

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**



*Сборник задач*

*ПО КУРСУ «ФИЗИКА»*

*АТОМНАЯ ФИЗИКА*

**ТАШКЕНТ – 2010**

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ**

УТВЕРЖДЕНО  
Методической комиссией ЕОИП  
Пр. № от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010г.

*Сборник задач  
ПО КУРСУ «ФИЗИКА»*

*АТОМНАЯ ФИЗИКА*

**ТАШКЕНТ – 2010**

Задачник предназначен для студентов бакалавров очной и заочной формы обучения. Прежде чем решать задачи, необходимо ознакомиться с «Введением». Перед каждым разделом имеется сводка основных формул и примеры решения типичных задач. Раздел «Введение» и часть задач составлены с использованием материалов из «Сборника задач по общему курсу физики В.С. Волькенштейн, 1995 изд. «Наука», Москва.

Составители: доц. Мирсоатов Р.М  
доц. Закиров К.К  
доц. Бурханов Ш.Д

Выходные данные:

Формат А5  
Объем

№ заказа  
печ.лист. 0,5

тираж 100  
2006 М.У. ТАДИ.

## ВВЕДЕНИЕ

Решение задач рекомендуется проводить по следующей схеме:

1. Внимательно прочитать условие задачи.
2. Выписать все уравнения относящиеся к условию задачи из справки, помещенной перед каждым параграфом.
3. Посмотреть и проанализировать решение типичных задач, данных перед каждым параграфом.
4. В формулах округлить все известные и данные в задаче параметры физических величин.
5. Произвести алгебраические преобразования с целью нахождения неизвестных параметров.
6. Подставить цифровые значения в системе СИ.
7. Проанализировать ответ на размерность и разумность полученного результата.

## ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

Введение:

Единица радиоактивности и ионизирующих излучений.

В таблице 1 в соответствии с ГОСТом 8848-63 приведены основные и некоторые производные единицы для измерений в области радиоактивных и ионизирующих излучений. ГОСТом 8848-63 допускается также применение в несистемных единиц, приведенных в таблице 2.

Таблица 1.

Величина и ее обозначение	Уравнение, служащее для определения единицы	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Размерность величины
Основные единицы.				
Длина $l$	-	метр	М	L
Масса $m$	-	килограмм	Кг	M
Время $t$	-	секунда	сек	T
Сила тока I	-	ампер	A	I
Производные единицы.				

Активность изотопа в радиоактивном источнике	$n = \frac{dN}{dt}$	Распад в секунду	расп/сек	$T^{-1}$
Интенсивность излучения	$J = \frac{W}{St}$	Ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	MT <sup>-3</sup>
Поглощенная доза излучения	$D_n = \frac{W}{m}$	Джоуль на килограмм	Дж\кг	L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
Мощность поглощенной дозы излучения	$P_n = \frac{D_n}{t}$	Ватт на килограмм	Вт\кг	L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>
Экспозиционная доза рентгеновского и гамма излучений	$D_3 = \frac{q}{m}$	Кулон на килограмм	К\кг	M <sup>-1</sup> TI
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма - излучений	$P_3 = \frac{D_3}{t}$	Ампер на килограмм	А\кг	M <sup>-1</sup> I

Примечание. Определение единицы для измерения поглощенной дозы излучения и экспозиционной дозы рентгеновского и гамма – излучений.

Джоуль на килограмм поглощенная доза излучения, измеряемая энергией в 1 Дж ионизирующего излучения любого вида, переданной массе в 1 кг облученного вещества.

Кулон на килограмм экспозиционная доза рентгеновского и гамма излучений, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия на 1 кг сухого атмосферного воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд в 1 к электричества каждого знака.

Таблица 2.

Величина	Единица измерения и ее связь с единицами СИ
Активность изотопа в радиоактивном источнике	1 кюри = 3,7 * 10 <sup>10</sup> расп/сек
Поглощенная доза излучения	1рад = 10 <sup>-2</sup> Дж/кг

Экспозиционная доза излучений (рентгеновского и гамма) (рентген/р) = 2,57976\*10<sup>-4</sup> к/кг.

Примечание. Единицу экспозиционной дозы рентгеновского и гамма излучений кулона на килограмм, а также в несистемную единицу рентген, можно применять для измерений излучений с энергией квантов, не превышающей 5\*10<sup>-13</sup> (приблизительно 3МэВ).

## § 1. Квантовая природа света и волновые свойства частиц

Энергия кванта (фотона) определяется формулой:

$$\varepsilon = h\nu$$

где = 6,625 \* 10<sup>-34</sup> Дж/сек – постоянная Планка

$\nu$  - частота колебания.

Количество движения фотона

$$P_{\phi} = \frac{h\nu}{c}$$

масса фотона

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

где  $c$  – скорость света в пустоте.

Связь между энергией фотона, вызывающей внешний фотоэффект, и максимальной кинетической энергией вылетающих электронов дается формулой Эйнштейна

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

где  $A$  – работа выхода электрона из металла  
 $m$  - масса электрона, если  $\nu=0$ , то  $h\nu_0=A$ , где  $\nu_0$  – частота, соответствующая красной границе фотоэффекта.

Величина светового давления

$$p = \frac{E}{C} (1 + \rho)$$

где  $E$  - количество энергии падающей на единицу поверхности за единицу времени,  
 $\rho$  - коэффициент отражения света.

Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии определяется формулой

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \varphi)$$

где  $\varphi$  – угол рассеяния и  $m$  – масса электрона.

Пучок, элементарных частиц обладает свойством плоской волны, распространяющейся в направлении перемещения этих частиц. Длина волны, соответствующая этому пучку, определяется соотношением де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{1}{\sqrt{2W_k m}}$$

где  $v$  - скорость частиц,  $m$  - масса частиц и  $W_k$  - их кинетическая энергия. Если скорость  $v$  частиц соизмерима со скоростью света  $c$ , то предыдущая формула принимает вид

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{h}{\sqrt{2W_k m_0 + \frac{W_k^2}{c^2}}}$$

где  $\beta=v/c$  и  $m_0$  - масса покоя частицы.

### Примеры решения задач

#### **Задача № 1.**

Докажите, что свободный электрон не может поглотить квант света.

Решение

Предположим, что электрон, покоящийся в данной системе обсчета, поглотил световой квант с энергией  $\varepsilon = hv$ . В этом случае его скорость можно определить, применив закон сохранения энергии:

$$hv = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2hv}{m}}$$

С другой стороны, при поглощении светового кванта должен выполняться закон сохранения импульса. Вычисления, выполненные на основе использования этого закона дают другое значение для скорости электрона:

$$\frac{hv}{c} = mv - 0 = mv$$

$$v = \frac{hv}{mc}$$

Следовательно, свободный электрон не может поглотить световой квант, так как в этом случае не могут одновременно выполняться закон сохранения импульса и закон сохранения энергии.

### **Задача № 2.**

В работе А.Г. Столетова «Актино – электрические исследования» впервые были установлены основные законы фотоэффекта. Один из результатов его опытов был сформулирован так: «Разряжающим действием обладают лучи самой высокой преломляемости, длина которых менее  $295 \cdot 10^{-6}$  мм». Определить работу выхода электрона из металла, с которым работал А.Г. Столетов.

Решение

Имеем

$$hv = A + \frac{mv^2}{2}$$

Для того, чтобы возник фотоэффект, необходимо, чтобы

$$hv > A, \quad \text{т.е.} \quad v > \frac{A}{h}$$

Но  $v = \frac{c}{R}$  и, следовательно, для фотоэффекта длины волны падающего света должна удовлетворять неравенству

$$\lambda < \frac{hc}{A}$$

В опытах Столетова  $\lambda = 2,95 \cdot 10^{-4}$  мм, откуда нетрудно найти, что  $A = 4,2$  эв.

### **Задачи**

**Задача № 1.** Рентгеновский фотон с частотой  $\nu = 1,5 \cdot 10^{19}$  Гц испытывает комптоновское рассеяние под углом  $\varphi = 60^\circ$ . Определите изменение длины волны рентгеновского излучения, импульс и энергию рассеянного фотона.

**Задача № 2.** С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы соответствующая ему волна де Брайля имела длину, равную:

- 1) длине волны света зеленого света ( $\lambda_1=5,5 \cdot 10^{-7}$  м);
- 2) длине волны рентгеновского излучения ( $\lambda_2=1,2 \cdot 10^{-11}$  м)?

Какую разность потенциалов электрического поля необходимо приложить, чтобы разогнать электрон до этой скорости?

**Задача № 3.** Определить энергию фотонов, соответствующие наиболее длинным ( $\lambda=0,76$  мкм) и наиболее коротким ( $\lambda=0,4$  мкм) волнами видимой части спектра.

**Задача № 4.** Каков импульс фотона, энергия которого равна  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж?

**Задача № 5.** Источник света мощностью в 100 Вт испускает  $5 \cdot 10^{20}$  фотонов за 1с. найти среднюю длину волны излучения.

**Задача № 6.** Под каким напряжением работает рентгеновская трубка, если самые «жесткие» лучи в рентгеновском спектре этой трубки имеют частоту  $10^{19}$  Гц?

**Задача № 7.** Для определения минимальной длины волны в рентгеновском спектре пользуются формулой  $\lambda = \frac{1,23}{U}$  (где  $\lambda$  – минимальная длина волны, выраженная в нанометрах,  $U$  - напряжение на трубке в киловольтах). Вывести эту формулу. Какова минимальная длина волны рентгеновского излучения, если опорное напряжение трубки 20 кВ?

**Задача № 8.** Рентгеновская трубка, работающая под напряжением 50 кВ и потребляющая так 2 мА, излучает  $5 \cdot 10^{19}$  фотонов в секунду. Считая среднюю длину волны излучения равной 0,1 нм, найти КПД трубки, т.е. определить, сколько процентов мощность рентгеновского излучения составляет от мощности потребляемого тока.

**Задача № 9.** Длинноволновая (красная) граница фотоэффекта для серебра равна 0,26 мкм. Определить работу выхода в джоулях.

**Задача № 10.** Определить красную границу фотоэффекта для калия, если работа выхода равна 2 эВ.

**Задача № 11.** Какой частоты свет следует направить на поверхность платины, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна 3000 км/с. Работа выхода для платины равна 6,3 эВ.

**Задача № 12.** Сравнить давления света, производимые на идеально белую и идеально черную поверхности при прочих равных условиях.

**Задача № 13.** Найти массу фотона:

- 1) красных лучей света ( $\lambda= 7 \cdot 10^{-5}$ );
- 2) рентгеновских лучей ( $\lambda=0,25$  А);
- 3) гамма лучей ( $\lambda= 1,24 \cdot 10^{-2}$  А).

**Задача № 14.** Определить энергию, массу и количество движения фотона, если соответствующая ему длина волны равна 0,016 А.

**Задача № 15.** С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с  $\lambda = 5200$  А?



**Задача № 16.** Какую энергию должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?

**Задача № 17.** Количество движения, переносимое монохроматическим пучком фотонов через площадку  $S=2 \text{ см}^2$  за время  $t=0,5 \text{ мин}$ , равно  $p_T=3 \cdot 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{см/сек}$ . Найти для этого пучка энергию, падающую на единицу площади за единицу времени.

**Задача № 18.** Найти массу фотона, количество движения которого равно количеству движения молекулы водорода при температуре  $20^\circ\text{C}$ . скорость молекулы считать равной средней квадратичной скорости.

**Задача № 19.** Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна  $2750 \text{ \AA}$ . Чему равно минимальное значение энергии протона, вызывающего фотоэффект?

**Задача № 20.** Найти частоту света, вырывающего с поверхности металла электроны, полностью задерживающиеся обратным потенциалом в  $3 \text{ в}$ . Фотоэффект у этого металла начинается при частоте падающего света в  $6 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1}$ . Найти работу выхода электрона из этого металла.

**Задача № 21.** Найти величину задерживающего потенциала для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого равна  $3300 \text{ \AA}$ .

**Задача № 22.** При фотоэффекте с платиновой поверхности величина задерживающего потенциала оказалась равной  $0,8 \text{ В}$ . Найти:

- 1) длину волны применяемого облучения;
- 2) максимальную длину волны, при которой еще возможен фотоэффект.

**Задача № 23.** В одном из опытов П.Н. Лебедева при падении света на зачерненный кружок ( $\rho=0$ ) угол поворота нити был равен  $10^0$ . Найти:

- 1) величину светового давления;
- 2) мощность падающего света.

Данные прибора взять из условия задачи № 26.

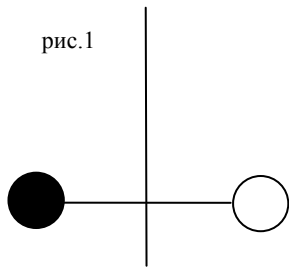
**Задача № 24.** В одном из опытов П.Н. Лебедева мощность падающего на кружки монохроматического света ( $\lambda=5,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ ) была равна  $0,5 \text{ Дж/мин}$ . Найти:

- 1) число фотонов, падающих на  $1 \text{ см}^2$  поверхности крылышек за  $1 \text{ сек}$ ;
- 2) импульс силы, сообщенный  $1 \text{ см}^2$  поверхности кружков за  $1 \text{ сек}$ .

Величину импульса найти для случаев: а)  $\rho=0$ , б)  $\rho=0,5$  и в)  $\rho=1$ . Данные прибора взять из условия задачи № 26.

**Задача № 25.** На рис. 1 показана часть прибора, с которым П.Н. Лебедев производил свои опыты по измерению давления света. Стеклообразная крестовина, подвешенная на тонкой нити, заключена в откачанный сосуд и несет на концах два легких кружка из платиновой фольги. Один кружок зачернен, другой оставлен блестящим. Направляя свет на один из кружков, и измеряя угол поворота нити (для зеркального отсчета служит зеркальце  $S$ ), можно определить величину светового давления. Найти:

- 1) величину светового давления;



- 2) энергию, подающую от дуговой лампы за 1 сек на  $1 \text{ см}^2$  поверхности кружков, если при освещении блестящего кружка отклонение зайчика было равно 76 мм по шкале, удаленной от зеркальца на 1200 мм. Диаметр кружков 5 мм. Расстояние от центра кружка до оси вращения 9,2 мм. Коэффициент отражения света от блестящего кружка 0,5. Постоянная к момента кручения нити ( $M=kd$ ) равна  $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ дн} \cdot \text{см/рад}$ .

**Задача № 26.** Найти давление света на стенки электрической 100-ватной лампы. Колба лампы представляет собой сферический сосуд радиусом 5 мм. Стенки лампы отражают 4% и пропускают 6% падающего на них света. Считать, что 1 сл потребляемая мощность идет на излучение.

**Задача № 27.** На поверхность площадью  $100 \text{ см}^2$  ежеминутно подает 63 Дж световой энергии. Найти величину светового давления в случаях, когда поверхность:

- 1) полностью отражает все лучи;
- 2) полностью поглощает все падающие на нее лучи.

**Задача № 28.** Монохроматический пучок света ( $\lambda=4900 \text{ \AA}$ ), падая нормально на поверхность, производит давление на нее, равное  $5 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2$ . Сколько квантов света падает каждую секунду на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света  $\rho=0,25$

**Задача № 29.** Рентгеновские лучи с длиной волны  $\lambda=0,708 \text{ \AA}$  испытывают комптоновское рассеяние на парафине. Найти длину волны рентгеновских лучей, рассеянных в направлениях: 1)  $\frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\pi$ .

**Задача № 30.** Какова была длина волны рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом  $60^\circ$  длина волны рассеянного излучения оказалась равной  $2,54 \cdot 10^{-9} \text{ см}$ ?

**Задача № 31.** В явлении Комптона энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен  $\frac{\pi}{2}$ . Найти энергию и количество движения рассеянного фотона.

**Задача № 32.** Энергия рентгеновских лучей равна 0,6 Мэв. Найти энергию электрона отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на 20%.

**Задача № 33.** Найти длину волны де Бройля для электронов, прошедших разность потенциалов: 1) 18 и 2) 100 в.

**Задача № 34.** Решить предыдущую задачу для пучка протонов.

**Задача № 35.** Найти длину волны де Бройля для:

- 1) электрона, летящего со скоростью  $10^8 \text{ см/сек}$ ;
- 2) атома водорода, движущегося со скоростью, равной средней квадратичной скорости при температуре  $300^\circ \text{ К}$ ;

3) шарика массой в 1г, движущегося со скоростью в 1 см\сек.

**Задача № 36.** Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов 200 в, имеет длину волны де Бройля, равную 0,0202 А. Найти массу этой частицы, если известно, что заряд ее численно равен заряду электрона.

**Задача № 37.** Найти длину волны де Бройля для электрона, кинетическая энергия которого равна: 1) 10 кэв; 2) 1Мэв.

**Задача № 38.** Найти длину волны де Бройля для атома водорода, движущегося при температуре 20<sup>0</sup>С с наиболее вероятной скоростью.

**Задача № 39.** При какой температуре кинетическая энергия молекулы двухатомного газа будет равна энергии фотона с длиной волны  $\lambda=5,89*10^{-4}$  мм?

### Ответы:

1.  $0.12*10^{-11}$ м;  $3.15*10^{-23}$ кг\*м/сек;  $9.45*10^{-15}$ дж.
2.  $1.32*10^2$ м/сек;  $0.6*10^8$ м/сек;  $5*10^{-6}$ в;  $10^4$ в.
3.  $2.6*10^{-19}$ Дж;  $5*10^{-19}$ Дж.
4.  $2*10^{-27}$ кг\*м/сек.
5. 0.99мкм.
6. 41кВ.
7. 62пм.
8. 0.1%
9.  $7.6*10^{-18}$ Дж.
10. 0.62мкм.
11.  $7.7*10^{15}$ Гц.
12. На белую в 2 раза больше.
13. 1)  $3.2*10^{-36}$ кг. 2)  $8.8*10^{-32}$ кг. 3)  $1.8*10^{-30}$ кг.
14.  $r=1.15*10^{-13}$ дж  $m=1.38*10^{-30}$ кг -----= $4.1*10^{-22}$ кг\*м/сек.
15.  $v=9.2*10^5$ м/сек.
16. 0.51Мэв.
17.  $E=P\tau/\rho t=150$ дж/м<sup>2</sup>\*сек.
18.  $m=2.1*10^{-32}$ кг.
19. E=4.5эв.
20. A=2.48эв.
21. U=1.75
22. 1) 2040А, 2) 3240А.
23. 1)  $P=3.55*10^{-7}$ ---/м<sup>2</sup>, 2)  $N=2.1*10^{-3}$ вт.
24. 1)  $1.2*10^{17}$ , 2) а)  $1.42*10^{-6}$ , б)  $2.13*10^{-6}$ , в)  $2.84*10^{-6}$
25.  $P=3.85*10^{-6}$  Н/м<sup>2</sup>,  $E=7.7*10^{-2}$  дж/см<sup>2</sup>\*сек.
26.  $P=1.04*10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>.
27. 1)  $P=7*10^{-7}$  Н/м<sup>2</sup>, 2)  $P=3.5*10^{-7}$  Н/м<sup>2</sup>
28.  $2.9*10^{21}$  квантов.
29. 1)  $\Delta\lambda=0.024$ А и  $\lambda=\lambda_0+\Delta\lambda=0.732$ А, 2)  $\Delta\lambda=0.048$ А и  $\lambda=0.756$ А
30.  $\lambda_0=0.242$ А
31.  $W=2.6*10^5$ эл  $P_\phi=9.3*10^{-12}$ кг\*м/сек
32. W=0.1Мэв
33.  $\lambda=12.3$ А  $\lambda=1.23$ А
34.  $\lambda=0.29$ А  $\lambda=0.029$ А
35. 1)  $\lambda=7.3$ А 2)  $\lambda=1.44$ А 3)  $\lambda=6.6*10^{-27}$ А

36.  $m=1.67 \cdot 10^{-27}$  кг  
 37. 0.122А 0.0087А  
 38.  $\lambda=1.8$ А  
 39.  $T=9800^0$ К

## § 2. Атом Бора. Рентгеновские лучи

Согласно первому постулату Бора движение электрона вокруг ядра возможно только по определенным орбитам, радиусы которых удовлетворяют соотношению

$$mv_k r_k = k \frac{h}{2\pi}$$

где  $m$  – масса электрона,  $v_k$  – его скорости на  $k$ -ой орбите,  $r_k$  – радиус этой орбиты,  $h$  – постоянная Планка и  $k$  – любое целое число (квантовое число).

По второму постулату Бора частота излучения, соответствующая переходу электрона с одной орбиты на другую определяется формулой

$$h\nu = W_n - W_k$$

где  $k$  и  $n$  – номера орбит ( $n > k$ ),  $W_k$  и  $W_n$  – соответствующие им значения энергии электрона.

Формула, позволяющая найти частоты  $\nu$  или длины волн  $\lambda$ , соответствующие линиям водородного спектра, имеет вид

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R_c \left( \frac{1}{K^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $k$  и  $n$  – номера орбит,  $C$  – скорость света в пустоте и  $R$  – постоянная Ридберга, равная

$$R = \frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^3 C} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $m$  – его масса,  $h$  – постоянная Планка и  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная. Формула, позволяющая найти частоты  $\nu$  или длины волн  $\lambda$  для водородно-подобных ионов, имеет вид

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

где  $Z$  – порядковый номер элемента.

При дифракции рентгеновских лучей имеет место уравнение Вульфа – Брегга

$$2d \sin \varphi = m\lambda (m = 0, 1, 2, \dots)$$

где  $d$  – расстояние между атомными плоскостями кристалла и  $\varphi$  – угол между пучком рентгеновских лучей и поверхностью кристалла.

Коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра может быть найдена из соотношения

$$h\nu_0 = eU$$

где  $U$  – разность потенциалов, приложенная к рентгеновской трубке.

Длины волн рентгеновских характеристических лучей могут быть найдены по формуле Мозли

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R_c (Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $Z$  – порядковый номер элемента, из которого сделан антикатод, и  $\sigma$  – “постоянная экранирования”. Последняя формула может быть переписана так:

$$\sqrt{v} = a(Z - \sigma), \quad \sigma \text{ де } a = \sqrt{R_c \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{n^2} \right)}$$

Интенсивность пучка рентгеновских лучей, прошедший сквозь пластинку толщиной  $x$ , определяется формулой

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

где  $I_0$  – интенсивность пучка, падающего на пластину, и  $\mu$  – линейный коэффициент поглощения. Коэффициент поглощения  $\mu$  зависит от длины волны рентгеновских лучей и от плотности вещества. Массовый коэффициент  $\mu_m$  поглощения связан с линейным коэффициентом соотношением  $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ , где  $\rho$  – плотность материала.

Поглощение рентгеновских лучей различными веществами можно охарактеризовать так называемым «слоем половинного ослабления», т.е. толщиной пластины уменьшающей вдвое интенсивность падающих лучей.

### Примеры решения задач

#### Задача № 1.

Определить частоту света, излучаемого возбужденным атомом водорода, при переходе электрона на второй энергетический уровень, если радиус орбиты электрона изменился в 9 раз.

Решение.

Согласно обобщенной формуле Бальмера, частота света, излучаемого атомом водорода.

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

где  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  – постоянная Ридберга,  $k$  - определяет серию (по условию задачи,  $k=2$  – серия Бальмера) т.е. номер орбиты, на которую переходит электрон,  $n$  - определяет отдельную линию серии, т.е. номер орбиты, с которой переходит электрон.

Второй закон Ньютона для электрона, движущегося по окружности радиусом  $r_n$  под действием кулоновской силы,

$$\frac{k_c v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} \quad (2)$$

Согласно теории Бора, момент импульса электрона, движущегося по  $n$ -й орбите,

$$R_c v_n r_n = nh (n=1,2,3,\dots) \quad (3)$$

Решая уравнение (2) и (3), получим

$$r_n = n^2 \frac{n^2 * 4\pi\epsilon_0}{K_e e^2} \quad (4)$$

Из выражения (4) и условия задачи следует, что

$$\frac{r_n}{r_2} = \frac{n^2}{k^2} = 9 \quad (5)$$

Умножив и разделив первую часть уравнения (1) на  $k^2$  и учитывая (5), получим искомую частоту

$$\nu = R \left( 1 - \frac{k^2}{n^2} \right) * \frac{1}{k^2} = \frac{R}{4} \left( 1 - \frac{1}{9} \right) = \frac{2}{9} R$$

Вычисляя, получим  $\nu = 7,31 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ .

### Задача № 2.

Определив энергию ионизации атома водорода. Найти в электрон\*вольтах энергию фотона, соответствующую самой длинной волновой линии серии Лоймана.

Решение.

Энергия ионизации атома (энергия, необходимая для отрыва электрона, находящегося в основном состоянии, от атома) определяется уравнением

$$E_i = h\nu = hR \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $=3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  – постоянная Ридберга,  $k=1$  и  $n=\infty$ . Тогда искомая энергия ионизации

$$E_i = hR \quad (1)$$

Самая длинноволновая линии серии Лаймана соответствует переходу электрона со второго энергетического уровня на основной, т.е.

Учитывая (1), получим искомую энергию фотона, соответствующую самой длинноволновой линии серии Лаймана:

$$E_{\lambda_{\max}} = E_{21} = h\nu_{21} = hR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} hR$$

Вычисляя, получим

1)  $E_i = 13,6 \text{ эВ}$ ;

2)  $E_{\lambda_{\max}} = 10,2 \text{ эВ}$ .

### Задачи

**Задача № 1.** На какие стационарные орбиты переходят электроны атома водорода при испускании видимых лучей? ультрафиолетовых? инфракрасных?

**Задача № 2.** При переходе электронов в атомах водорода с четвертой стационарной орбиты на вторую излучаются фотоны с энергией  $4,04 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , (зеленая линия водородного спектра). Определить длину волны этой линии спектра.

**Задача № 3.** При облучении паров ртути электронами энергия атома ртути увеличивается на  $4,9 \text{ эВ}$ . Какова длина волны излучения, которую атомы испускают при переходе в невозбужденное состояние?

**Задача № 4.** Для ионизации атома кислорода необходима энергия около  $14 \text{ эВ}$ . Найти частоту излучения, которое может вызвать ионизацию.

**Задача № 5.** Найти (с точностью до двух значащих цифр) значения постоянной  $R$  в формуле Бальмера, зная, что наименьшая частота излучения в видимой части спектра водорода равна  $4,8 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .

**Задача № 6.** Наибольшая длина волны излучения в видимой части спектра водорода  $0,66 \text{ мкм}$ . Найти длины волн ближайших трех линий в видимой части спектра водорода.

**Задача № 7.** Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на второй.

**Задача № 8.** Определить максимальную и минимальную энергию фотона в видимой серии спектра водорода (серии Бальмера).

**Задача № 9.** Определить длину волны  $\lambda$ , соответствующую второй спектральной линии в серии Пашина.

**Задача № 10.** Определить, длинны волн, соответствующие: 1) границы серии Лаймана; 2) границы серии Бальмера; 3) границы серии Пашина.

**Задача № 11.** Определить число спектральных линий, испускаемых атомарным водородом, возбужденным на  $n$ -й энергетический уровень.

**Задача № 12.** Используя теорию Бора для атома водорода, определить: 1) радиус ближайшей к ядру орбиты (первый Боровский радиус), 2) скорость движения электрона на этой орбите.

**Задача № 13.** Определить на сколько изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода, при излучении атомом фотона с длиной волны  $\lambda=4.86 \cdot 10^{-7}$  м.

**Задача № 14.** Определить длину волны  $\lambda$  спектральной линии, излучаемой при переходе электрона с более высокого уровня энергии на более низкий уровень, если при этом энергия атома уменьшилась на  $\Delta E=10$  эВ.

**Задача № 15.** Используя теорию Бора, определить орбитальный магнитный момент электрона, движущегося по третьей орбите атома водорода.

**Задача № 16.** Определить скорость электрона по третьей орбите атома водорода.

**Задача № 17.** Определить частоту вращения электрона на третьей орбите атома водорода.

**Задача № 18.** Определить: 1) частоту вращения электрона, находящегося на первой боровской орбите;

**Задача № 19.** Пользуясь теорией Бора найти числовое значение постоянной Ридберга.

**Задача № 20.** Определить потенциал ионизации атома водорода.

**Задача № 21.** Основываясь на том, что энергия ионизации атома водорода  $E_i=13.6$  эВ. Определить первый потенциал возбуждения  $\phi$  этого атома.

**Задача № 22.** Определить первый потенциал возбуждения атома водорода.

**Задача № 23.** Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы удалить электрон со второй боровской орбиты атома водорода за пределы притяжения его ядром.

**Задача № 24.** Электрон выбит из атома водорода, находящегося в основном состоянии, фотоном энергии  $E=17.7$  эВ. Определить скорость  $v$  электрона за пределами атома.

**Задача № 25.** Найти: 1) радиусы первых трех боровских электронных орбит в атоме водорода; 2) скорость электрона на них?

**Задача № 26.** 1) Найти наибольшую длину волны в ультрафиолетовой серии спектра водорода; 2) какую наименьшую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами электронов появилась эта линия?

**Задача № 27.** Определить потенциал ионизации атома водорода.

**Задача № 28.** Определить первый потенциал возбужденного атома водорода.

**Задача № 29.** На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной атомарным водородом. Постоянная решетки равна  $5 \cdot 10^{-4}$  см. какому переходу электрона соответствует спектральная линия, наблюдаемая при помощи этой решетки в спектре пятого порядка под углом  $41^\circ$ .

**Задача № 30.** Найти длину волны де Бройля для электрона, движущегося по первой боровской орбите в атоме водорода.

**Задача № 31.** Найти: 1) радиус первой боровской электронной орбиты для однократно ионизируемого гелия; 2) скорость электрона на ней?

**Задача № 32.** Найти первый потенциал возбуждения 1) однократно ионизируемого гелия; 2) двукратно ионизируемого лития.

**Задача № 33.** Найти потенциал ионизации: 1) однократно ионизируемого гелия; 2) двукратно ионизируемого лития.

**Задача № 34.** Найти длину волны фотона, соответствующего переходу электрона со второй боровской орбиты на первую в однократно ионизируемом атоме гелия.

**Задача № 35.** Решить предыдущую задачу для двукратно ионизированного атома лития.

**Задача № 36.** К электродам рентгеновской трубки, приложена разность потенциалов 60кВ. Наименьшая длина волны рентгеновских лучей, получаемых от этой трубки равна 0.206А. Найти из этих данных постоянную Планка.

**Задача № 37.** Найти коротко - волновые границы непрерывного рентгеновского спектра для случаев, когда к рентгеновской трубке приложена разность потенциалов: 1) 30кВ, 2) 40кВ.

**Задача № 38.** Найти для алюминия толщину слоя половинного ослабления для рентгеновских лучей некоторой длины волны, если известно, что массовый коэффициент поглощения алюминия для этой длины волны равен  $5.3 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

#### **Ответы:**

1. на 2-ю, 3-ю, 1-ю и выше
2.  $0.49 \text{ мкм}$
3.  $0.25 \text{ мкм}$
4.  $3.4 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ .
5.  $3.3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$



6. 0.49мкм, 0.43мкм, 0.41мкм
7. 1.89эВ
8.  $E_{\max}=3.41\text{эВ}$ ,  $E_{\min}=1.89\text{эВ}$
9. 1.28
10. 1)91нм, 2)364нм, 3)820нм
11.  $N=n(n-1)/2$
12. 1)52.8пм, 2)2.19Мм/с
13. на 2.56эВ
14. 124нм
15.  $p_m=e\hbar/(2m)=2.8*10^{-23}\text{А*м}^2$
16.  $\vartheta=e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar)=0.731\text{Мм/с}$
17.  $f=me^4/(4\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3)=2.42*10^{14}\text{Гц}$
18. 1)  $6.58*10^{15}\text{Гц}$ ,
19.  $R=me^4/(8\hbar^3\epsilon_0^2)=3.27*10^{15}\text{с}^{-1}$
20. 13.6В
21. 10.2В
22.  $\varphi_1=3R\hbar/(4e)=10.2\text{В}$
23.  $5.45*10^{-19}\text{Дж}$
24. 1.2Мм/с
25.  $r_1=0.53*10^{-10}\text{м}$ ,  $r_2=2.12*10^{-10}\text{м}$ ,  $r_3=4.77*10^{-10}\text{м}$
26. 1)  $\lambda=1.21*10^{-7}\text{м}$ , 2)  $\vartheta=1.90*10^6\text{м/сек}$
27.  $U_i=13.6\text{В}$
28. 10.2В
29. Переходу с n-3 на k-2
30.  $\lambda=3.3\text{А}$
31. 1)  $r_1=2.66*10^{-11}\text{м}$ , 2)  $r_2=4.37*10^7\text{м/сек}$
32. 1)  $U=40.8\text{В}$ , 2)  $U=92.8\text{В}$
33. 1)  $U=54\text{В}$ , 2)  $U=122\text{В}$
34.  $\lambda=304\text{А}$
35.  $\lambda=135\text{А}$
36.  $\hbar=6.6*10^{-34}\text{дж*сек}$
37. 1) 0.413А, 2) 0.31А, 3) 0.248А
38.  $x=5*10^{-4}\text{м}$

### **§ 3. Радиоактивность**

Количество атомов радиоактивного вещества, распадающихся за время  $dt$ , пропорционально количеству наличных атомов и определяется соотношением

$$dN/dt = -\lambda N$$

Где  $\lambda$  - постоянная радиоактивного распада. Интегрируя, получим

$$N = N_1 e^{-\lambda t}$$

Где  $N_1$  – число атомов имевшихся в момент времени  $t_0$ ,  $N$  – число их по истечении времени  $t$ .

Период полураспада  $T$  и постоянная распада  $\lambda$  связаны соотношением

$$T = \ln 2 / \lambda$$

Величина, обратная постоянной распада  $\tau = 1/\lambda$ , называется средним временем жизни радиоактивного атома.

Если некоторое количество радиоактивного препарата А помещено в закрытый сосуд и при распаде вещества А образуется препарат Б, также радиоактивный, то количество вещества В в этом сосуде по истечении времени  $t$  определяется формулой

$$N_B = N_{IA} * \lambda_A / (\lambda_B - \lambda_A) * e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}$$

Здесь  $N_{ia}$  – количество препарата А при  $t = 0$ .  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  – постоянные распада препаратов А и В соответственно. Если период полураспада препарата А значительно больше периода полураспада препарата В, то последняя формула имеет вид

$$N_B = N_{IA} * (\lambda_A / \lambda_B) * (1 - e^{-\lambda_B t})$$

При радиоактивном равновесии  $N_A / N_B = \lambda_B / \lambda_A$ .

Удельная активность радиоактивного препарата определяется числом актов распада в одну секунду на единицу массы распадающегося вещества.

### Примеры решения задач

#### **Задача № 1.**

Искусственно полученный радиоактивный изотоп кальция  $^{45}_{20}\text{Ca}$  имеет период полураспада равный 164 суткам. Найти активность 1мкг этого препарата.

#### **Решение.**

Количество атомов радиоактивного вещества  $\Delta N$ , распадающихся за время  $\Delta t$ , определяется формулой  $|\Delta N| = \ln 2 / T * N$ , где  $T$  – период полураспада изотопа,  $N$  – число его атомов в данной массе. Число атомов  $N$  связано с массой  $M$  препарата соотношением  $N = (M/A) * N_0$ , где  $N_0$  – число Авогадро и  $A$  – масса одного атома. По условию задачи  $T = 164,24 * 3600$  сек,  $M = 10^{-9}$  кг,  $N_0 = 6,02 * 10^{26}$  1/кг \* атом. Подставляя эти данные получим число распадов в 1 сек  $\Delta N / \Delta t = 6,53 * 10^8$  расп/сек =  $1,77 * 10^{-2}$  кюри.

### Задачи

**Задача 1.** Сколько процентов радиоактивных ядер кобальта останется через месяц, если период полураспада равен 41 дню?

**Задача 2.** Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найти период полураспада.

**Задача 3.** Период полураспада  $\pi$ -мезона  $\gg 8$  мс. За какое время (по часам земного наблюдателя) распадется 99% частиц, двигающихся со скоростью 0,6с.

**Задача 4.** Определить, что (и во сколько раз) продолжительнее три периода полураспада или два средних времени жизни радиоактивного ядра.

**Задача 5.** Определите во сколько раз начальное количество ядер радиоактивного изотопа уменьшится за три года, если за один год она уменьшилась в 4 раза.

**Задача 6.** Определить какая часть начального количества ядер радиоактивного изотопа распадется за время  $t$ , равное двум периодам полураспада  $T_{1/2}$ .

**Задача 7.** Определить период полураспада радиоактивного изотопа, если  $5/8$  начального количества ядер этого изотопа распалось за время  $t=849$ с.

**Задача 8.** Период полураспада радиоактивного изотопа актиния  $^{225}_{89}\text{Ac}$  составляет 10сут Определить время, за которое распадается  $1/3$  начального количества ядер актиния.

**Задача 9.** Постоянная радиоактивного распада изотопа  $^{210}_{82}\text{Pb}$  равна  $10^{-9}\text{с}^{-1}$ . Определить время в течении которого распадается  $2/5$  начального количества ядер этого изотопа.

**Задача 10.** вывести формулу для скорости радиоактивного распада через период полураспада  $T_{1/2}$  и начальное число радиоактивных атомов.

**Задача 11.** Активность некоторого радиоактивного изотопа в начальный момент времени составляла 100Ба. Определить активность изотопа по истечению изотопа времени равного половине периода полураспада.

**Задача 12.** Начальная активность 1гр изотопа радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$  равна 1Ки. Определить период полураспада  $T_{1/2}$  этого изотопа.

**Задача 13.** Принимая что все атомы иода  $^{131}_{58}\text{I}$  ( $T_{1/2}=8$ сут) массой  $m=1\text{мкг}^2$  радиоактивны. Определить 1) начальную активность этого изотопа; 2) его активность через 3сут.

**Задача 14.** Определить период полураспада  $T_{1/2}$  некоторого радиоактивного изотопа если его активность за 5сут уменьшилась в 2,2раза.

**Задача 15.** Определить удельную активность  $a$  (число распадов  $d/c$  на 1кг вещества) изотопа  $^{238}_{92}\text{U}$ , если период его полураспада  $T_{1/2}=4.5*10^9$  лет.

**Задача 16.** Определить какая часть (%) начального количества ядер радиоактивного изотопа остается не распавшейся по истечении времени равного двум средним временам жизни  $\tau$  радиоактивного ядра.

**Задача 17.** Сколько атомов полония распадется за сутки из 1млн атомов.

**Задача 18.** Найти число распадов за 1сек в 1г радия.

**Задача 19.** Найти постоянную распада радона если известно, что число атомов радона уменьшается за сутки на 18.2%

**Задача 20.** Найти удельную активность: 1) урана  $^{235}_{92}\text{U}$  и 2) радона  $^{222}_{86}\text{Rn}$ .

**Задача 21.** Некоторый радиоактивный препарат имеет постоянную распада  $\alpha=1.44*10^{-3}\text{л}^{-1}$ . Через сколько времени распадется 75% первоначального количества атомов?

**Задача 22.** Кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы, вылетающей из ядра атома радия при радиоактивном распаде равна 4,78МэВ. Найти 1) скорость  $\alpha$ -частицы, 2) полную энергию, выделяющуюся при вылете  $\alpha$ -частицы.

**Задача 23.** Какое количество тепла выделяет 1кюри радона 1) 8час; 2) за среднее время жизни? Кинетическая энергия вылетающей из радона  $\alpha$ -частицы равна 5,5МэВ.

**Задача 24.** В уране  ${}_{92}\text{U}^{238}$  в равновесии с продуктами его распада выделяет мощность  $1,07 \cdot 10^{-7}$ вт. Найти полное количество тепла, выделяемое одним граммом атомом урана.

**Задача 25.** Чему равна активность радона, образовавшегося из 1г радия за один час?

**Задача 26.** В результате распада 1г радия за год образовалось некоторое количество гелия, занимающего при нормальных условиях объем в  $0,043\text{см}^3$ . Найти из этих данных число Авогадро.

**Задача 27.** В закрытый сосуд помещен препарат, содержащий 1,5г радия. Какое количество радона накопится в этой ампуле по истечении времени  $t=T/2$ , где T-период полураспада радона?

**Задача 28.** В ампулу помещен радон активность которого равна 400мкюри. Через сколько времени после наполнения ампулы радон будет давать,  $2,22 \cdot 10^9$ расп/сек?

**Задача 29.** Зная периоды полураспада радия и урана, найти, сколько атомов урана приходится на один атом радия в природной урановой руде. Указание: учесть, радиоактивность природного урана обусловлено в основном изотопом  ${}_{92}\text{U}^{238}$ .

**Задача 30.** Из какого наименьшего количества руды содержащей 42% чистого урана можно получить 1г радия?

**Задача 31.** Какая доля первоначального количества радиоактивного изотопа распадается за время жизни этого изотопа?

**Задача 32.** Найти активность 1мкг полония  ${}_{84}\text{Po}^{210}$ .

**Задача 33.** Найти удельную активность искусственно полученного изотопа стронция  ${}_{38}\text{Sr}^{90}$ .

**Задача 34.** К 10мг радиоактивного изотопа  ${}_{20}\text{Ca}^{45}$  примешано 30мг нерадиоактивного изотопа  ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ . На сколько уменьшилась удельная активность препарата?

**Задача 35.** Какой изотоп образуется из  ${}_{90}\text{Th}^{232}$  после  $4^x$   $\alpha$ -распадов и  $2^x$   $\beta$ -распадов?

**Задача 36.** Какой изотоп образуется из  ${}_{92}\text{U}^{238}$  после  $3^x$   $\alpha$ -распадов и  $2^x$   $\beta$ -распадов?

**Задача 37.** Какой изотоп образуется из  ${}_{92}\text{U}^{239}$  после  $2^x$   $\beta$ -распадов и одного  $\alpha$ -распада.

**Задача 38.** Какой изотоп образуется из радиоактивного изотопа  ${}^8_3\text{Li}$  после  $1^{\text{го}}$   $\beta$ -распада и  $1^{\text{го}}$   $\alpha$ -распада?

**Задача 39.** Какой изотоп образуется из радиоактивного изотопа сурьмы  ${}^{133}_{51}\text{Sb}$  после  $4^{\text{x}}$   $\beta$ -распадов?

**Задача 40.** Записать  $\alpha$ -распад радия  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ .

### Ответы:

1. 75%
2. 4 дня
3. 150нс
4. ----
5. в 64 раза
6. 0,75
7. 10 мин
8. 5,85 сут
9. 16,2 года
10.  $V = \ln 2 / T_{1/2}$
11. 70?7 Бк
12. 1582 года
13. 1) 4,61 ТБк 2) 3,55 ТБк
14. 4,4 сут
15.  $a = NH(\ln 2) / (M * T_{1/2}) = 12,3 \text{ МБк/кг}$
16. 13,5%
17. 5025 суток<sup>-1</sup>
18.  $3,7 * 10^{10}$  расп/сек
19.  $\lambda = 2,1 * 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$
20. 1)  $7,9 * 10^7$  расп/сек 2)  $5,7 * 10^{18}$  расп/кг
21. через 40 суток
22.  $V = 1,52 * 10^7 \text{ м/сек}$
23. 1)  $Q = 120 \text{ дж}$  2)  $Q = 1,6 * 10^4 \text{ дж}$
24.  $Q = 5,2 * 10^{12} \text{ дж}$
25.  $2,8 * 10^2$  расп/сек
26.  $N_0 = 6 * 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$
27.  $m = 4,8 * 10^{-9} \text{ кг}$
28. через 10,4 суток
29.  $2,8 * 10^6$  атомов
30. из  $7 * 10^3 \text{ кг}$  руды
31. 63,2%
32.  $1,67 * 10^8$  расп/сек
33.  $5,25 * 10^{15}$  расп/(сек\*кг)
34.  $1,32 * 10^7$  кюри/кг
35.  ${}^{216}_{84}\text{Po}$
36.  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$
37.  ${}^{235}_{92}\text{U}$
38.  ${}^4_2\text{He}$
39.  ${}^{133}_{55}\text{Cs}$

## § 4. Ядерные реакции

Энергия связи ядра любого изотопа определяется соотношением

$$\Delta W = C^2 \Delta M$$

где  $\Delta M$  – разность между массой частиц, составляющих ядро, и массой самого ядра. Очевидно,

$$\Delta M = ZM_n + (M - Z)M_p - M_A \quad (1)$$

где  $Z$  – порядковый номер изотопа,  $M$  – массовое число,  $M_p$  – масса протона,  $M_n$  – масса нейтрона и  $M_A$  – масса ядра изотопа. Так как  $M_A = M_p Z + M_n (M - Z) - Zm_e$ , где  $M_A$  – масса изотопа и  $m_e$  – масса электрона, то предыдущие уравнение можно заменить следующим:

$$\Delta M = ZM_n + (M - Z)M_p - M_A \quad (2)$$

где  $M, H'$  – масса изотопа водорода,  $H'$  и  $M_A$  – масса другого изотопа.

Изменение энергии при ядерной реакции определяется соотношением

$$\Delta W = C^2 (\sum M_1 - \sum M_2)$$

где  $\sum M_1$  – сумма масс частиц до реакции и  $\sum M_2$  – сумма масс частиц после реакции.

Если  $\sum M_1 > \sum M_2$ , то реакция идет с выделением энергии, если же  $\sum M_1 < \sum M_2$ , то реакция идет с поглощением энергии. Отметим, что в последнюю формулу так же, как и при вычислении энергии связи ядра, мы можем подставлять массу, изотопов, а не ядер, так как поправки на массу электронов оболочки выходят с разными знаками и поэтому исключаются.

### Примеры решения задач

#### Задача №1.

Определить энергию связи, приходящую на один нуклон,  $E_{св}/A$ , атома ядра  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ .  
Масса соответствующего атома равна

#### Задача №1.

Определить энергию связи, приходящую на один нуклон,  $E_{св}/A$ , атома ядра  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ .  
Масса соответствующего атома равна 52103,47 МэВ. Масса атома водорода  $m_p = 938,79$  МэВ.

Решение.

Энергия связи нуклонов в ядре определяется формулой

$$\frac{F_{св}}{A} = C^2 [ZM_n + (A - Z)M_p - M_A] = 492,17 \text{ МэВ}$$

Разделив полученное значение на  $A=56$ , получим искомую величину

$$\frac{F_{св}}{A} = 8,79 \text{ МэВ / нуклон}$$

#### Задача №2.

При бомбардировке изотопа лития  ${}^6_3\text{Li}$  дейтронами  ${}^2_1\text{H}$  ( $M_{{}^2_1\text{H}} = 3,3446 \cdot 10^{-27}$  кг) образуются две  $\alpha$ -частицы  ${}^4_2\text{He}$  ( $M_{{}^4_2\text{He}} = 6,6467 \cdot 10^{-27}$ ) и выделяется энергия  $E = 22,3$  МэВ. Определить массу изотопа лития.

Решение.

Дефект массы ядра

$$\Delta M = M_3Li^6 + M_1H^2 - 2M_2He^4 \quad (1)$$

С другой стороны,  $\Delta M = \frac{\Delta E}{C^2}$  (2)

Поэтому из выражений (1) и (2) найдем искомую массу изотопа лития:

$$M_3Li^6 = \frac{\Delta E}{C^2} + 2M_2He^4 - M_1H^2$$

Вычисляя, получим  $=9,9884 \cdot 10^{-27}$  кг.

### Задачи

**Задача №1.** Каков состав ядер натрия ( $_{11}Na^{23}$ ), фтора ( $_9F^{19}$ ), серебра ( $_{47}Ag^{107}$ ), тория ( $_{90}Th^{232}$ ), менделевия ( $_{101}Mv^{256}$ )?

**Задача №2.** Каков состав изотопов неона  $_{10}Ne^{20}$ ,  $_{10}Ne^{21}$ ,  $_{10}Ne^{22}$ ?

**Задача №3.** Написать ядерную реакцию, происходящего при бомбардировке алюминия ( $_{13}Al^{27}$ )  $\alpha$ - частицами и сопровождающуюся выбиванием протона.

**Задача №4.** Написать я ядерную реакцию, происходящего при бомбардировке бора ( $_5B^{11}$ )  $\alpha$  - частицами и сопровождающуюся выбиванием нейтронов.

**Задача №5.** Для замедления быстрых нейтронов можно использовать, например, тяжелую воду углерод. В каком из этих замедлителей нейтрон испытывает большее число столкновений, пока его скорость не снизится до тепловой?

**Задача №6.** Написать реакцию  $\alpha$  - распада радия ( $_{88}Ra^{226}$ ). Сравнить импульсы и кинетические энергии образовавшихся ядер, считая, что до распада ядро радия покоилось.

**Задача №7.** Вычислить энергию связи ядра дейтерия  $_1H^2$  (в МэВ).

**Задача №8.** Найти энергию связи ядра алюминия  $_{13}Al^{27}$ .

**Задача №9.** Ядро  $_3Li^7$ , захватывает протон, распадается на две  $\alpha$  - частицы. Определить сумму кинетических энергий этих частиц. Кинетической энергией протона пренебречь.

**Задача №10.** Используя результат предыдущей задачи, найти какая энергия выделяется при синтезе 0,4 г дейтерия и 0,6г трития. Суммарную массу  $_1H^2$  и  $_1H^3$  округлить до 5 а.е.м.

**Задача №11.** При электрона и позитрона образовалось два одинаковых  $\gamma$  – кванта. Найти длину волны, пренебрегая кинетической энергией частиц до реакции.

**Задача №12.** Какова электрическая мощность атомной электростанции, расходующий в сутки 220г изотопа  $_{92}U^{235}$  и имеющей КПД 25%?

**Задача №13.** Определить массу нейтрального атома хрома  $_{24}Cr^{52}$ .

**Задача №14.** Определить число протонов и нейтронов, входящих в состав ядер трех изотопов кислорода: 1)  $_8O^{16}$ ; 2)  $_8O^{17}$ ; 3)  $_8O^{18}$ .

**Задача №15.** Определить, пользуясь таблицей Менделеева, число нейтронов и протонов в атомах платины и урана.

**Задача №16.** Определить, какая энергия в электрон – вольтах соответствует дефекту массы  $\Delta M = 3 \text{ мкг}$ .

**Задача №17.** Определить энергию связи ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Масса нейтрального атома гелия равна  $6,6467 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

**Задача №18.** Определить удельную энергию связи  $\delta E_{\text{св}}$  (энергию связи, отнесенную к одному нуклону) для ядер: 1)  ${}^4_2\text{He}$ ; 2)  ${}^{12}_6\text{C}$ . Массы нейтральных атомов гелия и углерода соответственно равны  $6,6467 \cdot 10^{-27}$  и  $19,9272 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

**Задача №19.** Используя данные задачи 18, определить, какая необходима энергия, чтобы разделить ядро  ${}^{12}_6\text{C}$  на три  $\alpha$ - частицы.

**Задача №20.** Определить массу изотопа  ${}^{15}_7\text{N}$ , если изменение массы при образовании ядра  ${}^{15}_7\text{N}$  составляет  $0,2508 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

**Задача №21.** Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смешения, определить, в какой элемент превращается  ${}^{238}_{92}\text{U}$  после трех  $\alpha$  – и двух  $\beta$  - распадов.

**Задача №22.** Ядра радиоактивного изотопа тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  претерпевают последовательно  $\alpha$  – распад два  $\beta$ - распада и  $\alpha$ - распад. Определить конечный продукт деления.

**Задача №23.** Определить сколько  $\beta$  – и  $\alpha$  – частиц выбрасывается при превращении ядра галлия  ${}^{210}_{81}\text{Tl}$  в ядро свинца  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ .

**Задача №24.** Определить высоту кулоновского потенциального барьера для  $\alpha$  – частицы в ядре свинца  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ .

**Задача №25.** Определить энергию, выделяющуюся в результате реакции  ${}^{23}_{12}\text{Mg} \rightarrow {}^{23}_{11}\text{Na} + {}^0_+1\text{e} + {}^0_+0\nu$ . Массы нейтральных атомов магния и натрия соответственно равны  $3,8184 \cdot 10^{-20}$  и  $3,8177 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ .

**Задача №26.** Записать  $\beta$  – распад магния  ${}^{27}_{12}\text{Mg}$ .

**Задача №27.** Определить является ли реакция  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$  экзотермической или эндотермической. Определить энергию ядерной реакции.

**Задача №28.** Определить поглощается или выделяется энергия при ядерной реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ . Определить эту энергию.

**Задача №29.** Записать недостающие значения X в следующих ядерных реакциях:

1.  ${}^{10}_5\text{B}(n;\alpha)x$ ;
2.  ${}^{40}_{18}\text{Ar}(\alpha;n)x$ ;
3.  $x(p;n){}^{37}_{18}\text{Ar}$ ;
4.  ${}^3_2\text{He}(x;p){}^3_1\text{H}$ ;
5.  $x(n;\alpha){}^3_1\text{H}$ .



**Задача №30.** Определить кинетическую энергию  $T$  и скорость  $v$  теплового нейтрона при температуре окружающей среды, равной  $17^{\circ}\text{C}$ .

**Задача №31.** Найти энергию связи ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ .

**Задача №32.** Найти энергию связи ядра атома дейтерия  ${}^2_1\text{H}$ .

**Задача №33.** Найти энергию, выделяющуюся при реакции  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}^2 \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ .

**Задача №34.** Найти энергию, выделяющуюся при реакции  ${}^8_4\text{Be} + {}^1_1\text{H}^2 \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ .

**Задача №35.** Написать недостающие обозначения в следующих ядерных реакциях, вызванных фотонами:

**Задача №36.** Найти порог ядерной реакции  ${}^{14}_7\text{N}(\alpha; p)$ .

**Задача №37.** Найти порог ядерной реакции  ${}^7_3\text{Li}(p; n)$ .

**Задача №38.** Найти наименьшее значение энергии  $\gamma$  – кванта, достаточное для осуществления реакции разложения дейтрона  $\gamma$  – лучами.  ${}^2_1\text{H} + h\nu \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n}$

**Задача №39.** Найти наименьшее значение энергии  $\gamma$  – кванта, достаточное для осуществления реакции  ${}^{24}_{12}\text{Mg}(\gamma; n)$

**Задача №40.** Какое количество энергии в киловатт-часах можно получить от деления  $n$  урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , если при каждом делении выделяется энергия, равная приблизительно 200 МэВ.

### Ответы:

1. ---
2. ---
3.  ${}^{24}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si} + {}^1_2\text{H}$
4.  ${}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n}$
5. в углероде.
6. Импульсы по модулю одинаковы, энергия  $\text{He}^4$  в 55.5 раза больше энергии  $\text{Rn}^{222}$ .
7. 2.2 МэВ.
8. 104 МэВ.
9. 17 МэВ.
10. 340 ГДж.
11. 2.4 нм.
12. 53 мВт.
13.  $8.64 \cdot 10^{-26}$  кг.
14. ---
15. ---
16. 16.9 ГэВ.
17. 28.4 МэВ.
18. 1) 7.1 МэВ/кулон, 2) 7.7 МэВ/кулон.
19. 7.26 МэВ.
20.  $2.4909 \cdot 10^{-26}$  кг.
21.  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$

22.  ${}_{88}\text{Ra}^{224}$
23. 3  $\alpha$ -частицы и 1  $\beta$ -частица.
24. 22.5 МэВ.
25. 2.91 МэВ.
26. ---
27. 1.64 МэВ.
28. 17.6 МэВ.
29. ---
30.  $T=6 \cdot 10^{-21}$  Дж,  $v=2.68$  км/с.
31.  $W=28.3$  МэВ.
32.  $W=2.3$  МэВ.
33. 15 МэВ.
34. 4.35 МэВ.
35. ---
36.  $W_x=1.52$  МэВ.
37.  $W_x=1.89$  МэВ.
38.  $h\nu=2.2$  МэВ.
39.  $h\nu=16.6$  МэВ.
40.  $2.3 \cdot 10^4$  кВт<sup>-4</sup>

### **§ 5. Элементарные частицы. Ускорители частиц**

Решение задач этого параграфа основано на закономерностях столкновения частиц, движение частиц в электрическом и магнитном полях и т.д. При решении ряда задач необходимо использовать формулы теории относительности.

**Задача №1.** Дать определение и объяснить происхождение первичного и вторичного космического излучения.

**Задача №2.** Объяснить происхождения мягкого и жесткого компонентов вторичного космического излучения.

**Задача №3.** Представить схематически и объяснить происхождение электронно-позитронно-фотонного или каскадного ливня.

**Задача №4.** Записать схемы распада положительного и отрицательного иона.

**Задача №5.** При захвате протоном отрицательного иона образуется нейтрон и еще одна частица. Записать эту реакцию и определить что это за частица.

**Задача №6** Известно, что продукты распада заряженных ионов испытывают дальнейший распад. Записать цепочку реакций для  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов.

**Задача №7.**  $\pi^0$ -мезон распадается покоя на два  $\gamma$ -кванта. Принимая массу покоя пиона равной  $264.1m_e$ . Определить энергию каждого из возникших  $\gamma$ -квантов.

**Задача №8.** Назвать и охарактеризовать четыре типа фундаментальных взаимодействий, а так же сравнить радиусы их действий. Какое из взаимодействий является универсальным?

**Задача №9.** Что называется изотопическим мультиплетом и изотопическим спином?

**Задача №10.** Возможно ли вынужденное излучение, если фотоны были фермионами? Дать объяснение.

**Задача №11.** Объяснить, в чем заключается принцип рядового сопряжения.

**Задача №12.** Записать продукты распада антинейтрона.

**Задача №13.** Перечислить основные свойства нейтрона и антинейтрона и объяснить, чем по современным представлениям они отличаются друг от друга.

**Задача №14.** Выбрав из четырех типов нейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ) правильное, написать недостающие обозначения (x) в каждой из приведенных реакций:

1.  $x + {}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^0$
2.  $x + {}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + \mu^-$
3.  $x + {}_1p^1 \rightarrow {}_0n^1 + {}_+1e^0$

**Задача №15.** Назвать элементарную частицу, обладающую наименьшей массой покоя. Чему равен электрический заряд этой частицы?

**Задача №16.** Объяснить какая характеристика элементарных частиц положено в основу деления адронов на мезоны и барионы.

**Задача №17.** Объяснить к какой группе элементарных частиц и почему относится:

1.  $\lambda^0$ -гиперболла
2. протон
3. таон
4.  $\pi^0$ -мезон

**Задача №18.** Объяснить к какой группе элементарных частиц и почему относится:

1. мюонное
2. нейтрон
3. фотон
4.  $k^0$ -мезон

**Задача №19.** Определить какие из приведенных ниже процессов разрешены законом сохранения тонного заряда:

1.  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
2.  $k \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
3.  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^- + e^+$
4.  $k^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e$

**Задача №20.** Ниже приведены запрещенные способы распада. Перечислите для каждого из них законы сохранения, которые в нем нарушаются.

1.  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$
2.  $k^- + n \rightarrow ? + k^+ + k^0$
3.  $p + n \rightarrow \Lambda + \Sigma^+$

**Задача №21.** Ниже приведены запрещенные способы распада. Перечислите для каждого из них законы сохранения, которые в нем нарушаются.

1.  $p^- + p \rightarrow p + \pi^+$
2.  $\pi^- + p \rightarrow k^- + \Sigma^+$
3.  $\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + k^-$
4.  $\pi^- \rightarrow \mu^- + e^+ + e^-$

**Задача №22.** Применить операцию заряда 2го сопряжения (при замене частицы на античастицу уравнения данной реакции получается новая реакция) к следующим процессам:

1.  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
2.  $p + k^- \rightarrow \Sigma^0 + \pi^+ + \pi^-$

**Задача №23.** Охарактеризовать основные свойства кварков (антикварков) – заряды (электрический и барионный) странность, цвет, очарование, прелесть.

**Задача №24.** Объяснить почему понадобилось введение внутренних характеристик кварков цвета и очарования.

**Задача №25.** Записать какие комбинации известных в настоящее время кварков воспроизводят свойства:

1. нейтрона
2. протона
3.  $\pi^+$ -мезона
4.  $\pi^-$ -мезона
5.  $\Sigma^0$ -гиперона

**Задача №26.** При упругом центральном столкновении нейтрона с неподвижным ядром замедляющего вещества кинетическая энергия нейтрона уменьшилась в 1,4раза. Найти массу ядер замедляющего вещества.

**Задача №27.** Какую часть первоначальной скорости будет составлять скорость нейтрона после упругого центрального столкновения с неподвижным ядром изотопа  ${}_{11}^{23}\text{Na}$ ?

**Задача №28.** Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B=0.5\text{Тл}$  и движется по окружности радиусом  $R=10\text{см}$ . Скорость частицы  $2.4 \cdot 10^6\text{м/с}$ . Найти для этой частицы соотношение ее заряда к массе.

**Задача №29.** Мезон космических лучей имеет кинетическую энергию  $W=7m_0c^2$  где  $m_0$ - масса покоя мезона. Во сколько раз собственное время жизни  $\tau_0$  мезона меньше времени его жизни  $\tau$  по лабораторным часам?

**Задача №30.** Позитрон и электрон соединяются, образуя два фотона. Найти энергию  $h\nu$  каждого из фотонов, считая, что начальная энергия частиц ничтожно мала. Какова длина волны этих фотонов.

**Задача №31.** Электрон и позитрон образуются фотоном с энергией  $h\nu=2,62\text{ МэВ}$ . Какова была в момент возникновения полная кинетическая энергия  $W_1+W_2$  позитрона и электрона.

**Задача №32.** Электрон и позитрон, образованные фотоном с энергией  $h\nu=5,7$  МэВ, дают в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, траектории с радиусом кривизны  $R$  поля.

**Задача №33.** Неподвижный  $\pi$ -мезон, распадаясь, превращается в два фотона. Найти энергию  $h\nu$  каждого фотона. Масса покоя  $\pi$ -мезона  $m_0(\pi)=264,2m_0$ , где  $m_0$ -масса покоя электрона.

**Задача №34.** Нейтрон и антинейтрон соединяются, образуя два фотона. Найти энергию  $h\nu$  каждого из фотонов, считая, что начальная энергия частиц ничтожно мала.

**Задача №35.** Ионный ток в циклотроне при работе с  $\alpha$ -частицами  $I=15$  мкА. Во сколько раз такой циклотрон продуктивнее массы  $m=1$  г радия?

**Задача №36.** Максимальный радиус кривизны траектории частиц в циклотроне  $R=50$  см, магнитная индукция  $B=1$  Тл. Какую постоянную разность потенциалов  $U$  должны пройти протоны, чтобы получить такое же самое ускорение, как в данном циклотроне?

**Задача №37.** Циклотрон дает дейтроны с энергией  $W=7$  МэВ. Магнитная индукция поля циклотрона  $B=1,5$  Тл. Найти максимальный радиус кривизны  $R$  траектории дейтрона.

**Задача №38.** До какой энергии  $W$  может ускориться  $\alpha$ -частицы в циклотроне, если относительное увеличения массы частицы  $K=(m-m_0)/m$  не должно превышать 5%?

**Задача №39.** Энергия дейтронов, ускоренных синхротроном,  $W=200$  МэВ. Найти для этих дейтронов отношение  $m/m_0$  (где  $m_0$ -масса движущегося дейтрона и  $m_0$ -его масса покоя) и скорость.

**Задача №40.** Нейтрон обладающий энергией  $W_0=4,6$  МэВ, в результате столкновения с протонами замедляется. Сколько столкновений он должен испытать, чтобы его энергия уменьшилась до  $W=0,23$  эВ? Нейтрон отклоняется при каждом столкновении в среднем на угол в  $45^\circ$ .

#### Ответы:

1. ---
2. ---
3. ---
4. ---
5. ---
6. ---
7. 67.7 МэВ.
8. ---
9. ---
10. ---
11. ---
12. ---
13. ---
14. ---
15. ---
16. ---
17. ---

18. ---
19. ---
20. ---
21. ---
22. ---
23. ---
24. ---
25. ---
26.  $M=12$  а.е.м. (графит)
27. 92%
28. ---
29.  $q/m=4.8 \cdot 10^7$  к/кг.
30. энергия каждого фотона  $W_0=0.51$ МэВ,  $\lambda=0.024$ А.
31. 160 МэВ.
32.  $W=2.34$  МэВ,  $V=0.31$
33.  $W=67.5$  МэВ.
34. 940 МэВ.
35. Данный циклотрон продуктивнее радия, больше чем в 1000раз.
36.  $U=K^2 \cdot R^2 \cdot q/2m=1.2 \cdot 10^7$  в.
37.  $R=0.36$  м.
38.  $W=188$  МэВ.
39. 1)  $M/M_0=1.1$ , 2)  $\beta=v/c=0.44$ ;  $v=1.32 \cdot 10^8$  м/сек.
40. 24 столкновения.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Физика атома и атомного ядра

Единица радиоактивности и ионизирующих излучений.....	стр 34
§ 1. Квантовая природа света и волновые свойства частиц.....	стр 36
§ 2. Атом Бора. Рентгеновские лучи.....	стр 43
§ 3. Радиоактивность.....	стр 49
§ 4. Ядерные реакции.....	стр 54
§ 5. Элементарные частицы. Ускорители частиц.....	стр 59