

Лекция №4. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. КВАНТЫ. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Т.о. попытки построить модель атома в рамках классической физики не привели к успеху: модель Томсона была опровергнута опытами Резерфорда, планетарная модель Резерфорда оказалась неустойчивой электродинамически и противоречила опытным данным. Это был кризис в физике в конце XIX в. Преодоление возникших трудностей потребовало создания качественно новой – квантовой – теории атома.

В это же время помимо изучения строения вещества естествоиспытателей волновал вопрос излучения энергии нагретыми телами, так как именно по этому излучению мы знаем о Вселенной. *Электромагнитное излучение обусловлено колебаниями электрических зарядов, входящих в состав вещества, которое сопровождается потерей энергии веществом.* Если тепло – единственный источник энергии, обеспечивающий излучение, и излучающее тело можно характеризовать определенной температурой, то излучение называется *тепловым (или температурным)*. *Тепловое излучение*, являясь самым распространенным в природе, совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (т. е. за счет его внутренней энергии) и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. (или Любые нагретые тела, т. е. тела с температурой $T > 0$, испускают электромагнитное излучение, микроскопические механизмы которого различны в разных интервалах температур.)

Абсолютно чёрное тело (АЧТ) – физическая идеализация, применяемая в термодинамике, тело, поглощающее всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах и ничего не отражающее.

Коэффициент поглощения АЧТ $a = \frac{W_{\text{погл}}}{W} = 1$. Абсолютно черных тел в природе нет, поэтому в физике для экспериментов используется модель. Есть тела, которые в определенном интервале частот близки к АЧТ, это – сажа, платиновая чернь (порошок платины), черный бархат, Солнце (Солнце – абсолютно черное тело, т. к. какие длины волн тело поглощает, такие и испускает при нагревании). Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой (термин введен Густавом Кирхгофом в 1862 году).

Технологии снижения заметности (Стелс-технология (от англ. Stealth technology)) — комплекс методов снижения заметности боевых машин в радиолокационном, инфракрасном и других областях спектра обнаружения посредством специально разработанных геометрических форм, радиопоглощающих материалов и покрытий, позволяющих уменьшать силу и отражение сигнала в сторону источника излучения, и за счёт этого находиться незамеченным на территории противника. Добиться полного поглощения волн независимо от угла падения технологически невозможно, поэтому главной целью является отражение волн таким образом, чтобы отражённый сигнал не вернулся в точку, откуда он пришёл (к радиолокационной станции противника). Технологии снижения заметности являются самостоятельным

разделом военно-научной дисциплины «электронные средства противодействия», охватывают диапазон техники и технологий изготовления военной техники (самолётов, вертолётов, кораблей, ракет и т. д.).

Релей и Джинс, исходя из классической теории о равном распределении энергии по степеням свободы, и представляя тело как набор осцилляторов, получили формулу для испускательной способности АЧТ. Формула удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными лишь при малых частотах и резко расходится с опытом для больших.

Заметим, что с излучением АЧТ каждый из нас сталкивался в жизни – если бы была верна классическая теория, то при открывании дверцы духовки плиты мы мгновенно попадали бы под поток чрезвычайно опасных для жизни коротких волн жесткого УФ излучения, γ -квантов и рентгеновского излучения. Это была катастрофа классических представлений – «ультрафиолетовая катастрофа» (УФ катастрофа) по определению физиков начала XX в.

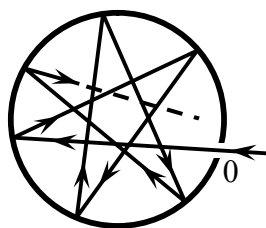


Рис.1. Модель абсолютно черного тела

В 1900г. Макс Планк (его настоящее имя Карл Эрнст Людвиг) выдвинул идею, что АЧТ излучает энергию не сплошным “поток”, а порциями. Этой мельчайшей порции Планк дал название **квант** (от лат. “quantum” – сколько, как много). Квантовая теория совершила революцию в физике, создав совершенно новые представления о веществе и энергии. Действительно, то, что считалось ранее непрерывным, по новым представлениям стало дискретным. Это противоречило всему обыденному опыту. Квант электромагнитного поля назвали **фотоном** (родительный падеж от греческого “photos” - свет).

Однако было совершенно непонятно, дискретность излучения есть результат взаимодействия с дискретным веществом или свойство, присущее самому излучению. По этому поводу Альберт Эйнштейн писал: “Если пиво всегда продают в бутылках, содержащих пинту, то вовсе не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте”. Он первым понял, что дискретность поглощения и испускания излучения – неотъемлемо свойство самого излучения. Через пять лет после появления понятия кванта Эйнштейн применил идею дискретности излучения к объяснению явления фотоэффекта (появление электрического тока в вакууме вследствие выбивания электронов из металлов под действием излучения). Именно за объяснение природы фотоэффекта в 1921г. он был удостоен Нобелевской премии (“...за успехи в теоретической физике, особенно за открытие законов фотоэффектов”).

Позже, в 1913 г., Джеймс Франк и Густав Герц провели ряд экспериментов по столкновению электрона с атомом, в которых они пытались измерить орбиты электронов в атомах.

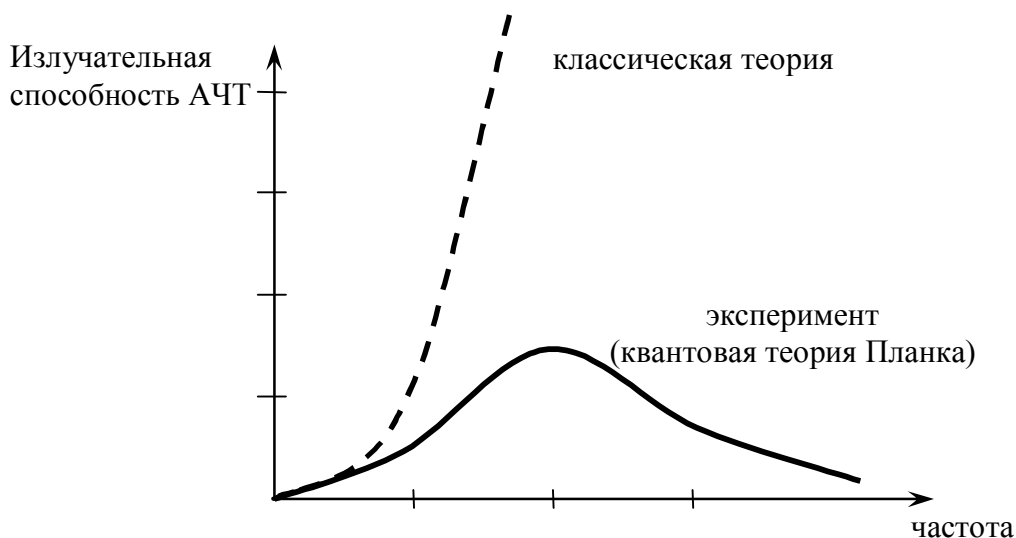


Рис. 2. Распределение энергии в спектре АЧТ

Мы можем измерить скорость электронов в пучке до взаимодействия с атомами и после него и по изменению этой скорости сделать заключение о тех процессах, которые произошли при взаимодействии пучка электронов с атомами. Это сделать достаточно просто, выявив зависимость тока, протекающего через трубку с газом (парами металла), от ускоряющей разности потенциалов.

Из обычных, классических, представлений следует, что электрон пучка должен изменять орбиты электронов атома, их энергия (скорость) должна уменьшиться, причем часть электронов должны просто всю свою энергию отдать атому. Этот эффект должен наблюдаться при любых энергиях пучка электронов. Поэтому зависимость тока от разности потенциалов должна быть монотонной. Но эксперимент дал совершенно иной результат. На рис. 3 показана зависимость тока, протекающего через трубку с парами ртути, от разности потенциалов. Вместо монотонной кривой – кривая с максимумами!

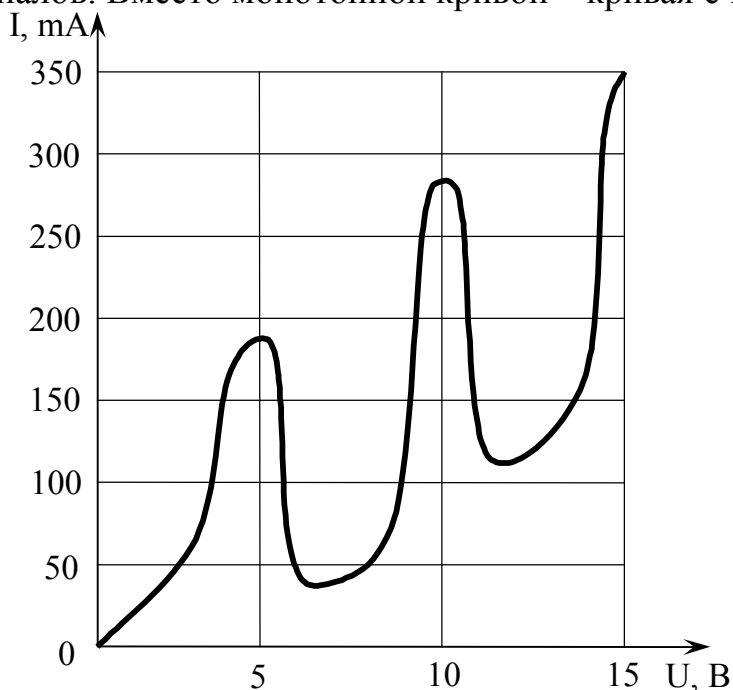


Рис. 3. Опыт Франка-Герца

Причем расстояние между максимумами не зависело ни от плотности пара, ни от внешних взаимодействий, но имело непосредственное отношение к оптическому спектру металла, пары которого были в установке. Оказалось, что это расстояние точно равно напряжению, необходимому для освобождения одного электрона с внешней электронной оболочки атома Hg (потенциалу ионизации), известному из оптических исследований.

Электроны, эмитированные катодом К, разгоняются в области 1 под действием ускоряющей разности потенциалов ϕ между катодом и сеткой С₁. В области 2 электроны проходят через пары ртути и достигают анода А. Первое возбужденное состояние атома ртути имеет энергию 4,86 эВ. При увеличении ускоряющего потенциала ϕ до этой величины, соударения электронов с атомами становятся неупругими: электрон отдает кинетическую энергию атому, возбуждая переход из основного энергетического состояния в первое возбужденное состояние (поглощение энергии атомами ртути) – ток в установке резко уменьшается. При дальнейшем увеличении ϕ , подобное же поведение тока наблюдается при энергиях, кратных $\Delta E = 4,86$ эВ, когда электроны испытывают 2, 3, ... неупругих соударений. Таким образом, опыты Франка и Герца показали, что электроны при столкновении с атомами ртути передают атомам только определенные порции энергии, причем 4,86 эВ – наименьшая возможная порция энергии (наименьший квант энергии), которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии ($E=eU=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл \cdot 4,86 В = 4,86 эВ).

Результат более чем странный, не вписывавшийся в обычные представления о свойствах вещества, известные к началу XIX в. Оказалось, что энергию электронов в атоме нельзя изменить на произвольную величину. Она либо меняется порциями, либо не меняется совсем. Причем эта порция достаточна велика. **Следовательно, и энергия частицы (а не только поля!) меняется порциями – квантами.** Франк и Герц получили Нобелевскую премию по физике в 1925 г.

Таким образом, мы видим, что в начале XX в. принципиальным образом претерпели изменения представления о материи: и о веществе, и о поле. Но в одном они оставались неизменными: **электромагнитное излучение по своим свойствам считалось резко отличающимся от электронов и других “частиц” материи.** Некоторое сближение наметилось, когда у излучения были обнаружены свойства, характерные для частиц – корпускулярные свойства. *(Свет представляет собой сложное явление: с одной стороны, согласно корпускулярной теории Ньютона свет – это поток частиц (фотонов); с другой стороны, согласно волновой теории Гюйгенса – поперечная электромагнитная волна.) Однако волновые свойства считались присущими только электромагнитному полю.*

Поэтому так настороженно была встречена гипотеза Луи де Бройля (1924) об универсальности, применимости не только к полю, но и к веществу, волновых представлений, корпускулярно-волнового дуализма. Действительно, идеи де Бройля могли показаться безумными. Он утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы обладают как корпускулярными, так и волновыми свойствами. В 1925 г. Эйнштейн писал другу о диссертации де Бройля: “Прочтите ее! Хотя и кажется, что ее писал сумасшедший, написана она солидно...” В одной из поздних работ де Бройль так излагает существо своей идеи: “Теория света страдала редкой болезнью раздвоения между волновой теорией, с одной стороны, и теорией фотонов – с другой. Чтобы исправить положение, следовало воспользоваться принципом “чем хуже, тем лучше” и принести эту болезнь на здоровую доселе теорию

вещества. В оптике в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым; не делалась ли в теории вещества обратная ошибка?...”

На первый взгляд, гипотеза де Бройля опровергается повседневным опытом. В окружающих нас предметах и нас самих волновые свойства не проявляются. Оценим длину волны де Бройля для электрона и пылинки массой 0,001 г. Соотношение де Бройля: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ ($eU = \frac{mv^2}{2}$; $\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$). $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг, $U \sim 1$ кВ, $\lambda_e = 10^{-9}$ м = 1 нм. Дифракцию электрона можно экспериментально наблюдать на кристаллической решетке. Для пылинки $\lambda_{п} \sim 10^{-32}$ м и нет объектов в природе, на которых можно наблюдать волновые свойства.

Первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 году американскими физиками К. Девиссоном и Л. Джермером. Они обнаружили, что пучок электронов, рассеивающийся на кристалле никеля, дает отчетливую дифракционную картину, подобную той, которая возникает при рассеянии на кристалле коротковолнового рентгеновского излучения. В этих экспериментах кристалл играл роль естественной дифракционной решетки. По положению дифракционных максимумов была определена длина волны электронного пучка, которая оказалась в полном соответствии с формулой де Бройля.

В следующем 1928 году английский физик Джордж Паджет Томсон (сын Джозефа Джона Томсона, открывшего за 30 лет до этого электрон) получил новое подтверждение гипотезы де Бройля. В своих экспериментах Томсон наблюдал дифракционную картину, возникающую при прохождении пучка электронов через тонкую поликристаллическую фольгу из золота (рис. 4). *Независимо от него П.С. Тартаковский (некоторое время работал в Томске) получили дифракционную картину при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу.* В последующие годы опыт Дж. Томсона был многократно повторен с неизменным результатом, в том числе при условиях, когда поток электронов был настолько слабым, что через прибор одновременно могла проходить только одна частица (дифракцию одиночных электронов, рис. 5) (В. А. Фабрикант, 1948 г.). Таким образом, было экспериментально доказано, что волновые свойства присущи не только большой совокупности электронов, но и каждому электрону в отдельности.

В основе квантовой теории лежат 4 принципа. В классической физике частица обладает свойством двигаться по вполне определенной траектории и в любой момент времени мы можем точно определить ее координаты и скорость. Волна этим свойством не обладает. Она не имеет координат. Нет смысла говорить о длине волны в данной точке пространства. Тогда из корпускулярно-волнового дуализма вытекает совершенно неожиданное правило: если мы точно знаем координаты частицы, то мы совсем не знаем ее скорости, и наоборот. Реализуется **принцип неопределенности** Гейзенберга (1927 г.)

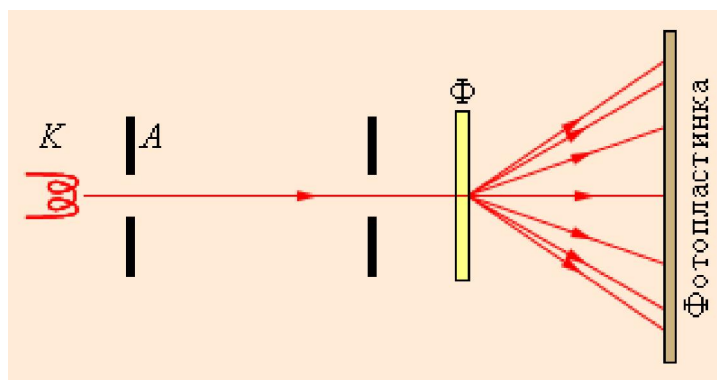


Рис. 4. Упрощенная схема опытов Дж. Томсона по дифракции электронов. К – накаливаемый катод, А – анод, Φ – фольга из золота

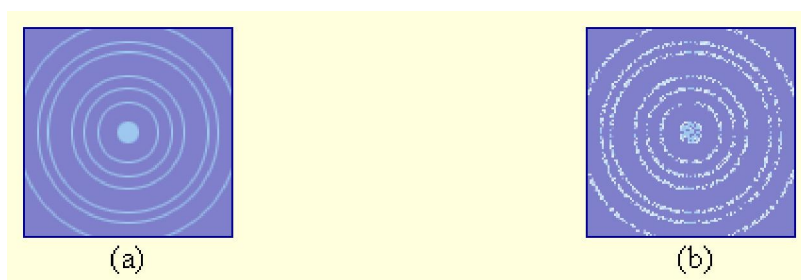


Рис. 5. Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (а) и при короткой экспозиции (б). В случае (б) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку

Приведем простейшее рассуждение, приводящее к формулировке этого принципа. Пусть мы хотим определить координаты и скорость электрона. Для этого мы должны осветить его (свет в качестве измерительного устройства!) и зафиксировать координату x . Но длина волны света конечна и равна λ . Тогда, очевидно, мы можем измерить координаты тела с точностью до длины волны света (как с помощью обычной линейки можно измерить длину с точностью до min деления – 1 мм). То есть точность определения координаты Δx и λ .

При измерении часть энергии кванта света – фотона будет передана электрону. То есть неточность в определении энергии электрона (и его скорости v) будет определяться величиной энергии фотона. Импульс частицы пропорционален ее длине волны, то есть Δv и $1/\lambda$. Тогда $\Delta x \Delta v \geq \hbar$ – это есть соотношение неопределенности. Неопределенности координаты и импульса связаны друг с другом.

Одно из следствий **принципа неопределенности** состоит в изменении наших взглядов на **принцип причинности**. Под **принципом причинности** мы понимаем наличие причинно – следственной связи между явлениями природы. Законы классической физики полностью определяют судьбу физической системы при условии, что вся необходимая информация нам известна в некоторый определенный момент времени. Пример тому – астрономические расчеты движения небесных тел. В квантовой физике, физике микромира, мы никогда не знаем состояния системы с точностью большей, чем это допускается принципом неопределенности. Мы вынуждены

перейти на *вероятностное* описание явлений микромира. По яркому выражению Эйнштейна, “природа играет в кости...”

Один из основателей современной физики, датский ученый Нильс Бор сформулировал еще одно принципиальное положение, описывающее наши взгляды на природу вещества – *принцип дополнительности*. Согласно этому принципу, получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих микрообъект, связано с потерей информации о других величинах, дополнительных к первым. Такими взаимно дополнительными величинами являются, например, координата частицы и ее скорость (кинетическая и потенциальная энергия; напряженность электрического поля в данной точке и число фотонов). С физической точки зрения этот принцип (по Бору) объясняется влиянием измерительного прибора (макроскопический объект!) на состояние микрообъекта. *При точном измерении одной из величин дополнительная к ней в результате взаимодействия с прибором претерпевает такое изменение, что ее последующее измерение теряет всякий смысл.* Именно здесь впервые появляется проблема взаимодействия измерительного прибора и исследуемого объекта. При измерении мы изменяем объект и получаем информацию не о независимом от нас объекте, а о результате взаимодействия объекта и прибора.

Другая сторона *принципа дополнительности* состоит в возможности описания квантовых систем с разных точек зрения. Атом можно описывать и как “планетарную” систему, и как подобное волне состояние. Каждое из описаний правильно, но применимо в различных условиях. *Способ описания выбирает исследователь!*

Еще один принцип квантовой физики – *принцип тождественности*, согласно которому невозможно экспериментально различить одинаковые частицы. Действительно, в классической механике мы всегда можем различить два одинаковых шара, проследив их траектории до и после столкновения. В квантовой механике такая возможность отсутствует, т.к. мы можем определить только вероятность обнаружения частицы в той или иной точке пространства. Так, все электроны Вселенной тождественны, мы не имеем способа пометить один из них и следить только за ним.

Отметим, что сегодня мы знаем примеры проявления квантовых свойств частиц и в макроскопических масштабах. Например, известно так называемое явление *сверхтекучести* жидкого гелия при температурах ниже 2 К. Жидкость течет так, будто отсутствует ее вязкость. Или *сверхпроводимость* (отсутствие сопротивления постоянному электрическому току), НТСП (низкотемпературная сверхпроводимость), ВТСП (высокотемпературная сверхпроводимость).