

# V. Элементы квантовой физики

## Тепловое излучение

Большинство диэлектриков в природе являются непрозрачными. При падении на непрозрачный диэлектрик часть энергии световой волны отражается, часть – поглощается.

$$I_0 = I_{отр} + I_{погл}$$

Разделив левую и правую части этого выражения на  $I_0$ , получим:

$$1 = \rho + \alpha$$

где  $\rho$  - отражательная способность тела,  $\alpha$  – поглощательная способность тела. В общем случае  $\rho$  и  $\alpha$  зависят от длины падающей волны и от температуры тела.

# Тепловое излучение

Все тела можно классифицировать след. образом:

$\alpha=0$  – абсолютно белое тело;  $\alpha=1$  – абсолютно черное тело; если  $0 < \alpha < 1$  – серое тело.

Кроме того, тела способны испускать электромагнитные волны – светиться. Одним из видов испускания электромагнитных волн телами является **тепловое излучение**. В случае теплового излучения часть энергии теплового (хаотического) движения переходит в энергию испускаемого телом электромагнитного излучения.

Основной количественной характеристикой теплового излучения является излучательная способность тела  $\epsilon_{\lambda, T}$  – лучистая энергия, испускаемая единицей поверхности за единицу времени. Измеряется в Дж/(м<sup>2</sup>с).

# Законы теплового излучения

## Закон Кирхгофа.

При термодинамическом равновесии, когда лучистая энергия, испускаемая каждым телом равняется энергии поглощаемой им за то же время, *отношение лучеиспускающей способности к лучепоглощательной есть величина постоянная и равная излучательной способности (спектральной плотности энергии) абсолютно черного тела.*

Это соотношение для одной и той же длины волны одинаково и не зависит от природы тел

$$\frac{\epsilon_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T}$$

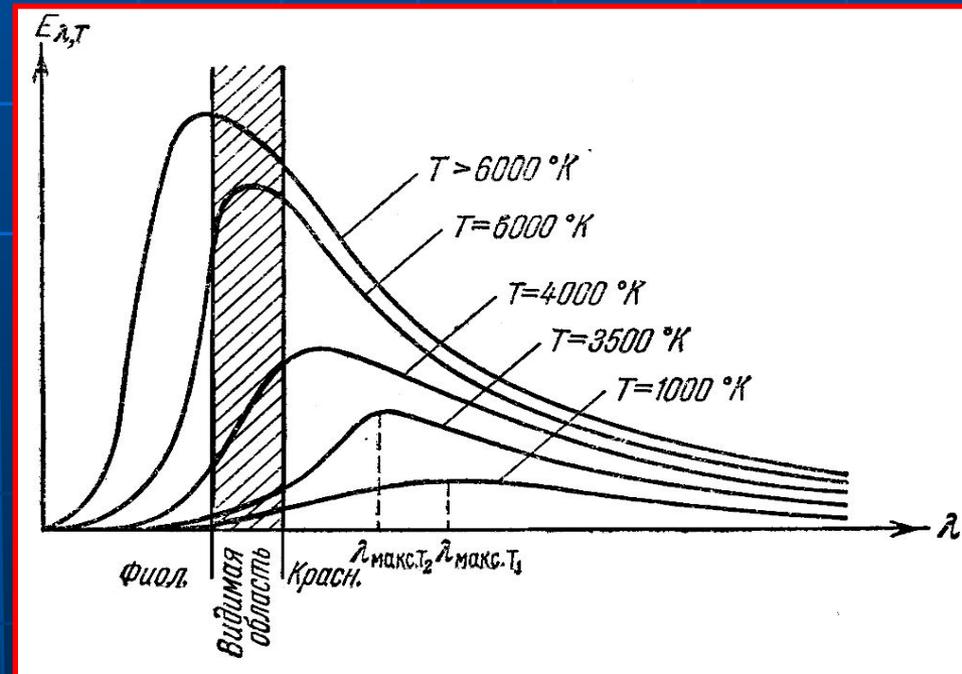
# Законы теплового излучения

В 1884 году была установлена зависимость энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры тела - **закон Стефана-Больцмана.**

$$E_{\lambda, T} = \sigma T^4$$

**Закон смещения Вина** отражает связь между максимумом спектральной плотности энергии теплового излучения и температурой тела

$$\lambda_{\max} T = \text{const}$$



Зависимость излучательная способности от длины волны, полученная Рэлеем, приводила к «ультрафиолетовой катастрофе» (тепловой смерти Вселенной). Стало очевидно, что электромагнитная теория в этом случае не работает.

Планк в 1900 году показал, что правильное выражение  $E_T$  можно получить, лишь предположив, что излучение испускается не непрерывно, а порциями (квантами, фотонами) с энергией  $\varepsilon = h\nu$ , где  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Дж.с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота излучения.

# квант, фотон

Что же такое квант энергии, фотон? Фотон, в отличие от элементарных частиц, **не имеет энергии покоя, массы покоя**. Из сопоставления двух формул

$$\varepsilon = h\nu$$

$$\varepsilon = mc^2$$

следует, что масса фотона

$$m = h\nu / c^2$$

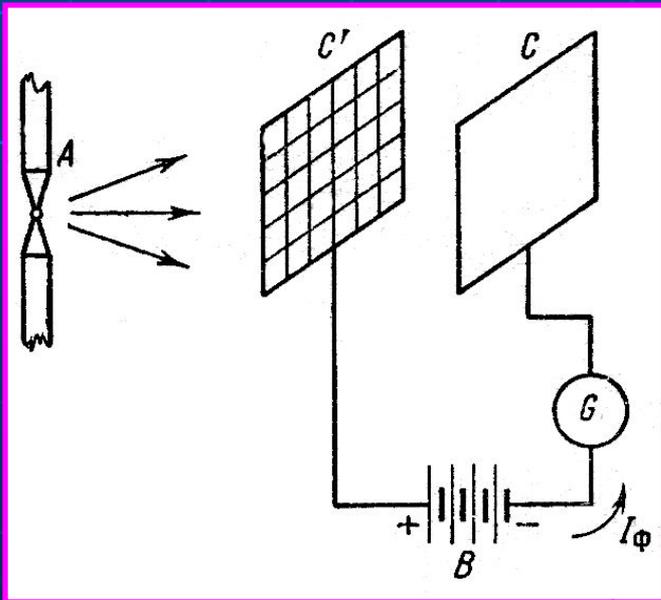
импульс фотона

$$p = h\nu / c = h / \lambda$$

Последняя формула отражает **связь между волновой характеристикой – длина волны и корпускулярной – импульс**. Фотон обладает как корпускулярными свойствами, так и волновыми.

# Внешний фотоэффект

Наряду с тепловым излучением в конце 19 века было открыто еще одно явление, которое невозможно описать с помощью электромагнитной теории – **внешний фотоэффект**. Суть фотоэффекта заключалась в том, что **металлическая пластина теряла отрицательные заряды при освещении металла**.



**Закономерности фотоэффекта.**  
Металлическая пластина **теряет лишь отрицательные заряды**.  
Плотность тока при фотоэффекте **пропорциональна мощности падающего излучения**.  
Существует **длинноволновая граница фотоэффекта**.

# Внешний фотоэффект

Внешний фотоэффект был объяснен Эйнштейном (1905 г.). Согласно Эйнштейну **излучение дискретно** и существует в виде порций  $h\nu$ .

**Никаких других порций излучения в природе нет!** Казалось бы, почти то же самое говорил и Планк, однако Планк утверждал, что это свойство излучательных систем, но не самого излучения.

Электрон может поглотить порцию  $h\nu$  и, если эта энергия достаточна для совершения работы выхода, электрон покидает металл.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта имеет вид:

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$$

# Физика атома.

## *Закономерности спектров атома водорода.*

К концу 19 века стали накапливаться сведения, свидетельствующие о **сложной структуре атомов**. Так, например, в результате разряда в газе появлялись отрицательные и положительные заряженные частицы: **электроны и ионы**.

Наличие внутри атомов электрических зарядов подтверждалось и тем, что **атомы способны испускать и поглощать электромагнитные волны с характерными для каждого элемента частотами**.

**Бальмер** установил (1885 г.), что спектр испускания водорода (**серия Бальмера**) удовлетворяет формуле:

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $n=2,3,4,5\dots$ , а  $R$  – некоторая постоянная (постоянная Ридберга)

# Закономерности спектров атома водорода

В дальнейшем Лайманом, Пашеном, Бреккетом были открыты другие серии, которые можно записать в виде обобщенной формулы Бальмера:

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $m=1,2,3,4,5\dots$ , а  $n=m+1,m+2,\dots$

Резерфорд экспериментально установил наличие положительно заряженного ядра в атоме и оценил его размеры ( $r \sim 10^{-15}$  м). Электроны, согласно модели Резерфорда, вращаются вокруг положительно заряженного ядра. Уязвимость модели Резерфорда состояла в том, что она не объясняла линейчатый спектр водорода. Кроме того, вращаясь и непрерывно излучая (теряя энергию), электрон должен был упасть на ядро.

# Элементы теории Бора атома водорода

Анализируя опытные факты, Бор делает вывод:

1. Энергия атома (электрона в атоме) не может меняться непрерывно, а **возможные энергетические состояния атома образуют дискретный ряд**

$$E_1, E_2, E_3, \dots, E_n,$$

Находясь в таком состоянии атом, **не поглощает и не испускает излучения**. Изменения состояния атома могут происходить **лишь в виде скачка – от одного возможного состояния к другому**. При этом испускается или поглощается **энергии**

$$h\nu_{ik} = E_k - E_i$$

квант

2. Момент количество движения электрона должен быть равен **целому числу величины**

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Это, так называемое, **правило отбора** для нахождения энергий разрешенных состояний. То есть, разрешенные состояния момента импульса, где  $n=1,2,3,\dots$

$$mvr = n\hbar$$

# Элементы теории Бора атома водорода - 2

Получим радиусы разрешенных орбит электронов в атоме водорода и значения разрешенных энергетических состояний.

На электрон, вращающийся вокруг ядра, действует **центробежная**

Решая это уравнение **с учетом отбора**

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

получим

$$mvr = n\hbar$$

$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} n^2$$

где  $n$  – номер орбиты.

Отсюда радиус первой орбиты электрона равен

$$r_1 \approx 0.5 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 0.5 \text{ \AA}$$

# Элементы теории Бора атома водорода - 3

Полная энергия электрона в атоме равна сумме потенциальной и кинетической энергий

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r} = -\frac{e^2}{2r}$$

Подставляя в это выражение значение  $r$ , получим значения энергий электрона, получим:

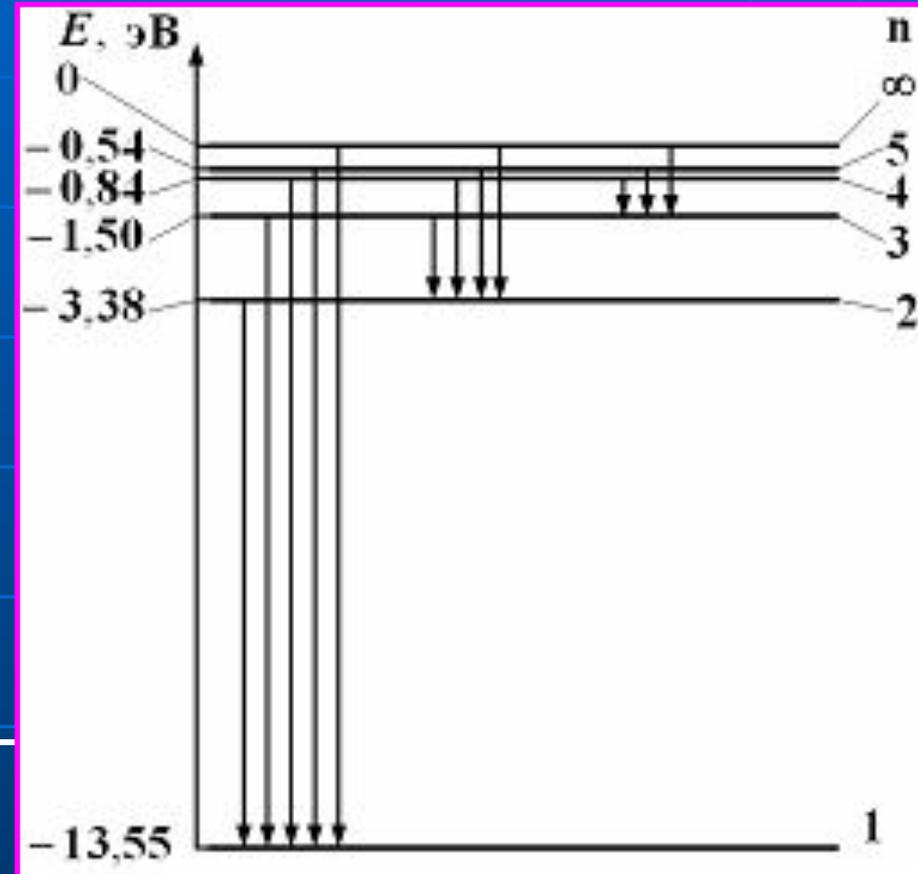
$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

Теория Бора прекрасно описывает атом водорода, объясняет закономерности в спектрах атома водорода, но не работает в случае уже второго элемента в таблице Менделеева – гелия. Тем не менее, Бором был сделан серьезный шаг для **перехода от классической теории к теории квантовой**.

# Задача

На рисунке дана схема энергетических уровней атома водорода, а также условно изображены переходы электрона с одного уровня на другой. В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают **серию Лаймана**, в видимой области – **серию Бальмера**, в инфракрасной области – **серию Пашена** и т.д.

Чему равно отношение минимальной частоты серии Лаймана к максимальной частоте серии Бальмера?



$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

# Давление света

Вполне понятно, что свет, независимо от того рассматриваем мы свет как электромагнитные волны или поток квантов энергии, **падая на поверхность тела, оказывает давление**. Для вычисления давления света при нормальном падении излучения и отсутствии рассеяния можно воспользоваться **следующей формулой**:

$$p = \frac{I}{c} (1 - k + \rho)$$

где  $I$  — интенсивность излучения (количество лучистой энергии, падающей нормально на  $1 \text{ м}^2$  поверхности за  $1 \text{ с}$ );  $c$  — скорость света в вакууме,  $k$  — коэффициент пропускания,  $\rho$  — коэффициент отражения.

**Без учета поглощения!**

# Давление света

Задача.

Давление света на поверхность при  $I=120$  Вт/м<sup>2</sup> составило  $p=0.5$  мкПа. Чему равен коэффициент отражения этой поверхности?

Поскольку для большинства тел коэффициент пропускания равен нулю, воспользуемся следующей формулой:

Откуда получим,  
что  $\rho=???$

$$p = \frac{I}{c} (1 + \rho)$$

Последнее выражение может быть записано и в следующем виде:

$$p = w(1 + \rho)$$

где  $w$  — объемная плотность энергии волны или фотонов.

Спасибо за внимание