

Федеральное агентство по образованию  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра физики**

**А.М. Кириллов**

**ФИЗИКА  
В КОНСПЕКТАХ И ПРИМЕРАХ**

**Часть 4**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ  
И ВОЛНЫ. ОПТИКА. МИКРОФИЗИКА**

**Учебно-методическое пособие для поступающих в ТУСУР**

**2007**

## СОДЕРЖАНИЕ

### 1. Электрический ток

Основные понятия и определения

Электролиз

Электрическое сопротивление

Последовательное и параллельное соединения проводников

Закон Ома

Закон Ома для участка цепи

Закон Ома для полной (замкнутой) цепи

Соединения источников тока

Правила Кирхгофа

Измерение тока и разности потенциалов (напряжения) в цепи. Шунтирование электроизмерительных приборов

Переменный электрический ток (действующие напряжения и сила тока)

Закон Джоуля-Ленца

Коэффициент полезного действия (КПД) источника

Мощность переменного тока

Основные законы и формулы

Примеры решения задач

### 2. Электромагнетизм

Основные понятия и определения

Силовое действие магнитного поля

Электромагнитная индукция

Самоиндукция

Основные законы и формулы

Примеры решения задач

### 3. Колебания и волны

Основные понятия и определения

Механические колебания

Электромагнитные колебания

Переменный электрический ток

Волны

Основные законы и формулы

Примеры решения задач

### 4. Оптика

Основные понятия и определения

Законы отражения и преломления света

Собирающая линза

Рассеивающая линза

Оптические системы

Дифракционная решетка

Основные законы и формулы

Примеры решения задач

### 5. Микрофизика

Основные понятия и определения

Внешний фотоэффект

Связь массы и энергии

Атомные ядра

Основные законы и формулы

Примеры решения задач

### 6. Контрольные работы

## 5. МИКРОФИЗИКА

### Основные понятия и определения

С точки зрения микрофизики (квантовой физики) монохроматический свет с частотой  $\nu$  (с длиной волны  $\lambda = c/\nu$ , где  $c$  – скорость света в вакууме) представляет собой поток квантов света – фотонов. Скорость фотонов всегда и в любой среде равна скорости света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

**Энергия фотона**  $\varepsilon$  определяется выражением:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (5.1)$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

**Импульс фотона**, являясь корпускулярной характеристикой, связан с волновой характеристикой (частотой  $\nu$  или длиной волны  $\lambda$ ) соотношением:

$$p_\phi = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.2)$$

#### Давление света.

Т.к. фотоны обладают импульсом, то падающий на некоторую поверхность свет (электромагнитное излучение) должен оказывать давление на эту поверхность.

Найдем световое давление, которое оказывает на поверхность тела поток монохроматического излучения, падающего перпендикулярно поверхности.

Пусть в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает  $n$  фотонов. Если коэффициент отражения света от поверхности равен  $R$ , то  $Rn$  фотонов отражается, а  $(1-R)n$  поглощается. Каждый отраженный фотон передает стенке импульс  $2p_\phi = 2h\nu/c$ . (при отражении импульс фотона изменяется с  $\vec{p}_\phi$  на  $-\vec{p}_\phi$ ). Каждый поглощенный фотон передает стенке свой импульс  $p_\phi = h\nu/c$ . Таким образом, давление света на поверхность, равное импульсу, который передают поверхности за 1 с все  $n$  фотонов, выражается формулой

$$P = \frac{2h\nu}{c} Rn + \frac{h\nu}{c} (1-R)n = \frac{nh\nu}{c} (1+R). \quad (5.3)$$

Очевидно, что величина  $nh\nu$  имеет смысл **мощности излучения**, падающего на поверхность.

### Атомы

**Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний):** атом может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарных состояниях атом не излучает. Стационарному состоянию соответствует **стационарная орбита (боровская орбита)**, по которой двигается электрон в атоме.

Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой энергетических уровней, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию (рис. 5.1). Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории

вокруг положительно заряженного ядра, отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии  $E_n < 0$ . При  $E_n \geq 0$  электрон удаляется от ядра (ионизация). Величина  $|E_1|$  называется энергией ионизации. Состояние с энергией  $E_1$  называется основным состоянием атома. Основному состоянию соответствует нахождение электрона на **первой боровской орбите**. Все другие состояния с энергией  $E_n > E_1$  - называются **возбужденными состояниями**.

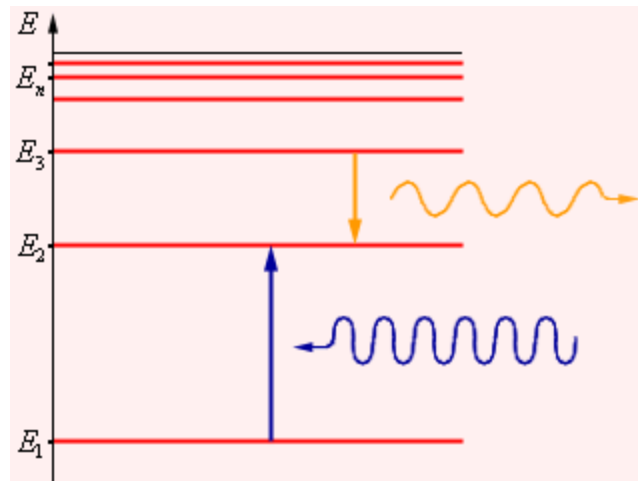


Рисунок 5.1 - Энергетические уровни атома и условное изображение процессов поглощения и испускания фотонов.

**Второй постулат Бора** (правило частот) формулируется следующим образом: при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое стационарное состояние с энергией  $E_m$  излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m. \quad (5.4)$$

Из выражения (5.4) можно выразить частоту или длину волны излучения. При переходе электрона из более высокого стационарного состояния в более низкое; при обратном переходе имеет место поглощение кванта света (рис.5.1).

## Внешний фотоэффект

**Фотоэффект** – явление вырывания электронов из вещества под действием света. Уравнение фотоэффекта (уравнение Эйнштейна) записывается в виде:

$$\varepsilon = h\nu = A + E_{\max}, \quad (5.5)$$

где  $\varepsilon = h\nu$  - энергия кванта света,  $A$  - работа выхода электрона из вещества,  $E_{\max} = \frac{m_e v_{\max}^2}{2}$  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона,  $v_{\max}$  - скорость электрона в момент его вылета из вещества).

Уравнение Эйнштейна отражает закон сохранения энергии в элементарном акте взаимодействия света с веществом. Из уравнения можно видеть, что фотоэффект возможен лишь при условии превышения энергии кванта света над значением работы выхода ( $\varepsilon \geq A$ ). Таким образом, **работа выхода** – это энергию которую должен затратить

электрон, чтобы покинуть вещество (у большинства металлов работа выхода  $A$  составляет несколько электрон-вольт ( $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ )).

**Красная граница фотоэффекта** – ситуация, когда скорость фотоэлектрона равна нулю, а вся энергия фотона уходит на совершение работы выхода:

$$A = \varepsilon_{\min} = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}. \quad (5.6)$$

Фотоэффект является пороговым явлением и красная граница соответствует минимальной частоте (максимальной длине волны) света при которой фотоэффект ещё возможен.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на рис. 5.2.

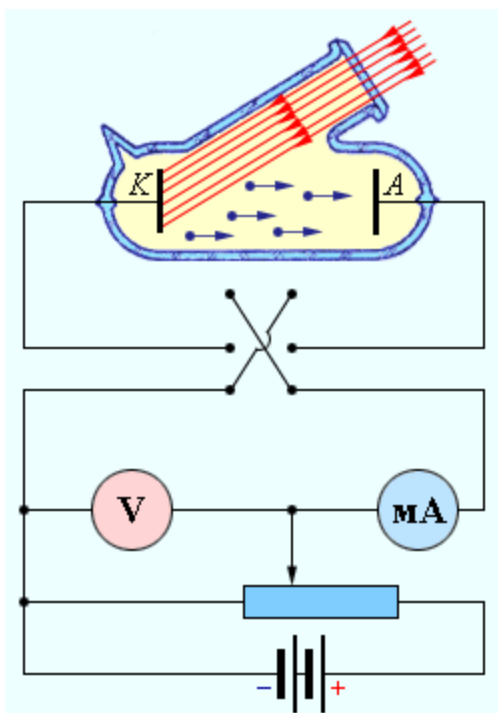


Рисунок 5.2 - Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта.

В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами. К электродам прикладывалось некоторое напряжение  $U$ , полярность которого можно было изменять с помощью ключа. Один из электродов (катод  $K$ ) через окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны  $\lambda$ , и при неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения. На рис. 5.3 изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности светового потока, падающего на катод.

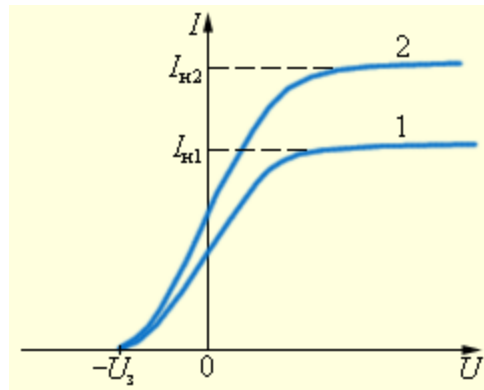


Рисунок 5.3 - Зависимость силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.  $I_{n1}$  и  $I_{n2}$  – токи насыщения,  $U_z$  – запирающий потенциал.

Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде *А* фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Измерения показывают, что ток насыщения  $I_n$  прямо пропорционален интенсивности падающего света (закон Столетова). Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $|eU|$ . Если напряжение на аноде меньше, чем  $-U_z$ , фототок прекращается.

**Задерживающий потенциал (задерживающее напряжение)** – напряжение тормозящего электрического поля при котором прекращается фототок. Таким образом для существования фототока необходимо, чтобы кинетическая энергия фотоэлектронов

$E_{\max} = \frac{m_e v_{\max}^2}{2}$  превышала работу  $|eU|$  по преодолению тормозящего электрического поля ( $E_{\max} \geq |eU|$ )

Измеряя  $U_z$ , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$E_{\max} = \left( \frac{m_e v^2}{2} \right)_{\max} = eU_z. \quad (5.7)$$

#### Основные законы фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности (5.4).
2. Для каждого вещества существует так называемая красная граница фотоэффекта, т.е. наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект (5.5).
3. Число фотоэлектронов, вырванных светом из катода за единицу времени, прямо пропорционально интенсивности света (число вырванных фотоэлектронов пропорционально числу падающих фотонов).
4. Фототок насыщения  $I_n$  прямо пропорционален интенсивности падающего света (закон Столетова)
5. Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{\min}$ .

## Связь массы и энергии

Энергия покоя  $E_0$  тела(частицы) дается формулой Эйнштейна:

$$E_0 = mc^2. \quad (5.8)$$

Закон показывает пропорциональность массы и энергии, что отражает возможность взаимопревращения двух видов материи – поля с энергией  $E_0$  и вещества с массой  $m$ .

Полная энергия зависит от скорости  $v$  движения тела:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (5.9)$$

Полная энергия частицы (тела)  $E$  складывается из ее энергии покоя  $E_0$  и кинетической энергии  $E_K$ :

$$E = E_0 + E_K. \quad (5.10)$$

## Атомные ядра

**Атомное ядро́** — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса и структура которого определяет химический элемент, к которому относится атом. Размеры ядер порядка фемтометра ( $10^{-15}$  м), что в 100 тысяч раз меньше размеров самого атома. Масса ядер примерно в 4000 раз больше массы входящих в атом электронов и сильно зависит от количества входящих в него частиц и энергии их связи.

**Нукло́ны** (от лат. *nucleus* — ядро) — частицы, из которых построены атомные ядра. Нуклоны представлены протонами и нейтронами. С точки зрения электромагнитного взаимодействия протон и нейтрон разные частицы, так как протон электрически заряжен, а нейтрон — нет. Однако с точки зрения сильного взаимодействия, которое является определяющим в масштабе атомных ядер, эти частицы неразличимы, поэтому и был введен термин «нуклон», а протон и нейтрон стали рассматриваться как два различных состояния нуклона.

**Протон** (от греч. *πρῶτος* — первый, основной) — элементарная частица, имеющая положительный заряд, по абсолютной величине равный заряду электрона. Ядро атома водорода состоит из одного протона. Протон в химическом смысле является ядром атома водорода (точнее, его лёгкого изотопа— протия) без электрона. В физике протон обозначается буквой  $p$  (или  $p^+$ ).

Протоны (вместе с нейтронами) являются основными составляющими атомных ядер. Порядковый номер химического элемента в периодической таблице (и, соответственно, все его химические свойства) полностью определяются зарядом ядра его атомов, который, в свою очередь, равен количеству протонов в ядре (протонному или зарядовому числу).

**Нейтрон** (от лат. *neutral* и обычного для частиц суффикса *on* (он)) — элементарная частица, не имеющая электрического заряда.

Для характеристик атомных ядер приняты следующие обозначения:

$Z$  – порядковый номер химического элемента в периодической системе Д.И. Менделеева (он равен числу протонов в ядре и числу электронов в атоме и называется **зарядовым числом**);

$N$  – число нейтронов в ядре (количество нейтронов в ядре называется его **изотопическим числом**);

$A=Z+N$  – **массовое число** (равно числу нуклонов в ядре).

**Изотопы** (от греч.  $\text{ισος}$  — «равный», «одинаковый», и  $\text{τόπος}$  — «место») — разновидности атомов (и ядер) одного химического элемента с разным количеством нейтронов в ядре. Название связано с тем, что изотопы находятся в одном и том же месте (в одной клетке) таблицы Менделеева. Химические свойства атома зависят практически только от строения электронной оболочки, которая, в свою очередь, определяется в основном зарядом ядра  $Z$  (то есть количеством протонов в нём) и почти не зависит от его массового числа  $A$  (то есть суммарного числа протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ ). Все изотопы одного элемента имеют одинаковый заряд ядра, отличаясь лишь числом нейтронов.

**Символ ядра некоторого химического элемента (элементарной частицы)  $X$  -  ${}^A_Z X$ .**

Отметим, что нижний индекс  $Z$  может определять не только число протонов в ядре, но и заряд ядра, нуклона или элементарной частицы, выраженный в числе элементарных электрических зарядов.

В таблице 5.1 приведены обозначения некоторых нуклонов и ядер.

Таблица 5.1 – Обозначения нуклонов, ядер, элементарных частиц

|                                           |                         |
|-------------------------------------------|-------------------------|
| Протон (ядро водорода)                    | ${}^1_1H={}_1^1p$       |
| Нейтрон                                   | ${}_0^1n$               |
| Дейтерий (изотоп водорода)                | ${}_1^2D$               |
| Тритий (изотоп водорода)                  | ${}_1^3T$               |
| Ядро гелия ( $\alpha$ - частица)          | ${}_2^4He={}_2^4\alpha$ |
| Электрон (положительная $\beta$ -частица) | ${}_{-1}^0e$            |
| Позитрон (положительная $\beta$ -частица) | ${}_1^0e^+$             |
| Гамма-квант (фотон большой энергии)       | ${}_0^0\gamma$          |

**Ядерная реакция** — процесс превращения атомных ядер, происходящий при их взаимодействии с элементарными частицами, гамма-квантами и друг с другом, обычно приводящий к выделению колоссального количества энергии. Спонтанные (происходящие без воздействия налетающих частиц) процессы в ядрах — например, радиоактивный распад — обычно не относят к ядерным реакциям. Для осуществления реакции между двумя или несколькими частицами необходимо, чтобы взаимодействующие частицы (ядра) сблизилась на расстояние порядка  $10^{-13}$  см, то есть характерного радиуса действия ядерных сил. Ядерные реакции могут происходить как с выделением, так и с поглощением энергии. Реакции первого типа, экзотермические, служат основой ядерной энергетики и являются источником энергии звёзд. Реакции, идущие с поглощением энергии (эндотермические), могут происходить только при условии, что кинетическая энергия сталкивающихся частиц выше определённой величины (порога реакции).

Ядерные реакции принято записывать в виде



Ядра  $X$  и  $Y$  принято называть **материнскими ядрами**, а ядра  $U$  и  $V$  – **дочерними ядрами**.



Кроме фундаментальных законов сохранения энергии и импульса в ядерных реакциях имеют место:

**закон сохранения нуклонов (массы):**

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4; \quad (5.12)$$

**закон сохранения заряда:**

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4. \quad (5.13)$$

**Радиоактивность** (от лат. *radio* — «излучаю», *radius* — «луч» и *activus* — «действительный»), **радиоактивный распад** — явление спонтанного превращения атомного ядра в другое ядро или ядра. Радиоактивный распад сопровождается испусканием одной или нескольких частиц (например, электронов, нейтрино, альфа-частиц, фотонов).

Радиоактивны все химические элементы с порядковым номером, большим 82 (то есть начиная с висмута), и многие более лёгкие элементы (протий и техний не имеют стабильных изотопов, а у некоторых элементов, таких как индий, калий или кальций, часть природных изотопов стабильны, другие же радиоактивны).

**Альфа-распад** - вид радиоактивного распада ядра, в результате которого происходит испускание альфа-частицы. При этом массовое число  $A$  уменьшается на 4, а зарядовое число — на 2. Запись альфа-распада:



**Электронный бета распад** - вид радиоактивного распада ядра, в результате которого происходит испускание электрона. При этом массовое число  $A$  не изменяется, а зарядовое число увеличивается на 1. Запись электронного бета-распада:



**Позитронный бета распад** - вид радиоактивного распада ядра, в результате которого происходит испускание позитрона. При этом массовое число  $A$  не изменяется, а зарядовое число уменьшается на 1. Запись позитронного бета-распада:



**Дефект масс.**

Масса ядра  $m_{\text{яд}}$  всегда меньше суммы масс входящих в его состав нуклонов:

$m_{\text{яд}} < Zm_p + Nm_n$ , где  $m_p = 1,007$  а.е.м. и  $m_n = 1,009$  а.е.м. — массы протона и нейтрона соответственно (1 а.е.м. =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг — атомная единица массы).

Дефект массы  $\Delta m$  - это разница между суммой масс всех нуклонов, содержащихся в ядре, и массой ядра:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{яд}}. \quad (5.17)$$

Согласно уравнению Эйнштейна (5.8) из соотношения (5.17) следует, что энергия покоя свободных нуклонов всегда больше энергии покоя составленного из них ядра.

**Энергия связи атомного ядра** — величина, представляющая собой работу по расщеплению ядра на образующие его нуклоны, равная

$$\Delta E_{CB} = \Delta m c^2. \quad (5.18)$$

Если из нуклонов образуется ядро, то высвобождается энергия, определяемая выражением (5.18)

**Удельная энергия связи**  $\Delta E_{уд}$  - это энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон:

$$\Delta E_{уд} = \Delta E_{CB} / A = \Delta E_{CB} / (N + Z). \quad (5.19)$$

**Энергия ядерной реакции** вида (5.10) определяется выражением:

$$E = [(m_X + m_Y) - (m_U + m_V)]c^2, \quad (5.20)$$

где  $m_X$  и  $m_Y$  – массы частиц до реакции,  $m_U$  и  $m_V$  – массы частиц после реакции. Очевидно, что если  $(m_X + m_Y) > (m_U + m_V)$ , то реакция происходит с выделением энергии (экзотермическая реакция); если  $(m_X + m_Y) < (m_U + m_V)$ , то энергия поглощается (эндотермическая реакция).

Таблица 5.2 Основные законы и формулы

| Название закона (формулы)                                        | Математическая запись закона, формула                                             |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Энергия фотона                                                   | $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$                                         |
| Импульс фотона                                                   | $p_\phi = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$             |
| Давление света                                                   | $P = \frac{nh\nu}{c}(1 + R)$                                                      |
| Второй постулат Бора (правило частот)                            | $h\nu_{nm} = E_n - E_m$                                                           |
| Уравнение Эйнштейна (уравнение фотоэффекта)                      | $\varepsilon = h\nu = A + E_{\max}$                                               |
| Красная граница фотоэффекта                                      | $A = \varepsilon_{\min} = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$                |
| Связь максимальной кинетической энергии и запирающего напряжения | $E_{\max} = \left( \frac{m_e v^2}{2} \right)_{\max} = eU_3$                       |
| Энергия покоя                                                    | $E_0 = mc^2$                                                                      |
| Полная энергия частицы (тела)                                    | $E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = E_0 + E_K$               |
| Запись ядерной реакции                                           | ${}^{A_1}_{Z_1}X + {}^{A_2}_{Z_2}Y \rightarrow {}^{A_3}_{Z_3}U + {}^{A_4}_{Z_4}V$ |
| Закон сохранения нуклонов (массы)                                | $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$                                                           |
| Закон сохранения заряда                                          | $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$                                                           |
| Альфа-распад                                                     | ${}^{A_1}_{Z_1}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$                   |
| Электронный бета-распад                                          | ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$                                    |
| Позитронный бета-распад                                          | ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_1e^+$                                     |
| Дефект массы                                                     | $\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{яд}}$                                        |

|                             |                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Энергия связи атомного ядра | $\Delta E_{CB} = \Delta m c^2$                                |
| Удельная энергия связи      | $\Delta E_{уд} = \Delta E_{CB} / A = \Delta E_{CB} / (N + Z)$ |
| Энергия ядерной реакции     | $E = [(m_x + m_y) - (m_u + m_v)]c^2$                          |

## Задачи

1. Энергия каждого фотона в пучке монохроматического света равна 1,5 эВ. Определить в нм длину волны этого света. 825
2. Излучение источника видимого света лежит в интервале частот от 400 ТГц до 750 ТГц. Во сколько раз отличаются импульсы фотонов, соответствующих границам спектра? 1,875
3. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона красного света, частота которого 455 ТГц. Ответ дать в км/с. 1,1
4. Во сколько раз энергия фотона рентгеновского излучения с длиной волны 1 нм, больше энергии фотона видимого света с частотой  $6 \cdot 10^{14}$  Гц? 500
5. В среде с абсолютным показателем преломления  $n$  распространяется монохроматическое электромагнитное излучение с длиной волны 82,5 нм. Энергия каждого фотона этого излучения 10 эВ. Определить  $n$ . 1,5
6. На сетчатку глаза человека направлен свет с длиной волны 495 нм. Глаз воспринимает излучение данной длины волны при мощности светового потока, не меньшей  $3 \cdot 10^{-16}$  Вт. Определить минимальное число фотонов, которые должны попасть на сетчатку глаза за 2 секунды, чтобы человек заметил свет. 1500
7. Луч лазера с длиной волны 660 нм имеет вид конуса с углом при вершине  $10^{-4}$  рад. Оптическая мощность излучения равна 3 мВт. Определить в Си максимальное расстояние от лазера до наблюдателя, при котором наблюдатель сможет увидеть лазерный луч. Учесть, что глаз воспринимает свет при условии, что на сетчатку попадает не менее 100 фотонов за секунду. Диаметр зрачка принять равным 0,5 см.  $5 \cdot 10^8$
8. Во сколько раз изменилась мощность источника электромагнитного излучения, если при неизменной частоте излучения число квантов, испускаемых источником за 10 с, уменьшилось со 120 до 100? 1,2
9. Сколько фотонов монохроматического света прошло через отверстие в диафрагме, если их суммарная энергия равна 13,2 эВ, а длина волны света 750 нм? 8
10. Работающий в непрерывном режиме газовый лазер даёт монохроматическое излучение с частотой 500 ТГц, излучая ежесекундно 66 мДж энергии. Сколько фотонов испускает такой лазер в течение одной пикосекунды?  $2 \cdot 10^5$
11. Капля воды объёмом 0,1 мл нагревается светом с длиной волны 750 нм, поглощая  $7 \cdot 10^{10}$  фотонов в секунду. Определить в нК/с скорость нагревания воды, считая, что вся энергия, полученная каплей, расходуется только на её нагревание. Удельная теплоёмкость воды 4,2 кДж/(кг·К). 44
12. В одном из проектов системы противоракетной обороны предлагалось вывести на орбиту химический лазер, создающий излучение мощностью  $2,52 \cdot 10^7$  Вт. Энергия и импульс каждого фотона этого излучения равны:  $E = 1,875$  эВ,  $p = 10^{-24}$  г·м/с. Определить в мН силу отдачи, действующую на лазер при его работе. 84
13. Луч лазера мощностью 51 мВт падает на поглощающую поверхность. Определить в пН силу светового давления луча на поверхность. 170
14. Монохроматический параллельный пучок фотонов, падающий нормально на черную пластинку, оказывает на нее давление 0,4 мкПа. Энергия каждого фотона в пучке 10 эВ, коэффициент поглощения света пластинкой равен 100%. Определить в СИ число фотонов,

пролетающих в единицу времени через единицу площади поперечного сечения пучка.  $7,5 \cdot 10^{19}$ .

15. При поглощении кванта света частотой 600 ТГц, атом перешёл из стационарного состояния с энергией  $E = -6,875$  эВ в другое стационарное состояние. Определить в эВ энергию конечного стационарного состояния атома. -4,4

16. Атом водорода может находиться в основном состоянии с энергией  $E = -13,6$  эВ и в возбуждённых состояниях с энергиями  $E_1 = -3,4$  эВ,  $E_2 = -1,4$  эВ. Во сколько раз энергия фотона, испущенного при переходе атома из первого возбуждённого состояния в основное, больше энергии фотона, испущенного при переходе атома из второго возбуждённого состояния в первое возбуждённое состояние?

17. При испускании атомом фотона полная энергия атома изменилась на 4,125 эВ. Найти в нм длину волны излученного фотона. 300

18. На сколько электрон вольт изменяется энергия атома при излучении им фотона с длиной волны 412,5 нм? 3

19. Невозбужденный атом водорода налетает с кинетической энергией  $T$  на другой такой же неподвижный атом. В результате происходит лобовое неупругое столкновение. Определить в эВ минимальное значение  $T$ , при котором данный процесс может сопровождаться испусканием фотона. Учесть, что энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ. 20,4

20. На изолированную металлическую пластинку, потенциал которой равен нулю, направлено монохроматическое излучение с частотой 800 ТГц. До какого потенциала зарядится пластинка при длительном освещении, если работа выхода электрона из неё равна 2 эВ? Ответ дать в СИ. 1,3

21. Найти в ТГц частоту света, вырывающего из металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов 3,3 В. Фотоэффект начинается при частоте света 600 ТГц. 1400

22. Катод вакуумного фотоэлемента освещается светом с длиной волны 500 нм. При задерживающей разности потенциалов между катодом и анодом 1,2 В фототок прекращается. Определить в эВ работу выхода электрона из материала катода. 1,275

23. В опыте А. Столетова на цинковую пластинку направлялось излучение от электрической дуги. До какого максимального потенциала заряжалась при этом пластинка, если наименьшая длина волны в спектре излучения дуги равнялась 300 нм? Работа выхода электрона из цинка 3,3 эВ. Ответ дать в СИ. 0,825

24. На один из вольфрамовых электродов двухэлектродной лампы падает излучение с длиной волны 150 нм. Между электродами приложено тормозящее напряжение 10 В. На каком расстоянии от облучаемого электрода скорость электронов уменьшится до нуля, если расстояние между электродами 40 см? Работа выхода электрона 4,5 эВ. Ответ дать в см. 15

25. Плоский алюминиевый катод электронной лампы освещается излучением с длиной волны 165 нм. Определить в мм максимальное расстояние, на которое может удалиться от катода фотоэлектрон в тормозящем однородном электрическом поле напряжённостью 37,5 В/см. Длина волны красной границы фотоэффекта для алюминия 330 нм. 1

26. Водородная лампа работает в режиме, при котором в спектре излучения присутствуют все спектральные линии водорода. Свет лампы падает на фотоэлемент с палладиевым катодом. Работа выхода электрона из палладия равна 5 эВ. Определить в СИ величину напряжения, полностью прекращающего ток в фотоэлементе. 8,6

27. Атом водорода находится в возбужденном состоянии, и его электрон вращается по боровской орбите с номером  $n$ . При переходе атома в основное состояние он излучает два фотона. Импульс первого из них равен  $1,36 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с, частота второго равна частоте красной границы фотоэффекта для материала, у которого работа выхода электрона составляет 10,2 эВ. Определить значение  $n$ . Учесть, что энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ. 4

28. Электрон в атоме водорода перешел со второй боровской орбиты на первую, и в результате атом излучил фотон. Этот фотон попал на катод фотодиода и выбил из него электрон с кинетической энергией  $T$ . Работа выхода электрона из катода равна 8,2 эВ. Определить в эВ максимально возможное значение величины  $T$  в этом процессе. Учесть, что энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ. 2

29. Во сколько раз масса покоя электрона больше массы фотона видимого излучения с длиной волны 660 нм?  $2,73 \cdot 10^5$

30. Электрон, ускоренный электрическим полем, приобрел скорость, при которой его полная энергия стала в 2,6 раза больше энергии покоя. Определить в кВ разность потенциалов, пройденную электроном. 819

31. Кальций и цирконий имеют в периодической таблице Менделеева порядковые номера 20 и 40 соответственно. Во сколько раз заряд всех ядер в трёх молях циркония больше заряда всех ядер в двух молях кальция? 3

32. При взаимодействии ядра алюминия (массовое число 27, атомный номер 13) с альфа-частицей образовалось новое ядро и протон. Определить атомный номер образовавшегося элемента. 14

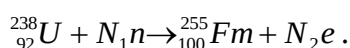
33. В результате взаимодействия ядра дейтерия, масса которого  $m_1 = 2,014$  а.е.м., с ядром трития ( $m_2 = 3,016$  а.е.м.) образуется ядро атома гелия ( $m_3 = 4,001$  а.е.м.) и нейтрон. Какая энергия выделяется при этой термоядерной реакции? Ответ дать в МэВ. Учесть, что 1 а.е.м. соответствует энергии 931 МэВ. 18,62

34. При термоядерной реакции слияния ядра дейтерия с ядром трития выделяется 18 МэВ энергии. Определить в ГДж суммарную энергию, которая выделится, если прореагирует 1 г дейтерия. 864

35. При столкновении альфа-частицы с ядром бериллия, имеющем 4 протона, происходит ядерная реакция, в результате которой образуется новое ядро и нейтрон. Определить для нового ядра его атомный номер в таблице Менделеева. 6

36. В результате взаимодействия гамма-кванта с ядром кальция (атомный номер 20, массовое число 40) образуются ядро нового атома и протон. Чему равно массовое число нового ядра? 39

37. Сотый элемент таблицы Менделеева фермий  $Fm$  впервые был получен путем кратковременного облучения урана сверхмощным потоком нейтронов. В этих условиях ядро урана может сразу поглотить более десяти нейтронов и затем, путем ряда  $\beta$ -распадов перейти в трансурановый элемент:

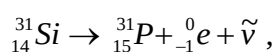


Сколько нейтронов поглотило ядро урана и сколько электронов было испущено в ходе этой ядерной реакции? Ответ дать в виде разности  $N = N_1 - N_2$ . 9

38. В результате реакции слияния неподвижных ядер дейтерия (заряд ядра  $Z = 1$ , массовое число  $A = 2$ ) и трития ( $Z = 1$ ,  $A = 3$ ) образуется новое ядро и нейтрон. Определить, какую часть выделившейся при реакции энергии составляет кинетическая энергия нейтрона. Не учитывать дефект массы и разницу между массами протона и нейтрона. 0,8

39. Ядро изотопа магния (массовое число 24, атомный номер 12) подвергается бомбардировке протонами. Определить число нуклонов в образующемся в результате реакции ядре, если реакция сопровождается испусканием альфа-частиц. 21

40. Реакция распада неподвижного ядра кремния  ${}_{14}^{31}Si$  протекает по схеме:



где символом  $\tilde{\nu}$  обозначено антинейтрино – нейтральная частица, энергия покоя которой равна нулю. Масса ядра кремния  ${}_{14}^{31}Si$  равна 30,9753 а.е.м., масса ядра фосфора  ${}_{15}^{31}P$  равна 30,9738 а.е.м. Кинетическая энергия образовавшегося электрона равна его энергии покоя – 0,51 МэВ. Пренебрегая кинетической энергией ядра фосфора, определить в МэВ энергию

- антинейтрино. Принять, что энергия покоя частицы с массой 1 а.е.м. равна 931 МэВ. 0,3765
41. Энергия связи ядра атома лития равна 29,88 МэВ. Найти в а.е.м. дефект массы этого ядра. 0,032
42. Масса ядра одного из изотопов лития равна 7,007 а.е.м. Определить в а.е.м. дефект массы этого ядра, если атомный номер лития 3, а массовое число 7. 0,05
43. Найти в МэВ энергию связи ядра изотопа кадмия, если известно, что дефект массы ядра этого изотопа составляет 0,008 а.е.м. 7,47
44. Какая минимальная энергия необходима для расщепления ядра изотопа лития на составляющие его нуклоны, если массовое число 7, заряд ядра - 3, масса ядра - 7,017 а.е.м? Ответ дать в МэВ. Учесть, что массе 1 а.е.м. соответствует энергия покоя 931 МэВ. 37,24
45. Вычислить в МэВ энергию связи ядра атома дейтерия, состоящего из 1 протона и 1 нейтрона. Масса ядра равна 2,0136 а.е.м. 2,241
46. Дефект массы ядра изотопа гелия (число протонов 2, число нейтронов 1) равен 0,005 а.е.м. Определить удельную энергию связи этого ядра. Ответ дать в пДж на нуклон. 0,249
47. Определить в МэВ энергию, выделяющуюся при образовании ядра изотопа гелия (массовое число - 3, атомный номер - 2) из отдельных нуклонов, если масса ядра изотопа равна 3,007 а.е.м. 14,94
48. В атомной подводной лодке "Наутилус" (США) мощность ядерного реактора равна 15 МВт, а к.п.д. – 20%. Ядерное горючее для реактора выполнено в виде одинаковых стандартных устройств, которые называются тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ). Каждый ТВЭЛ содержит делящееся вещество (обогащенный уран) массой 1 кг и обеспечивает надежный отвод тепла от топлива к теплоносителю. Какое минимальное количество ТВЭЛов необходимо для годового плавания лодки, если при делении 1 кг урана выделяется энергия  $7 \cdot 10^{13}$  Дж? Считать, что 1 год равен  $3 \cdot 10^7$  с. 33
49. Третий блок Белоярской АЭС имеет электрическую мощность 600 МВт при к.п.д., равном 47 процентов. Определить в СИ массу урана  $^{235}\text{U}$ , расходуемого в течение двух суток, если известно, что при делении одного ядра этого элемента выделяется энергия 200 МэВ. 2,7
50. Атомный реактор приводит в действие турбогенератор мощностью 200 МВт. Определить в процентах к.п.д. генератора, если в течение суток расходуется 470 г урана  $^{235}\text{U}$ , а при делении одного ядра  $^{235}\text{U}$  выделяется энергия 200 МэВ. Принять, что число Авогадро равно  $6 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ . 45