

где $E(\lambda, T)$ — плотность энергии в полости на единичный интервал длин волн для данных значений длины волны λ и температуры T ; k — постоянная Больцмана; c — скорость света.

Интенсивность излучения, выходящего из малой щели в стенках полости, пропорциональна плотности энергии внутри полости. Таким образом, выражение (39а) дает математическую зависимость, показанную графически на рис. 35А.

Чтобы найти положение максимума функции $E(\lambda, T)$ при данном T , возьмем производную E по λ , приравняем ее нулю и решим полученное уравнение относительно λ_{\max} . Таким способом мы получим уравнение (38а) или эквивалентное ему:

$$\lambda_{\max} T = C_0 = 0,2014 hc, k. \quad (39b)$$

Величины λ_{\max} и T могут быть измерены, скорость света c известна, и, таким образом, уравнение (39b) позволяет экспериментально определить отношение h/k . Кроме того, непосредственным сравнением измеренного распределения $E(\lambda, T)$ с его теоретическим значением (39а) может быть определена постоянная h . После этого можно вычислить значение постоянной Больцмана и, воспользовавшись соотношением $N_0 = R/k$, величину N_0 . Планк получил этим методом значение величины k , которое оказалось всего на 2,5% меньше лучшего современного значения.

40. Подробная история открытия закона излучения Планка весьма поучительна. Планк догадался о правильной зависимости $E(\lambda, T)$ от λ и T еще до того, как ему удалось вывести формулу (39а) на основании «микроскопического» рассмотрения. Эта догадка была основана частью на точных измерениях Рубенса и Курлбаума, частью на некоторых общих теоретических соображениях. [Выражение (39а) слишком сложно, чтобы его можно было получить эмпирически.] Свои предварительные результаты Планк доложил Немецкому физическому обществу 19 октября 1900 г. В этой версии в формуле были две константы, не имевшие физической интерпретации. В наших современных обозначениях это константы $8\pi hc$ и hc/k . Полученная формула была проверена на опыте в измерениях Рубенса, а также Луммера и Прингсгейма. Согласно теории и опыта было замечательно точным*), и перед Планком встала необходимость дать теоретическое объяснение этой формулы. За восемь недель напряженного труда он достиг успеха.

Фотоэлектрический эффект

41. В конце прошлого века было экспериментально обнаружено, что при падении света из видимой области или из ультрафиолетовой части спектра на поверхность металла из последней испускаются электроны. Сам по себе этот эффект не удивителен, поскольку известно, что свет представляет собой электромагнитные колебания. Та-

*) О дальнейшей проверке закона Планка см. в работе: *Rubens H., Michel G. Prüfung der Planckschen Strahlungsformel.* — *Phys. Zs.*, 1921, v. 22, p. 569.

ким образом, мы вправе ожидать, что электрическое поле световой волны вызывает силу, действующую на электроны металла. При этом некоторые из электронов могут покинуть поверхность. Неожиданно здесь то, что кинетическая энергия выброшенных из поверхности электронов, как оказалось, не зависит от *интенсивности* света, а зависит только от его *частоты*, причем очень простым образом: кинетическая энергия электронов линейно растет с частотой света. Увеличение интенсивности света вызывает лишь возрастание числа испущенных в единицу времени электронов, но не влияет на их энергию. Это очень трудно понять с классической точки зрения, согласно которой увеличение интенсивности означает возрастание амплитуды электромагнитной волны и, следовательно, ускорение электронов до больших скоростей.

Рассмотренные факты были установлены Ленардом и другими физиками еще до 1905 г. Особенно *точные* измерения связи между частотой света и энергией испущенных электронов были выполнены Милликеном в 1916 г.

42. В 1905 г. Эйнштейну удалось объяснить явление фотоэффекта *). Он предположил, что энергия в пучке монохроматического света состоит из порций, величина которых равна $h\nu$, где ν — частота. Эти *кванты* энергии могут быть полностью поглощены электроном. Иными словами, электрон, еще находящийся в металле, поглотив такую порцию энергии, приобретает энергию $E = h\nu$. Предположим, что для вырывания электрона из металла нужно затратить работу W . Тогда кинетическая энергия такого электрона будет равна $E_k = E - W$, или

$$E_k = h\nu - W. \quad (42a)$$

Величина W , называемая *работой выхода* данного вещества, представляет собой константу, не зависящую от частоты ν .

Выражение (42a) — это знаменитое эйнштейновское уравнение фотоэффекта. Энергия электрона линейно растет с частотой света и не зависит от его интенсивности. Разумеется, число испущенных электронов должно быть пропорционально числу световых квантов, т. е. интенсивности падающего света. Таким образом, Эйнштейну удалось объяснить известные в то время качественные закономерности фотоэффекта.

43. Эйнштейн пришел к этой идее, заметив, что некоторые особенности планковского закона излучения черного тела легко объяснить. Для этого следует предположить, что электромагнитное излучение в полости имеет корпускулярный характер, т. е. состоит из *квантов*, энергия которых равна $h\nu$. Следует заметить, что в то время истинный смысл планковских идей для многих был неясен и новая точка зрения, с которой Эйнштейн рассмотрел излучение черного тела, была большим шагом вперед. Эйнштейн сумел связать свое понимание явления излучения черного тела с *новой* физической ситуацией и глубоко проникнуть в существо фотоэффекта.

*) *Einstein A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. — Ann. d. Phys., 1905, v. 17, p. 132.*

44. Уравнение (42а) является ясным предсказанием, которое дает теория, и его можно с большой точностью проверить на опыте. Более того, если идеи Эйнштейна верны, то это уравнение открывает возможность нового измерения постоянной Планка. Как мы упоминали выше, эти крайне важные проблемы были исследованы Милликеном в ряде прекрасных и тщательно выполненных опытов, которые полностью подтвердили уравнение Эйнштейна (42а).

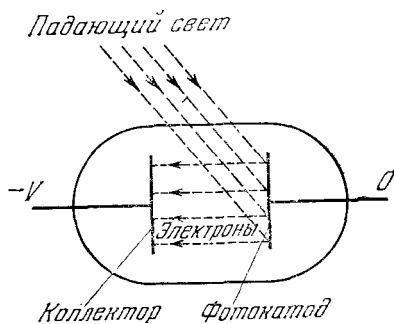


Рис. 44А. Схема, иллюстрирующая принцип опыта Милликена. Электроны, испущенные фотокатодом, имеют энергию $h\nu - W$, где W — работа выхода, характеризующая свойства вещества катода. Ток электронов на коллектор исчезает, если задерживающий потенциал $V > (h\nu - W)/e$. Измерение критического значения задерживающего потенциала $V_0 = (h\nu - W)/e$ для различных значений ν дает отношение h/e (см. рис. 44В)

Метод Милликена схематически показан на рис. 44А. Монохроматический свет падает на поверхность металла (обычно в этих опытах использовали щелочные металлы) и вырывает из нее фотоэлектроны. Собирающий электрод (коллектор) может находиться при определенном потенциале $-V$ по отношению к фотокатоду, в непосредственной близости от которого он расположен. В опыте измеряется ток фотоэлектронов. Допустим, что все электроны покидают поверхность металла, имея одну и ту же кинетическую энергию E_k , определенную уравнением (42а). Тогда ясно, что ни один электрон не сможет достичь коллектора, если $eV > E_k$. Если измерять ток, меняя задерживающий потенциал V , то при некотором значении $V = V_0$ ток прекратится. Значение V_0 равно

$$V_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e}. \quad (44а)$$

График, изображающий зависимость задерживающего потенциала от частоты ν , будет прямой линией, как это видно из рис. 44В, заимствованного из статьи Милликена. По наклону этой прямой находится отношение h/e , а точка ее пересечения с осью V_0 дает величину W/e , характеризующую работу выхода для металла.

Этот опыт ясен и прост по своей идее, но для получения точных и повторяющихся результатов потребовалось большое искусство и многочисленные меры предосторожности.

45. Оценим величины, входящие в уравнение (44а). Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$ эрг·с $= 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и $h/e = 4,14 \cdot 10^{-15}$ В·с. Длины волн видимого света лежат в пределах 4000—7000 Å, что отвечает интервалу частот $(4,3—7,5) \cdot 10^{14}$ Гц. Синему свету отвечает частота $\nu \approx 7 \cdot 10^{14}$ Гц, и в этом случае мы получаем $(h/e) \nu \approx 2,8$ В. В видимой области или

В близком ультрафиолете задерживающий потенциал оказывает порядка 1 В, так как типичные значения работы выхода W/e имеют такой же порядок величины. Она особенно мала для щелочных металлов. Именно поэтому у фотоэлементов, предназначенных для работы с видимым светом, фотокатод сделан из подобных материалов. Такой элемент не реагирует на свет, для которого $W > hv$.

46. Замечательные свойства фотоэффекта были в общих чертах известны еще до 1905 г., но понадобился гений Эйнштейна, чтобы

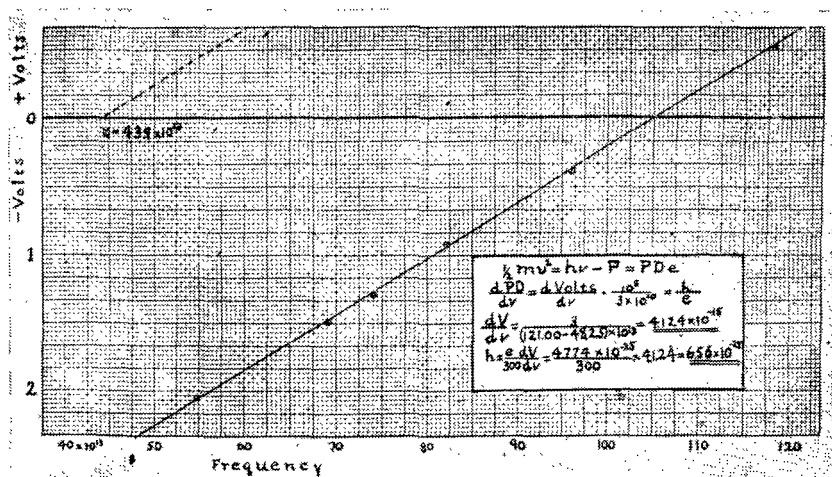


Рис. 44В. График из работы: Millikan R. A. — Phys. Rev., 1916, v. 7, p. 355, показывающий линейную зависимость критического значения задерживающего потенциала от частоты света для фотоочувствительной поверхности натрия. Вни у справа приведены вычисления отношения h/e , сделанные Милликеном по этому графику

извлечь из известных качественных закономерностей новые физические концепции.

Ключом ко всей проблеме является странное равенство

$$E/\nu = X_2, \quad (46a)$$

где E — энергия, которая может быть передана электрону пучком монохроматического света с частотой ν ; X_2 — постоянная, не зависящая ни от интенсивности света, ни от его частоты, ни от свойств вещества, содержащего электроны. (В 1905 г. тот факт, что кинетическая энергия электрона *меньше* E , не выглядел бы более таинственным, нежели в наше время; работа выхода W просто имеет смысл энергии связи электрона в веществе.) В рамках классической физики невозможно ни понять формулу (46a), ни выразить постоянную X_2 через основные физические константы; эта постоянная X_2 имеет размерность действия, величину с такой размерностью можно образовать из констант e и c , а именно: $e^2/c \approx h/860$. Теперь известно, что $X_2 = h$, следовательно, величина e^2/c отличается от h прибли-

зительно на три порядка. Таким образом, соображения размерности не дают обнадеживающего результата, не говоря о том, что невозможно придумать классический механизм, который дал бы формулу (46а). Это никому не удалось сделать, и законы фотоэффекта являются сильнейшим доводом в поддержку идеи Эйнштейна о *квантовании энергии* *).

В дальнейшем нам станет ясно, что в формуле (46а) выражен фундаментальный принцип квантовой физики, а именно имеющая *универсальный* характер связь между энергией и частотой:

$$E = h\nu.$$

Эта связь полностью чужда классической физике, и мистическая константа $X_2 (=h)$ в (46а) есть проявление непостигнутого в то время тайн природы.

Проблема стабильности и размера атомов

47. Обратимся теперь к третьей проблеме, а именно к вопросам о стабильности и размерах атомов. Остановимся в особенности на последнем вопросе. Мы можем определить «размер» атома как расстояние между двумя соседними атомами твердого тела или жидкости. Из опыта известно, что эта величина имеет порядок $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$. Очевидно, что порядок этой величины определяется постоянной Авогадро N_0 . Действительно, масса 1 см^3 жидкости или твердого тела имеет порядок 1 г. Весьма приблизительно можно считать, что в этом объеме содержится N_0 атомов, и тогда линейные размеры атомов имеют порядок $(1/N_0)^{1/3} \text{ см} \approx 1 \text{ \AA}$. Мы отмечали уже, что *точные* измерения межатомных расстояний в кристаллах дают значение постоянной Авогадро.

Вопрос теперь в том, можно ли в рамках классической физики объяснить размеры атомов, иными словами, можно ли вычислить «радиус» атома, опираясь на основные константы классической физики.

48. В 1910 г. Г. Гейгер и Е. Марсден выполнили опыты по рассеянию α -частиц. Анализ этих опытов привел Резерфорда **) к выводу, что атом состоит из очень малого центрального ядра, окруженного электронами, и что большая часть массы атома заключена в его ядре. Из этих опытов следовало также, что размеры ядра и электронов очень малы по сравнению с размером всего атома, они меньше 10^{-11} см . После работ по рассеянию α -частиц ядрами естественно было представлять себе атом как нечто подобное Солнечной системе, где ядро играет роль Солнца, а электроны — роль планет. Эти частицы движутся под действием электростатических сил, и большая часть атома представляет собой «пустое пространство». Размер атома определяется радиусом орбит внешних электронов.

*) Заметим, что в своей работе Эйнштейн не пользовался термином *фотон* для кванта электромагнитной энергии. Это название появилось много позже.

**) *Rutherford E. The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.*— *Phil. Mag.*, 1911, v. 21, p. 669; см. также том I этого курса: *Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика.*— 3-е изд.— М.: Наука, 1983.