·с. Наряду со скоростью света она принадлежит к числу фундаментальных мировых констант.

В последующем экспериментаторы придумывали самые изощренные опыты для расщепления излученного кванта света, однако все их попытки заканчивались неудачами. Вся совокупность опытов убедительно свидетельствовала о том, что квант света ведет себя как элементарная частица. В 1923 году американский физик Артур Комптон, сделавший решающий эксперимент в доказательстве этого факта, предложил для кванта электромагнитного излучения изящное название – *фотон*.

**Задача 11.** Определите кинетическую энергию и массу фотона, имеющего частоту  $\nu$ .

**Решение.** Поскольку для света  $\beta = 1$ , то согласно (6.4)  $cp = E$ . Подставим найденное значение в (6.5):

$$(mc^2)^2 = E^2 - E^2 \Rightarrow mc^2 = 0.$$

С учетом этого результата из формул (6.6) и (6.7) следует  $E_{\text{кин}} = E$ . Получается, что фотон – безмассовая частица, обладающая только кинетической энергией.

**Задача 12.** Фотон обладает энергией  $E = 3,1$  эВ. Определите длину волны соответствующего электромагнитного излучения.

**Решение.** Из курса оптики известно, что  $\lambda\nu = c$ , а по формуле Планка  $E = h\nu$ . Из этих двух уравнений следует равенство

$$\lambda = \frac{ch}{E}. \quad (11.2)$$

Численная подстановка дает  $\lambda = 4000$  Å (ультрафиолетовое излучение).

**Примечание 2.** 1 Å (один ангстрем) – единица длины в атомной физике, равная  $10^{-10}$  м и названная в честь шведского физика и астронома Андерса Йонаса Ангстрема. Например, диаметр атома водорода равен приблизительно 1 Å.

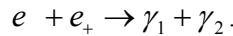
**Примечание 3.** В атомной и ядерной физике постоянные « $c$  и  $h$  любят ходить парочкой». Для справки приведем значение их произведения

$$ch = 1,24 \cdot 10^4 \text{ эВ} \cdot \text{Å}. \quad (11.3)$$

### § 12. Позитроны. Аннигиляция

Позитрон – это античастица по отношению к электрону. Массы позитрона и электрона равны, а заряды противоположны по знаку.

В результате столкновения этих частиц происходит аннигиляция. Образно говоря, при встрече они попадают в такие «тесные объятия» друг друга, что «испускают дух», т.е. превращаются в два фотона, энергия каждого из которых более 0,5 МэВ. Вот схема такой реакции:



Для упрощения расчетов предположим, что частицы имеют одинаковые скорости и движутся навстречу друг другу вдоль одной прямой. Ясно, что общий импульс системы равен нулю. До столкновения формула (6.5) имеет вид

$$(m_{\text{сист}} c^2)^2 = (E_{e_{-}} + E_{e_{+}})^2 - (0)^2.$$

Что мы получим после столкновения?

Поскольку фотон – безмассовая частица, то, очевидно, что суммарная масса двух безмассовых частиц тоже равна нулю.

Очевидно? Давайте подсчитаем. После реакции формула (6.5) по-прежнему имеет вид

$$(m_{\text{сист}} c^2)^2 = (E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2})^2 - (0)^2.$$

Здесь  $E_{\gamma_1}$  и  $E_{\gamma_2}$  – энергии родившихся фотонов,  $E_{\gamma_1} > 0$  и  $E_{\gamma_2} > 0$ .

Более того, согласно (7.2)

$$E_{e_{-}} + E_{e_{+}} = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}.$$

Невероятно! Масса двух безмассовых частиц в сумме равна удвоенной массе электрона. Вывод: **масса – не аддитивная величина.**

### § 13. Гипотеза Луи де Бройля

В 1922 году американский физик-экспериментатор Артур Холли Комптон получил прямое экспериментальное доказательство корпускулярных свойств света, наблюдая рассеяние высокоэнергетичных фотонов на свободных электронах. С этого момента ученый мир смирился с мыслью, что фотон обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Появился даже специальный термин – корпускулярно-волновой дуализм.

Над столь выделенным положением фотона относительно других элементарных частиц задумался французский физик Луи де Бройль. В конце концов он пришел к мысли о том, что корпускулярные и волновые свойства должны быть присущи любым формам материи. Чтобы сходство свойств частиц и фотонов было более сильным, де Бройль предположил, что фотоны имеют массу  $m_{\text{ф}} \sim 10^{-50}$  г.

Подтвердить или опровергнуть эту гипотезу экспериментаторам до сих пор не удалось. Из теоретических выкладок де Бройля следовало: любой частице, обладающей импульсом  $p$ , должна соответствовать волна, длина которой может быть найдена по формуле

$$\lambda_{\text{D}} = \frac{h}{p}. \quad (13.1)$$

В редакции физического журнала, куда де Бройль принес свою работу, ему ответили отказом. Только благодаря счастливому стечению обстоятельств в сентябре 1924 года работа вышла в свет. Любопытно мнение А. Эйнштейна об этой статье де Бройля. В письме к Макс Борну он писал: «Прочти ее. Хотя и кажется, что писал ее сумасшедший, написана она солидно».

Спустя два года сразу две независимые группы исследователей обнаружили дифракцию электронов на кристаллической решетке. Идея де Бройля оказалась верной! С тех пор волны материи стали называть *волнами де Бройля*.

**Задача 13.** Найдите зависимость длины волны де Бройля электрона от его скорости для всего диапазона скоростей ( $0 < v < c$ ).

**Решение.**

$$\lambda_{\text{D}} = \frac{h}{p} = \frac{ch}{cp} = \frac{ch}{\beta E} = \frac{ch}{\beta \gamma E_0}.$$

Здесь, как и ранее,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ,  $E_0 = m_e c^2$ . Выражение  $\frac{ch}{E_0}$  имеет размерность длины. Обычно его называют комптоновской длиной волны и обозначают символом  $\Lambda$ .

$$\Lambda = \frac{ch}{E_0}, \quad \Lambda = 2,42 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}. \quad (13.2)$$

Сравните формулу (13.2) и (11.2). Впечатляющее сходство!

С учетом принятых обозначений выражение для  $\lambda_D$  упрощается

$$\lambda_D = \frac{\Lambda}{\beta\gamma}. \quad (13.3)$$

В случае малых скоростей ( $\beta \ll 1$ ,  $\gamma \approx 1$ )

$$\lambda_D = \frac{\Lambda}{\beta} = \frac{h}{mv}. \quad (13.4)$$

Впрочем, этот результат получается сразу из (13.1), ибо при малых скоростях  $p = mv$ .

В другом предельном случае ( $\beta \approx 1$ ) мы получим

$$\lambda_D = \frac{\Lambda}{\gamma}. \quad (13.5)$$

Последняя формула позволяет оценить энергию, до которой нужно ускорить электрон с тем, чтобы электронными волнами «просвечивать» атомное ядро и изучать его внутреннюю структуру. Для этого длина волны де Бройля электрона должна быть много меньше характерных размеров ядра ( $\sim 10^{-15}$  м) или размеров тех структур, из которых оно может состоять. Несложные численные оценки показывают, что для получения таких энергий требуются мощнейшие ускорители. Стоимость их строительства и эксплуатации под силу лишь очень крупным и богатым странам. Все это послужило толчком к международной кооперации физиков, занимающихся поиском и исследованием элементарных частиц.

#### § 14. Модель атома водорода Бора – де Бройля

В школьных учебниках физики достаточно подробно освещены такие вопросы, как история открытия Эрнестом Резерфордом атомного ядра и история построения молодым датским физиком Нильсом Бором модели атома водорода. Обратим ваше внимание на то, что модель Бора, несмотря на ее явные достоинства, не могла объяснить наблюдаемую на опыте сферическую симметрию атома водорода или показать, почему электрон, находящийся на стационарной орбите и испытывающий при этом колоссальное центростремительное ускорение, не излучает электромагнитные волны, как того требует теория Максвелла.

На последний вопрос попытался ответить Луи де Бройль, применив к модели Бора свою гипотезу.

Электрон обладает волновыми свойствами. Если длина его стационарной орбиты кратна целому числу длин волн де Бройля, то на орбите установятся стоячие волны. Для стоячих волн уже невозможно указать направление их движения (в узловой точке можно поставить стенку; при этом стоячая волна сохранится), а раз нет движения вдоль орбиты – нет и излучения.

Давайте получим из модели Бора – де Бройля формулы, необходимые для решения задач.

Как и в школьных учебниках, будем рассматривать атом водорода, в котором электрон движется по круговой орбите. Ее радиус называют *радиусом Бора* и обозначают символом  $r_B$ .

Чтобы не загромождать выкладки лишними символами предположим, что на длине орбиты электрона уместается только одна длина волны де Бройля. Такое состояние атома называется *основным*. В конце параграфа мы приведем формулы для общего случая, когда  $n > 1$ .

$$2\pi r_B = \lambda_D.$$

Предположим, что  $\beta \ll 1$ . Тогда с учетом (11.4) мы можем записать

$$2\pi r_B = \frac{h}{m\nu} = \frac{ch}{\beta E_0}. \quad (14.1)$$

$$E_{\text{кин(е)}} = \frac{m_e \nu^2}{2} = \frac{E_0 \beta^2}{2}. \quad (14.2)$$

Согласно (8.6)

$$\frac{ke^2}{r_B} = 2E_{\text{кин(е)}}. \quad (14.3)$$

Решая систему уравнений (14.1) и (14.3), мы получим выражение для скорости электрона:

$$\beta = k \frac{e^2}{c\hbar}. \quad (14.4)$$

Численная подстановка показывает, что скорость электрона в основном состоянии атома водорода в 137 раз меньше скорости света. Следовательно, наше предположение о том, что  $\beta \ll 1$  было верным.

Энергия ионизации атома водорода, находящегося в основном состоянии, называется энергией Ридберга или просто ридбергом и обозначается символом  $Ry$ . Легко видеть, что

$$Ry = \frac{E_0 \beta^2}{2}. \quad (14.5)$$

Численно  $Ry = 13,6$  эВ.

**Примечание.** В учебниках ридберг обычно выражают через основные константы  $m$ ,  $h$ ,  $e$ :

$$Ry = k^2 \frac{me^4}{2\hbar^2}. \quad (14.6)$$

Записи (14.6) и (14.5) эквивалентны.

А теперь перепишем полученные нами формулы применительно к общему случаю, когда на орбите помещается  $n$  ( $n > 1$ ) волн:

$$\beta_n = \frac{\beta}{n}. \quad (14.7)$$

$$r_n = r_B n^2. \quad (14.8)$$

$$E_n = \frac{Ry}{n^2}. \quad (14.9)$$

Состояния, в которых на орбите электрона укладывается целое число волн де Бройля, называются *стационарными*. Если этих волн больше одной, говорят, что атом находится в возбужденном состоянии. Электрон может достаточно долго (по масштабу атомных времен) находиться в возбужденном состоянии. Но, в конце концов, он должен вернуться в основное состояние с  $n = 1$  (иногда через один или несколько промежуточных уровней с меньшим номером  $n$ ). При таком переходе избыток энергии  $\Delta E = E_{n_1} - E_{n_2} = E_{12}$  излучается в виде фотона:

$$E_{12} = h\nu_{12}. \quad (14.10)$$

### § 15. Электронная эмиссия и фотоэффект

Для того, чтобы отделить электрон от атома, необходимо затратить энергию, равную по величине энергии связи этого электрона с ядром. Похожая ситуация наблюдается и при попытках извлечь электрон из твердого вещества, например, из диэлектрика или металла. Процесс выхода электрона из металла, называется электронной эмиссией, а величина энергии, необходимой для эмиссии электронов – работой выхода. Обозначается работа выхода  $A_{\text{вых}}$ . Для каждого металла эта работа имеет свое конкретное значение.

Существует много способов передачи энергии электронам металла. Например, ее могут принести от какого-либо внешнего источника ионы, электроны или фотоны.

Электронная эмиссия, происходящая под действием света (фотонов), получила название фотоэлектрического эффекта или просто *фотоэффекта*, а поток электронов вылетающих с поверхности металла называют *фототоком*.

Открыл фотоэффект Генрих Рудольф Герц в 1887 году, а подробнейшим образом исследовал его наш соотечественник Александр Григорьевич Столетов.

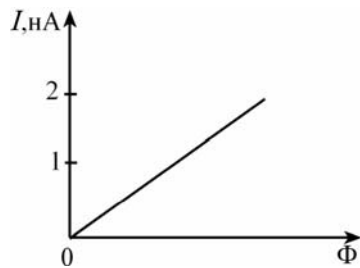


Рис. 15.1

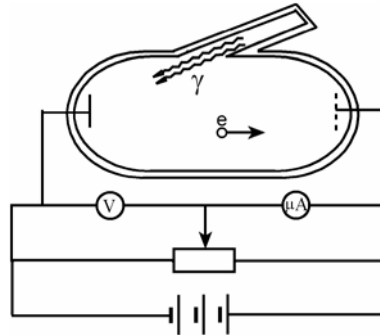


Рис. 15.2

Столетов установил зависимость фототока от интенсивности светового потока  $\Phi$  (рис. 15.1). Он же обнаружил, что фототок наблюдается только в тех случаях, когда длина волны падающего излучения меньше некоторого значения.

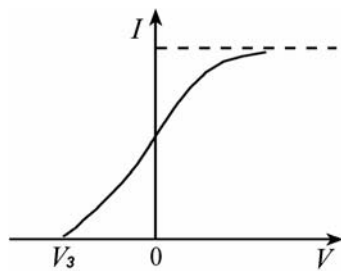


Рис. 15.3

Столетов сконструировал незамысловатую установку (рис. 15.2) и с ее помощью изучил зависимость фототока от напряжения, приложенного между фотокатодом и тонкой металлической сеткой, находящейся в непосредственной близости от фотокатода. На рис. 15.3 приведена полученная им зависимость.

Фотон поглощается в образце целиком в единичном акте взаимодействия.

Предположим, что энергии фотона достаточно для выбивания электрона из металла. В этом случае справедливо следующее неравенство

$$h\nu \geq E_{\text{кин}(e)} + A_{\text{вых}} \quad (15.1)$$

Почему пишется неравенство, а не строгое равенство?

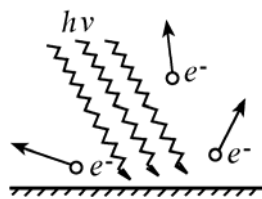


Рис. 15.4

Дело в том, что чем глубже проникает фотон, чем на большей глубине происходит его поглощение, тем с большей глубины придется выбираться электрону к поверхности металла. По дороге он может растерять значительную часть полученной энергии. Поэтому электроны вылетают с поверхности в разные стороны и с разными скоростями (см. рис. 15.4).

На практике для того, чтобы определить работу выхода электрона, пользуются установкой, аналогичной установке Столетова.

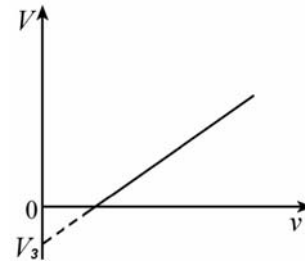
На сетку подают отрицательный (относительно фотокатода) потенциал  $V$ . При некотором значении  $V = V_3$  этого потенциала ни один выбитый из катода электрон не сможет достичь анода. Все электроны окажутся «запертыми». Тогда неравенство (15.1) превращается в равенство

$$h\nu = eV_3 + A_{\text{вых}} \quad (15.2)$$

Каждому заданному потенциалу  $V_3$  соответствует своя минимальная частота или максимальная длина электромагнитной волны падающего излучения. Эту длину волны  $\lambda_{\text{max}}$  называют красной границей фотоэффекта.

Зависимость задерживающей разности потенциалов от частоты падающего света (см. рис. 15.5) впервые установил немецкий физик-экспериментатор Филипп

Эдуард Антон Ленард  
(в 1902 году). Объяснение же дал спустя два  
года Альберт Эйнштейн. В 1921 году за  
объяснение фотоэффекта ему присудили  
Нобелевскую премию.



*Рис. 15.5*