

## ЧАСТЬ 3. Основы квантовой физики.

*Раздел 11. Основные проблемы квантовой механики*

*Раздел 12. Квантовые операторы. Электроны в атомах*

*Раздел 13. Взаимодействие ЭМИ с атомами вещества.  
Ядра атомов.*

## *Раздел 11. Основные проблемы квантовой механики.*

*Тема 1. Квантовые модели электромагнитного излучения*

*Тема 2. Квантовые свойства частиц*

*Тема 3. Решение задачи квантовой механики «о частице в яме»*

*Тема 4. Квантовый анализ движения некоторых объектов*

Для работы с тестами скорректируйте Word:  
Сервис→Макрос→Безопасность→Низкая

*Тема 1. Квантовые модели электромагнитного излучения.*

**П.1 Ограниченность классического описания материи.**

**П.2. Моделирование ЭМИ. Фотоны.**

**П.3. Фотоэффект.**

**П.4. Фотоэлемент. Напряжение запираения.**

**П.5. Эффект Комптона.**

## П.1 Ограниченность классического описания материи.

Проблема: Как моделировать материю?

Знаем: То, что нас окружает, и мы сами есть материя. Материя это то, что существует объективно, независимо от нашей воли и действует на наши органы чувств.

В классической физике есть материальные объекты и их взаимодействие, а материя описывается с помощью двух моделей: частицы (для вещественных объектов или коротко «вещества») и поля (для взаимодействия).

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ:

*Классическая модель вещества – это частица или система частиц, в которой материя локализована (ограничена в пространстве).*

*Классическая модель передачи взаимодействия - поле, в котором материя заполняет пространство непрерывно и не имеет строгих (математически) границ.*

В действительности материальные объекты микромира имеют весьма разнообразные свойства, по-разному проявляющиеся в различных условиях.

Квантовая физика это наука, которая рассматривает материальные объекты, используя универсальную (двуединую) модель материи, которая является совокупностью указанных классических моделей.

Универсальная модель: материальные объекты (вещество и взаимодействие) в одних условиях ведут себя как частицы (т.е. так их надо моделировать), а в других - как волны в полях, например, волновые пакеты, импульсы и т.д. (т.е. их надо описывать с помощью модели «поле»).

Ограниченность наших способностей (возможностей) приводит к необходимости использования двух моделей для описания одного и того же объекта, но в разных условиях.

Указанная проблема получила даже специальное название «дуализм волна-частица». *Дуализм понимается как двойственность описания объекта.*

## П.2. Моделирование ЭМИ. Фотоны.

Проблема: Как связаны друг с другом две стороны универсальной модели ЭМИ?

Известно: Хорошо (но не всегда) работает модель ЭМИ в форме электромагнитного поля (ЭМП), в котором возможно волновое движение, т.е. распространение электромагнитной волны (ЭМВ).

Обобщение: ЭМИ иногда надо моделировать, как поток частиц. Но «старая» модель (ЭМВ) также остается справедливой для определенных условий.

Фотонами называются частицы, поток которых моделирует ЭМИ. Фотон есть квант ЭМИ. Квант – доля, часть.

## Основные свойства фотонов.

1) Скорость любого фотона равна скорости света. Скорость света инвариантна.

*Инвариантность есть свойство физической характеристики быть одинаковой при измерении в разных инерциальных системах отсчета.*

2) Фотон не имеет электрического заряда.

3) Фотон имеет энергию  $E_{\phi}$ , массу  $m_{\phi}$  и импульс

$$p_{\phi} = m_{\phi}c.$$

Связь энергии фотона с массой (формула Эйнштейна):

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2.$$

Замечание:

*Гармоническая ЭМВ соответствует потоку фотонов с одинаковой энергией.*

Формула, связывающая характеристики двух моделей: корпускулярной ( $E_{\phi}$ ) и волновой (частота и длина гармонической волны):

$$E_{\phi} = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}.$$

где  $\nu$  - частота,  $\omega$  - циклическая частота,  $\lambda$  - длина волны (характеристики волновой модели ЭМИ),  $h$  – постоянная

Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

Задача: Найти формулы для массы и импульса фотона.

Используем связь энергии фотона с массой (формула Эйнштейна):  $E_{\phi} = m_{\phi} c^2$ .

Сравнивая два выражения для энергии, получим

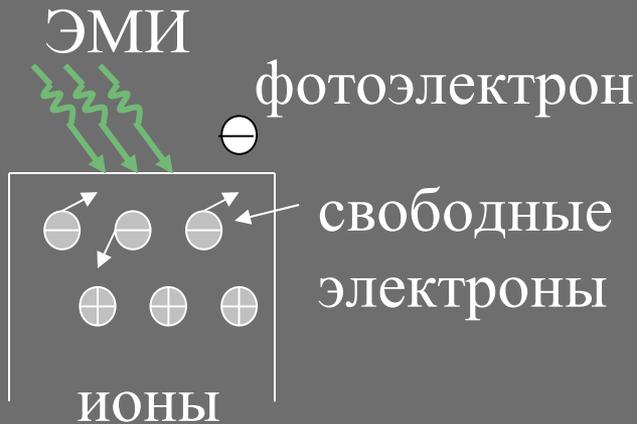
$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

$$\text{Импульс фотона } p_{\phi} = m_{\phi} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Замечание: Приведенные выше формулы устанавливают связь «корпускулярного» и «волнового» описаний единого объекта - ЭМИ.

### П.3. Фотоэффект.

Фотоэффект (внешний) – явление вылета электронов из поверхности вещества при его облучении ЭМИ.



Вылетевшие электроны называются фотоэлектронами.

Взаимодействуют два объекта:  
ЭМИ и вещество. Решаем данную физическую задачу.

Объекты и процессы	Модели	Характеристики и законы
ЭМИ при полете	ЭМВ	Частота $\nu$ , длина волны $\lambda$ , интенсивность $I$
ЭМИ в веществе	Поток частиц – фотонов	Энергия фотона $E_{\phi} = h\nu$ . Скорость $c$ . Концентрация $n_{\phi}$
Взаимодействие ЭМИ с веществом	Один электрон взаимодействует с одним фотоном и фотон исчезает.	$\Delta E_{\text{эл.вну}}^{\text{кин}} = E_{\phi}.$

При абсолютно упругих столкновениях электронов с ионами имеет место “рассеяние” импульса электронов.

Поскольку  $m_{\text{эл}} \ll m_{\text{ион}}$ , импульс электрона почти сохраняется по величине, но хаотически меняется по направлению, и у части электронов оказывается направленным к поверхности металла.

**ВЫВОД:** После взаимодействия электронов с фотонами часть электронов будет двигаться к поверхности металла, стремясь вылететь из него.

При вылете из металла электростатическая сила притяжения совершает над электроном работу  $A_{\text{кул}} = -A_{\text{вых}}$ , после чего

вне металла 
$$E_{\text{кэл}}^{\text{вне}} = \Delta E_{\text{кэл}}^{\text{вну}} - A_{\text{вых}} \Rightarrow$$

$$\frac{mV_{\text{вне}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$$
 - уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

ТЕСТ

## Дополнение.

*Красная граница – явление прекращения вылета фотоэлектронов при определенной частоте падающего ЭМИ.*

Условие прекращения вылета:  $E_{\text{К.ЭЛ}}^{\text{ВНЕ}} = 0$ .

Используя уравнение Эйнштейна, получим

$$\Delta E_{\text{К.ЭЛ}}^{\text{ВНУ}} = A_{\text{ВЫХ}}, \quad h\nu_{\text{КР}} = A_{\text{ВЫХ}}.$$

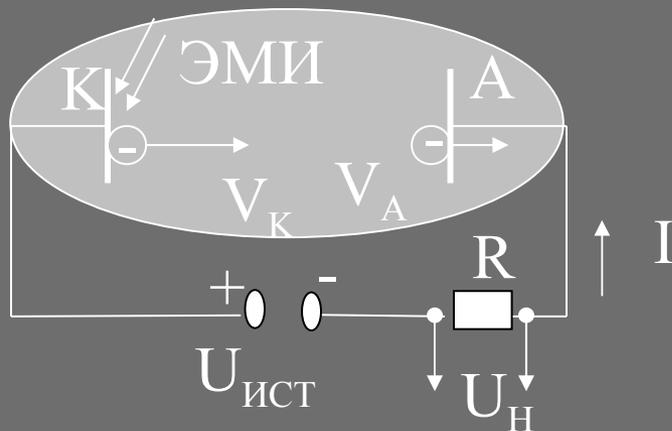
Частота красной границы -  $\nu_{\text{КР}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}$ .

ТЕСТ

## П.4. Фотоэлемент. Напряжение запираения.

Проблема: Как наблюдать и как использовать фотоэффект?

*Прибор, в котором реализован внешний фотоэффект, называется фотоэлементом.*



*Запирающим называется минимальное по величине напряжение, при котором прекращается фототок.*

Математически:  $I = 0$ , т.е.  $V_A = 0$ .

ЗАДАЧА: Вывести формулу запирающего напряжения.

Пусть напряжение источника равно запирающему и  $I = 0$ .

По закону сохранения механической энергии

$$E_{\text{МЕХ}}^{\text{ДО}} = E_{\text{МЕХ}}^{\text{ПОСЛЕ}}, \quad \text{или} \quad E_{\text{КИН}}^{\text{ВНЕ}} = E_{\text{ПОТ}}^{\text{АНОД}}. \quad \text{Отсюда:}$$

$$E_{\text{КИН}}^{\text{ВНЕ}} = q_{\text{эл}} U_{\text{ЗАП}} = -eU_{\text{ЗАП}} \Rightarrow$$

$$U_{\text{ЗАП}} = -\frac{1}{e} E_{\text{КИН}}^{\text{ВНЕ}} = -\frac{1}{e} (h\nu - A_{\text{ВЫХ}}).$$

Вывод:

Измеряя это напряжение можно найти либо работу выхода, либо частоту ЭМИ, либо постоянную Планка, если остальное известно.

## П.5. Эффект Комптона.

Проблема: Как ЭМИ рассеивается веществом?

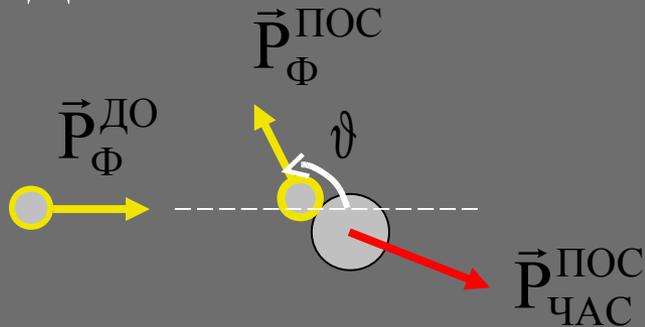
Рассеянием называется движение ЭМИ в направлении, не совпадающем с направлением падающего на вещество ЭМИ.

Эффектом Комптона называется явление изменения длины волны при рассеянии ЭМИ веществом.



Объект. Процесс	Модели	Характеристики. Законы
ЭМИ на входе	Волна (ЭМВ)	Длина волны $\lambda_{\text{ДО}}$
ЭМИ внутри	Поток частиц - фотонов	Энергия $E_{\text{ф}} = h\nu$ , импульс $p = \frac{h}{\lambda}$ .
ЭМИ на выходе	Волна (ЭМВ)	Длина волны $\lambda_{\text{ПОСЛЕ}}$
Вещество	Совокупность идеальных неподвижных шариков (ядер атомов)	Масса шарика $m_{\text{яд}}$ Концентрация $n$ .
Рассеяние	Абсолютно упругий удар фотонов с ядрами атомов вещества	Законы сохранен. импульса и кин. энергии

Для данной задачи:



$$E_{\Phi}^{\text{ДО}} = E_{\Phi}^{\text{ПОСЛЕ}} + E_{\text{ЧАС}}^{\text{ПОСЛЕ}}.$$

Т.к.  $V_{\text{ЧАС}} \ll c$ , то

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{ДО}}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{ПОСЛЕ}}} + \frac{m_{\text{ЧАС}} V_{\text{ЧАС}}^2}{2}.$$

При взаимодействии двух шаров выполняется закон сохранения импульса:

$$\vec{p}_{\text{СУМ}}^{\text{ДО}} = \vec{p}_{\text{СУМ}}^{\text{ПОСЛЕ}}.$$

Выполняется закон сохранения энергии:

$$E_{\text{СУМ}}^{\text{ДО}} = E_{\text{СУМ}}^{\text{ПОСЛЕ}}.$$

Вывод: длина волны рассеянного фотона возрастает на  $\Delta\lambda$ .

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{ПОСЛЕ}} - \lambda_{\text{ДО}} = 2\lambda_{\text{К}} \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right), \text{ где}$$

$$\lambda_{\text{К}} = \frac{h}{m_{\text{ЧАС}} \cdot c} \text{ — КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ ЧАСТИЦЫ.}$$

ТЕСТ

ТЕСТ