

**Суркаев А.Л., Рахманкулова Г.А.,
Сухова Т.А., Кумыш М.М.**



ПОСОБИЕ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

ФИЗИКА

ЧАСТЬ VI

КВАНТОВАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Л. Суркаев, Г.А. Рахманкулова, Т.А. Сухова, М.М. Кумыш

ПОСОБИЕ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

ФИЗИКА

ЧАСТЬ VI

КВАНТОВАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Электронное учебное пособие



Волжский

2019

УДК. 53(07)
ББК 22.3я73
С 901

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Общая физика» Волжского филиала ГОУ ВПО МЭИ (ТУ)

Кульков В.Г.,

кандидат технических наук, профессор РАЕ, руководитель детского технопарка «Кванториум»

Моисеев Ю. И.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Суркаев, А.Л.

Квантовая и ядерная физика [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Л. Суркаев, Г.А. Рахманкулова, Т.А. Сухова, М.М. Кумыш; ВПИ (филиал) ВолгГТУ, – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 1,1МБ). – Волжский, 2019. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана
ISBN 978-5-9948-3309-4

Учебное пособие содержит необходимый теоретический материал и примеры, иллюстрирующие основные понятия раздела «Квантовая и ядерная физика» курса «Общая физика». Подробно рассматриваются вопросы, касающиеся подробного анализа решения основных типов задач в курсе физики. Значительная часть материала является оригинальным. Изложение адаптировано к уровню студентов первого и второго курсов.

Пособие написано в соответствии с действующей программой курса физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений и может быть полезно для студентов всех специальностей.

Ил. 4, библиограф.12 назв.

ISBN 978-5-9948-3309-4

© Волгоградский государственный
технический университет, 2019
© Волжский политехнический
институт, 2019

Содержание

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....	5
§ 1.1. Введение.....	5
§ 1.2. Классификация задач.....	7
§ 1.3. Алгоритм решения задач.....	8
2. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	10
§ 2.1. Основные законы и формулы	10
§ 2.2. Примеры решения задач.....	11
§ 2.3. Задачи для самостоятельного решения.....	18
3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ	22
§ 3.1. Основные законы и формулы	22
§ 3.2. Примеры решения задач.....	23
§ 3.3. Задачи для самостоятельного решения.....	30
4. СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ. ФОТОНЫ	33
§ 4.1. Основные законы и формулы	33
§ 4.2. Примеры решения задач.....	33
§ 4.3. Задачи для самостоятельного решения.....	37
5. ЭФФЕКТ КОМПТОНА	40
§ 5.1. Основные законы и формулы	40
§ 5.2. Примеры решения задач.....	40
§ 5.3. Задачи для самостоятельного решения.....	43
6. ТЕОРИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ	46
§ 6.1. Основные законы и формулы	46
§ 6.2. Примеры решения задач.....	47
§ 6.3. Задачи для самостоятельного решения.....	53
7. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ	55
§ 7.1. Основные законы и формулы	55
§ 7.2. Примеры решения задач.....	55
§ 7.3. Задачи для самостоятельного решения.....	64
8. УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА.....	68
§ 8.1. Основные законы и формулы	68
§ 8.2. Примеры решения задач.....	69
§ 8.3. Задачи для самостоятельного решения.....	78
9. РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ.....	81
§ 9.1. Основные законы и формулы	81
§ 9.2. Примеры решения задач.....	82
§ 9.3. Задачи для самостоятельного решения.....	93
10. АТОМНОЕ ЯДРО.....	97
§ 10.1. Основные законы и формулы	97
§ 10.2. Примеры решения задач.....	97
§ 10.3. Задачи для самостоятельного решения	101
11. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ	105

§ 11.1. Тесты по теме тепловое излучение	105
§ 11.2. Тесты по теме фотоэффект.....	112
§ 11.3. Тесты по теме давление света. Эффект Комптона	120
§ 11.4. Тесты по теме атом водорода по Бору.....	123
§ 11.5. Тесты по теме квантовая механика	126
§ 11.6. Тесты по теме уравнение Шредингера	129
ПРИЛОЖЕНИЕ	138
§ Список библиографических источников.....	150

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

§ 1.1. Введение

Мир, в котором мы живем, необычайно огромен и разнообразен. Он состоит из колоссального количества различных материальных объектов от галактик и звезд до элементарных частиц. Взаимодействие между ними приводит к настолько сложному и запутанному характеру их поведения, что, казалось бы, невозможно найти и следа каких-либо закономерностей. Однако, оказывается возможным среди этого хаоса выделить наиболее общие связи, присущие всем телам, их взаимодействиям.

Одной из важнейших естественных наук, изучающей такие связи и их количественные характеристики, является *физика*. Она определяет такие понятия, как пространство, время, материя и другие. Являясь наиболее общей наукой о природе, она служит основой для многих других. Открытие и изучение новых физических процессов позволяет глубже понять сущность проходящих в природе явлений, еще на шаг приблизиться к разгадке ее тайн. Успехи в этом направлении приводят к созданию новых технологий в промышленности, совершенствованию уже существующих, непосредственно влияет на темпы научно-технического прогресса.

Одним из важнейших понятий, которым мы будем пользоваться далее, является *физическая система*. Она представляется в виде совокупности некоторых физических объектов, отделенных от всех других по каким-либо признакам. Иногда бывает так, что физической системой является всего лишь один такой объект. Например, системой можно считать некоторое количество газа, находящегося в баллоне, пружину с закрепленным на ее конце грузом, заряженную частицу, движущуюся во внешнем магнитном поле и т.д.

Для количественной характеристики физических объектов и процессов, в

которых они участвуют, вводятся различные физические величины, позволяющие описать состояние и эволюцию системы. К ним относят массу, скорость движения, напряженность поля, величину заряда, температуру и многие другие. Совокупность физической системы и частично определенных параметров или величин составляет *предмет исследования физической науки*.

Изучение физической науки следует рассматривать как процесс, состоящий из трех этапов.

Первый заключается в изучении теоретических сведений, в понимании и запоминании формул, знании способов их получения, уяснении основных физических законов.

Второй этап предусматривает умение использовать полученные знания при решении конкретных задач. Хорошо известна ситуация, когда человек, казалось бы, хорошо знающий теорию, совсем не может решать задачи, то есть применять ее на практике. Решение конкретных физических задач является необходимой практической основой при изучении курса физики. Оно способствует приобщению студентов к самостоятельной творческой работе, учит анализировать изучаемые явления, выделять главные факторы, обуславливающие то или иное явление, отвлекаясь от случайных и несущественных деталей. Благодаря этому, решение задач приближается к моделям научного физического исследования. Никакое количество материала, сколь большим бы оно ни было, не заменит настойчивых усилий, прилагаемых для решения физических задач, и тех навыков, которые с этим приходят.

Третьим этапом можно считать умение проводить физический эксперимент и получать из него необходимые сведения. Эта цель достигается при выполнении лабораторных работ.

§ 1.2. Классификация задач

Физические задачи могут быть *экспериментальными* или *теоретическими*. Последние, в свою очередь, можно разделить на две категории – *непоставленные* и *поставленные*.

Непоставленной называется задача, в которой не обеспечена совокупность необходимых исходных данных, за исключением табличных величин или же не проведена ее идеализация. В противном случае говорят о *поставленной* задаче, которые можно еще разделять и по роду рассматриваемых явлений.

Среди поставленных задач можно выделить четыре основных класса:

1. *Элементарные задачи*. Сюда входят те задачи, для решения которых требуется использование одного физического закона.

2. *Стандартные задачи*. Они требуют использования нескольких обычных, часто используемых приемов решения и физических законов.

3. *Нестандартные задачи*. В этом случае кроме обычных законов и методов решение требует применения дополнительных нестандартных приемов, которые могут быть основаны, например, на свойствах симметрии или некоторых других отличительных свойствах системы.

4. *Оригинальные задачи*. Это задачи с определяющей ролью особых приемов решения, значительной степенью интуиции. Для решения таких задач нужны определенные навыки, достаточно широкий физический кругозор, умение проводить аналогию между явлениями из разных разделов физики и математики. Бывает так, что стандартная или нестандартная задача может иметь оригинальное решение.

Для того чтобы научиться быстро и хорошо решать задачи, необходимо прежде всего владеть определенным объемом теоретического материала. С этой целью студент должен изучить соответствующие разделы конспектов лекций и учебника. Не следует ограничиваться использованием одного лишь лекционного материала. Наибольший объем знаний можно получить, работая с

учебниками, которых в настоящее время имеется достаточно много и написаны они на разном уровне. Лекция же выполняет лишь направляющую и разъясняющую главные моменты функцию. Она указывает направление в отборе материала для изучения.

§ 1.3. Алгоритм решения задач

Основными этапами решения любой физической задачи являются следующие: *физический, математический и анализ решения*. Все указанные этапы сведены в общий *алгоритм решения задач*. Согласно алгоритму, при решении задач необходимо выполнять следующие действия:

1. Указать основные законы и формулы, на которых базируется решение, и дать словесную формулировку этих законов, разъяснить буквенные обозначения формул. Если при решении задач применяется формула, полученная для частного случая, не выражающая какой-нибудь физический закон или не являющаяся определением какой-нибудь физической величины, то ее следует вывести.

2. Дать чертеж, поясняющий содержание задачи и выполнять его надо аккуратно при помощи чертежных принадлежностей.

3. Решение задачи сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями.

4. Решить задачу в общем виде, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи и взятых из справочных материалов. Задачи по физике весьма разнообразны, и дать единый рецепт их решения невозможно. Однако, как правило, их следует решать в общем виде. При этом способе не производятся вычисления промежуточных величин; числовые значения подставляются только в окончательную (рабочую) формулу, выражающую искомую величину.

5. Подставить в рабочую формулу размерности или обозначения единиц

и убедиться в правильности размерности искомой величины или ее единицы (см. примеры).

6. Выразить все величины, входящие в рабочую формулу, в единицах СИ и выписать их для наглядности столбиком.

7. Подставить в окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, числовые значения, выраженные в единицах одной системы. Несоблюдение этого правила приводит к неверному результату. Исключение из этого правила допускается лишь для тех однородных величин, которые входят в виде сомножителей в числитель и знаменатель формулы с одинаковыми показателями степени. Такие величины необязательно выражать в единицах той системы, в которой ведется решение задачи. Их можно выразить в любых, но только одинаковых единицах.

8. Произвести вычисление величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений (см. далее), записать в ответе числовое значение и сокращенное наименование единицы измерения искомой величины.

9. При подстановке в рабочую формулу, а также при записи ответа числовые значения величин записать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 3520 надо записать $3,52 \cdot 10^3$, вместо 0,00129 записать $1,29 \cdot 10^{-3}$ и т.д.

10. Оценить, где это целесообразно, правдоподобность численного ответа. В ряде случаев такая оценка поможет обнаружить ошибочность полученного результата. Например, коэффициент полезного действия тепловой машины не может быть больше единицы, скорость тела не может быть больше скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ и т.д. Решение задачи необязательно должно включать в себя все перечисленные действия. Их необходимость в значительной мере определяется спецификой и сложностью решаемой задачи.

2. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

§ 2.1. Основные законы и формулы

1. Закон Стефана-Больцмана:

$$R_e = \sigma T^4,$$

где R_e – энергетическая светимость (излучательность) черного тела; T – термодинамическая температура; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

2. Энергетическая светимость серого тела:

$$R_T = a_t \sigma T^4,$$

где a_t - коэффициент черноты серого тела.

3. Связь энергетической светимости R_e и спектральной плотности энергетической светимости $r(\nu; T)$ или $r(\lambda; T)$ абсолютно черного тела:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu;T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda;T} d\lambda.$$

4. I закон Вина (закон смещения Вина):

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $\lambda_{\max}$ - длина волны, соответствующая max значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела; $b = 2,9 \times 10^{-3} \text{ мК}$ - постоянная закона смещения Вина.

5. II закон Вина – зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры:

$$r_{\lambda;T_{\max}} = c T^5,$$

где $c = 1,3 \times 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \text{К}^5)$ – постоянная Вина.

6. Формула Рэлея-Джинса для спектральной плотности энергетической светимости черного тела:

$$r_{\nu;T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где $k=1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, $c=3 \times 10^8$ м/с - скорость электромагнитной волны.

7. Энергия кванта:

$$\varepsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

8. Формула Планка:

$$r_{\nu;T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad r_{\lambda;T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}.$$

9. Радиационная температура:

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{R_t}{\sigma}} = \sqrt[4]{a_t T_{ист}},$$

где $T_{ист}$ - истинная температура, $T_p < T_{ист}$.

10. Цветовая температура:

$$T_{ц} = \frac{B}{\lambda_{max}},$$

где $B=2,9 \times 10^3$ мК. Для серых тел $T_{ц} = T_{ист}$.

§ 2.2. Примеры решения задач

2.2.1. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости (излучательность) соответствует длине волны $\lambda=500$ Нм. Принимая Солнце за абсолютно черное тело, определить: 1) излучательность R_e Солнца; 2) поток энергии Φ , излучаемый Солнцем; 3) массу m электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за 1с.

Дано: $\lambda_{\max} = 500 \text{ нм} = 5 \times 10^{-7} \text{ м}$,

$t = 1 \text{ с}$.

Найти: $R_e = ?$

$\Phi = ?$

$m = ?$

Решение

1. Для определения излучательности R_e Солнца воспользуемся законом Стефана-Больцмана: $R_e = \sigma T^4$,

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Температура излучающей поверхности может быть определена из I закона Вина, согласно которому $T = \frac{b}{\lambda_{\max}}$, где $b = 2,9 \times 10^3 \text{ мК}$ - постоянная Вина.

$$\text{Исходя из этого, } R_e = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4.$$

Произведя вычисления, получим

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2,9 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 64 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2. Поток энергии Φ , излучаемый Солнцем, равен произведению излучательной способности R_e на площадь S его поверхности, то есть $\Phi = R_e S$, где $S = 4\pi r^2$; r - радиус Солнца = $6,95 \times 10^8 \text{ м}$. Подставив значения π, r и R_e , получим

$$\Phi = 4 \cdot 3,14 \left(6,95 \cdot 10^8 \right)^2 \cdot 64 \cdot 10^6 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

3. Массу электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за время $t = 1 \text{ с}$, определим из соотношения энергии массы - $E = mc^2$. Энергия электромагнитных волн, излучаемых за время t , равна произведению потока Φ

(мощности излучения) на время: $E = \Phi t$. Отсюда $\Phi t = mc^2$, тогда $m = \frac{\Phi t}{c^2}$,

подставив значения Φ , t и c , получим:

$$m = \frac{3,9 \cdot 10^{26} \cdot 1}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

$$\text{Ответ: } R_e = 64 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \Phi = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}; m = 4 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

2.2.2. Во сколько раз увеличится энергетическая светимость абсолютно черного тела, если температура тела при нагревании изменяется от 727°C до 2727°C ?

$$\text{Дано: } T_1 = 727^\circ\text{C} = 10^3 \text{ К,}$$

$$T_2 = 2727^\circ\text{C} = 3 \times 10^3 \text{ К.}$$

$$\text{Найти: } \frac{R_{e2}}{R_{e1}} = ?$$

Решение

Энергетическая светимость черного тела определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$R_e = \sigma T^4.$$

Исходя из этого, определим энергетические светимости тела при температурах T_1 и T_2 : $R_{e1} = \sigma T_1^4$, $R_{e2} = \sigma T_2^4$.

Увеличение энергетической светимости определим путем отношения $\frac{R_{e2}}{R_{e1}}$.

$$\text{Тогда } \frac{R_{e2}}{R_{e1}} = \frac{(T_2)^4}{(T_1)^4} = \frac{81 \cdot 10^{12}}{10^{12}} = 81 \text{ раз.}$$

$$\text{Ответ: } \frac{R_{e2}}{R_{e1}} = 81.$$

2.2.3. Максимум в спектре излучения абсолютно черного тела сместился с длины волны 0,4 мкм до 0,6 мкм. На сколько изменится мощность теплового излучения с 1 см² поверхности излучателя?

Дано: $S = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$,

$$\lambda_{1\max} = 4 \times 10^{-7} \text{ м},$$

$$\lambda_{2\max} = 6 \times 10^{-7} \text{ м}.$$

Найти: $\Delta\Phi = ?$

Решение

Поток энергии Φ (мощность теплового излучения) определяется как произведение энергетической светимости тела на площадь измеряемой поверхности, то есть $\Phi = R_e S$, где S - площадь поверхности; R_e - энергетическая светимость (излучательность).

Излучательность тела определяется согласно закону Стефана-Больцмана:

$$R_e = \sigma T^4.$$

Исходя из этого, определим мощность излучения при температурах T_1 и T_2 : $\Phi_1 = S\sigma T_1^4$, $\Phi_2 = S\sigma T_2^4$.

Тогда изменение мощности излучения получим из выражения:

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = S\sigma(T_1^4 - T_2^4).$$

Для определения изменения мощности излучения необходимо определить значение T_1 и T_2 , которые можно найти, используя закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \text{ где } b = 2.9 \times 10^3 \text{ мК}.$$

Найдем T_1 и T_2 :

$$T_1 = \frac{b}{\lambda_{1\max}}, T_2 = \frac{b}{\lambda_{2\max}}.$$

Подставив выражения T_1 и T_2 , определим изменение мощности теплового излучения:

$$\Delta\Phi = S\sigma_B^4 \left(\frac{1}{\lambda_{1\max}^4} - \frac{1}{\lambda_{2\max}^4} \right) = 10^{-4} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (2,9 \cdot 10^3)^4 \left(\frac{1}{(4 \cdot 10^{-7})^4} - \frac{1}{(6 \cdot 10^{-7})^4} \right) =$$

$$= 1,38 \cdot 10^{28} \text{ Вт.}$$

Ответ: $\Delta\Phi = 1,38 \cdot 10^{28} \text{ Вт}$

2.2.4. *Определить температуру абсолютно черного тела, излучающего в 1 мин энергию, равную 4 Дж с 1 мм² поверхности.*

Дано: $S = 10^{-6} \text{ м}^2$,

$E = 4 \text{ Дж}$,

$t = 60 \text{ с}$.

Найти: $T = ?$

Решение

Для определения температуры абсолютно черного тела воспользуемся законом

Стефана-Больцмана:

$$T = \sqrt[4]{\frac{R_e}{\sigma}},$$

где R_e - излучательная способность; σ - постоянная Стефана-Больцмана.

С другой стороны, излучательная способность R_e - это есть энергия, излучаемая единицей площади в единицу времени то есть $R_e = \frac{E}{St}$.

$$\text{Тогда } T = \sqrt[4]{\frac{E}{St\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{4}{10^{-6} \cdot 60 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ К.}$$

Ответ: $T = 1,04 \cdot 10^3 \text{ К}$.

2.2.5. Длина волны $\lambda_{\max}$, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, равна 0,58 мкм. Определить максимальную спектральную плотность излучательности $(r_{\lambda,T})_{\max}$, рассчитанную на интервал длин волн $\Delta\lambda = 1 \text{ Нм}$, вблизи $\lambda_{\max}$.

Дано: $\lambda_{\max} = 0,58 \text{ мкм} = 580 \times 10^{-9} \text{ м}$,

$\Delta\lambda = 1 \text{ Нм} = 10^{-9} \text{ м}$.

Найти: $(r_{\lambda,T})_{\max} = ?$

Решение

Максимальная спектральная плотность излучательности пропорциональна пятой степени температуры Кельвина и выражается вторым законом Вина:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = cT^5, \text{ где } c = 1,3 \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^3 \text{ К}^5.$$

Температуру T определим по закону смещения Вина: $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$,

откуда $T = \frac{b}{\lambda_{\max}}$.

Подставив значение температуры T в формулу максимальной спектральной плотности излучательности, получим:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = \frac{c\lambda_{\max}^5}{b^5}.$$

В таблице "Основные физические постоянные" значение C дано в единицах СИ, в которых единичный интервал длин волн $\Delta\lambda = 1 \text{ м}$. По условию задачи требуется вычислить спектральную плотность излучательности, рассчитанную на интервал длин волн 1 Нм, поэтому выпишем значение C в единицах СИ и пересчитаем его на заданный интервал длин волн: $C = 1,3 \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^3 \text{ К}^5 = 1,3 \times 10^{-14} \text{ Вт/м}^2 \text{ Нм К}^5$.

Вычисляя, получим $(r_{\lambda,T})_{\max} = 40,6 \times 10^3 \text{ Вт/м}$

Ответ: $(r_{\lambda,T})_{\max} = 40,6 \times 10^3 \text{ Вт/м}$.

2.2.6. Определить количество теплоты, теряемой 50 см^2 поверхности расплавленной платины за 1 мин., если поглощательная способность платины $a_T=0,8$. Температура плавления платины равна 1770°C .

Дано: $S = 50 \text{ см}^2 = 5 \times 10^{-3} \text{ м}^2$,

$t = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$,

$T = 2043 \text{ К}$,

$a_T = 0,8$.

Найти: $Q = ?$

Решение

Количество теплоты, теряемое платиной, равно энергии, излучаемой ее раскаленной поверхностью: $Q = E = a_T R_e St$, то есть $R_e = \frac{E}{St}$ - энергетическая светимость черного тела, где S - поверхность излучения; t - время.

Согласно закона Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma T^4.$$

Тогда искомое количество теплоты Q , теряемое платиной, определяется как по формуле $Q = a_T R_e St \sigma T^4$.

Подставив значения, получим:

$$Q = 0,8 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (2043)^4 = 237 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 237 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

2.2.7. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, $\lambda_0 = 0,58 \text{ мкм}$. Определить энергетическую светимость (излучательность) R_e поверхности тела.

Дано:

$\lambda_0 = 0,58 \text{ мкм}$

Найти:

R_e -?

Решение

Энергетическая светимость R_e абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана - Больцмана пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры и выражается формулой

$$R_e = \sigma T^4, \quad (1)$$

где σ - постоянная Стефана - Больцмана; T - термодинамическая температура.

Температуру T можно вычислить с помощью закона смещения Вина

$$\lambda_0 = b/T, \quad (2)$$

где b - постоянная закона смещения Вина.

Используя формулы (2) и (1), получим

$$R_e = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_0} \right)^4. \quad (3)$$

Выпишем числовые значения величин, входящих в эту формулу: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$, $\lambda_0 = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, и, подставив числовые значения в формулу (3), произведем вычисления:

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 3,54 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$R_e = 35,4 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ: $R_e = 3,54 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

§ 2.3. Задачи для самостоятельного решения

1. Во сколько раз увеличится энергетическая светимость абсолютно черного тела, если температура тела при нагревании изменяется от 727°C до 2727°C ?

2. Определить температуру T , при которой энергетическая светимость АЧТ равна $10 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

3. Максимум в спектре излучения абсолютно черного тела сместился с длины волны 0,4 мкм до 0,6 мкм. На сколько изменится мощность теплового излучения с 1 см² поверхности излучателя?

4. Во сколько раз увеличится поток излучения от АЧТ, если максимум энергии излучения передвинется от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе.

5. Поток энергии Φ_e , излучаемый из смотрового окошка плавильной печи, равен 34 Вт. Определить температуру T печи, если площадь отверстия $S = 6 \text{ см}^2$.

6. Определить энергию E , излучаемую за время $t = 1$ мин из смотрового окошка площадью $S = 8 \text{ см}^2$ плавильной печи, если ее температура $T = 1,2 \text{ кК}$.

7. Какую мощность надо подводить к свинцовому шарiku радиусом 4 см, чтобы поддерживать его температуру $T_1 = 27^\circ\text{C}$, если температура окружающей среды $T_2 = -23^\circ\text{C}$. Тепло теряется только вследствие излучения. Коэффициент теплового излучения свинца $\varepsilon = 0,6$.

8. Принимая коэффициент теплового излучения угля при температуре $T = 600 \text{ К}$ равным 0,8, определить: 1) энергетическую светимость R_e угля; 2) энергию E , излучаемую с поверхности угля с площадью $S = 5 \text{ см}^2$ за время $t = 10$ мин.

9. Принимая, что Солнце излучает как черное тело, вычислить его энергетическую светимость R_e и температуру T его поверхности. Солнечный диск виден с Земли под углом $\vartheta = 32'$. Солнечная постоянная $C = 1,4 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

10. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Принимая Солнце за черное тело, определить: 1) энергетическую светимость R_e Солнца; 2) поток энергии Φ_e , излучаемый Солнцем; 3) массу m электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за 1 с.

11. На какую длину волны λ_m приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{max}$ черного тела при температуре $t = 0^\circ\text{C}$?

12. Температура верхних слоев Солнца равна 5,3 кК. Считая Солнце черным телом, определить длину волны λ_m , которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{max}$ Солнца.

13. При увеличении термодинамической температуры. T черного тела в два раза длина волны λ_m , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости $(R_{\lambda,T})_{max}$, уменьшилась на $\Delta\lambda = 400$ нм. Определить начальную и конечную температуры T_1 и T_2 .

14. Абсолютно черное тело имеет температуру $T_1 = 1000$ К. Какова будет температура T_2 тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в $n = 10$ раз?

15. Температура абсолютно черного тела $T = 2$ кК. Определить длину волны λ_0 , на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости (излучательности) r_{λ_0} для этой длины волны.

16. Определить температуру T и энергетическую светимость (излучательность) R_v абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны $\lambda_0 = 600$ нм.

17. Из смотрового окошечка печи излучается поток $\Phi_e = 4$ кДж/мин. Определить температуру T печи, если площадь окошечка $S = 10$ см².

18. Поток излучения абсолютно черного тела $\Phi_e = 10$ кВт, максимум энергии излучения приходится на длину волны $\lambda_0 = 0,8$ мкм. Определить площадь S излучающей поверхности.

19. Определить поглощательную способность a_r серого тела, для которого температура, измеренная радиационным пирометром, $T_{рад} = 1,4$ кК, тогда как истинная температура T тела равна 3,2 кК.

20. Вычислить истинную температуру T вольфрамовой раскаленной лампы, если радиационный пирометр показывает температуру $T_{\text{рад}} = 2,5$ кК. Принять, что поглощательная способность для вольфрама не зависит от частоты излучения и равна $a_T = 0,35$.

21. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ($\lambda_{01} = 780$ нм) на фиолетовую ($\lambda_{02} = 390$ нм)?

22. Определить поглощательную способность a_T серого тела, для которого температура, измеренная радиационным пирометром, $T_{\text{рад}} = 1,4$ кК, тогда как истинная температура T тела равна $3,2$ кК.

23. На какую длину волны λ_m приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{\text{max}}$ черного тела при температуре $t = 16$ °С?

24. Принимая коэффициент теплового излучения угля при температуре $T = 800$ К равным $0,8$, определить: 1) энергетическую светимость R_e угля; 2) энергию E , излучаемую с поверхности угля с площадью $S = 10$ см² за время $t = 10$ мин.

3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

§ 3.1. Основные законы и формулы

1. Формула Эйнштейна в общем случае:

$$\varepsilon = h\nu = A + T_{\max} \quad \text{или} \quad h\omega = A + T_{\max},$$

где $\varepsilon = h\nu = h\omega$ - энергия фотона, падающего на поверхность металла; A - работа выхода электрона из металла; $T_{\max}$ - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона; в случае, если энергия фотона много больше работы выхода ($h\nu \Rightarrow A$), то $h\nu = T_{\max}$ или $h\omega = T_{\max}$.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона в двух случаях (нерелятивистском и релятивистском) выражаются различными формулами:

а) если фотоэффект вызван фотоном, имеющим незначительную энергию

$$h\nu = h\omega < 5 \text{ к эВ, то } T_{\max} = \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2,$$

где m_0 - масса покоя электрона;

б) если фотоэффект вызван фотоном, обладающим большой энергией

$$h\nu = h\omega \gg 5 \text{ к эВ, то } T_{\max} = (m - m_0)c^2 \quad \text{или} \quad T_{\max} = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right),$$

где $\beta = \frac{v_{\max}}{c}$; m - масса релятивистского электрона; c - скорость света.

3. “Красная граница” фотоэффекта для данного металла:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}; \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где λ_0 - максимальная длина волны излучателя (ν_0 - соответствующая минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен.

4. Работа выхода электронов из металла:

$$A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}.$$

5. Задерживающее напряжение:

$$U_0 = \frac{m\vartheta_{\max}^2}{2e},$$

где e - заряд электрона равен $1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

6. $1\text{эВ} = 1,6 \times 10^{-19}$ Дж.

§ 3.2. Примеры решения задач

3.2.1. *Определить максимальную скорость $v_{\max}$ фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны $\lambda_1 = 0,155$ мкм; 2) γ -излучением с длиной волны $\lambda_2 = 2,47$ нм.*

Дано: $\lambda_1 = 0,155$ мкм = 155×10^{-9} м;

$\lambda_2 = 2,47$ нм = $2,47 \times 10^{-12}$ м.

Найти: $v_{1\max} = ?$

$v_{2\max} = ?$

Решение

Максимальную скорость фотоэлектронов определим из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\varepsilon = A + T_{\max}. \quad (1)$$

Энергия фотона вычисляется по формуле $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$, работа выхода A определяется по справочнику [1], для серебра $A = 4,7$ эВ.

Кинетическая энергия фотоэлектрона в зависимости от того, какая скорость ему сообщается, может быть выражена или по классической формуле

$$T_{\max} = \frac{m_0 \sigma_{\max}^2}{2}, \quad (2)$$

или по релятивистской: $T_{\max} = (m - m_0)c^2$. (3)

Скорость фотоэлектрона зависит от энергии фотона, вызывающего фотоэффект; если энергия фотона ϵ много меньше энергии покоя электрона E_0 , то может быть применена формула (2); если же ϵ сравнима по размеру с E_0 , то вычисление по формуле (2) приводит к грубой ошибке. В этом случае кинетическую энергию фотоэлектрона необходимо выражать по формуле (3).

1. В формулу энергии фотона $\epsilon = \frac{hc}{\lambda}$ подставим значения величин h и λ_1 и, проведя вычисления для ультрафиолетового излучения, получим $\epsilon_1 = 1,28 \cdot 10^{-18}$ Дж = 8 эВ. Это значение энергии фотона много меньше энергии покоя электрона (0,51 МэВ).

Следовательно, для данного случая максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона в формуле (1) может быть выражена по классической формуле (2):

$$\epsilon_1 = A + \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2,$$

откуда $v_{\max} = \sqrt{2(\epsilon_1 - A) / m_0}$. (4)

Выпишем величины, входящие в формулу (4): $\epsilon_1 = 1,28 \times 10^{-18}$ Дж (вычислено выше); $A = 4,7$ эВ = $4,7 \times 1,6 \times 10^{-19}$ Дж = $0,75 \times 10^{-18}$ Дж, $m_0 = 9,11 \times 10^{-31}$ кг.

Подставив числовые значения в формулу (4), найдем максимальную скорость: $v_{\max} = 1,08$ Мм/с = $1,08 \times 10^6$ м/с.

2. Вычислим теперь энергию фотона γ излучения:

$$\epsilon_2 = \frac{hc}{\lambda_2} = 8,04 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,502 \text{ МэВ} = 0,502 \cdot 10^6 \text{ эВ}.$$

Работа выхода электрона ($A = 4,7$ эВ) пренебрежимо мала по сравнению с энергией γ - фотона, поэтому можно принять, что максимальная кинетическая энергия электрона равна энергии фотона: $T_{\max} = \epsilon_2 = 0,502$ МэВ

Так как в данном случае кинетическая энергия электрона сравнима с его энергией покоя, то для вычисления скорости электрона следует взять релятивистскую формулу кинетической энергии:

$$T = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right),$$

где $E_0 = m_0 c^2$. Выполним преобразование и найдем

$$\beta = \frac{\sqrt{(2E_0 + T)T}}{(E_0 + T)}.$$

Сделав вычисления, получим $\beta = 0,755 = \frac{v_{\max}}{c}$.

Следовательно, максимальная скорость фотоэлектронов, вырывааемых γ -излучением, будет

$$v_{\max} = \beta c = 0,755 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 2,26 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v_{\max} = 2,26 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

3.2.2. Определить красную границу λ_0 фотоэффекта для цезия, если при облучении его поверхности фиолетовым светом длиной волны $\lambda = 400 \text{ Нм}$ максимальная скорость $v_{\max}$ фотоэлектронов равна $0,65 \text{ Мм/с}$.

Дано: $\lambda = 400 \text{ Нм} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$;

$v_{\max} = 0,65 \text{ Мм/с} = 65 \cdot 10^4 \text{ м/с}$,

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$,

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$,

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$

Найти: $\lambda_0 = ?$

Решение

При облучении светом, длина волны λ_0 которого соответствует красной границе фотоэффекта, скорость, а следовательно, и кинетическая энергия фотоэлектронов равна 0.

Поэтому уравнение Эйнштейна для фотоэффекта $\varepsilon = A_{\text{вых}} + T$ в случае красной границы запишется в виде

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} \quad \text{или} \quad \frac{hc}{\lambda_0} = A_{\text{вых}}. \quad \text{Отсюда} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}.$$

Работу выхода для цезия определим с помощью уравнения Эйнштейна:

$$A_{\text{вых}} = \varepsilon - T = \frac{hc}{\lambda} - \frac{mv^2}{2}.$$

Подставив значения, получим, что работа выхода равна:

$$A_{\text{вых}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{-7}} - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (65 \cdot 10^4)^2}{2} = 3,05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,9 \text{ эВ}.$$

Для определения красной границы фотоэффекта воспользуемся формулой

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,05 \cdot 10^{-19}} = 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Ответ: $\lambda_0 = 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

3.2.3. На уединенный медный шарик падает монохроматический свет, длина волны которого $\lambda = 0,165 \text{ мкм}$ (ультрафиолет). До какого потенциала зарядится шарик, если работа выхода электрона для меди $A_{\text{вых}} = 4,5 \text{ эВ}$?

Дано: $\lambda = 0,165 \times 10^{-6} \text{ м}$;

$A_{\text{вых}} = 4,5 \text{ эВ}$.

Найти: $\phi_{\text{max}} = ?$

Решение

Под действием падающего ультрафиолетового излучения происходит вырывание электронов из металла (фотоэффект). Вследствие вылета электронов медный шарик заряжается положительно. Электрическое поле шарика тормо-

зит вылетающие электроны, однако если их кинетическая энергия достаточно велика для преодоления электростатического напряжения, то они будут уходить практически в бесконечность; при этом потенциал шарика возрастает. Максимальный потенциал $\varphi_{\max}$, до которого может зарядиться шарик, определяется наибольшей начальной кинетической энергией электрона T , с которой электроны вылетают из металла: $e\varphi_{\max} = T$.

Эта энергия может быть определена из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = T + A_{\text{вых}}, \quad \text{тогда} \quad T = h\nu - A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}.$$

Найдем максимальный потенциал $\varphi_{\max}$:

$$\varphi_{\max} = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}}{e} = \frac{\left(6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8\right)}{0,165 \cdot 10^{-6}} - 7,2 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3 \text{ В}.$$

Ответ: 3 В.

3.2.4. Наблюдается внешний фотоэффект на фотоэлементе с цезиевым катодом. Длина волны падающего излучения $\lambda = 0,331$ мкм. Работа выхода для цезия $A_{\text{вых}} = 1,89$ эВ. Найти импульс вылетающего электрона и импульс, получаемый катодом при вылете одного электрона. Электроны вылетают навстречу падающему свету нормально к поверхности катода.

Дано: $\lambda = 0,331 \times 10^{-6}$ м;

$A_{\text{вых}} = 1,89$ эВ = $3,02 \times 10^{-19}$ Дж.

Найти: $p_e = ?$

$p_k = ?$

Решение

Согласно квантовым представлениям, вылет электронов из металла при фотоэффекте есть результат взаимодействия фотон-электрон. Однако система фотон-электрон не является замкнутой, так как электрон взаимодействует еще с

кристаллической решеткой катода. Система, включающая в себя фотон, электрон и кристаллическую решетку катода, замкнута, и для нее справедлив закон сохранения импульса. До взаимодействия импульс данной системы равен импульсу фотона P_v ; после взаимодействия – импульсу электрона P_e и кристаллической решетки P_k . В соответствии с законом сохранения импульса

$$\vec{p}_v = \vec{p}_e + \vec{p}_k.$$

При применении закона сохранения энергии следует учитывать только энергию E_e , полученную электроном, так как энергией, полученной кристаллической решеткой, можно пренебречь вследствие того, что масса ее несоизмеримо больше массы и электрона и фотона. Согласно уравнения Эйнштейна, энергия падающего фотона

$$h\nu = E_e = T + A_{\text{вых}}.$$

Из этого уравнения можно рассчитать максимальную кинетическую энергию T , с которой электрон покидает катод. Применим формулу взаимосвязи кинетической энергии и импульса

$$T = \frac{p_e^2}{2m_e}.$$

Чтобы закон сохранения импульса записать в скалярном виде, необходимо ввести ось x , направленную перпендикулярно поверхности катода по световому пучку. Тогда $p_{vx} = +p_v = \frac{h}{\lambda}$, $p_{ex} = -p_e = -\sqrt{2m_e T}$.

Поскольку векторы $\vec{p}_v$ и $\vec{p}_e$ направлены в противоположные стороны, очевидно, что вектор $\vec{p}_k$ должен быть сонаправлен вектору $\vec{p}_v$, следовательно $p_{vx} = p_k$. Тогда

$$p_{vx} = p_{ex} + p_{kx} \text{ или } \frac{h}{\lambda} = -\sqrt{2m_e T} + p_k.$$

Зная, что $T = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}$ можно определить

$$p_k = \frac{h}{\lambda} + \sqrt{2m_e \left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right)} = 7,38 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

Импульс вылетевшего электрона, направленный в сторону, противоположную векторам $\vec{p}_k$ и $\vec{p}_\nu$ равен $p_e = \sqrt{2m_e \left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right)} =$

$$= \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \left(\frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,331 \cdot 10^{-6}} - 3,02 \cdot 10^{-19} \right)} = 7,36 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $p_e = 7,36 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$

3.2.5. Фототок, возникающий в цепи при освещении вольфрамового катода светом с длиной волны $\lambda = 2537 \text{ \AA}$, прекращающийся при включении задерживающей разности потенциалов $U_z = 1 \text{ в}$. Определить контактную разность потенциалов между анодом и катодом, если работа выхода для вольфрама равна $A_{\text{вых}} = 4,5 \text{ эВ}$.

Дано: $\lambda = 2537 \text{ \AA} = 2,5 \times 10^{-7} \text{ м};$

$U_z = 1 \text{ в};$

$A_{\text{вых}} = 4,5 \text{ эВ} = 7,2 \times 10^{-19} \text{ Дж}.$

Найти: $U_k = ?$

Решение

Максимальная кинетическая энергия T электронов определяет задерживающую разность потенциалов U_z , при которой сила фототока обращается в нуль: $eU_z = T$.

Абсолютная разность потенциалов между несоприкасающимися концами проводников (разность потенциалов контактная):

$$U_k = \frac{(A_{1B} - A_{2B})}{e}, \quad \text{где} \quad \left. \begin{matrix} A_{1B} \\ A_{2B} \end{matrix} \right\} \text{ работа выхода.}$$

Эта контактная разность потенциалов остается неизменной независимо от того, соприкасаются ли металлы непосредственно или через произвольное количество других проводников.

Такая разность потенциалов образуется между катодом и анодом. Истинное значение максимальной кинетической энергии, с которой фотоэлектроны покидают катод, определяется уравнением

$$T_{\max} = eU_{\text{з}} \pm e|U_{\text{к}}|.$$

Максимальная кинетическая энергия $T_{\max}$ определяется по уравнению

Эйнштейна:
$$\frac{hc}{\lambda} = T_{\max} + A_{\text{вых}}.$$

Тогда искомая контактная разность потенциалов равна

$$U_{\text{к}} = (T_{\max} - eU_{\text{з}}) / e.$$

Подставив значение $T_{\max}$ из уравнения Эйнштейна, будем иметь:

$$U_{\text{к}} = \frac{1}{e} \left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right) - U_{\text{з}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,5 \cdot 10^{-7}} - 7,2 \cdot 10^{-19} \right) - 1 = -0,6 \text{ В}.$$

Знак (-) показывает, что контактная разность направлена внешнему тормозящему напряжению источника ЭДС.

Ответ: $U_{\text{к}} = -0,6 \text{ В}$.

§ 3.3. Задачи для самостоятельного решения

25. Определить работу выхода $A_{\text{вых}}$ электронов из натрия, если красная граница фотоэффекта $\lambda_0 = 500 \text{ нм}$.

26. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта $\lambda_0 = 307 \text{ нм}$ и максимальная кинетическая энергия $T_{\max}$ фотоэлектрона равна 1 эВ?

27. Определить красную границу λ_0 фотоэффекта для цезия, если при облучении его поверхности фиолетовым светом длиной волны $\lambda = 400$ нм максимальная скорость $v_{\max}$ фотоэлектронов равна $0,65$ Мм/с.

28. Определить максимальную скорость $v_{\max}$ фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны $\lambda_1 = 0,155$ мкм; 2) γ - излучением с длиной волны $\lambda_2 = 2,47$ Пм.

29. На уединенный медный шарик падает монохроматический свет, длина волны которого $\lambda = 0,165$ мкм (ультрафиолет). До какого потенциала зарядится шарик, если работа выхода электрона для меди $A_{\text{вых}} = 4,5$ эВ ?

30. На поверхность лития падает монохроматический свет ($\lambda = 310$ нм). Чтобы прекратить эмиссию электронов, нужно приложить задерживающую разность потенциалов U не менее $1,7$ В. Определить работу выхода $A_{\text{вых}}$.

31. Фототок, возникающий в цепи при освещении вольфрамового катода светом с длиной волны $\lambda = 2537$ Å, прекращающейся при включении задерживающей разности потенциалов $U_z = 1$ В. Определить контактную разность потенциалов между анодом и катодом, если работа выхода для вольфрама равна $A_{\text{вых}} = 4,5$ эВ.

32. На цинковую пластинку падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 220$ нм. Определить максимальную скорость $v_{\max}$ фотоэлектронов.

33. Наблюдается внешний фотоэффект на фотоэлементе с цезиевым катодом. Длина волны падающего излучения $\lambda = 0,331$ мкм. Работа выхода для цезия $A_{\text{вых}} = 1,89$ эВ. Найти импульс вылетающего электрона и импульс, получаемый катодом при вылете одного электрона. Электроны вылетают навстречу падающему свету нормально к поверхности катода.

34. Максимальная скорость $v_{\max}$ фотоэлектронов, вылетающих из металла при облучении его γ -фотонами, равна 291 Мм/с. Определить энергию ε γ -фотонов.

35. Для прекращения фотоэффекта, вызванного облучением ультрафиолетовым светом платиновой пластинки, нужно приложить задерживающую разность потенциалов $U_1 = 3,7$ В. Если платиновую пластинку заменить другой пластинкой, то задерживающую разность потенциалов придется увеличить до 6 В. Определить работу $A_{\text{вых}}$ выхода электронов с поверхности этой пластинки.

36. Определить длину волны λ ультрафиолетового излучения, падающего на поверхность некоторого металла, при максимальной скорости фотоэлектронов, равной 10 Мм/с. Работой выхода электронов из металла пренебречь.

37. Красная граница фотоэффекта для цинка $\lambda_0 = 310$ нм. Определить максимальную кинетическую энергию T_{max} фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падают лучи с длиной волны $\lambda = 200$ нм.

38. На поверхность калия падают лучи с длиной волны $\lambda = 150$ нм. Определить максимальную кинетическую энергию T_{max} фотоэлектронов.

39. На фотоэлемент с катодом из лития падают лучи с длиной волны $\lambda = 210$ нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов U_{min} , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

40. На металл падают рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 1$ нм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость v_{max} фотоэлектронов.

41. Фотон с энергией $\epsilon = 10$ эВ падает на серебряную пластину и вызывает фотоэффект. Определить импульс p , полученный пластиной, если принять, что направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластин.

42. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетовых лучей ($\lambda = 0,25$ мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов $U_{\text{min}} = 0,96$ В. Определить работу выхода A электронов из металла.

4. СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ. ФОТОНЫ

§ 4.1. Основные законы и формулы

1. Давление, производимое светом при нормальном падении:

$$P = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) \quad \text{или} \quad \omega(1 + \rho) = P,$$

где E_e - облученность поверхности;

$$E_e = Nh\nu,$$

$h\nu$ - энергия фотона; N - количество фотонов; c - скорость электромагнитного излучения в вакууме; ω - объемная плотность энергии излучения; ρ - коэф. отражения.

2. Энергия фотона:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{или} \quad \varepsilon = h\omega,$$

где h - постоянная Планка: $h = \frac{h}{2\pi}$; ν - частота света; ω - круговая частота;

λ - длина волны.

3. Масса и импульс фотона:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}, \quad p = mc = \frac{h}{\lambda}.$$

§ 4.2. Примеры решения задач

4.2.1. Пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 663 \text{ Нм}$ падает нормально на зеркальную плоскую поверхность. Поток энергии $\Phi = 0,6 \text{ Вт}$. Определить силу F давления, испытываемую этой поверхностью, а так же число N фотонов, падающих на нее за время $t = 5 \text{ с}$.

Дано: $\lambda = 663 \text{ Нм} = 6,63 \times 10^{-7} \text{ м}$;

$\Phi = 0,6 \text{ Вт}$;

$\Delta t = 5 \text{ с}$.

Найти: $F = ?$

$N = ?$

Решение

Сила светового давления на поверхность равна произведению светового давления P на площадь S поверхности: $F = PS$.

Световое давление определим по формуле

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

Тогда сила давления будет определяться как

$$F = \frac{E_e S}{c}(1 + \rho).$$

Если поток энергии $\Phi = E_e S$, то сила давления $F = \frac{\Phi}{c}(1 + \rho)$.

Для зеркальной поверхности коэффициент отражения $\rho = 1$.

$$\text{Отсюда } F = \frac{0,6}{3 \cdot 10^8}(1 + 1) = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Н}.$$

Число N фотонов, падающих за время Δt на поверхность, определяется по формуле

$$N = \frac{\Delta W}{\varepsilon} = \frac{\Phi \Delta t}{\varepsilon}, \text{ где } \Delta W - \text{энергия излучения, получаемая за время } \Delta t.$$

Зная, что энергия фотона $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$, получим

$$N = \frac{\Phi \lambda \Delta t}{hc} = \frac{0,6 \cdot 6,63 \cdot 10^{-7} \cdot 5}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 10^{19} \text{ фотонов}.$$

Ответ: $N = 10^{19}$ фотонов.

4.2.2. Давление монохроматического света с длиной волны $\lambda = 500 \text{ Нм}$ на поверхность с коэффициентом отражения $\rho = 0,3$, расположенную перпендикулярно падающему свету, равно $0,2 \text{ мкПа}$. Определить число фотонов, падающих ежесекундно на единицу площади этой поверхности.

Дано: $\lambda = 5 \times 10^{-7} \text{ м}$;

$\rho = 0,3$;

$P = 2 \times 10^{-7} \text{ Па}$.

Найти: $N = ?$

Решение

Давление света на поверхность определяется:

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho), \quad \text{т.к.} \quad E_e = Nh\nu, \quad \text{а} \quad \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Тогда $P = \frac{Nh(1 + \rho)}{\lambda}.$

Выразим из этой формулы искомое число фотонов N :

$$N = \frac{P\lambda}{(1 + \rho)h} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{(1 + 0,3) \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}} = 1,16 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}.$$

Ответ: $N = 1,16 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}.$

4.2.3. Лазер на рубине излучает в импульсе длительностью $\tau = 0,5 \times 10^{-3} \text{ с}$ энергию $W = 1 \text{ Дж}$ в виде почти параллельного пучка с площадью сечения $S = 0,8 \text{ см}^2$. Длина волны лазера $\lambda = 0,694 \text{ мкм}$. Определить плотность потока фотонов в пучке и давление света на площадку, расположенную перпендикулярно пучку. Коэффициент отражения $\rho = 0,6$. (Расчет давления произвести с помощью корпускулярных представлений).

Дано: $\tau = 0,5 \times 10^{-3} \text{ с}$;

$W = 1 \text{ Дж}$;

$S = 0,8 \text{ см}^2$;

$$\lambda = 0,694 \times 10^{-6} \text{ м};$$

$$\rho = 0,6.$$

Найти: $j = ?$

$$P_c = ?$$

Решение

Согласно корпускулярной теории свет - это поток фотонов с энергией

$\epsilon = \frac{hc}{\lambda}$ и импульсом $p = \frac{h}{\lambda}$; тогда общее число фотонов, излучаемых лазером:

$$N = \frac{W}{h\nu} = \frac{W\lambda}{hc}.$$

Если мощность лазера постоянна в течение времени излучения, то плотность потока фотонов можно записать в виде

$$j = \frac{N}{S\tau}.$$

Подставив в это выражение число фотонов, получим:

$$j = \frac{W\lambda}{hcS\tau} = \frac{1 \cdot 0,694 \cdot 10^{-7} \cdot 10^3}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5} = 8,85 \cdot 10^{25} \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}.$$

Давление света на произвольную площадку определяется изменением импульса фотонов при их ударе об эту площадку. Отражение света равнозначно абсолютно упругому удару, поглощение – неупругому. Если за некоторый промежуток времени Δt о площадку ударяется ΔN фотонов, причем $\Delta N'$ из них отразится, то суммарное изменение импульса всех фотонов

$$\Delta p = \Delta p' \Delta N' + \Delta p'' (\Delta N - \Delta N').$$

Зная коэффициент отражения, равный отношению отраженной энергии к падающей

$$\rho = \frac{\Delta N' \epsilon}{\Delta N \epsilon},$$

можно найти число отраженных фотонов $\Delta N' = \rho \Delta N$.

Средняя за промежуток времени Δt сила $\langle F \rangle$, действующая на площадку со стороны фотонов, согласно II и III законов Ньютона:

$$\langle F \rangle \Delta t = -\Delta p,$$

Тогда давление света, испытываемое этой площадкой: $P_c = \langle F \rangle / S$.

Определим суммарное изменение импульса:

$$\Delta p = -p \Delta N (1 + \rho),$$

где p - импульс фотона.

Тогда сила, действующая на площадку,

$$\langle F \rangle = \frac{p(1 + \rho) \Delta N}{\Delta t}.$$

Давление света определяется:

$$P_c = \frac{p(1 + \rho) \Delta N}{S \Delta t}.$$

Так как плотность потока j фотонов не изменяется со временем и вдоль сечения светового пучка, то очевидно, что $j = \frac{\Delta N}{\Delta t S}$.

Учитывая, что импульс фотона $p = \frac{h}{\lambda}$, получим

$$P_c = \frac{h j (1 + \rho)}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 8,8 \cdot 10^{25} \cdot 1,6}{0,694 \cdot 10^{-6}} = 0,13 \text{ Па}.$$

Ответ: $P_c = 0,13 \text{ Па}$.

§ 4.3. Задачи для самостоятельного решения.

43. Определить поверхностную плотность I потока энергии излучения, падающего на зеркальную поверхность, если световое давление p при перпендикулярном падении лучей равно 10 мкПа .

44. Поток энергии Φ_e , излучаемый электрической лампой, равен 600 Вт. На расстоянии $r = 1$ м от лампы перпендикулярно падающим лучам расположено круглое плоское зеркальце диаметром $d = 2$ см. Принимая, что излучение лампы одинаково во всех направлениях и что зеркальце полностью отражает падающий на него свет, определить силу F светового давления на зеркальце.

45. На зеркальце с идеально отражающей поверхностью площадью $S = 1,5 \text{ см}^2$ падает нормально свет от электрической дуги. Определить импульс p , полученный зеркальцем, если поверхностная плотность потока излучения ϕ , падающего на зеркальце, равна $0,1 \text{ МВт/м}^2$. Продолжительность облучения $t = 1$ с.

46. Лазер на рубине излучает в импульсе длительностью $\tau = 0,5 \cdot 10^{-3}$ с энергию $W = 1$ Дж в виде почти параллельного пучка с площадью сечения $S = 0,8 \text{ см}^2$. Длина волны лазера $\lambda = 0,694$ мкм. Определить плотность потока фотонов в пучке и давление света на площадку, расположенную перпендикулярно пучку. Коэффициент отражения $\rho = 0,6$.

47. Определить давление p солнечного излучения на зачерненную пластинку, расположенную перпендикулярно солнечным лучам и находящуюся вне земной атмосферы на среднем расстоянии от Земли до Солнца. Солнечная постоянная $C = 1,4 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

48. Определить энергию ϵ , массу m и импульс p фотона, которому соответствует длина волны $\lambda = 380$ нм (фиолетовая граница видимого спектра).

49. Определить длину волны λ , массу m и импульс p фотона с энергией $\epsilon = 1$ МэВ. Сравнить массу этого фотона с массой покоящегося электрона.

50. Определить длину волны λ фотона, импульс которого равен импульсу электрона, обладающего скоростью $v = 10$ Мм/с.

51. Пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 663$ нм падает нормально на зеркальную плоскую поверхность. Поток энергии $\Phi_e = 0,6$ Вт.

Определить силу F давления, испытываемую этой поверхностью, а также число N фотонов, падающих на нее за время $t = 5$ с.

52. Давление p монохроматического света ($\lambda = 600$ нм) на черную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно $0,1$ мкПа. Определить число N фотонов, падающих за время $t = 1$ с на поверхность площадью $S = 1$ см².

53. Монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 500$ нм падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на нее с силой $F = 10$ нН. Определить число N_1 фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

54. Параллельный пучок монохроматического света ($\lambda = 662$ нм) падает на зачерненную поверхность и производит на нее давление $p = 0,3$ мкПа. Определить концентрацию n фотонов в световом пучке.

55. Параллельный пучок света длиной волны $\lambda = 500$ нм падает нормально на зачерненную поверхность, производя давление $p = 10$ мкПа. Определить: 1) концентрацию n фотонов в пучке, 2) число N_1 фотонов, падающих на поверхность площадью 1 м² за время 1 с.

5. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

§ 5.1. Основные законы и формулы

1. Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии определяется выражением

$$\lambda - \lambda_0 = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta),$$

где λ - длина волны рассеянного фотона; λ_0 - длина волны падающего фотона; h - постоянная Планка; m_0 - масса покоя электрона; c - скорость света в вакууме; θ - угол рассеяния.

2. Комптоновская длина волны: $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c}$.

§ 5.2. Примеры решения задач

5.2.1. Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения рассеивается веществом. При этом длины волн излучения, рассеянного под углом $\theta_1=60^\circ$ и $\theta_2=120^\circ$, отличаются друг от друга в $n=2$ раза. Считая, что рассеяние происходит на свободных электронах, найти длину волны падающего излучения.

Дано: $\theta_1=60^\circ$;

$\theta_2=120^\circ$;

$n=2$ раза.

Найти: $\lambda_0 = ?$

Решение

Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском рассеянии определяется выражением:

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

где $\Delta\lambda$ - изменение длины волны; h - постоянная Планка; m - масса электрона; c - скорость света; θ - угол рассеяния:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0.$$

Таким образом, имеем

$$\begin{cases} \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta_1), \\ \lambda_2 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta_2), \\ \lambda_2 = 2\lambda_1. \end{cases}$$

Решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} 2\lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta_2), \\ \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta_1). \end{cases}$$

Разделив первое уравнение на 2 и вычитая из первого второе, получим:

$$\begin{aligned} -\frac{\lambda_0}{2} &= \frac{h}{mc} \left[(1 - \cos\theta_1) - \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_2) \right]; \\ \lambda_0 &= \frac{2h}{mc} \left[\frac{1}{2}(1 - \cos\theta_2) - (1 - \cos\theta_1) \right] = \frac{2 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} \times \\ &\times \left[\frac{1}{2}(1 - \cos 120^\circ) - (1 - \cos 60^\circ) \right] = 0,012 \text{ \AA} = 0,12 \cdot 10^{-11} \text{ м}. \end{aligned}$$

Ответ: $\lambda_0 = 1,2 \text{ пм}$

5.2.2. Фотон с энергией $E = 250 \text{ МэВ}$ рассеялся под углом $\theta = 120^\circ$ на первоначально покоившемся свободном электроны. Какова энергия рассеянного фотона?

Дано: $h\omega_0 = 250 \cdot 10^6 \text{ эВ};$

$\theta = 120^\circ.$

Найти: $E_{\text{рас.}} = ?$

Решение

Эффект Комптона: $\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$. Энергия рассеянного фотона

$E_{\text{рас.}} = h\nu$, где ν - частота рассеяния; $\nu = \frac{c}{\lambda}$, λ - длина рассеянного фотона

$E_{\text{рас.}} = \frac{hc}{\lambda}$. Используя формулу Комптона, имеем: $\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$.

Тогда $E_{\text{рас.}} = \frac{hc}{\frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) + \lambda_0}$, где λ_0 - длина волны падающего фотона.

$E = h\omega_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$, следовательно,

$$\begin{aligned} E_{\text{рас.}} &= \frac{hc}{\frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) + \frac{hc}{E}} = \frac{mc^2 E}{1,5E + mc^2} = \\ &= \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,5 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} + 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}} = 23,23 \cdot 10^{-15} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Ответ: $E_{\text{рас.}} = 0,145 \text{ МэВ}$

5.2.3. В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол $\theta = 90^\circ$. Энергия рассеяния фотона $\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$. Определить энергию фотона ε_1 до рассеяния.

Дано:

$$\theta = 90^\circ$$

$$\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$$

Найти:

$$\varepsilon_1 - ?$$

Решение.

Для определения энергии первичного фотона воспользуемся формулой Комптона

$$\Delta\lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \text{ где } \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 - \text{изменение длины волны фотона в ре-}$$

зультате рассеяния на свободном электро-не; h - постоянная Планка; m_0 - масса покоя электрона; c - скорость света в вакууме; θ - угол рассеяния фотона.

Изменение длины волны при эффекте Комптона $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

Выразим длины волн λ_1 и λ_2 через энергии ε_1 и ε_2 соответствующих фотонов,

воспользовавшись формулой
$$\varepsilon = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Изменение длины волны при эффекте Комптона в результате выше пере-численных преобразований представлено в виде:
$$\frac{hc}{\varepsilon_2} - \frac{hc}{\varepsilon_1} = \frac{hc}{m_0 c^2} 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Сократим на hc и выразим из полученной формулы искомую энергию:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2 m_0 c^2}{m_0 c^2 - \varepsilon_2 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{\varepsilon_2 E_0}{E_0 - 2\varepsilon_2 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}, \quad (2)$$

где $E_0 = m_0 \cdot c^2$ - энергия покоя электрона.

Вычисления по формуле (2) удобнее вести во внесистемных единицах. Взяв из справочных таблиц (см. справочную табл.) значение энергии покоя электро-на в мегаэлектрон-вольтах и подставив числовые данные, получим

$$\varepsilon_1 = \frac{0,4 \cdot 0,511}{0,511 - 2 \cdot 0,4 \sin^2 \frac{90^\circ}{2}} \text{ МэВ} = 1,85 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $\varepsilon_1 = 1,85 \text{ МэВ}.$

§ 5.3. Задачи для самостоятельного решения

56. В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол $\theta = 90^\circ$. Энергия ε' рассеянного фотона равна 0,4 МэВ. Определить энергию ε фотона до рассеяния.

57. Рентгеновское излучение длиной волны $\lambda = 55,8$ пм рассеивается графитовой пластинкой. Определить длину волны λ' света, рассеянного под углом $\theta = 60^\circ$ к направлению падающего пучка света.

58. Определить максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии: 1) на свободных электронах; 2) на свободных протонах.

59. Определить угол θ рассеяния фотона на свободном электроны, если изменение длины волны $\Delta\lambda$ при рассеянии равно 3,62 пм.

60. Фотон с энергией $\varepsilon = 0,4$ мэВ рассеялся под углом $\theta = 90^\circ$ на свободном электроны. Определить энергию ε' рассеянного фотона и кинетическую энергию T электрона отдачи.

61. Фотон с энергией $\varepsilon = 0,75$ МэВ рассеялся на свободном электроны под углом $\theta = 60^\circ$. Принимая, что кинетическая энергия и импульс электрона до соударения с фотоном были пренебрежимо малы, определить: 1) энергию ε' рассеянного фотона; 2) кинетическую энергию T электрона отдачи;

62. Определить импульс p электрона отдали при эффекте Комптона, если фотон с энергией, равной энергии покоя электрона, был рассеян на угол $\theta = 180^\circ$.

63. Какая доля энергии фотона при эффекте Комптона приходится на электрон отдачи, если фотон претерпел рассеяние на угол $\theta = 180^\circ$? Энергия ε фотона до рассеяния равна 0,255 МэВ.

64. Фотон с энергией $\varepsilon = 0,25$ МэВ рассеялся на свободном электроны. Энергия ε' рассеянного фотона равна 0,2 МэВ. Определить угол рассеяния θ .

65. Угол рассеяния θ фотона равен 90° . Угол отдачи ϕ электрона равен 30° . Определить энергию ε падающего фотона.

66. Фотон ($\lambda = 1$ пм) рассеялся на свободном электроны под углом $\theta = 90^\circ$. Какую долю своей энергии фотон передал электрону?

67. Длина волны λ фотона равна комптоновской длине λ_c электрона. Определить энергию ε и импульс p фотона.

68. Энергия ϵ падающего фотона равна энергии покоя электрона. Определить долю ω_1 энергии падающего фотона, которую сохранит рассеянный фотон, и долю ω_2 этой энергии, полученную электроном отдачи, если угол рассеяния θ равен: 1) 60° ; 2) 90° ; 3) 180° .

69. Пучок рентгеновского излучения рассеивается веществом на свободном электроне. При этом длины волн излучения, рассеянного под углом $\theta_1 = 60^\circ$ и $\theta_2 = 120^\circ$, отличаются друг от друга в $n = 2$ раза. Найти длину волны падающего излучения.

70. Фотон при эффекте Комптона на свободном электроне был рассеян на угол $\theta = \pi/2$. Определить импульс p (в МэВ/с), приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была $\epsilon_1 = 1,02$ МэВ.

71. Какая доля энергии фотона приходится при эффекте Комптона на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол $\theta = \pi/4$? Энергия фотона до рассеяния $\epsilon_1 = 0,51$ МэВ.

72. Фотон с длиной волны $\lambda_1 = 16$ пм рассеялся на свободном электроне. Длина волны рассеянного фотона $\lambda_2 = 17$ пм. Определить угол θ рассеяния.

73. В результате эффекта Комптона фотон с энергией $\epsilon_1 = 1,02$ МэВ был рассеян на свободных электронах на угол $\theta = 135^\circ$. Определить энергию ϵ_2 рассеянного фотона.

74. Определить угол ϑ , на который был рассеян γ -квант с энергией $\epsilon_1 = 1,56$ МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи $T = 0,51$ МэВ.

75. Фотон с энергией $\epsilon_1 = 0,55$ МэВ был рассеян при эффекте Комптона на свободном электроне на угол $\theta = 120^\circ$. Определить кинетическую энергию T электрона отдачи.

76. Определить максимальное изменение длины волны $(\Delta\lambda)_{\max}$ при комптоновском рассеянии света на свободных электронах и свободных протонах.

6. ТЕОРИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

§ 6.1. Основные законы и формулы

1. Обобщенная формула Бальмера, описывающая серии в спектре водорода:

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

где ν - частота спектральных линий в спектре атома водорода; R - постоянная Ридберга; m - определяет серию ($m=1, 2, 3, \dots$); n - определяет отдельные линии соответствующей серии ($n=m+1, m+2, \dots$): $m=1$ (серия Лаймана), $m=2$ (серия Бальмера), $m=3$ (серия Пашена), $m=4$ (серия Брэкета), $m=5$ (серия Пфунда), $m=6$ (серия Хэмфри).

2. Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний):

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

где m_e - масса электрона; v_n - скорость электрона по n -й орбите радиусом r_n .

3. Второй постулат Бора (правило частот):

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где E_n и E_m - соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения).

4. Энергия электрона на n -й стационарной орбите:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где z - порядковый номер элемента в системе Менделеева; ϵ_0 - электрическая постоянная.

§ 6.2. Примеры решения задач

6.2.1. *Определить радиус орбиты r_1 электрона для стационарного состояния атома водорода. Определить скорость электрона при его движении по этой орбите и циклическую частоту вращения, считая массу электрона бесконечно малой по сравнению с массой ядра.*

Дано:

$$n=1;$$

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Найти: $r_1=?$;

$$v_1=?;$$

$$\omega_1=?.$$

Решение

Так как масса электрона бесконечно мала по сравнению с массой ядра, то можно считать ядро неподвижным. Тогда закон движения электрона в кулоновском поле ядра имеет вид

$$\frac{mv_1^2}{r_1} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}, \quad (1)$$

где m , e , v - масса, заряд и скорость электрона. Из правила квантования орбит следует, что для первой стационарной орбиты ($n=1$)

$$mv_1 r_1 = h. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует:

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 h^2}{me^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad v_1 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 h} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м / с} ..$$

Зная период обращения $T_1 = \frac{2\pi r_1}{v_1}$ электрона по орбите, можно найти

циклическую частоту: $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \frac{v_1}{r_1} = 4,2 \cdot 10^{16} \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$

Ответ: $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}; v_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \omega_1 = 4,2 \cdot 10^{16} \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$

6.2.2. Какую наименьшую энергию в электрон-вольтах должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов появились все линии всех серий спектра водорода? Какую при этом наименьшую скорость должны иметь эти электроны?

Дано:

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Найти:

$$v_{\min} = ?$$

Решение

Все линии всех серий спектра водорода появятся при ионизации атома водорода. Энергия ионизации равна работе, совершаемой при удалении электрона с нормальной орбиты (где $n=1$) в бесконечность (где $n=\infty$). Тогда

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

где R - постоянная Ридберга, k и n - номера орбиталей. Подставив $k=1$, $n=\infty$, получим:

$$E_i = hcR = 13,6 \text{ эВ}.$$

Такую энергию должны иметь электроны, чтобы ионизировать атом водорода. При этом появятся все линии спектра. Скорость электронов, соответствующую этой энергии, найдем из соотношения, выражающего закон сохранения энергии:

$$\frac{mv_{\min}^2}{2} = E_i.$$

Отсюда $v_{\min} = \sqrt{\frac{2E_i}{m}} = 2,2 \times 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, где m - масса электрона.

Ответ: $v_{\min} = 2,2 \times 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

6.2.3. *Определить скорость, которую приобрел покоившийся атом водорода в результате излучения фотона при переходе из первого возбужденного состояния в основное. На сколько процентов отличается энергия испущенного фотона от энергии данного перехода?*

Дано:

$k=1$;

$n=2$.

Найти:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = ?$$

Решение

Согласно законам сохранения энергии и импульса

$$\varepsilon = \hbar\omega + \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

$$\frac{\hbar\omega}{c} = mv, \quad (2)$$

где в последней формуле слева записан импульс фотона; m , v - масса и скорость атома водорода; $\hbar\omega$ - энергия фотона.

Энергия возбуждения атома:

$$\varepsilon = hcR \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{3}{4} hRc, \quad (3)$$

где $k=1$, $n=2$.

Решая совместно (1) и (2), получим квадратное уравнение для V :

$$v^2 + 2cv - \frac{2E}{m} = 0, \quad (4)$$

положительный корень которого дается выражением с учетом (3):

$$v = c \left(\sqrt{\frac{3hR}{2mc}} + 1 - 1 \right) \approx 3,27 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Далее } \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \times 100\% = \frac{mv^2}{2E} \times 100\% = \frac{2mv^2}{3hRc} \times 100\% \approx 5,5 \cdot 10^{-7}\%.$$

$$\text{Ответ: } \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \approx 5,5 \cdot 10^{-7}\%.$$

6.2.4. Атом в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны $\lambda = 121,5 \text{ нм}$. Определить радиус r электронной орбиты возбужденного атома водорода.

Дано:

$$n=1;$$

$$\lambda = 121,5 \text{ нм}.$$

Найти:

$$r=?$$

Решение

Длина волны света, поглощенного атомом водорода при переходе электрона с одной орбиты на другую, задается выражением:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (1)$$

Поскольку первоначально атом водорода находился в основном состоянии, то полагая в (1) $n_1=1$ и выражая n_2 , которое считаем равным n ($n_2=n$), получаем:

$$n = \sqrt{\frac{\lambda R}{\lambda R - 1}}. \quad (2)$$

После подстановки численных значений $\lambda=1,215 \times 10^{-7}$ м, $R=1,1 \times 10^7$ м⁻¹ получим $n=2$, то есть электрон переходит на вторую орбиту. Для расчета ее радиуса запишем уравнение квантования и второй закон Ньютона для движения электрона на n -й орбите: $mvr = nh$, (3)

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}. \quad (4)$$

Решаем систему уравнений (3), (4) относительно r , после чего получаем:

$$r = n \frac{4\pi\epsilon_0 h^2}{me^2} = \sqrt{\frac{\lambda R}{\lambda R - 1}} \frac{4\pi\epsilon_0 h^2}{me^2}; \quad (5)$$

подставив сюда численные значения величин, получим ответ:

$$r = 2,11 \times 10^{-10} \text{ м.}$$

Ответ: $r = 2,11 \times 10^{-10}$ м.

6.2.5. Вычислить энергию ϵ фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с пятого энергетического уровня на второй, и его циклическую частоту.

Дано:

$n_1=2$;

$n_2=5$.

Найти:

$\epsilon=?$

Решение

Энергия электрона, находящегося на n -й орбите, дается формулой:

$$E_n = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2 h^2 n^2}. \quad (1)$$

Энергия фотона равна разности энергий электрона на $n_1=5$ и $n_2=2$ энергетических уровнях. Подставляя в (1) поочередно эти значения и вычисляя разность полученных величин, находим:

$$\varepsilon = E_{n1} - E_{n2} = \frac{me^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2n^2} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{25} \right). \quad (2)$$

После подстановки численных значений находим:

$$\varepsilon = 2,86 \text{ эВ} = 4,57 \times 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Частоту находим после деления этой величины на постоянную Планка:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\hbar} = 4,35 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Ответ: $\varepsilon = 2,86 \text{ эВ}$; $\omega = 4,35 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

6.2.5. *Электрон в атоме водорода перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.*

Дано:

$$n_1 = 2$$

$$n_2 = 4$$

Найти:

$$\varepsilon - ?$$

Решение.

Для определения энергии фотона воспользуемся серийной формулой для водородоподобных ионов:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (1)$$

где λ - длина волны фотона; R - постоянная Ридберга; Z - заряд ядра в относительных единицах (при $Z = 1$ формула переходит в серийную формулу для водорода); n_1 - номер орбиты, на которую перешел электрон; n_2 - номер орбиты, с которой перешел электрон (n_1 и n_2 - главные квантовые числа).

Энергия фотона ε выражается формулой

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}.$$

Поэтому, умножив обе части равенства (1) на hc , получим выражение для

энергии фотона

$$\varepsilon = R \cdot h \cdot c \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Так как величина $R \cdot h \cdot c$ есть энергия ионизации E_1 атома водорода, то

$$\varepsilon = E_1 Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Вычисления выполним во внесистемных единицах: $E_1 = 13,6$ эВ (см. справочную табл. 1); $Z = 1$ (заряд ядра атома водорода в относительных единицах, где за единицу заряда принято абсолютное значение заряда электрона); $n_1 = 2$; $n_2 = 4$;

$$\varepsilon = 13,6 \cdot 1^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right) \text{эВ} = 13,6 \frac{3}{16} \text{эВ} = 2,55 \text{эВ}.$$

Ответ: $\varepsilon = 2,55 \text{эВ}$

§ 6.3. Задачи для самостоятельного решения

77. Вычислить радиус первой орбиты атома водорода (Боровский радиус) и скорость электрона на этой орбите.

78. Вычислить радиусы r_2 и r_3 второй и третьей орбит в атоме водорода.

79. Определить скорость электрона на второй орбите атома водорода и частоту обращения электрона на этой же орбите.

80. Определить потенциальную Π , кинетическую T и полную E энергии электрона, находящегося на первой орбите атома водорода.

81. Определить длину волны λ , соответствующую третьей спектральной линии в серии Бальмера.

82. Найти наибольшую λ_{max} наименьшую λ_{min} длины волн в первой инфракрасной серии спектра водорода (серии Пашена).

83. Вычислить энергию ε и частоту ν фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на первый.

84. Определить наименьшую ε_{min} и наибольшую ε_{max} энергии фотона в ультрафиолетовой серии спектра водорода (серии Лаймана).

85. Какую наименьшую энергию в электрон-вольтах должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов появились все линии всех серий спектра водорода? Какую при этом наименьшую скорость должны иметь эти электроны?

86. Фотон с энергией $\varepsilon = 16,5$ эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость v будет иметь электрон вдали от ядра атома?

87. Вычислить частоты f_1 и f_2 вращения электрона в атоме водорода на второй и третьей орбитах. Сравнить эти частоты с частотой ν излучения при переходе электрона с третьей на вторую орбиту.

88. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны $\lambda = 121,5$ нм. Определить радиус r электронной орбиты возбужденного атома водорода.

89. Определить первый потенциал U_i возбуждения атома водорода.

90. Атом в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны $\lambda = 121,5$ нм. Определить радиус r электронной орбиты возбужденного атома водорода.

7. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

§ 7.1. Основные законы и формулы

1. Соотношения де Бройля для энергии и импульса частицы:

$$E = \hbar\omega, \quad p = \hbar k,$$

где ω - частота дебройлевской волны; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число.

2. В релятивистском случае связь длины волны со скоростью частицы

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

где m_0 - масса покоя частицы, c - скорость света.

3. Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim \hbar,$$

где Δx и Δp_x - неопределенности координаты и соответствующей компоненты импульса частицы.

4. Связь длины волны де Бройля с кинетической энергией K частицы в классическом приближении: $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_0 T}}$; в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{T(T + 2E_0)}}, \quad \text{где } E_0 = mc^2 - \text{энергия покоя частицы.}$$

5. Постоянная Планка: $\hbar = 2\pi h$.

§ 7.2. Примеры решения задач

7.2.1. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона и протона, движущихся с кинетической энергией 2 кэВ. При каких значениях кинетической энергии их длина волны будет 100 нм?

Дано: $T = 2 \times 10^3$ эВ = $3,2 \times 10^{-16}$ Дж;

$$\lambda = 100 \text{ пм} = 1 \times 10^{-10} \text{ м.}$$

Найти: $\lambda_1, \lambda_2, E_1, E_2 = ?$

Решение

Связь импульса с кинетической энергией частицы дается выражением:

$$\frac{p^2}{2m} = T. \quad (1)$$

Длина волны связана с импульсом при помощи выражения:

$$p = hk = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и выражая далее длину волны, получаем:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mT}}. \quad (3)$$

В это выражение подставим массы электрона $m_1 = 9,1 \times 10^{-31}$ кг, протона $m_2 = 1,67 \times 10^{-27}$ кг и значение энергии T :

$$\lambda_1 = 2,76 \times 10^{-11} \text{ м}, \lambda_2 = 6,45 \times 10^{-13} \text{ м.}$$

Выражая из (3) энергию, получим

$$T = \frac{h^2}{2m\lambda^2}. \quad (4)$$

Подставляя сюда значение λ , а также приведенные выше массы электрона и протона, получим:

$$T_1 = 2,4 \times 10^{-17} \text{ Дж} = 0,15 \text{ кэВ}, T_2 = 1,31 \times 10^{-20} \text{ Дж} = 0,082 \text{ эВ.}$$

$$\text{Ответ: } \lambda_1 = 2,76 \times 10^{-11} \text{ м}; \lambda_2 = 6,45 \times 10^{-13} \text{ м}; T_1 = 0,15 \text{ кэВ}, T_2 = 0,082 \text{ эВ.}$$

7.2.2. При какой скорости электрона его длина волны равна комптоновской длине?

Дано:

$$m_0 = 9,1 \times 10^{-31} \text{ кг};$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ м/с.}$$

Найти:

$$v = ?$$

Решение

Если для длины волны электрона воспользоваться нерелятивистской формулой:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}, \quad (1)$$

и приравнявая ее компоновской длине электрона:

$$\lambda_k = \frac{h}{m_0 c}, \quad (2)$$

то получим, что скорость электрона должна равняться скорости света, что противоречит основным принципам теории относительности. Поэтому для длины волны электрона целесообразно использовать релятивистскую формулу:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (3)$$

где $\beta = \frac{v}{c}$, а c - скорость света. Приравняв между собой (3) и (2), получим:

$$\beta^2 = 2; \quad v = \frac{c}{\sqrt{2}} = 2,12 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Ответ: $v = \frac{c}{\sqrt{2}} = 2,12 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$

7.2.3. Найти кинетическую энергию электронов, падающих нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, если на экране, отстоящем от диафрагмы на $l=75 \text{ см}$, расстояние между соседними максимумами $\Delta x=7,5 \text{ мкм}$. Расстояние между щелями $d=25 \text{ мкм}$.

Дано: $l=0,75 \text{ м}$;

$d=2,5 \times 10^{-5} \text{ м}$;

$\Delta x=7,5 \times 10^{-6} \text{ м}$.

Найти: $T=?$

Решение

При интерференции волн от двух источников, которыми в данном случае являются две щели, возникает картина из чередующихся максимумов и минимумов.

Расстояние Δx между соседними максимумами дается выражением:

$$\Delta x = \frac{1\lambda}{d}, \quad (1)$$

где λ - длина волны падающих на диафрагму с щелями электронов. Учтем приведенную в задаче связь длины волны частиц с их энергией:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mT}}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и выражая из полученной формулы энергию, получим:

$$T = \frac{1}{2m} \left(\frac{1h}{\Delta x d} \right)^2, \quad (3)$$

что после подстановки численных значений величин и $m=9,1 \times 10^{-31}$ кг, дает:

$$T=38,4 \times 10^{-19} \text{ Дж} = 24 \text{ эВ}.$$

Ответ: $T=24$ эВ.

7.2.4. Плоский поток частиц падает нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, образуя на экране дифракционную картину. Показать, что попытка определить, через какую щель прошла та или иная частица (например, с помощью индикатора И) приводит к разрушению дифракционной картины. Углы дифракции считать малыми.

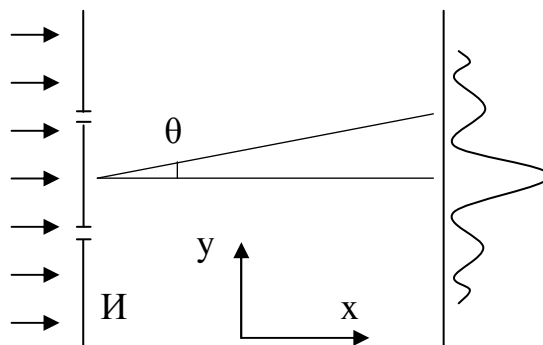


Рис 7.1.

Решение

Пусть θ - угол между нормалью к плоскости щелей и лучем. Чтобы установить, через какую щель прошла частица, ее y - координата должна быть определена индикатором И с погрешностью $\Delta y < \frac{d}{2}$, где d - расстояние между щелями. В соответствии с соотношением неопределенностей это означает, что индикатор должен вносить неопределенность в y - проекцию импульса частицы:

$$\Delta p_y \geq \frac{2h}{d}. \quad (1)$$

В то же время условие того, что дифракционная картина не будет нарушена,

$$\text{есть} \quad \Delta p_y \ll p_\theta, \quad (2)$$

где $p = \frac{h}{\lambda}$, $\theta \approx \frac{\lambda}{d}$, λ - длина волны частицы. То есть (2) принимает вид:

$$\Delta p_y \ll \frac{h}{d}. \quad (3)$$

Таким образом, вносимая индикатором неопределенность импульса Δp_y оказывается значительно большей (1), чем неопределенность Δp_y , при которой дифракционная картина сохраняется (3), что, естественно, ее уничтожает.

7.2.5. *Электрон с кинетической энергией $T=10$ эВ локализован в области размером $l=1$ мкм. Определить относительную неопределенность скорости электрона.*

Дано: $T=10$ эВ= $1,6 \times 10^{-18}$ Дж;

$l=1$ мкм= 10^{-6} м.

Найти: $\Delta v/v=?$

Решение

Согласно принципу неопределенности

$$\Delta p \Delta x \sim h, \quad (1)$$

где $\Delta p = m\Delta v$ - неопределенность импульса, а $\Delta x = \frac{1}{2}$ - неопределенность координаты. Выражая отсюда Δv , получим:

$$\Delta v \sim \frac{2h}{ml}. \quad (2)$$

С другой стороны, между скоростью и кинетической энергией есть связь

$$T = \frac{mv^2}{2} \quad (3)$$

или
$$v = \sqrt{\frac{2T}{m}} \quad (4)$$

Деля (2) на (4), получим:

$$\frac{\Delta v}{v} \sim \frac{2h}{l} \sqrt{\frac{1}{2Tm}},$$

что после подстановки численных значений величин дает $\frac{\Delta v}{v} = 1,2 \cdot 10^{-4}$.

Ответ: $\frac{\Delta v}{v} = 1,2 \cdot 10^{-4}$.

7.2.6. Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U . Найти длину волны де Бройля λ для двух случаев: 1) $U_1 = 5 \text{ В}$; 2) $U_2 = 510 \text{ кВ}$.

Дано:

$$U_1 = 5 \text{ В}$$

$$U_2 = 510 \text{ кВ}$$

Найти:

$$\lambda_1 - ?$$

$$\lambda_2 - ?$$

Решение

Длина волны де Бройля для частицы зависит от ее импульса p и определяется формулой

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где h - постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна ее кинетическая энергия T . Связь импульса с кинетической энергией различна для нерелятивистского случая (когда кинетическая энергия частицы много меньше энергией ее покоя) и для релятивистского случая (когда кинетическая энергия сравнима с энергией покоя частицы). В нерелятивистском случае

$$p = \sqrt{2m_0 T}, \quad (2)$$

где m_0 - масса покоя частицы. В релятивистском случае

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + T)T}, \quad (3)$$

где $E_0 = m_0 c^2$ - энергия покоя частицы.

Формула (1) с учетом соотношений (2) и (3) запишется: в нерелятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 T}}, \quad (4)$$

в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + T)T}}. \quad (5)$$

Сравним кинетические энергии электрона, прошедшего заданные в условии задачи разности потенциалов $U_1 = 51$ В и $U_2 = 510$ кВ, с энергией покоя электрона, и в зависимости от этого решим, которую из формул (4) или (5) следует применить для вычисления длины волны де Бройля.

Как известно, кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую

разность потенциалов U ,

$$T = eU.$$

В первом случае $T_1 = e \cdot U_1 = 51 \text{ эВ} = 0,51 \cdot 10^{-4} \text{ МэВ}$, что много меньше энергии покоя электрона $E_1 = m_0 c^2 = 0,51 \text{ МэВ}$. Следовательно, в этом случае можно применить формулу (4). Для упрощения расчетов заметим, что $T_1 = 10^{-4} m_0 c^2$. Подставив это выражение в формулу (4), перепишем ее в виде

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_0 \cdot 10^{-4} \cdot m_0 c^2}} \cdot \frac{10^2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{h}{m_0 c}.$$

Учтя, что $\frac{h}{m_0 c}$ есть комптоновская длина волны λ_c для электрона, получим

$$\lambda_1 = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \lambda_c.$$

Так как $\lambda_c = 2,43 \text{ пм}$, то

$$\lambda_1 = \frac{10}{\sqrt{2}} \cdot 2,43 \text{ пм} = 17,1 \text{ пм}.$$

Во втором случае кинетическая энергия $T_2 = e \cdot U_2 = 510 \text{ кэВ} = 0,51 \text{ МэВ}$, т.е. равна энергии покоя электрона. В этом случае необходимо применить релятивистскую формулу (5). Учитывая, что $T_2 = 0,51 \text{ МэВ} = m_0 c^2$, по формуле (5) найдем

$$\lambda_2 = \frac{h}{\frac{1}{c} \sqrt{(2m_0 c^2 + m_0 c^2) m_0 c^2}} = \frac{h}{\sqrt{3} m_0 c},$$

или

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_c}{\sqrt{3}}.$$

Подставим значение λ_c и произведем вычисления:

$$\lambda_2 = \frac{2,43}{\sqrt{3}} \text{ пм} = 1,40 \text{ пм}.$$

Ответ: $\lambda_1 = 171 \text{ нм}$; $\lambda_2 = 1,40 \text{ нм}$.

7.2.7. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка $T = 10 \text{ эВ}$. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

Дано:

$$T = 10 \text{ эВ}$$

Найти:

$$\ell_{\min} - ?$$

Решение

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид $\Delta x \Delta p \geq \hbar$, где Δx - неопределенность координаты частицы (в данном случае электрона); Δp - неопределенность импульса частицы (электрона); $\hbar$ - постоянная Планка h , деленная на 2π .

Из соотношения неопределенностей следует, что чем точнее определяется положение частицы в пространстве, тем более неопределенным становится импульс, а следовательно, и энергия частицы. Пусть атом имеет линейные размеры ℓ , тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью

$$\Delta x = \frac{\ell}{2}. \quad (1)$$

Соотношение неопределенностей (1) можно записать в этом случае в виде

$$\frac{\ell}{2} \Delta p \geq \hbar,$$

откуда

$$\ell \geq \frac{2\hbar}{\Delta p}. \quad (2)$$

Физически разумная неопределенность импульса Δp во всяком случае не должна превышать значения самого импульса p , т.е. $\Delta p \leq p$.

Импульс p связан с кинетической энергией T соотношением, $p = \sqrt{2mT}$.

Заменим Δp значением $\sqrt{2mT}$ (такая замена не увеличит ℓ).

Переходя от неравенства к равенству, получим

$$\ell_{\min} = \frac{2\hbar}{\sqrt{2mT}}.$$

Подставим числовые значения и произведем вычисления:

$$\ell_{\min} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}} \text{ м} = 1,24 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 124 \text{ пм}.$$

Ответ: $\ell_{\min} = 124 \text{ пм}$.

§ 7.3. Задачи для самостоятельного решения

91. Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U . Найти длину волны де Бройля λ для двух случаев: 1) $U_1 = 6 \text{ В}$; 2) $U_2 = 520 \text{ кВ}$.

92. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона и протона, движущихся с кинетической энергией 2 кэВ . При каких значениях кинетической энергии их длина волны будет 100 пм ?

93. При какой скорости электрона его длина волны равна комптоновской длине?

94. Электрон движется со скоростью 200 Мм/с . Определить длину волны де Бройля λ , учитывая изменение массы электрона в зависимости от скорости.

95. Найти длину волны де Бройля λ для электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода, находящегося в основном состоянии.

96. Определить длину волны де Бройля λ , электрона, находящегося на второй орбите атома водорода.

97. Определить длину волны де Бройля λ электронов, бомбардирующих антикатод рентгеновской трубки, если граница сплошного рентгеновского спектра приходится на длину волны $\lambda = 3 \text{ нм}$.

98. Электрон движется по окружности радиусом $r = 0,5$ см в однородном магнитном поле с индукцией $B = 8$ мТл. Определить длину волны де Бройля λ электрона.

99. На узкую щель шириной, $a = 1$ мкм направлен параллельный пучок электронов, имеющих скорость $v = 3,65$ Мм/с. Учитывая волновые свойства электронов, определить расстояние x между двумя максимумами интенсивности первого порядка в дифракционной картине, полученной на экране, отстоящем на $L = 10$ см от щели.

100. Найти кинетическую энергию электронов, падающих нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, если на экране, отстоящем от диафрагмы на $\ell = 75$ см, расстояние между соседними максимумами $\Delta x = 7,5$ мкм. Расстояние между щелями $d = 25$ мкм.

101. На грань кристалла никеля падает параллельный пучок электронов. Кристалл поворачивают так, что угол скольжения θ изменяется. Когда этот угол делается равным 64° , наблюдается максимальное отражение электронов, соответствующее дифракционному максимуму первого порядка. Принимая расстояние d между атомными плоскостями кристалла равным 200 пм, определить длину волны де Бройля λ электронов и их скорость v .

102. Известно, что фазовая скорость $v = \omega/k$. Найти выражения фазовой скорости волн де Бройля в нерелятивистском и релятивистском случаях.

103. Кинетическая энергия T электрона в атоме водорода составляет величину порядка 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

104. Определить неточность Δx в определении координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью $v = 1,5 \cdot 10^6$ м/с, если допускаемая неточность Δv в определении скорости составляет 10% от ее величины. Сравнить полученную неточность с диаметром d атома водорода, вычисленным по

теории Бора для основного состояния, и указать, применимо ли понятие траектории в данном случае.

105. Электрон с кинетической энергией $T = 15$ эВ находится в металлической пылинке диаметром $d = 1$ мкм. Оценить относительную неточность Δv , с которой может быть определена скорость электрона.

106. Во сколько раз дебройлевская длина волны λ частицы меньше неопределенности Δx ее координаты, которая соответствует относительной неопределенности импульса в 1%?

107. Приняв, что минимальная энергия E нуклона в ядре равна 10 МэВ, оценить, исходя из соотношения неопределенностей, линейные размеры ядра.

108. Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть моноэнергетический пучок электронов ($T = 10$ эВ) падает на щель шириной a . Можно считать, что если электрон прошел через щель, то его координата известна с неточностью $\Delta x = a$. Оценить получаемую при этом относительную неточность в определении импульса $\Delta p/p$ электрона.

109. Пылинки массой $m = 10^{-12}$ г взвешены в воздухе и находятся в тепловом равновесии. Можно ли установить, наблюдая за движением пылинок, отклонение от законов классической механики? Принять, что воздух находится при нормальных условиях, пылинки имеют сферическую форму. Плотность вещества, из которого состоят пылинки, равна $2 \cdot 10^3$ кг/м³.

110. Используя соотношение неопределенности $\Delta E \Delta t \geq \hbar$, оценить ширину Γ энергетического уровня в атоме водорода, находящегося: 1) в основном состоянии; 2) в возбужденном состоянии (время τ жизни атома в возбужденном состоянии равно 10^{-8} с).

111. Используя соотношение неопределенностей энергии и времени, определить естественную ширину $\Delta \lambda$ спектральной линии излучения атома при переходе его из возбужденного состояния в основное. Среднее время τ жизни

атома в возбужденном состоянии принять равным 10^{-8} с, а длину волны λ излучения – равной 600 нм.

112. Вычислить длину волны λ де Бройля для тепловых ($T = 300$ К) нейтронов. Следует ли учитывать волновые свойства нейтронов при анализе их взаимодействия с кристаллом? Расстояние между атомами в кристалле принять равным 0,5 нм.

113. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти протон, чтобы дебройлевская длина волны λ была равна: 1) 2 нм; 2) 2 пм?

114. Вычислить длину волны λ де Бройля альфа частицы, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U , равную: 1) 1 МВ; 2) 1 ГВ.

115. Протон обладает кинетической энергией $T = 1$ кэВ. Определить величину дополнительной энергии ΔT , которую необходимо ему сообщить для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась в четыре раза.

116. Кинетическая энергия T электрона равна удвоенному значению его энергии покоя ($2m_0c^2$). Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.

117. Вычислить длину волны λ де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией $T = 13,6$ эВ (энергия ионизации атома водорода). Сравнить полученное значение λ с диаметром d атома водорода (найти отношение λ/d). Нужно ли учитывать волновые свойства электрона при изучении движений электрона в атоме водорода? Диаметр атома водорода принять равным удвоенному значению боровского радиуса.

118. Вычислить длину волны де Бройля для тепловых ($T = 400$ К) нейтронов. Следует ли учитывать волновые свойства нейтронов при анализе их взаимодействия с кристаллом? Расстояние между атомами в кристалле принять равным 0,5 нм.

8. УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА

§ 8.1. Основные законы и формулы

1. Вероятность нахождения частицы в объеме dV :

$$dW = \psi \psi^* dV = |\psi|^2 dV,$$

где $\psi = \psi(x, y, z, t)$ - волновая функция, описывающая состояние частицы;
 ψ^* - функция, комплексно сопряженная с ψ ; $|\psi|^2 = \psi \psi^*$ - квадрат модуля волновой функции.

Для стационарных состояний

$$dW = \psi \psi^* dV = |\psi|^2 dV,$$

где $\psi = \psi(x, y, z)$ - координатная (амплитудная) часть волновой функции.

2. Условие нормировки вероятностей:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dV = 1,$$

где интегрирование производится по всему бесконечному пространству, то есть по координатам x, y, z от $-\infty$ до $+\infty$.

3. Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2 :

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

4. Среднее значение физической величины L , характеризующей частицу, находящуюся в состоянии, описываемом волновой функцией ψ :

$$\langle L \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} L |\psi|^2 dV.$$

5. Общее уравнение Шредингера (уравнение Шредингера, зависящее от времени): $-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U(x, y, z, t)\psi = i\hbar\frac{\partial \psi}{\partial t}$,

где $\psi = \psi(x, y, z, t)$ - волновая функция, описывающая состояние частицы;

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$; m - масса частицы, Δ - оператор Лапласа

$\left(\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)$; $i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица; $U = U(x, y, z, t)$ - по-

тенциальная энергия частицы в силовом поле, в котором она движется.

6. Уравнение Шредингера для стационарных состояний.

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0,$$

где $\psi = \psi(x, y, z)$ - координатная часть волновой функции ($\psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z)e^{-i(E/\hbar)t}$); $U = U(x, y, z)$ - потенциальная энергия частицы; E - полная энергия частицы.

§ 8.2. Примеры решения задач

8.2.1. Частица массы m находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l с бесконечно высокими стенками. Найти собственные значения энергии частицы и ее нормированные собственные функции.

Решение

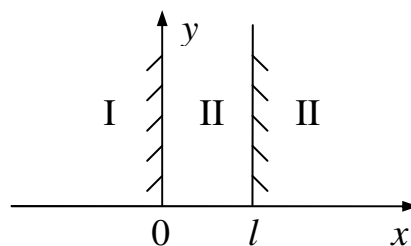


Рис. 8.1

Уравнение Шредингера в одномерном случае имеет вид

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U(x))\psi = 0. \quad (1)$$

$$\text{Здесь, как следует из условия, } U(x) = \begin{cases} \infty & x \leq 0 \\ 0 & 0 < x < l \\ \infty & x \geq l \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку за пределами потенциальной ямы $U(x)$ обращается в бесконечность, частица туда попасть не может. Значит там волновая функция, как и на границах ямы, должна обращаться в нуль. Отсюда имеем для $\psi(x)$ граничные условия:

$$\psi(0) = \psi(l) = 0. \quad (3)$$

В области ямы $0 < x < l$ уравнение (1) имеет вид

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = 0. \quad (4)$$

Решение его имеет вид $\psi(x) = A \sin(kx + \alpha)$, где A , α - константы, а $k^2 = \frac{2m}{\hbar^2}E$. Подставляя для x значения $x=0$ и $x=l$, получим из граничных условий (3):

$$\begin{aligned} \psi(0) = A \sin \alpha &= 0, & \alpha &= 0, \\ \psi(l) = A \sin kl &= 0, & kl &= \pm \pi n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения для k с условием (5) получаем собственные значения энергии:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Спектр энергии дискретен. Этим значениям энергии соответствуют волновые функции:

$$\psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (7)$$

Множитель A можно найти из условия нормировки $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dx = 1$, которое в нашем случае принимает вид $A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx = 1$. (8)

Отсюда, взяв интеграл, получим $A = \sqrt{\frac{2}{l}}$. Тогда окончательно собственные функции имеют вид $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l}$, $n=1,2,3,\dots$

8.2.2. Частица массы m находится в одномерном симметричном потенциальном поле глубиной U_0 (рис. 8.2). Найти спектр собственных значений энергии E при условии $E < U_0$.

Дано:

m

$E < U_0$

Найти:

E -?

Решение

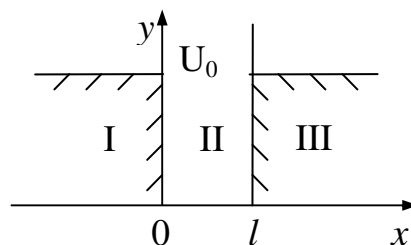


Рис. 8.2

Уравнение Шредингера имеет вид

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{h^2}(E - U(x))\psi = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } U(x) = \begin{cases} U_0, & x \leq 0, \\ 0, & 0 < x < 1, \\ U_0, & x \geq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим решения этого уравнения во всех трех областях:

$$x \leq 0, \quad \psi_1 = Ae^{\gamma x}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{h^2}}, \quad (3)$$

$$0 < x < 1, \quad \psi_2 = B \sin(kx + \alpha) \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{h^2}}, \quad (4)$$

$$x \geq 1, \quad \psi_3 = C e^{-\gamma x}. \quad (5)$$

Волновая функция и ее производная должна быть всюду непрерывны.

Применим это условие в точках $x=0$ и $x=1$:

$$x = 0, \quad \psi_1(0) = \psi_2(0), \quad A = B \sin \alpha, \quad (6)$$

$$\psi_1'(0) = \psi_2'(0), \quad \gamma A = kB \cos \alpha. \quad (7)$$

$$x = 1, \quad \psi_2(1) = \psi_3(1), \quad B \sin(kl + \alpha) = C e^{-\gamma l}, \quad (8)$$

$$\psi_2'(1) = \psi_3'(1), \quad kB \cos(kl + \alpha) = -\gamma C e^{-\gamma l}. \quad (9)$$

После деления (6) на (7) получим $\operatorname{tg} \alpha = \frac{k}{\gamma}$.

Отсюда с использованием известного соотношения $\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$

$$\text{получаем } \sin \alpha = \frac{hk}{\sqrt{2mU_0}}. \quad (10)$$

Проведя для точки $x=1$ аналогичные операции, получаем

$$\sin(kl + \alpha) = -\frac{hk}{\sqrt{2mU_0}}. \quad (11)$$

Исключив из (10) и (11) α , получим:

$$kl = n\pi - 2 \arcsin\left(\frac{hk}{\sqrt{2mU_0}}\right), \quad (12)$$

где $n=1,2,3\dots n$. Значения $\arcsin$ берутся в первой четверти (от 0 до $\pi/2$). Поскольку аргумент у $\arcsin$ не может быть больше единицы, то значения k не могут превосходить $k_{\max} = \sqrt{\frac{2mU_0}{h}}$.

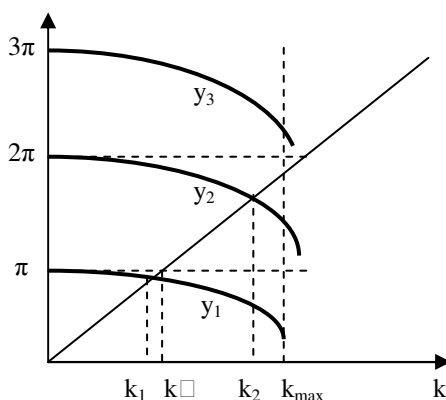


Рис. 8.3

Изобразим левую и правую части уравнения (8) как функцию от k (рис. 8.3), где y_1 , y_2 и y_3 - правая часть уравнения при $n=1,2,3$). Точки пересечения прямой с кривыми y_1 , y_2 и так далее определяют корни этого уравнения, которые, как видно из рисунка, дают дискретный спектр собственных значений E .

При уменьшении U_0 величина $k_{\max}$ перемещается влево - число точек пересечения будет уменьшаться (при заданном l положение прямой остается неизменным). Когда $k_{\max}$ становится меньше k' , яма будет иметь только один уровень энергии. Таким образом, данная яма всегда содержит, по крайней мере, один уровень энергии.

8.2.3. Частица массы m находится в основном состоянии в одномерной потенциальной яме шириной l с бесконечно высокими стенками. Найти: а) силу, давления, которую оказывает частица на стенку, б) работу, которую необходимо совершить, чтобы медленно сжать яму в η раз.

Дано:

m

ℓ

η

Найти:

F-?

A-?

Решение

Как известно из механики, сила, действующая на стенку, перпендикулярную оси x , есть среднее значение производной от энергии частицы по длине ямы вдоль оси x . Согласно формуле, полученной в задаче (8.2.1) для основного

состояния с $n=1$. $E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m\ell^2}$, взяв отсюда производную по ℓ , получим:

$$F = -\frac{dE}{d\ell} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m\ell^3}.$$

Работу, совершаемую при сжатии ямы, можно найти как разность энергии в двух конечных положениях стенки ямы:

$$A = E\left(\frac{1}{\eta}\right) - E(1) = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m\ell^2} (\eta^2 - 1).$$

Ответ: $F = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m\ell^3}$; $A = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m\ell^2} (\eta^2 - 1)$.

8.2.4. Частица массы m находится в трехмерной прямоугольной потенциальной яме с абсолютно непроницаемыми стенками. Длина ребер ямы равна a , b , c . Найти собственные значения энергии частицы и ее собственные волновые функции.

Дано:

m

a

в

с

Найти:

$\psi(xyz)$ – ?

Решение

Абсолютная непроницаемость стенок говорит о том, что волновая функция может быть отличной от нуля только внутри ямы, которую в данном случае часто называют потенциальным ящиком. Поэтому для волновых функций, являющихся решением уравнения Шредингера, должны выполняться нулевые граничные условия:

$$\psi|_{x=0} = \psi|_{x=a} = \psi|_{y=0} = \psi|_{y=B} = \psi|_{z=0} = \psi|_{z=c} = 0. \quad (1)$$

Одномерный аналог такой ямы рассмотрен в задаче 8.2.1. Повторяя те же рассуждения только для трех переменных x, y, z , можно получить решение задачи с учетом граничных условий (1).

Запишем уравнение Шредингера внутри ямы:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k\psi = 0, \quad (2)$$

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{h}.$$

Его решение удобно искать сразу в виде произведения синусов:

$$\psi(x, y, z) = A \sin(k_1 x) \sin(k_2 y) \sin(k_3 z), \quad (3)$$

так как при $x=0$, $y=0$ и $z=0$ волновая функция должна обращаться в нуль.

Возможные значения k_1 , k_2 и k_3 находим из граничных условий:

$$k_1 = \frac{n_1 \pi}{a}, \quad k_2 = \frac{n_2 \pi}{b}, \quad k_3 = \frac{n_3 \pi}{c}.$$

После подстановки $\psi(xyz)$ в уравнение Шредингера получим:

$$k^2 = k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 \text{ или } E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right). \quad (4)$$

Постоянную A в выражении для волновой функции находим из условия нормировки:

$$\int_{\Omega} |\psi|^2 dV = 1, \quad (5)$$

где Ω - область внутри ямы, dv - элемент объема.

Так как функция (3) представляет произведение трех сомножителей, каждый из которых зависит лишь от одной переменной, то (5) можно представить

$$\text{в виде } A^2 \int_0^a \sin^2(k_1 x) dx \int_0^b \sin^2(k_2 y) dy \int_0^c \sin^2(k_3 z) dz = 1.$$

Отсюда для A получим выражение: $A = \sqrt{\frac{8}{abc}}$, и волновые функции при-

$$\text{мут вид } \psi(xyz) = \sqrt{\frac{8}{abc}} \sin \frac{n_1 \pi x}{a} \sin \frac{n_2 \pi y}{b} \sin \frac{n_3 \pi z}{c}.$$

$$\text{Ответ: } \psi(xyz) = \sqrt{\frac{8}{abc}} \sin \frac{n_1 \pi x}{a} \sin \frac{n_2 \pi y}{b} \sin \frac{n_3 \pi z}{c}.$$

8.2.5. Найти уровни энергии и соответствующие им волновые функции для частицы, представляющей собой одномерный гармонический осциллятор с потенциальной энергией $U = \frac{m\omega_0^2}{2} x^2$.

Решение

Зависимость потенциальной энергии частицы от координаты x имеет параболический вид. Классическим осциллятором может служить математический маятник при малых углах отклонения (груз, подвешенный на пружине). Решение задачи для квантового гармонического осциллятора имеет большое значение в приложениях, так как движение любой системы частиц, совершающих малые колебания, может быть сведено к движению совокупности независимых осцилляторов.

Уравнение Шредингера для осциллятора имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{m\omega_0^2}{2} x^2 \psi = E\psi. \quad (1)$$

Для решения этого уравнения введем безразмерные величины:

$$\xi = \frac{x}{x_0}, \quad x_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega_0}}, \quad \lambda = \frac{2E}{\hbar\omega_0}. \quad (2)$$

Рассматривая ψ как функцию ξ после элементарных преобразований, приведем уравнение (1) к виду

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} + (\lambda - \xi^2)\psi = 0. \quad (3)$$

Нам нужно найти конечные непрерывные и однозначные решения этого уравнения в интервале $-\infty < \xi < +\infty$. Такие решения уравнение (3) имеет не при всех значениях параметра λ , а лишь при

$$\lambda = 2n+1, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Причем соответствующие функции ψ_n равны

$$\psi_n(\xi) = e^{-\frac{\xi^2}{2}} H_n(\xi), \quad (5)$$

где $H_n(\xi)$ - полином Чебышева-Эрмита n -го порядка, определяемый формулой

$$H_n(\xi) = \frac{(-1)^n}{\sqrt{2^n n! \sqrt{\pi}}} e^{\xi^2} \frac{d^n e^{-\xi^2}}{d\xi^n}. \quad (6)$$

При этом множитель перед e^{ξ^2} выбран так, что функция $\psi_n(\xi)$ нормирована по ξ к 1:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_n^2(\xi) d\xi = 1. \quad (7)$$

Согласно (2) параметр λ определяет энергию. Сравнивая (2) и (4), находим, что возможные ее значения:

$$E_n = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right), n=0, 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Число n называется главным квантовым числом. Выпишем несколько

функций (5), нормированных по x на 1: $\psi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{x_0}\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2x_0^2}}, \quad n=0;$

$$\psi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2x_0}\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2x_0^2}} \cdot \frac{2x}{x_0}, \quad n=1.$$

Ответ: $E_n = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right), n=0, 1, 2, 3, \dots; \psi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2x_0}\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2x_0^2}} \cdot \frac{2x}{x_0}.$

§ 8.3. Задачи для самостоятельного решения

119. Электрон находится в бесконечно глубоком прямоугольном одномерном потенциальном ящике шириной l (рис.8.1). Написать уравнение Шредингера и его решение (в тригонометрической форме) для области II ($0 < x < l$).

120. Известна волновая функция, описывающая состояние электрона в потенциальном ящике шириной l : $\psi(x) = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx$. Используя граничные условия $\psi(0)=0$ и $\psi(l)=0$, определить коэффициент C_2 и возможные значения волнового вектора k , при котором существуют нетривиальные решения.

121. Электрон находится в потенциальном ящике шириной $l = 0,5$ им. Определить наименьшую разность ΔE энергетических уровней электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

122. Электрон находится в потенциальном ящике шириной l . В каких точках в интервале ($0 < x < l$) плотность вероятности нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одинакова? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение пояснить графически.

123. В одномерном потенциальном ящике шириной l находится электрон. Вычислить вероятность W нахождения электрона на первом энергетическом уровне в интервале $1/4$, равноудаленном от стенок ящика.

124. Электрон с энергией $E = 25$ эВ встречает на своем пути потенциальный барьер высотой $U = 9$ эВ. Определить коэффициент преломления n волн де Бройля на границе барьера.

125. Определить коэффициент преломления n волн де Бройля для протонов на границе потенциальной ступени. Кинетическая энергия протонов равна 16 эВ, а высота U потенциальной ступени равна 9 эВ.

126. Электрон обладает энергией $E = 10$ эВ. Определить, во сколько раз изменятся его скорость v , длина волны де Бройля λ и фазовая скорость при прохождении через потенциальный барьер высотой $U = 6$ эВ.

127. Протон с энергией $E = 1$ МэВ изменил при прохождении потенциального барьера дебройлевскую длину волны на 1 %. Определить высоту U потенциального барьера.

128. Определить показатель преломления n волн де Бройля при прохождении частицей потенциального барьера с коэффициентом отражения $\rho = 0,5$.

129. При каком отношении высоты U потенциального барьера и энергии E электрона, падающего на барьер, коэффициент отражения $\rho = 0,5$?

130. Вычислить коэффициент прохождения τ электрона с энергией $E = 100$ эВ через потенциальный барьер высотой $U = 99,75$ эВ.

131. На низкий потенциальный барьер падает моноэнергетический поток электронов. Концентрация n_0 электронов в падающем потоке равна 10^9 мм⁻³, а их энергия $E = 100$ эВ. Определить давление, которое испытывает барьер, если его высота $U = 9,7$ эВ.

132. Найти вероятность W прохождения электрона через прямоугольный потенциальный барьер при разности энергий $U - E = 1$ эВ, если ширина барьера: 1) $d = 0,1$ нм; 2) $d = 0,5$ нм.

133. Электрон проходит через прямоугольный потенциальный барьер шириной $d = 0,5$ нм. Высота U барьера больше энергии E электрона на 1 %. Вычислить коэффициент прозрачности D , если энергия электрона: 1) $E = 10$ эВ; 2) $E = 100$ эВ.

134. Ширина d прямоугольного потенциального барьера равна 0,2 нм. Разность энергий $U - E = 1$ эВ. Во сколько раз изменится вероятность W прохождения электрона через барьер, если разность энергий возрастет в $n = 10$ раз?

135. Ядро испускает α -частицы с энергией $E = 5$ МэВ. В грубом приближении можно считать, что α -частицы проходят через прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10$ МэВ и шириной $d = 5$ фм. Найти коэффициент прозрачности D барьера для α -частиц.

136. Протон и электрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов $\Delta\phi = 10$ кВ. Во сколько раз отличаются коэффициенты прозрачности D_e для электрона и D_p для протона, если высота U барьера равна 20 кэВ и ширина $d = 0,1$ пм?

137. Частица находится в потенциальном ящике. Найти отношение разности $\Delta E_n, n+1$ соседних энергетических уровней к энергии E_n частицы в трех случаях: 1) $n = 2$; 2) $n = 5$; 3) $n = 7$.

9. РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

§ 9.1. Основные законы и формулы

1. Количество атомов радиоактивного вещества, распадающихся на время dt , пропорционально количеству наличных атомов и определяется:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Интегрируя данное выражение, получим основной закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N - число ядер, не распавшихся к моменту времени t ; N_0 - число ядер в начальный момент времени $t=0$; λ - постоянная радиоактивного распада.

2. Число ядер, распавшихся за время t :

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

3. В случае, если промежуток времени Δt , за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, то число распавшихся ядер определяется выражением:

$$\Delta N = \lambda N \Delta t.$$

4. Период полураспада $T_{1/2}$ и постоянная распада λ связаны соотношением:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

5. Среднее время жизни τ радиоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

6. Число N атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе,

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где m - масса изотопа; μ - молярная масса; N_A - число Авогадро.

7. Активность A – радиоактивного изотопа:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \text{ или } A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где A_0 – активность изотопа в начальный момент времени. Удельная активность изотопа:

$$a = \frac{A}{m}.$$

8. Энергия связи ядра любого изотопа определяется как

$$\Delta W_{св} = c^2 \Delta m,$$

где Δm - дефекты массы ядра;

$$\Delta m = ZM_H + (A - Z)m_n - M,$$

где Z - число протонов в ядре; A - массовое число; M_H - масса атома водорода; M - масса атома.

9. Во внесистемных единицах энергия связи

$$\Delta W_{св} = 931 \Delta m,$$

где Δm - дефекты массы в а.е.м. (атомные единицы массы); 931 - коэффициент пропорциональности c^2 (1 а.е.м.=931 МэВ).

§ 9.2. Примеры решения задач

9.2.1. За какой промежуток времени из 10^7 атомов актиния распадается один атом? (Период полураспада актиния $T_{1/2}=13,5 \text{ лет} = 4,23 \times 10^8 \text{ с}$).

Дано:

$$N=10^7$$

$$T_{1/2}=4,23 \times 10^8 \text{ с}$$

Найти:

Δt – ?

Решение

Если промежуток времени Δt , за который определяется число атомов, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$ элемента, то число распавшихся атомов определяется по формуле $\Delta N = \lambda N \Delta t$, где ΔN - число атомов, распавшихся за время Δt ; N - число атомов; λ - постоянная радиоактивного распада.

Взаимосвязь периода полураспада $T_{1/2}$ и постоянной распада: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Совместно решая уравнения, получим:

$$\Delta t = \frac{\Delta N}{\lambda N} = \frac{\Delta N T_{1/2}}{N \ln 2} = \frac{1 \cdot 4,23 \cdot 10^8}{10^7 \cdot 0,693} = 61 \text{ с}.$$

Ответ: $\Delta t = 61 \text{ с}$.

9.2.2. Определить начальную активность A_0 радиоактивного препарата магния ^{27}Mg массой $m = 2,5 \times 10^{-10} \text{ кг}$, а также его активность A через время $t = 7$ часов. Период полураспада $T_{1/2} = 10 \text{ мин}$.

Дано:

$$m = 2,5 \times 10^{-10} \text{ кг}$$

$$t = 7 \text{ часов}$$

$$T_{1/2} = 10 \text{ мин}$$

Найти:

A – ?

Решение

Активность A изотопа характеризует скорость радиоактивного распада:

$$A = - \frac{dN}{dt} . \quad (1)$$

Используя основной закон радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$, имеем:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

откуда следует, что начальная активность, то есть

$$t=0: A_0 = \lambda N_0. \quad (3)$$

Таким образом, закон изменения активности со временем, используя (2) и (3), выражается формулой

$$A = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Число радиоактивных атомов N_0 , содержащихся в изотопе, равно $N_0 = \nu N_A$, где N_A - число Авогадро; $\nu = m/\mu$ - количество вещества; m - масса изотопа; μ - молярная масса. Таким образом,

$$N_0 = \frac{2,5 \cdot 10^{-10} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3}} = 5,57 \cdot 10^{17} \text{ ядер.}$$

Используя связь между периодом полураспада и постоянной распада $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, имеем:

$$A_0 = \lambda N_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_0 = \frac{0,693}{600} \cdot 5,57 \cdot 10^{17} = 6,4 \cdot 10^{14} \text{ Бк.}$$

Активность изотопа через $t=4$ часа получим из выражения (4)

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = 6,4 \cdot 10^{14} \cdot e^{-\frac{0,693}{600} \cdot 7 \cdot 3600} = 6,4 \cdot 10^{14} \cdot e^{-16,632} = 1,66 \cdot 10^2 \text{ Бк.}$$

Ответ: $A = 1,66 \cdot 10^2 \text{ Бк.}$

9.2.3. *Определить отношение количества радия к количеству урана в древних минералах. Период полураспада радия $T_{1/2Ra} = 5,02 \times 10^{10} \text{ с}$, период полураспада урана $T_{1/2U} = 1,4 \times 10^{17} \text{ с}$.*

Дано:

$$T_{1/2Ra} = 5,02 \times 10^{10} \text{ с}$$

$$T_{1/2U} = 1,4 \times 10^{17} \text{ с}$$

Найти:

$\nu - ?$

Решение

Число распавшихся атомов можно выразить формулой для радия и урана, соответственно:

$$\begin{cases} \Delta N_{\text{Ra}} = \lambda_{\text{Ra}} N_{\text{Ra}} \Delta t, \\ \Delta N_{\text{U}} = \lambda_{\text{U}} N_{\text{U}} \Delta t. \end{cases} \quad (1)$$

Считая, что время распада, а также начальное содержание в минералах радия и урана одинаково, имеем:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{Ra}} &= \lambda_{\text{Ra}} N \Delta t, \\ \Delta N_{\text{U}} &= \lambda_{\text{U}} N \Delta t, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{а отношение} \quad \nu = \frac{\Delta N_{\text{Ra}}}{\Delta N_{\text{U}}} = \frac{\lambda_{\text{Ra}}}{\lambda_{\text{U}}}; \quad (3)$$

используя связь $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ между периодом полураспада и постоянной распада,

получаем:

$$\nu = \frac{\Delta N_{\text{Ra}}}{\Delta N_{\text{U}}} = \frac{\ln 2}{T_{1/2\text{Ra}}} \cdot \frac{T_{1/2\text{U}}}{\ln 2} = \frac{1,4 \cdot 10^{17}}{5,02 \cdot 10^{10}} = 0,28 \cdot 10^7.$$

$$\text{Ответ: } \nu = \frac{\Delta N_{\text{Ra}}}{\Delta N_{\text{U}}} = 0,28 \cdot 10^7.$$

9.2.4. *Определить возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа C^{14} у них составляет 3/5 удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада ядер C^{14} равен 5570 лет.*

Дано:

$$a = \frac{3}{5} a_0$$

$T = 5570$ лет

Найти:

$t - ?$

Решение

Удельная активность изотопа определяется $a = \frac{A}{m}$, где m - масса изотопа;

a - активность изотопа единичной массы.

Активность $A = \frac{dN}{dt}$, следовательно, $A = A_0 e^{-\lambda t}$, где A_0 - активность изотопа в начальный момент времени. Тогда для удельной активности имеем:
 $a = a_0 e^{-\lambda t}$.

Так как $a = \frac{3}{5} a_0$ согласно условию задачи, следовательно, $\frac{3}{5} a_0 = a_0 e^{-\lambda t}$,
откуда, после логарифмирования имеем: $\ln \frac{3}{5} = -\lambda t$; а так как $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$,

$$\text{то } t = \frac{\ln 0,6}{\ln 2} \cdot T_{1/2} = 4,1 \cdot 10^3 \text{ лет.}$$

Ответ: $t = 4,1 \cdot 10^3$ лет.

9.2.5. Элемент кюрий (${}_{96}\text{Cm}^{240}$) испускает α -частицы с энергией $E_\alpha = 6,25$ МэВ. Вычислить количество тепла, которое выделится в закрытом сосуде с раствором соли кюрия, содержащем $m = 2 \times 10^{-6}$ кг кюрия, при полном распаде элемента.

Дано:

$$E_\alpha = 6,25 \text{ МэВ}$$

$$m = 2 \times 10^{-6} \text{ кг}$$

Найти:

Q-?

Решение

Количество распавшихся ядер можно получить из выражения

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}, \text{ то есть } N = \frac{mN_A}{\mu},$$

где m - масса вещества; N_A - число Авогадро; μ - молярная масса; α - частица представляет собой ядро атома гелия, то есть состоит из 2-х протонов и 2-х нейтронов. Всего в ядре содержится 96 протонов, следовательно, может быть образовано 48 α - частиц. Считаем, что вся энергия при расчете превращается в тепло, тогда

$$Q = 48 \cdot N \cdot E_{\alpha} = 48 \frac{mN_A}{\mu} E_{\alpha} = 48 \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{240 \cdot 10^{-3}} 6,25 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \approx \\ \approx 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Ответ: $Q \approx 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$

9.2.6. *Какой массе радона соответствует радиоактивный фон, дающий 1 отброс ионизационного счетчика Гейгера-Мюллера за время $t=8 \text{ с}$? Период полураспада радона $T_{1/2}=3,82 \text{ суток}$.*

Дано:

$$t=8 \text{ с}$$

$$T_{1/2}=3,82 \text{ суток}$$

Найти:

$$m - ?$$

Решение

Число атомов радиоактивного вещества ΔN , распадающихся за время Δt , определяем соотношением

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N,$$

где λ - постоянная распада $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}}.$

Число радиоактивных атомов в образце можно выразить через количество

$$\text{вещества } \nu = \frac{m}{\mu}: \quad \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A},$$

где m - масса вещества; N_A - число Авогадро; μ - молярная масса.

$$\text{Тогда имеем } \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A \frac{m}{\mu}, \text{ откуда } m = \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{\mu T_{1/2}}{\ln 2 N_A}.$$

Число распадов за единицу времени является активностью $\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{1}{8}$ по

$$\text{условию задачи. Следовательно } m = \frac{\mu T_{1/2}}{8 \ln 2 N_A} = \frac{222 \cdot 10^{-3} \cdot 3,82 \cdot 24 \cdot 3600}{8 \cdot 0,693 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \approx 22 \cdot 10^{-20} \text{ кг.}$$

Ответ: $m \approx 22 \cdot 10^{-20} \text{ кг.}$

9.2.7. Вычислить энергетический эффект Q реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{N}$.

Массы элементов считать известными.

Дано: $m_4^9\text{Be} = 9,01219 \text{ а.е.м.},$

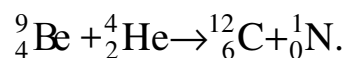
$m_4^2\text{He} = 4,0026 \text{ а.е.м.},$

$m_6^{12}\text{C} = 12,000 \text{ а.е.м.},$

$m_0^1\text{N} = 1,00867 \text{ а.е.м.}$

Найти: $Q = ?$

Решение



Энергетический эффект Q ядерной реакции определяется по формуле:

$$Q = c^2 [(m_{\text{Be}} + m_{\text{He}}) - (m_{\text{C}} + m_{\text{N}})],$$

где c - скорость света, $c^2 = 931 \text{ МэВ / а.е.м.}$, массы элементов являются табличными данным, тогда имеем:

$$Q = 931 \cdot [(9,01219 + 4,0026) - (12,000 + 1,00867)] = 5,697 \text{ МэВ.}$$

Ответ: $Q = 5,697 \text{ МэВ.}$

9.2.8. При взаимодействии ядра атома водорода ${}^1_1\text{H}$ с ${}^6_3\text{Li}$ образовалось два новых ядра, одним из которых была α - частица. Определить второе ядро и вычислить энергетический эффект, массы элементов считать целыми.

Дано: ${}^1_1\text{H}$,

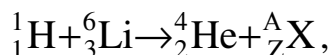
${}^6_3\text{Li}$,

α - частица.

Найти: $Q = ?$

Решение

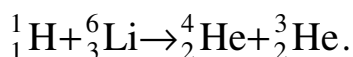
Символическая запись ядерной реакции:



где ${}^4_2\text{He}$ - ядро атома гелия – α -частица.

Индексы элемента ${}^A_Z\text{X}$ показывают: Z – порядковый номер (количество протонов), A – массовое число (количество нуклонов).

Применим к данной ядерной реакции закон сохранения числа нуклонов. Тогда $1+6=4+A$, следовательно, $A=3$ и, применяя закон сохранения заряда, имеем $1+3=2+Z$, следовательно, $Z=2$, то есть число протонов 2, то ${}^3_2\text{X}$ есть ${}^3_2\text{He}$.



Используя табличные данные, получаем

$$m_3^6\text{Li} = 6,0513 \text{ а.е. м.}, m_4^2\text{He} = 4,0026 \text{ а.е. м.},$$

$$m_1^1\text{H} = 1,00783 \text{ а.е. м.}, m_2^3\text{He} = 3,01603 \text{ а.е. м.}$$

Тогда энергетический эффект:

$$\begin{aligned} Q &= c^2 \left[\left(m_3^6\text{Li} + m_1^1\text{H} \right) - \left(m_4^2\text{He} + m_2^3\text{He} \right) \right] = \\ &= 931 \left[(6,0513 + 1,00783) - (4,0026 + 3,01603) \right] = 4,031 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Ответ: $Q = 4,031 \text{ МэВ}$.

9.2.9. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра ${}^7_3\text{Li}$.

Дано:



Найти:

$$\Delta m - ?$$

$$E - ?$$

Решение

Масса ядра всегда меньше суммы масс свободных (находящихся вне ядра) протонов и нейтронов, из которых ядро образовалось. Дефект массы ядра (Δm) и есть разность между суммой масс свободных нуклонов (протонов и нейтронов) и массой ядра, т.е.

$$\Delta m = Zm_0 + (A - Z)m_n - m, \quad (1)$$

где Z - атомный номер (число протонов в ядре); A - массовое число (число нуклонов, составляющих ядро); m_0 , m_n , m - соответственно массы протона, нейтрона и ядра.

В справочных таблицах всегда даются массы нейтральных атомов, но не ядер, поэтому формулу (1) целесообразно преобразовать так, чтобы в нее входила масса M нейтрального атома. Можно считать, что масса нейтрального атома равна сумме масс ядра и электронов, составляющих электронную оболочку атома $M = m + Zm_e$, откуда $m = M - Zm_e$.

Выразив в равенстве (1) массу ядра по последней формуле, получим $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M + Zm_e$, или $\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - M$.

Замечая, что $m_p + m_e = M_H$, где M_H - масса атома водорода, окончательно получим $\Delta m = ZM_H + (A - Z)m_n - M$. (2)

Подставив в выражение (2) числовые значения масс (из справочных табл.), получим $\Delta m = [3 \cdot 1,00783 + (7 - 3) \cdot 1,00867 - 7 \cdot 0,1601] \text{ а.е.м.} = 0,04216 \text{ а.е.м.}$

Энергией связи ΔE ядра называется энергия, которая в той или иной форме

выделяется при образовании ядра из свободных нуклонов.

В соответствии с законом пропорциональности массы и энергии $E = c^2 \Delta m$, (3), где c - скорость света в вакууме.

Коэффициент пропорциональности c^2 может быть выражен двояко:
 $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 / \text{с}^2$, или $c^2 = \frac{\Delta E}{\Delta m} = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Если вычислить энергию связи, пользуясь внесистемными единицами, то
 $c^2 = 931 \text{ МэВ} / \text{а.е.м.}$

С учетом этого формула (3) примет вид

$$E = 931 \Delta m (\text{МэВ}). \quad (4)$$

Подставив ранее найденное значение дефекта массы ядра в формулу (4), получим

$$E = 931 \cdot 0,04216 \text{ МэВ} = 39,2 \text{ МэВ}.$$

Примечание. Термин «дефект массы» иногда применяют в другом смысле: дефектом массы Δ называют разность между массой нейтрального атома M данного изотопа и его массовым числом: $\Delta = M - A$. Эта величина особого физического смысла не имеет, но ее использование позволяет в ряде случаев значительно упростить вычисления.

Ответ: $\Delta m = 0,04216 \text{ а.е.м.}$; $E = 39,2 \text{ МэВ}$.

9.2.10. При соударении α -частицы с ядром бора $^{10}_5\text{B}$ произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось два новых ядра. Одним из этих ядер было ядро атома водорода ^1_1H . Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, дать символическую запись ядерной реакции и определить ее энергетический эффект.

Дано:



Найти:

${}_Z^AX$ -?

Q -?

Решение

Обозначим неизвестное ядро символом ${}_Z^AX$. Так как α - частица представляет собой ядро гелия ${}_2^4\text{He}$, запись реакции будет иметь вид ${}_2^4\text{He} + {}_5^{10}\text{B} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_Z^AX$.

Применив закон сохранения числа нуклонов, получим уравнение $4 + 10 = A + 1$, следовательно, $A = 13$. Применив закон сохранения заряда, получим уравнение $2 + 5 = z + 1$, откуда $Z = 6$. Следовательно, неизвестное ядро является ядром атома изотопа углерода ${}_6^{13}\text{C}$.

Теперь можем записать реакцию в окончательном виде: ${}_2^4\text{He} + {}_5^{10}\text{B} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_6^{13}\text{C}$.

Энергетический эффект Q ядерной реакции определяется по формуле

$$Q = 931[(m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}})].$$

Здесь в первых круглых скобках указаны массы исходных ядер, во вторых скобках – массы ядер – продуктов реакции. При числовых подсчетах по этой формуле массы ядер заменяют массами нейтральных атомов. Возможность такой замены вытекает из следующих соображений.

Число электронов в электронной оболочке нейтрального атома равно его зарядовому числу Z . Сумма зарядовых чисел исходных ядер равна сумме зарядовых чисел ядер – продуктов реакции.

Очевидно, что при вычитании суммы масс нейтральных атомов углерода и водорода из суммы масс атомов гелия и бора массы электронов выпадут, и мы получим тот же результат, как если бы брали массы ядер. Подставив массы атомов, взятые из справочной табл., в расчетную формулу, получим

$$Q = 931[(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)]\text{МэВ} = 4,06\text{МэВ}.$$

Ответ: ${}_6^{13}\text{C}$; $Q = 4,06\text{МэВ}$.

§ 9.3. Задачи для самостоятельного решения

138. Водород обогащен дейтерием. Определить массовые доли ω_1 протия и ω_2 дейтерия, если относительная атомная масса A_r такого водорода оказалась равной 1,122.

139. Зная постоянную Авогадро N_A , определить массу m_a нейтрального атома углерода ^{12}C и массу m , соответствующую углеродной единице массы.

140. Хлор представляет собой смесь двух изотопов с относительными атомными массами $A_{r1} = 34,969$ и $A_{r2} = 36,966$. Вычислить относительную атомную массу A_r хлора, если массовые доли ω_1 и ω_2 первого и второго изотопов соответственно равны 0,754 и 0,246.

141. Бор представляет собой смесь двух изотопов с относительными атомными массами $A_{r1} = 10,013$ и $A_{r2} = 11,009$. Определить массовые доли ω_1 и ω_2 первого и второго изотопов в естественном боре. Относительная атомная масса A_r бора равна 10,811.

142. Какую часть массы нейтрального атома плутония составляет масса его электронной оболочки?

143. Определить массу ядра лития, если масса нейтрального атома лития равна 7,01601 а. е. м.

144. Определить отношение сечений σ_1/σ_2 ядер висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$ и алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$.

145. Определить атомные номера, массовые числа и химические символы зеркальных ядер, которые получатся, если в ядрах ^3_2He , ^7_4Be , $^{15}_8\text{O}$ протоны заменить нейтронами, а нейтроны – протонами. Привести символическую запись получившихся ядер.

146. Определить диаметры следующих ядер: ^8_3Li ; $^{27}_{13}\text{Al}$; $^{64}_{29}\text{Cu}$; $^{125}_{50}\text{Sn}$; $^{216}_{84}\text{Po}$.

147. Определить концентрацию нуклонов в ядре.

148. Ядро радия $^{226}_{88}\text{Ra}$ выбросило α -частицу (ядро атома гелия ^4_2He). Найти массовое число A и зарядовое число Z вновь образовавшегося ядра. Определить, какому элементу это ядро соответствует.

149. В ядре изотопа кремния $^{27}_{14}\text{Si}$ один из протонов превратился в нейтрон (β^+ -распад). Какое ядро получилось в результате такого превращения?

150. Покоившееся ядро радона $^{220}_{86}\text{Rn}$ выбросило α -частицу со скоростью $v = 16$ Мм/с. В какое ядро превратилось ядро радона? Какую скорость v_1 получило оно в результате отдачи?

151. В ядре изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ один из нейтронов превратился в протон (β^- -распад). Какое ядро получилось в результате такого превращения?

152. Постоянная распада λ рубидия ^{89}Rb равна $0,00077 \text{ с}^{-1}$. Определить его период полураспада $T_{1/2}$.

153. За какой промежуток времени из 10^7 атомов актиния распадается один атом? (Период полураспада актиния $T_{1/2} = 13,5$ лет $= 4,23 \cdot 10^8$ с).

154. За один год начальное количество радиоактивного изотопа уменьшилось в три раза. Во сколько раз оно уменьшится за три года?

155. За какое время t распадается $1/4$ начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада $T_{1/2} = 24$ ч?

156. При распаде радиоактивного полония ^{210}Po в течение времени $t = 1$ ч образовался гелий ^4He , который при нормальных условиях занял объем $V = 89,5 \text{ см}^3$. Определить период полураспада $T_{1/2}$ полония.

157. Период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного нуклида равен 1 ч. Определить среднюю продолжительность τ жизни этого нуклида.

158. Какая часть начального количества радиоактивного нуклида распадается за время t , равное средней продолжительности τ жизни этого нуклида?

159. Определить начальную активность A_0 радиоактивного магния ^{27}Mg массой $m = 0,2$ мкг, а также активность A по истечении времени $t = 1$ ч. Предполагается, что все атомы изотопа радиоактивны.

160. Определить число N атомов, распадающихся в радиоактивном изотопе за время $t = 10$ с, если его активность $A = 0,1$ МБк. Считать активность постоянной в течение указанного времени.

161. Активность A препарата уменьшилась в $k = 250$ раз. Скольким периодам полураспада $T_{1/2}$ равен протекший промежуток времени t ?

162. За время $t = 1$ сут активность изотопа уменьшилась от $A_1 = 118$ ГБк до $A_2 = 7,4$ ГБк. Определить период полураспада $T_{1/2}$ этого нуклида.

163. При определении периода полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа использован счетчик импульсов. За время $\Delta t = 1$ мин в начале наблюдения ($t = 0$) было насчитано $\Delta n_1 = 250$ импульсов, а по истечении времени $t = 1$ ч – $\Delta n_2 = 92$ импульса. Определить постоянную радиоактивного распада λ и период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

164. Уран ^{234}U является продуктом распада наиболее распространенного изотопа урана ^{238}U . Определить период полураспада $T_{1/2}$ урана ^{234}U , если его массовая доля ω в естественном уране ^{238}U равна $6 \cdot 10^{-5}$.

165. Определить начальную активность A_0 радиоактивного препарата магния ^{27}Mg массой $m = 2,5 \cdot 10^{-10}$ кг, а также его активность A через время $t = 7$ часов. Период полураспада $T_{1/2} = 10$ мин.

166. Определить отношение количества радия к количеству урана в древних минералах. Период полураспада радия $T_{1/2\text{Ra}} = 5,02 \cdot 10^{10}$ с, период полураспада урана $T_{1/2\text{U}} = 1,4 \cdot 10^{17}$ с.

167. Определить возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа ^{14}C у них составляет $3/5$ удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада ядер ^{14}C равен 5570 лет.

168. Элемент кюрий ($^{240}_{96}\text{Cm}$) испускает α -частицы с энергией $E_\alpha = 6,25$ МэВ. Вычислить количество тепла, которое выделится в закрытом

сосуде с раствором соли кюрия, содержащем $m = 2 \cdot 10^{-6}$ кг кюрия, при полном распаде элемента.

169. Какой массе радона соответствует радиоактивный фон, дающий 1 отброс ионизационного счетчика Гейгера-Мюллера за время $t = 8$ с? Период полураспада радона $T_{1/2} = 3,82$ суток.

170. Радиоактивный изотоп $^{22}_{11}\text{Na}$ излучает γ -кванты энергией $\varepsilon = 1,28$ МэВ. Определить мощность P гамма-излучения и энергию W , излучаемую за время $t = 5$ мин изотопом натрия массой $m = 5$ г. Считать, что при каждом акте распада излучается один γ -фотон с указанной энергией.

10. АТОМНОЕ ЯДРО

§ 10.1. Основные законы и формулы

1. Массовое число ядра (число нуклонов в ядре):

$$A=Z+N,$$

где Z – величина заряда (число протонов); N – число нейтронов.

2. Образование произвольного ядра представляется в виде A_ZX .

§ 10.2. Примеры решения задач

10.2.1. При столкновении α -частицы с ядром A , заряд которого равен Z_e , угол отклонения φ и прицельное расстояние r_0 связаны соотношением

$$\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{mr_0v^2}{2ze^2}, \text{ где } m \text{ и } v - \text{масса и скорость } \alpha - \text{частицы. Вычислить прицельное}$$

расстояние при столкновении α -частицы, имеющей энергию $W=4,8 \text{ МэВ}$, с ядром золота ($Z=79$), если α -частица рассеивается на угол $\alpha=128^\circ$.

Дано: $Z=79$,

$W=4,8 \text{ МэВ}$,

$\alpha=128^\circ$,

$$\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{mr_0v^2}{2ze^2}.$$

Найти: r_0 - ?

Решение

Рассмотрим соотношение $\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{mr_0v^2}{2ze^2}$, из которого выразим r_0 - при-

цельное расстояние, при этом заметив, что $\frac{mv^2}{2} = W$ - энергия α -частицы:

$$r_0 = \frac{2ze^2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{m\vartheta^2} = \frac{ze^2}{W} \operatorname{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right).$$

Выразив энергию в Джоулях, имеем:

$$r_0 = \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4,8 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \operatorname{ctg}\left(\frac{128}{2}\right) = 1,28 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

Ответ: $r_0 = 1,28 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$

10.2.2. Определить дефект массы, энергию связи и энергию связи на нуклон для ядра ${}_3\text{Li}^7$, если масса атома $M=7,016 \text{ а.е.м.}$ (атомная единица массы $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ кг}$).

Дано: ${}_3\text{Li}^7$,

$M=7,016 \text{ а.е.м.}$

Найти: Δm - ?

$E_{\text{св1}}$ - ?

$E_{\text{св2}}$ - ?

Решение

Дефект массы Δm определяется выражением $\Delta m = Zm_{\text{пр}} + (A - Z)m_{\text{н}} - M$, где Z - атомный номер – число протонов в ядре; A – массовое число – число нуклонов $m_{\text{пр}}$ и $m_{\text{н}}$ – масса протона и нейтрона, соответственно.

В ядре ${}_3\text{Li}^7$ имеется 3 протона и $7-3=4$ нейтрона, следовательно

$$\begin{aligned} \Delta m &= 3 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27} + 4 \cdot 1,6749 \cdot 10^{-27} - 7,016 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} = \\ &= 0,0695 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \end{aligned}$$

В а.е.м. дефект масс равен $\Delta m=0,042 \text{ а.е.м.}$

Энергия связи ядра $E_{\text{с в1}} = \Delta m c^2$, где c - скорость света в вакууме.

$$E_{\text{с в1}} = 6,95 \cdot 10^{-25} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 0,621 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 39,3 \text{ МэВ}$$

Всего нуклонов 7; тогда энергия связи, приходящаяся на один нуклон, есть

$$E_{св2} = \frac{E_{св1}}{7} = 5,6 \text{ МэВ}$$

Ответ: $E_{св2} = 5,6 \text{ МэВ}$.

10.2.3. В циклотроне заряженные частицы движутся в однородном поперечном магнитном поле по круговым орбитам. Ускорение осуществляется электрическим полем в щели между электродами. Для резонансного ускорения частота вращения частицы и частота электрического поля должны совпадать. При релятивистских скоростях движения частицы происходит изменение массы частицы и возникает несогласованность работы циклотрона. Вычислить относительное изменение частоты обращения электрона с энергией $E=1 \text{ МэВ}$.

Дано: электрон

$E=1 \text{ МэВ}$.

Найти: $\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = ?$

Решение

На частицу, движущуюся в поперечном магнитном поле, действует сила Лоренца: $\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}] = qv \sin(\vec{v} \wedge \vec{B})$,

где q - заряд, $\vec{v}$ - скорость частицы; $\vec{B}$ - вектор магнитной индукции.

Так как магнитное поле поперечно, следовательно, $\sin(\vec{v} \wedge \vec{B})=1$, а также траекторией движения является окружность, то, используя второй закон Ньютона, имеем: $ma_n = e v B$;

$$a_n = \frac{v^2}{R} - \text{нормальное ускорение, то есть } \frac{mv^2}{R} = e v B.$$

Используя связь между кинематическими величинами, имеем:

$$v = \omega R, \text{ а } \omega = 2\pi\nu_0, \text{ где } \omega - \text{циклическая частота;}$$

$$\frac{m\omega R}{R} = m2\pi\nu_0, \text{ то есть } 2\pi\nu_0 m = eB.$$

Следовательно, ν - частота вращения частицы определяется как $\nu = \frac{eB}{2\pi m}$.

Зависимость массы от скорости определяется выражением Эйнштейна:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Тогда имеем:
$$\nu = \frac{eB\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{2\pi m_0} = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (1)$$

где $\nu_0 = \frac{eB}{2\pi m_0}$.

Выразим $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ через кинетическую энергию.

Согласно теории относительности
$$T_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2.$$

Отсюда
$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_0 c^2}{T_k + m_0 c^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{T_k}{m_0 c^2}\right)}.$$

Тогда выражение (1) будет иметь вид
$$\nu = \frac{\nu_0}{\left(1 + \frac{T_k}{m_0 c^2}\right)},$$
 а относительное

изменение частоты-

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v_0 - v}{v_0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{T_k}{m_0 c^2}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1 \cdot 10^6}{0,51 \cdot 10^6}} = 0,66, \text{ где } m_0 c^2 = 0,51 \text{ МэВ}$$

- энергия покоя электрона.

Ответ: $\frac{\Delta v}{v_0} = 0,66$.

§ 10.3. Задачи для самостоятельного решения

171. Вычислить дефект массы Δm и энергию связи $E_{св}$ ядра $^{11}_5\text{B}$.

172. Используя известные значения масс нейтральных атомов ^1_1H ($m_H = 1,007825$), ^2_1H ($m_H = 2,014102$), $^{12}_6\text{C}$ и электрона, определить массы m_p протона, m_d дейтона, m_α ядра $^{12}_6\text{C}$.

173. Масса m_α альфа-частицы (ядро гелия ^4_2He) равна 4,001507 а.е.м. Определить массу m_a нейтрального атома гелия.

174. Зная массу m_a нейтрального атома изотопа лития ^7_3Li ($m_a = 7,016004$), определить массы m_1 , m_2 и m_3 ионов лития: однозарядного $(^7_3\text{Li})^+$, двухзарядного $(^7_3\text{Li})^{2+}$ и трехзарядного $(^7_3\text{Li})^{3+}$.

175. Определить энергию $E_{св}$, которая освободится при соединении одного протона и двух нейтронов в атомное ядро.

176. Определить удельную энергию связи ядра ^7_3Li ($m_a = 7,016004$).

177. Определить удельную энергию связи ядра $^{12}_6\text{C}$ ($m_a = 12,000000$).

178. Энергия связи $E_{св}$ ядра, состоящего из двух протонов и одного нейтрона, равна 7,72 МэВ. Определить массу m_a нейтрального атома, имеющего это ядро.

179. Определить массу m_a нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов и энергия связи $E_{св}$ ядра равна 26,3 МэВ.

180. Определить энергию E , которую нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра $^{23}_{11}\text{Na}$.

181. Атомное ядро, поглотившее γ -фотон ($\lambda = 0,47$ пм), пришло в возбужденное состояние и распалось на отдельные нуклоны, разлетевшиеся в разные стороны. Суммарная кинетическая энергия T нуклонов равна 0,4 МэВ. Определить энергию связи $E_{св}$ ядра.

182. Определить энергию E , которая выделится при образовании из протонов и нейтронов ядер гелия ${}^4_2\text{He}$ массой $m = 1$ г.

183. Какую наименьшую энергию связи E нужно затратить, чтобы разделить ядро ${}^4_2\text{He}$ на две одинаковые части?

184. Найти энергию реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$, если известно, что кинетические энергии протона $T_H = 5,45$ МэВ, ядра гелия $T_{He} = 4$ МэВ и что ядро гелия вылетело под углом 90° к направлению движения протона. Ядро-мишень ${}^9_4\text{Be}$ неподвижно. ($m_{Be} = 9,012186$, $m_{Li} = 6,015125$, $m_H = 1,007825$).

185. Решить задачу предыдущего примера, считая, что кинетические энергии и направления движения ядер неизвестны.

186. При взаимодействии ядра атома водорода ${}^1_1\text{H}$ с ${}^6_3\text{Li}$ образовалось два новых ядра, одним из которых была α -частица. Определить второе ядро и вычислить энергетический эффект ($m_{He} = 3,016022$, $m_{Li} = 6,015125$, $m_H = 1,007825$).

187. Определить порядковый номер Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой X , в символической записи ядерной реакции: ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + X$.

188. Определить порядковый номер Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой X , в символической записи ядерной реакции: ${}^{27}_{13}\text{Al} + X \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{26}_{12}\text{Mg}$.

189. Определить энергию Q ядерных реакций: 1) ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$; 2) ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$; 3) ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$; 4) ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$; 5) ${}^{44}_{20}\text{Ca} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{41}_{19}\text{K} + {}^4_2\text{He}$. Освобождается или поглощается энергия в каждой из указанных реакций?

190. Найти энергию Q ядерных реакций: 1) ${}^3\text{H}(p,\gamma){}^4\text{He}$; 2) ${}^2\text{H}(d,\gamma){}^4\text{He}$; 3) ${}^2\text{H}(n,\gamma){}^3\text{H}$; 4) ${}^{19}\text{F}(p,\alpha){}^{16}\text{O}$.

191. Освобождается или поглощается энергия в каждой из указанных реакций?

192. Радиоактивное ядро магния ${}^{23}\text{Mg}$ выбросило позитрон и нейтрино. Определить энергию Q β^+ -распада ядра.

193. Определить суммарную кинетическую энергию T ядер, образовавшихся в результате реакции ${}^{13}\text{C}(d,\alpha){}^{11}\text{B}$, если кинетическая энергия T_1 дейтрона равна 1,5 МэВ. Ядро-мишень ${}^{13}\text{C}$ считать неподвижным.

194. При делении одного ядра урана-235 выделяется энергия $Q = 200$ МэВ. Какую долю энергии покоя ядра урана-235 составляет выделившаяся энергия?

195. Определить энергию E , которая освободится при делении всех ядер, содержащихся в уране-235 массой $m = 1$ г.

196. Сколько ядер урана-235 должно делиться за время $t = 1$ с, чтобы тепловая мощность P ядерного реактора была равной 1 Вт?

197. Определить массовый расход m_t ядерного горючего ${}^{235}\text{U}$ в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность P электростанции равна 10 МВт. Принять энергию Q , выделяющуюся при одном акте деления, равной 200 МэВ. КПД η электростанции составляет 20%.

198. Найти электрическую мощность P атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана-235 в сутки, если КПД η станции равен 16%.

199. Определить энергию Q α -распада ядра полония ${}^{210}_{84}\text{Po}$.

200. Покоившееся ядро полония ${}^{210}_{84}\text{Po}$ выбросило α -частицу с кинетической энергией $T = 5,3$ МэВ. Определить кинетическую энергию T ядра отдачи и полную энергию Q , выделившуюся при α -распаде.

201. Определить энергию Q распада ядра углерода ${}^{10}_6\text{C}$, выбросившего позитрон и нейтрино.

202. Ядро углерода $^{14}_6\text{C}$ выбросило отрицательно заряженную β -частицу и антинейтрино. Определить полную энергию Q β -распада ядра.

203. Вычислить энергию ядерной реакции $^9_4\text{Be} + ^2_1\text{He} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n}$. Освобождается или поглощается энергия?

204. Вычислить энергию ядерной реакции $^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n}$. Освобождается или поглощается эта энергия?

205. Вычислить энергию ядерной реакции $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$. Освобождается или поглощается эта энергия?

206. Вычислить энергию ядерной реакции $^6_3\text{Li} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^1_1\text{p}$. Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

207. Вычислить энергию ядерной реакции $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$.

208. Вычислить энергию ядерной реакции $^2_1\text{H}(n, \gamma)^3_1\text{H}$.

209. Фотон с энергией $\epsilon = 1,53$ МэВ превратился в пару электрон-позитрон. Принимая, что кинетическая энергия частиц одинакова, определить кинетическую энергию каждой частицы.

210. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии $T = 0,51$ МэВ, при взаимодействии превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию ϵ каждого фотона и соответствующую ему длину волны λ .

11.ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

§ 11.1 Тесты по теме тепловое излучение

Задание 1. Выберите правильное утверждение. Тепловым излучением называют ...

а) электромагнитные волны, испускаемые всеми телами; б) электромагнитные волны, испускаемые черными телами; в) электромагнитные волны, испускаемые телами с температурой выше 0°C ; г) механические волны, испускаемые всеми телами; д) механические волны, испускаемые телами с температурой выше 0°C .

Задание 2. Среднюю мощность излучения за время, значительно большее периода световых колебаний, называют ...

а) энергетической светимостью; б) потоком излучения; в) коэффициентом поглощения; г) спектральной плотностью энергетической светимости.

Задание 3. Поток излучения, испускаемый с единицы площади поверхности тела, называют ...

а) энергетической светимостью; б) монохроматическим коэффициентом поглощения; в) спектральной плотностью энергетической светимости; г) коэффициентом поглощения.

Задание 4. Величина, равная отношению энергетической светимости узкого участка спектра к ширине этого участка, называется ...

а) энергетическая светимость; б) поток излучения; в) коэффициент поглощения; г) спектральная плотность энергетической светимости.

Задание 5. Величина, равная отношению потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него, называется ...

а) энергетическая светимость; б) поток излучения; в) коэффициент поглощения; г) спектральная плотность энергетической светимости.

Задание 6. Коэффициент поглощения может принимать значения ...

а) большие 0; б) меньше 0; в) от -1 до 1; г) от 0 до 1.

Задание 7. Укажите единицу СИ энергетической светимости:

а) Вт; б) Дж/с; в) Вт/м²; г) Вт/м³; д) Вт·м².

Задание 8. Укажите единицу СИ спектральной плотности энергетической светимости:

а) Вт; б) Дж/с; в) Вт/м²; г) Вт/м³; д) Вт·м².

Задание 9. Тело, коэффициент поглощения которого равен 1 для всех частот, называют ...

а) серым; б) цветным; в) черным; г) белым.

Задание 10. Тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы и не зависит от длины волны света, падающего на него, называют ...

а) серым; б) цветным; в) черным; г) белым.

Задание 11. Выберите верное утверждение закона Кирхгофа:

а) при одинаковой спектральной плотности энергетической светимости отношение температуры к монохроматическому коэффициенту поглощения одинаково для любых тел;

б) при одинаковом коэффициенте поглощения отношение спектральной плотности энергетической светимости к температуре одинаково для любых тел;

в) при одинаковой температуре отношение спектральной плотности энергетической светимости к монохроматическому коэффициенту поглощения одинаково для любых тел;

г) при одинаковой температуре отношение энергетической светимости к потоку излучения одинаково для любых тел;

д) при одинаковой спектральной плотности энергетической светимости отношение потока излучения к монохроматическому коэффициенту поглощения одинаково для любых тел.

Задание 12. Закон Кирхгофа при заданной температуре T аналитически записывается так:

а) $(r_l/T)_1 = (r_l/T)_2 = \dots = (r_l/T)_n$; б) $(r_l/\alpha_l)_1 = (r_l/\alpha_l)_2 = \dots = (r_l/\alpha_l)_n$; в) $(T/\alpha_l)_1 = (T/\alpha_l)_2 = (T/\alpha_l)_n$; г) $(r_l/\alpha_l)_1 = (r_l/\alpha_l)_2 = (r_l/\alpha_l)_n$

Задание 13. Выберите верную формулировку закона Стефана-Больцмана:

- а) спектральная плотность энергетической светимости черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры;
- б) коэффициент поглощения черного тела пропорционален четвертой степени его термодинамической температуры;
- в) энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры;
- г) энергетическая светимость черного тела пропорциональна второй степени его термодинамической температуры;
- д) энергетическая светимость черного тела обратно пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры.

Задание 14. Выберите верную формулировку закона смещения Вина:

- а) максимальная длина волны теплового излучения черного тела обратно пропорциональна его термодинамической температуре;
- б) максимальная длина волны теплового излучения черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры;
- в) длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости черного тела, пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры;
- г) длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре;
- д) длина волны, на которую приходится максимум энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре.

Задание 15. Формула Планка представляет собой зависимость ...

- а) спектральной плотности энергетической светимости черного тела от его коэффициента поглощения и длины волны излучения;
- б) спектральной плотности энергетической светимости черного тела от его термодинамической температуры и длины волны излучения;
- в) энергетической светимости черного тела от его термодинамической температуры и длины волны излучения;
- г) энергетической светимости черного тела от его термодинамической температуры и коэффициента поглощения.

Задание 16. Укажите верные высказывания:

- а) Отношение спектральной плотности энергетической светимости любого тела к его соответствующему монохроматическому коэффициенту поглощения равно спектральной плотности энергетической светимости черного тела при той же температуре.
- б) Спектральная плотность энергетической светимости любого тела больше спектральной плотности энергетической светимости черного тела при той же температуре.
- в) Черное тело при прочих равных условиях является наименее интенсивным источником теплового излучения.

Задание 17. Укажите верные высказывания:

- а) Максимум спектральной плотности энергетической светимости с повышением температуры смещается в сторону длинных волн.
- б) Максимум спектральной плотности энергетической светимости с уменьшением температуры смещается в сторону длинных волн.
- в) Максимум спектральной плотности энергетической светимости с повышением температуры смещается в сторону коротких волн.
- г) Энергетическая светимость уменьшается по мере нагревания черного тела.
- д) Энергетическая светимость увеличивается по мере остывания черного тела.

Задание 18. Укажите верные высказывания:

- а) Спектральная плотность энергетической светимости любого тела меньше спектральной плотности энергетической светимости черного тела при той же температуре.
- б) Спектральная плотность энергетической светимости любого тела больше спектральной плотности энергетической светимости черного тела.
- в) Спектральная плотность энергетической светимости любого тела больше спектральной плотности энергетической светимости черного тела при той же температуре.

Задание 19. Укажите верные высказывания:

- а) Зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны называют потоком излучения черного тела.
- б) Зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны называют спектром излучения тела.
- в) Зависимость потока излучения от длины волны называют спектром излучения тела.
- г) Зависимость спектральной плотности энергетической светимости от температуры тела называют спектром излучения тела.

Задание 20. Укажите верные высказывания:

- а) Теплообмен организма с окружающей средой происходит посредством только теплопроводности и испарения.
- б) Наибольшая доля тепловых потерь приходится на испарение с поверхности кожи и легких и на излучение во внешнюю среду от открытых частей тела.
- в) Теплообмен организма с окружающей средой происходит посредством только излучения (поглощения) и испарения.

Задание 21. Абсолютно черное тело (АЧТ) – это тело...

- а) рассеивающее все падающее на него излучение; б) не излучающее электромагнитные волны; в) абсолютно черного цвета; г) поглощающее все падающее на него излучение.

Задание 22. Спектральная плотность энергетической светимости черного тела в некотором интервале длин волн равна $3 \cdot 10^{13}$ Вт/м³. Определите соответствующую спектральную плотность энергетической светимости серого тела, имеющего ту же температуру и коэффициент поглощения 0,8.

а) $3,75 \cdot 10^{13}$ Вт/м³; б) $2,40 \cdot 10^{13}$ Вт/м³; в) $240 \cdot 10^{13}$ Вт/м³; г) $0,27 \cdot 10^{13}$ Вт/м³.

Задание 23. Вычислите, во сколько раз отличаются энергетические светимости участков тела человека, имеющих температуры 30,5 и 30,0 °С соответственно.

а) в 1,0066 раз; б) в 1,068 раз; в) в 1,67 раз; г) не изменяется.

Задание 24. Как изменится энергетическая светимость серого тела, если вследствие изменения его температуры максимум спектральной плотности энергетической светимости сместился с $\lambda_1 = 800$ нм на $\lambda_2 = 2400$ нм?

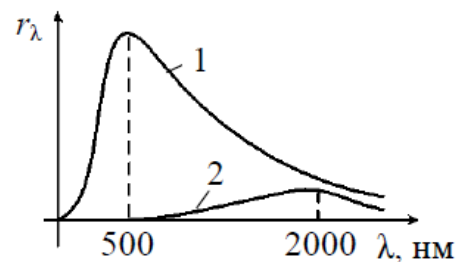
а) увеличилась в 3 раза; б) уменьшилась в 3 раза; в) уменьшилась в 9 раз; г) уменьшилась в 81 раз; д) увеличилась в 81 раз.

Задание 25. Абсолютно черное и серое тело имеют одинаковую температуру. При этом интенсивность излучения...

а) определяется площадью поверхности тела; б) больше у серого тела; в) больше у абсолютно черного тела; г) одинаковая у обоих тел.

Задание 26. По мере нагревания твердого тела цвет излучения меняется в следующей последовательности:

а) красный, желтый, синий; б) синий, красный, желтый; в) синий, желтый, красный; г) фиолетовый, зеленый, красный.



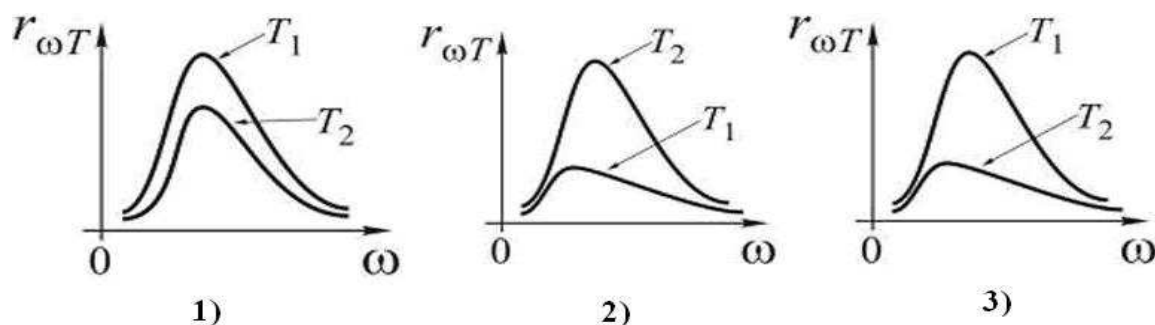
Задание 27. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны при разных температурах. Если кривая 2 соответствует...

а) 5800 К; б) 725 К; в) 2900 К; г) 1933 К.

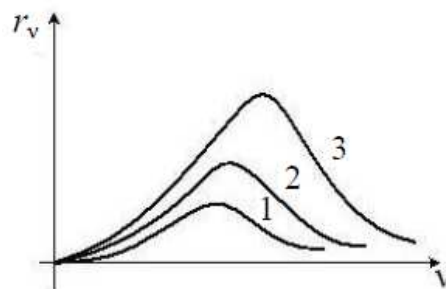
Задание 28. Для условия теста 27 отношение энергетических светимостей $R_{Э1} / R_{Э2}$ равно

а) 256; б) 16; в) 1/16; г) 1/256

Задание 29. Распределение энергии в спектре излучения АЧТ в зависимости от частоты излучения для температур T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) верно представлено на рисунке...



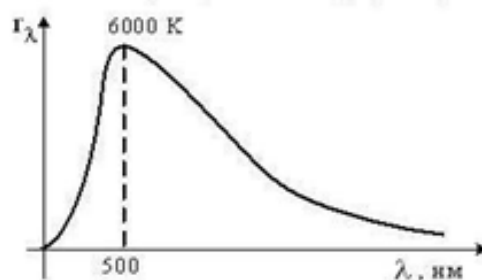
Задание 30. На рисунке представлены графики зависимости спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от частоты при различных температурах. Наибольшей температуре соответствует график...



а) 1; б) 2; в) 3; г) 1 и 2.

Задание 31. Длина волны теплового излучения нагретого тела увеличилась в 2 раза. Его температура при этом...

а) увеличилась в 2 раза; б) увеличилась в 16 раз; в) уменьшилась в 16 раз; г) уменьшилась в 2 раза.



Задание 32. На рисунке показан график зависимости спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны при $T = 6000\text{K}$. Если

температуру уменьшить в 4 раза, то длина волны, соответствующая максимуму излучения АЧТ...

- а) увеличится в 4 раза; б) уменьшится в 2 раза; в) увеличится в 2 раза; г) уменьшится в 4 раза.

Задание 33. На рисунке задания 40 показана кривая зависимости спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны при температуре T . При температуре T_1 площадь под кривой увеличилась в 16 раз. Температура T_1 равна...

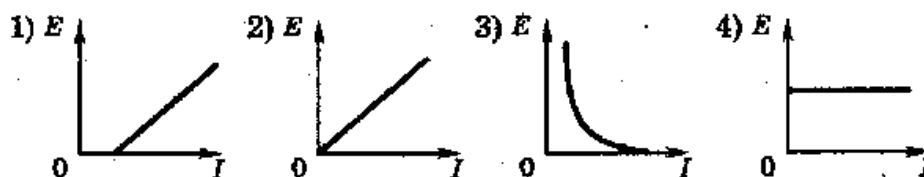
- а) $T/2$; б) $4T$; в) $2T$; г) $T/4$.

Задание 34. Температура АЧТ увеличилась в 2 раза. При этом энергия излучения...

- а) уменьшилась в 4 раза; б) увеличилась в 16 раз; в) увеличилась в 4 раза; г) уменьшилась в 16 раз.

§ 11.2 Тесты по теме фотоэффект

Задание 35. Четырех учеников попросили нарисовать общий вид графика зависимости максимальной кинетической энергии электронов, вылетевших из пластины в результате фотоэффекта, от интенсивности падающего света. Какой рисунок выполнен правильно?



Задание 36. Металлическую пластину освещали монохроматическим светом одинаковой интенсивности: сначала красным, потом зеленым, затем синим. В каком случае максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов была наибольшей?

а) при освещении красным светом; б) при освещении зеленым светом; в) при освещении синим светом; г) во всех случаях одинаковой.

Задание 37. От чего зависит максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, выбиваемых из металла при фотоэффекте?

- А. От частоты падающего света
- Б. От интенсивности падающего света
- В. От работы выхода электронов из металла

а) только Б; б) А и Б; в) А и В; г) А, Б, В.

Задание 38. При фотоэффекте задерживающая разность потенциалов не зависит от

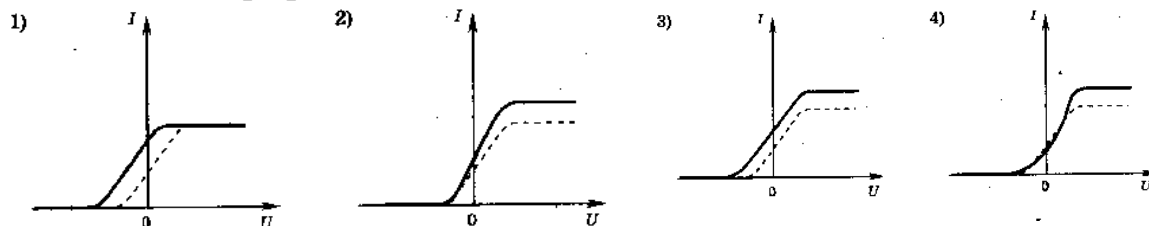
- А. частоты света
- Б. интенсивности света
- В. угла падения света

а) А и Б; б) Б и В; в) А и В; г) А, Б, В.

Задание 39. Как изменится минимальная частота, при которой возникает фотоэффект, если пластинке сообщить положительный заряд?

а) не изменится; б) увеличится; в) уменьшится; г) увеличится или уменьшится в зависимости от рода вещества.

Задание 40. Фотоэлемент освещают светом с определенными частотами и интенсивностью. На рисунке пунктирной линией представлен график зависимости силы фототока в этом фотоэлементе от приложенного к нему напряжения. В случае увеличения частоты без изменения интенсивности падающего света график изменится. На каком из приведенных рисунков правильно показано изменение графика?



Задание 41. Поверхность металла освещают светом, длина волны которого меньше длины волны, соответствующей красной границе фотоэффекта для данного вещества. При увеличении интенсивности света

а) фотоэффект не будет происходить при любой интенсивности света; б) будет увеличиваться количество фотоэлектронов; в) будет увеличиваться энергия фотоэлектронов; г) будет увеличиваться как энергия, так и количество фотоэлектронов.

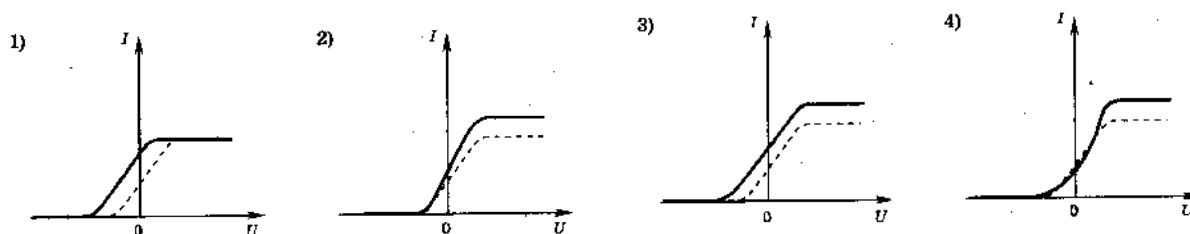
Задание 42. При фотоэффекте работа выхода электрона из металла зависит от...

а) частоты падающего света; б) интенсивности падающего света; в) химической природы металла; г) кинетической энергии вырываемых электронов.

Задание 43. Как изменится минимальная частота, при которой возникает фотоэффект, если пластинке сообщить положительный заряд?

а) не изменится; б) увеличится; в) уменьшится; г) увеличится или уменьшится в зависимости от рода вещества.

Задание 44. Фотоэлемент освещают светом с определенными частотами и интенсивностью. На рисунке пунктирной линией представлен график зависимости силы фототока в этом фотоэлементе от приложенного к нему напряжения. В случае увеличения интенсивности падающего света той же частоты график изменится. На каком из приведенных рисунков правильно показано изменение графика?



Задание 45. В своих опытах Столетов измерял максимальную силу тока (ток насыщения) при освещении электрода ультрафиолетовым светом. Сила тока насыщения при увеличении падающего света и неизменной его частоте будет...

а) увеличиваться; б) уменьшаться; в) оставаться неизменной; г) сначала увеличиваться, затем уменьшаться.

Задание 46. Кинетическая энергия электронов, выбиваемых из металла при фотоэффекте, не зависит от

А – частоты падающего света

Б - интенсивности падающего света

В – площади освещаемой поверхности

Какие утверждения правильны?

а) Б и В; б) А и Б; в) А и В; г) Б и В.

Задание 47. Энергия фотона, поглощенного при фотоэффекте, равна E . Кинетическая энергия электрона, вылетевшего с поверхности металла под действием этого фотона

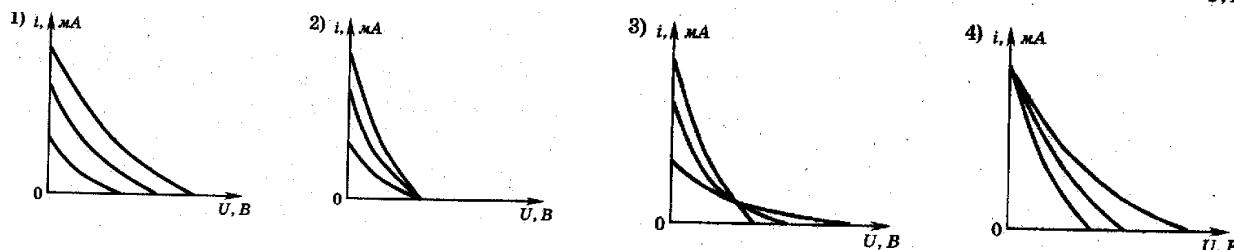
а) больше E ; б) меньше E ; в) равна E ; г) может быть больше или меньше E при разных условиях.

Задание 48. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится максимальная энергия вылетевших фотоэлектронов при уменьшении частоты падающего света в 2 раза?

а) увеличится в 2 раза; б) уменьшится в 2 раза; в) уменьшится более чем в 2 раза; г) уменьшится менее чем в 2 раза.

Задание 49. Было проведено три эксперимента по измерению зависимости фототока от приложенного напряжения между катодом и анодом. Металлическая пластинка катода освещалась монохроматическим светом одной и той

же частоты, но разной интенсивности. На каком из рисунков правильно отражены результаты экспериментов?



Задание 50. Интенсивность света, падающего на фотокатод, уменьшилась в 10 раз. При этом уменьшилась (-ось)

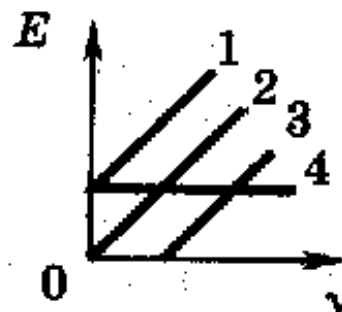
а) максимальная скорость фотоэлектронов; б) максимальная энергия фотоэлектронов; в) число фотоэлектронов; г) максимальный импульс фотоэлектронов.

Задание 51. При увеличении угла падения на плоский фотокатод монохроматического излучения с неизменной длиной волны максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

а) возрастает; б) уменьшается; в) не изменяется; г) возрастает при $\lambda > 500$ нм и уменьшается при $\lambda < 500$ нм.

Задание 52. Какой график соответствует зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов E от частоты ν падающих на вещество фотонов при фотоэффекте?

а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.



Задание 53. Явление испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения называется...

а) ударной ионизацией; б) фотосинтезом; в) фотоэффектом; г) электризацией.

Задание 54. При исследовании внешнего фотоэффекта А. Г. Столетов выяснил, что...

а) энергия фотона прямо пропорциональна частоте света; б) вырывание электронов с поверхности вещества происходит под действием света; в) сила фото-

тока прямо пропорциональна частоте падающего света; г) фототок возникает при частотах падающего света, превышающих некоторое значение.

Задание 55. Свет, падающий на металл, вызывает эмиссию электронов. Если интенсивность света уменьшается, а его частота остаётся неизменной, то.

а) количество выбитых электронов остаётся неизменным, а их кинетическая энергия увеличивается; б) количество выбитых электронов уменьшается, а их кинетическая энергия остаётся неизменной; в) количество выбитых электронов увеличивается, а их кинетическая энергия уменьшается; г) количество выбитых электронов и их кинетическая энергия увеличиваются; д) количество выбитых электронов остаётся неизменным, а их кинетическая энергия уменьшается.

Задание 56. При фотоэффекте задерживающая разность потенциалов *не* зависит...

А. От частоты падающего света.

Б. Интенсивности падающего света.

В. Угла падения света.

Какие утверждения правильны?

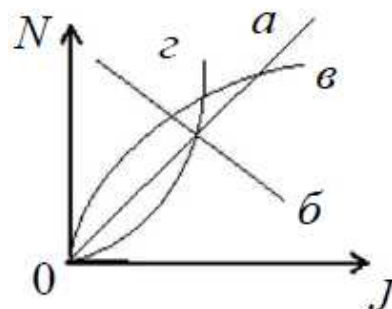
а) А и Б; б) Б и В; в) А и В; г) А, Б и В.

Задание 57. Кинетическая энергия электронов при внешнем фотоэффекте увеличивается, если...

а) уменьшается работа выхода электронов из металла; б) увеличивается интенсивность светового потока; в) уменьшается энергия падающего кванта; г) увеличивается работа выхода электронов из металла.

Задание 58. На металлическую пластинку падает монохроматический свет, при этом количество N фотоэлектронов, вылетающих с поверхности единицу времени, зависит от интенсивности J света согласно графику ...

а) в; б) а; в) б; г) з.



Задание 59. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Если интенсивность света уменьшится в 4 раза, то количество фотоэлектронов, вырываемых светом за одну секунду...

а) не изменится; б) уменьшится в 2 раза; в) уменьшится в 4 раза; г) уменьшится в 16 раз.

Задание 60. Наблюдается явление внешнего фотоэффекта. При этом с уменьшением длины волны падающего света...

а) увеличивается величина задерживающей разности потенциалов; б) уменьшается кинетическая энергия электронов; в) уменьшается энергия фотонов; г) увеличивается красная граница фотоэффекта.

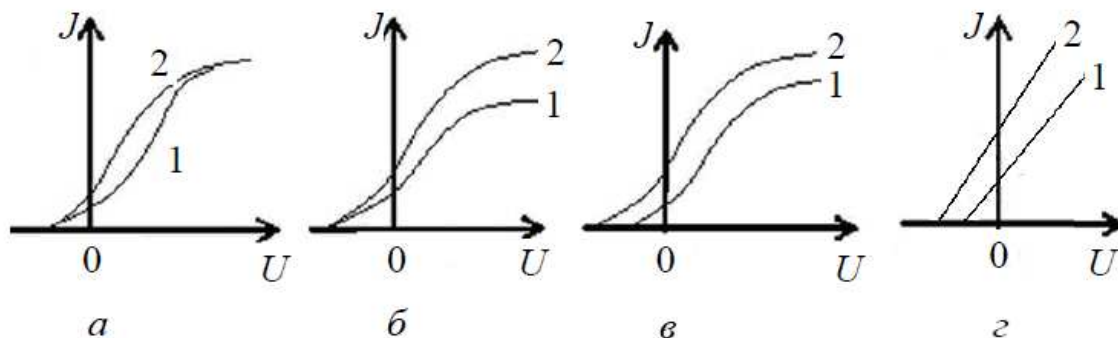
Задание 61. Внешний фотоэффект в металле вызывается монохроматическим излучением. При увеличении интенсивности этого излучения в 2 раза максимальная скорость фотоэлектронов, покидающих металл...

а) увеличится в 4 раза; б) увеличится в $\sqrt{2}$ раз; в) увеличится в 2 раза; г) не изменится.

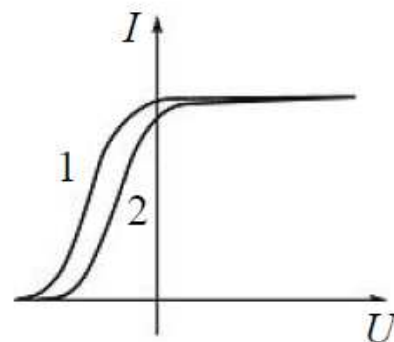
Задание 62. Красная граница фотоэффекта приходится на зеленый свет. Фотоэффект будет наблюдаться при освещении катода светом...

а) любым; б) желтым; в) красным; г) фиолетовым.

Задание 63. Если длина волны света, падающего на фотоэлемент, остается неизменной, то при увеличении падающего светового потока $\Phi_2 > \Phi_1$ изменения в вольт-амперной характеристике правильно представлено на рисунке...

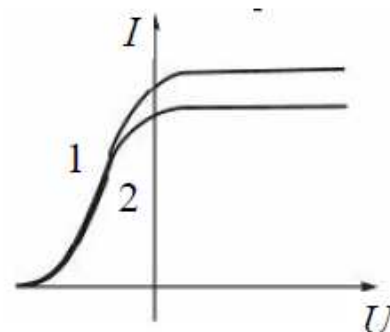


Задание 64. На рисунке приведены две вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента. Если E – освещенность фотоэлемента, а ν – частота падающего на него света, то для данного случая справедливы соотношения...



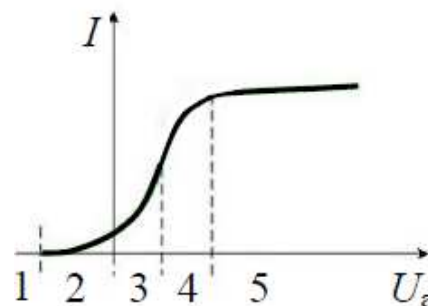
- а) $\nu_1 < \nu_2$, $E_1 = E_2$; б) $\nu_1 = \nu_2$, $E_1 < E_2$; в) $\nu_1 = \nu_2$, $E_1 > E_2$; г) $\nu_1 > \nu_2$, $E_1 = E_2$.

Задание 65. На рисунке приведены две вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента. Если E – освещенность фотоэлемента, а ν – частота падающего на него света, то для данного случая справедливы соотношения...



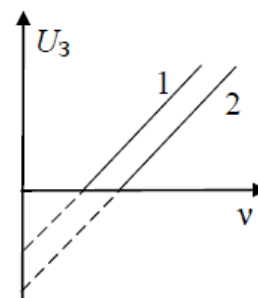
- а) $\nu_1 > \nu_2$; $E_1 = E_2$; б) $\nu_1 = \nu_2$; $E_1 > E_2$; в) $\nu_1 = \nu_2$; $E_1 < E_2$; г) $\nu_1 < \nu_2$; $E_1 = E_2$.

Задание 66. На рисунке приведена вольт-амперная характеристика фотоприемника с внешним фотоэффектом. Какая область на графике соответствует попаданию всех вылетевших в результате фотоэмиссии электронов на анод фотоприемника?



- а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5.

Задание 67. При изучении внешнего фотоэффекта были получены две зависимости задерживающего напряжения U_3 от частоты падающего света ν . Верным является утверждение, что зависимости получены...



- а) для двух различных металлов, при этом работа выхода для второго металла больше;

- б) двух различных металлов, при этом работа выхода для первого металла больше;
- в) одного и того же металла при различных его освещенностях, при этом освещенность первого металла больше;
- г) одного и того же металла при различных его освещенностях, при этом освещенность второго металла больше.

Задание 68. Уединенный медный шарик освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны $\lambda = 165$ нм. Если работа выхода электрона для меди $A = 4,5$ эВ, то максимальный потенциал, до которого может зарядиться шарик, равен... ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл)

- а) 30 В; б) 45 В; в) 4,5 В; г) 3,0 В.

Задание 69 Катод вакуумного фотоэлемента освещается светом с энергией квантов 10 эВ. Если фототок прекращается при подаче на фотоэлемент задерживающего напряжения 4 В, то работа выхода электронов из катода равна...

- а) 6 эВ; б) 14 эВ; в) 7 эВ; г) 3,0 эВ.

§ 11.3 Тесты по теме давление света. Эффект Комптона

Задание 70. Длина волны γ -лучей при комптоновском рассеянии на свободных электронах увеличилась на комптоновскую длину волны. Угол рассеяния равен...

- а) 30° ; б) 60° ; в) 90° г) 45° .

Задание 71. При рассеянии фотона на свободном электроны кинетическая энергия отдачи электрона будет максимальной, если угол рассеяния равен...

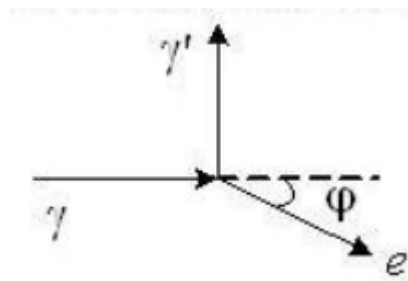
- а) 90° ; б) 180° ; в) 30° ; г) 0° .

Задание 72. В явлении Комптона энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассея-

ния равен 90° . Известно, что $\lambda_c = 2,4 \cdot 10^{-12}$ м – комптоновская длина волны для электрона. Длина волны фотона фемтометрах (10^{-15}) равна...

а) 4800; б) 2400; в) 1200; г) 9600.

Задание 73. На рисунке показаны направления падающего фотона (γ), рассеянного фотона (γ') и электрона отдачи (e). Угол рассеяния 90° , направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол $\phi = 30^\circ$. Если импульс падающего фотона P_ϕ , то импульс рассеянного фотона равен...



а) $1,5\sqrt{3}P_\phi$; б) $P_\phi/\sqrt{3}$; в) $0,5P_\phi$; г) $\sqrt{3}P_\phi$.

Задание 74. Для условия теста 73 импульс электрона отдачи равен...

а) $1,5P_\phi$; б) $2P_\phi/\sqrt{3}$; в) $0,5P_\phi$; г) $1,5\sqrt{3}P_\phi$.

Задание 75. Для условия задания 73, если импульс рассеянного фотона $2\sqrt{3}$ (МэВ·с)/м, то импульс падающего фотона (в тех же единицах) равен...

а) $2\sqrt{3}$; б) 3; в) 2; г) 6.

Задание 76. Величина изменения длины волны $\Delta\lambda$ излучения при комптоновском рассеянии зависит...

а) от свойств рассеивающего вещества; б) энергии падающего фотона; в) угла рассеяния излучения.

Задание 77. Одинаковое количество фотонов с длиной волны λ нормально падает на непрозрачную поверхность. Наибольшее давление свет будет оказывать в случае, если...

а) $\lambda = 700$ нм, поверхность абсолютно черная; б) $\lambda = 700$ нм, поверхность – идеальное зеркало; в) $\lambda = 400$ нм, поверхность – идеальное зеркало; г) $\lambda = 400$ нм, поверхность абсолютно черная.

Задание 78. Два источника излучают свет с длинами волн $\lambda_1 = 375$ нм и $\lambda_2 = 750$ нм. Отношение импульсов фотонов, излучаемых первым и вторым источником, равно...

а) 1/2; б) 2; в) 4; г) 1/4.

Задание 79. Фотон с длиной волны $\lambda = 4,86$ пм рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроне. Комптоновская длина волны для электрона $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м. Отношение максимально возможной длины волны рассеянного фотона к его первоначальной длине равно...

а) 1; б) 2; в) 3; г) 1/2.

Задание 80. Если зачерненную пластину, на которую падает свет, заменить на зеркальную той же площади, то световое давление...

а) уменьшится в 2 раза; б) не изменится; в) увеличится в 2 раза; г) увеличится в 4 раза.

Задание 81. Если зеркальную пластинку, на которую падает свет, заменить на зачерненную той же площади, то световое давление ...

а) уменьшится в 2 раза; б) не изменится; в) увеличится в 2 раза; г) увеличится в 4 раза.

Задание 82. Если увеличить в 2 раза объемную плотность световой энергии, то давление света...

а) увеличится в 2 раза; б) увеличится в 4 раза; в) не изменится; г) увеличится в 4 раза.

Задание 83. Один и тот же световой поток падает нормально на абсолютно белую и абсолютно черную поверхности. Отношение давления света на первую и вторую поверхности равно...

а) 1/4; б) 4; в) 2; г) 1/2.

Задание 84. Давление света на поверхность, имеющую коэффициент отражения $\rho = 0,25$, составило 0,25 мкПа. Энергетическая освещенность этой поверхности равна...

а) 30 Вт/м^2 ; б) 120 Вт/м^2 ; в) 250 Вт/м^2 ; г) 60 Вт/м^2 .

Задание 85. Солнечный свет падает на зеркальную поверхность по нормали к ней. Если интенсивность солнечного излучения равна $1,37 \text{ кВт/м}^2$, то давление света на поверхность приблизительно равно...

а) 18 мкПа ; б) 90 мкПа ; в) 3 мкПа ; г) 9 мкПа .

Задание 86. На зеркальную поверхность направляют поочередно поток одинаковой интенсивности фиолетовых, зеленых, желтых, красных лучей. Давление света на эту поверхность будет наименьшим для лучей...

а) желтого цвета; б) фиолетового цвета; в) зеленого цвета, г) красного цвета.

Задание 87. Давление света на поверхность, имеющую коэффициент отражения $\rho = 0,5$, при энергетической освещенности $E = 200 \text{ Вт/м}^2$ составляет...

а) 1 мкПа ; б) 10 мкПа ; в) $0,01 \text{ мкПа}$; г) $0,001 \text{ мкПа}$.

Задание 88. Параллельный пучок света падает по нормали на зачерненную плоскую поверхность, производя давление P . При замене поверхности на зеркальную давление света не изменяется, если угол падения (отсчитываемый от нормали к поверхности) будет равен...

а) 30° б) 0° в) 45° г) 60°

Задание 89. На зеркальную поверхность площадью $S=6 \text{ см}^2$ падает нормально поток излучения $\Phi_e=0,8 \text{ Вт}$. Определить силу давления F света на эту поверхность.

а) $5,3 \text{ нН}$; б) 53 нН ; в) 6 нН ; г) 60 нН .

Тесты по теме атом водорода по Бору

Задание 90. В планетарной модели атома принимается...

а) число электронов на орбитах равно числу протонов в ядре; б) число протонов равно числу нейтронов в ядре; в) число электронов на орбитах равно сумме

чисел протонов и нейтронов в ядре; г) число нейтронов в ядре равно сумме чисел электронов на орбитах и протонов в ядре.

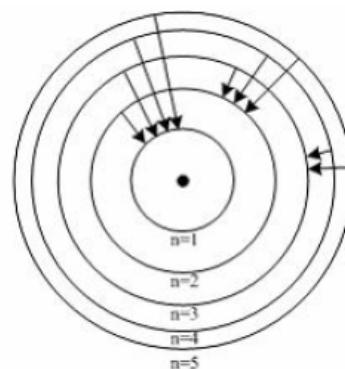
Задание 91. Излучение фотонов происходит при переходе из возбужденных состояний с энергиями $E_1 > E_2 > E_3$ в основное состояние. Для частот соответствующих фотонов ν_1, ν_2, ν_3 справедливо соотношение...

а) $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$; б) $\nu_2 < \nu_1 < \nu_3$; в) $\nu_2 < \nu_3 < \nu_1$; г) $\nu_1 > \nu_2 > \nu_3$.

Задание 92. Фотон с энергией 16,5 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Выбитый электрон вдали от ядра будет иметь скорость u , равную...

а) $3 \cdot 10^8$ м/с; б) $1 \cdot 10^8$ м/с; в) $1 \cdot 10^7$ м/с; г) $1 \cdot 10^6$ м/с; д) $1 \cdot 10^5$ м/с.

Задание 93. На рисунке изображены стационарные орбиты атома водорода согласно модели Бора, а также условно изображены переходы электрона с одной стационарной орбиты на другую, сопровождающиеся излучением кванта энергии. В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают серию Лаймана, в видимой – серию Бальмера, в инфракрасной – серию Пашена. *Наибольшей* частоте кванта в серии Лаймана соответствует переход ...



а) $n = 5 \rightarrow n = 3$; б) $n = 5 \rightarrow n = 2$; в) $n = 5 \rightarrow n = 1$; г) $n = 2 \rightarrow n = 1$.

Задание 94. На рисунке к заданию 93 *наибольшей* частоте кванта в серии Бальмера соответствует переход...

а) $n = 3 \rightarrow n = 2$; б) $n = 5 \rightarrow n = 2$; в) $n = 2 \rightarrow n = 1$; г) $n = 4 \rightarrow n = 3$.

Задание 95. На рисунке к заданию 93 *наименьшей* частоте кванта в серии Лаймана соответствует переход...

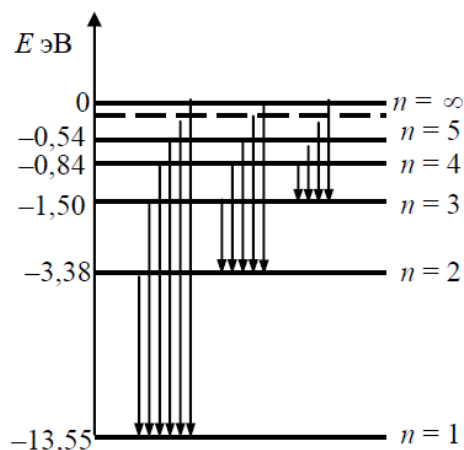
а) $n = 5 \rightarrow n = 3$; б) $n = 5 \rightarrow n = 1$; в) $n = 2 \rightarrow n = 1$; г) $n = 4 \rightarrow n = 3$.

Задание 96. На рисунке к заданию 93 *наименьшей* энергии кванта в серии Пашена соответствует переход...

а) $n = 5 \rightarrow n = 3$; б) $n = 5 \rightarrow n = 1$; в) $n = 2 \rightarrow n = 1$; г) $n = 4 \rightarrow n = 3$.

Задание 97. На рисунке дана схема энергетических уровней атома водорода. Наименьшая длина волны спектральной линии серии Пашена равна ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с)...

а) 829 нм; б) 661 нм; в) 122 нм; г) 368 нм.



Задание 98. На рисунке задания 97 дана схема энергетических уровней атома водорода. Наибольшая длина волны спектральной линии серии Лаймана равна ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с)...

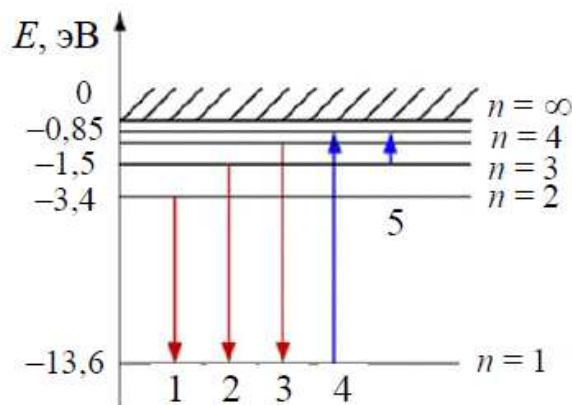
а) 92 нм; б) 661 нм; в) 122 нм; г) 368 нм.

Задание 99. На рисунке задания 97 дана схема энергетических уровней атома водорода. Отношение максимальной частоты линии в серии Пашена к минимальной частоте линии в серии Бальмера равно...

а) 4/5; б) 1/3; в) 4/27; г) 5/36.

Задание 100. На рисунке представлена диаграмма энергетических уровней водорода. Поглощение фотона с наибольшей длиной волны происходит при переходе, обозначенном стрелкой под номером...

а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5.



Задание 101. Электрон в атоме

водорода перешел из основного состояния в возбужденное с $n = 3$. Радиус его боровской орбиты...

а) увел. в 9 раз; б) не изменился; в) увеличился в 3 раза; г) уменьшился в 3 раза.

Задание 102. Главное квантовое число n определяет...

а) энергию стационарного состояния электрона в атоме; б) орбитальный механический момент электрона в атоме; в) проекцию орбитального момента импульса электрона на заданное направление; г) собственный механический момент электрона в атоме.

Задание 103. В видимом диапазоне спектра излучения газа неизвестного состава обнаружены только две линии, соответствующие длинам волн 557 и 587 нм. В видимом диапазоне спектра поглощения этого газа...

а) будут присутствовать только эти две линии; б) эти две линии будут отсутствовать; в) будет присутствовать только одна линия, соответствующая 557 нм; г) будет присутствовать только одна линия, соответствующая 587 нм.

Задание 104. В видимой части спектра поглощения газа неизвестного состава обнаружены 3 линии. Отсюда следует, что газ

а) обязательно содержит 3 элемента; б) обязательно содержит 1 элемент; в) обязательно содержит 3 или 1 элемент; г) может содержать 1, 2 или 3 элемента.

§ 11.4. Тесты по теме квантовая механика

Задание 105. Энергия первого фотона в четыре раза больше энергии второго. Отношение импульса первого фотона к импульсу второго равно...

а) 8; б) $1/4$; в) 2; г) 4.

Задание 106. Де Бройль обобщил соотношение $p = h/\lambda$ для фотона на любые волновые процессы, связанные с частицами, импульс которых равен p . Тогда если скорость частиц одинакова, то наименьшей длиной волны обладают...

а) протоны; б) α - частицы; в) нейтроны; г) электроны.

Задание 107. Длина волны де Бройля частицы уменьшилась вдвое. Скорость частицы...

а) увеличилась в 4 раза; б) уменьшилась вдвое; в) уменьшилась в 4 раза; г) увеличилась вдвое.

Задание 108. Если частицы имеют одинаковую длину волны де Бройля, то наименьшей скоростью обладает...

а) протон; б) позитрон; в) нейтрон; г) альфа-частица.

Задание 109. Если частицы имеют одинаковую длину волны де Бройля, то наибольшей скоростью обладает ...

а) протон; б) позитрон; в) нейтрон; г) альфа-частица

Задание 110. Отношение длин волн де Бройля нейтрона и α -частицы, имеющих одинаковые скорости, равно...

а) 4; б) $1/4$; в) 2; г) $1/2$.

Задание 111. Отношение длин волн де Бройля протона и α -частицы, имеющих одинаковую кинетическую энергию равно...

а) 4; б) $1/4$; в) 2; г) $1/2$.

Задание 112. Если молекула водорода, позитрон, протон и α -частица имеют одинаковую длину волны де Бройля, то наибольшей скоростью обладает

а) молекула водорода; б) α -частица; в) позитрон; г) протон.

Задание 113. Отношение скорости второй частицы к первой равно 2. Если их длины волн де Бройля одинаковы, то отношение масс m_1/m_2 этих частиц равно...

а) $1/4$; б) 4; в) $1/2$; г) 2.

Задание 114. Отношение скоростей протона и α -частицы, длины волн де Бройля которых одинаковы, равно...

а) $1/4$; б) 4; в) $1/2$; г) 2; д) 2.

Задание 115. Если протон и дейтрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов, то отношение их длин волн де Бройля равно...

а) 1; б) 2; в) $1/\sqrt{2}$; г) $\sqrt{2}$

Задание 116. Отношение длин волн де Бройля для дейтрона и α -частицы, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов, равно...

а) 1; б) 2; в) $1/\sqrt{2}$; г) $\sqrt{2}$.

Задание 117. Время жизни атома в возбужденном состоянии 10нс. Учитывая, что постоянная Планка $\hbar = 6,6 \cdot 10^{-16}$ эВ·с, ширина энергетического уровня составляет не менее...

А) $6,6 \cdot 10^{-8}$ эВ; б) $1,5 \cdot 10^{-8}$ эВ; в) $1,5 \cdot 10^{-10}$ эВ; г) $6,6 \cdot 10^{-10}$ эВ.

Задание 118. Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии $\sim 10^{-3}$ с. Учитывая, что постоянная Планка $h = 6,6 \cdot 10^{-16}$ эВ·с, ширина метастабильного состояния будет не менее...

а) $6,6 \cdot 10^{-19}$ эВ; б) $1,5 \cdot 10^{-13}$ эВ; в) $1,5 \cdot 10^{-19}$ эВ; г) $6,6 \cdot 10^{-13}$ эВ.

Задание 119. Положение пылинки массой $m=10^{-9}$ кг определяется с неопределенностью $\Delta x = 0,1$ мкм. Учитывая, что постоянная Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с неопределенность скорости Δv_x будет не менее...

а) $1,05 \cdot 10^{-24}$ м/с; б) $1,05 \cdot 10^{-18}$ м/с; в) $1,05 \cdot 10^{-27}$ м/с; г) $1,05 \cdot 10^{-21}$ м/с.

Задание 120. Ширина следа электрона на фотографии, полученной с использованием камеры Вильсона, составляет 1 мм. Учитывая, что постоянная Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, а масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, неопределенность скорости электрона будет не менее...

а) 0,12 м/с; б) 0,12 мм/с; в) $1,05 \cdot 10^{-31}$ мм/с; г) $1,05 \cdot 10^{-34}$ мм/с.

Задание 121. Отношение неопределенностей проекций скоростей нейтрона и α -частицы на некоторое направление при условии, что соответствующие координаты частиц определены с одинаковой точностью, равно...

а) 4; б) 1/4; в) 2; г) 1/2.

Задание 122. Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном со-

стоянии $\sim 10^{-3}$ с. Учитывая, что постоянная Планка $\hbar = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, ширина метастабильного уровня (в эВ) будет не менее...

а) $6,6 \cdot 10^{-19}$ эВ; б) $1,5 \cdot 10^{-13}$ эВ; в) $1,5 \cdot 10^{-19}$ эВ; г) $6,6 \cdot 10^{-13}$ эВ.

Задание 123. Найти длину волны де Бройля для атома водорода, движущегося при температуре 293 К с наиболее вероятной скоростью.

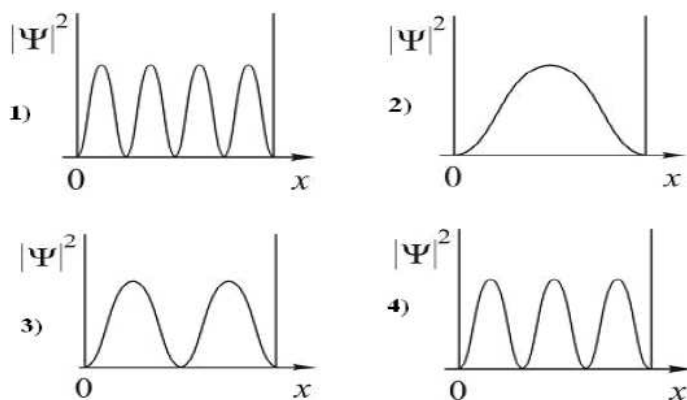
А) 180 нм; б) 180 пм; в) 1800 пм; г) 1.8 нм; д) 0.180 мкм.

Задание 124. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов $U = 200$ В, имеет длину волны де Бройля 2,02 пм. Найти массу частицы, если ее заряд численно равен заряду электрона.

а) 1.82×10^{-26} кг; б) 1.55×10^{-27} кг; в) 1.67×10^{-26} кг; г) 1.67×10^{-27} кг.

§ 11.5 Тесты по теме уравнение Шредингера

Задание 125. На рисунках приведены картины распределения плотности вероятности нахождения микрочастицы в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Состоянию с квантовым числом $n=1$ соответствует рисунок



Задание 126. Из рисунков из задания 125 показать состояние микрочастицы в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками с квантовым числом $n = 2$.

а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.

Задание 130. Из рисунков из задания 125 показать состояние микрочастицы в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками с квантовым числом $n = 4$.

а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.

Задание 131. Вероятность обнаружить электрон на участке (а, b) одномерного потенциального ящика с бесконечно высокими стенками вычисляется по формуле

$$W = \int_a^b \omega dx, \text{ где } \omega - \text{плотность вероятности, определяемая } \psi - \text{функцией.}$$

Если ψ - функция имеет вид,

указанный на рисунке, то вероятность обнаружить электрон на участке

$$\frac{\ell}{8} < x < \frac{\ell}{2} \text{ равна...}$$

а) 3/8; б) 5/8; в) 2/3; г) 1/2.

Задание 132. В состоянии $n = 4$ вероятность обнаружить электрон в интервале $\frac{3\ell}{8} < x < \ell$ равна...

а) 3/8; б) 5/8; в) 3/4; г) 7/8.

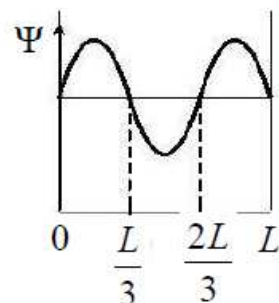
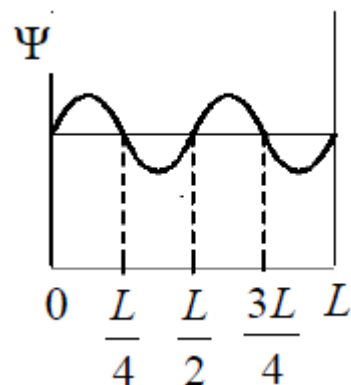
Задание 133. Если ψ -функция имеет вид, указанный на рисунке, то вероятность обнаружить электрон

$$\text{на участке } \frac{\ell}{6} < x < \frac{\ell}{2} \text{ равна...}$$

а) 5/6; б) 1/3; в) 2/3; г) 1/2.

Задание 134. Если ψ -функция имеет вид, указанный на рисунке задания 132, то вероятность обнаружить электрон на участке $\frac{\ell}{6} < x < \frac{5\ell}{6}$ равна...

а) 5/6; б) 1/3; в) 2/3; г) 1/2.

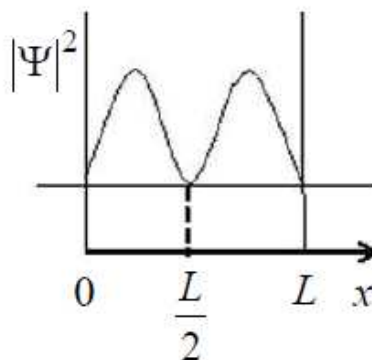


Задание 135. Если ψ -функция имеет вид, указанный на рисунке задания 132, то вероятность обнаружить электрон на участке $\frac{\ell}{6} < x < \frac{\ell}{2}$ равна...

а) 5/6; б) 1/3; в) 2/3; г) 1/2.

Задание 136. Если $|\psi(x)|^2$ имеет вид, указанный на рисунке, то вероятность обнаружить электрон на участке $\frac{\ell}{4} < x < \frac{3\ell}{4}$ равна ...

а) 1/2; б) 3/4; в) 0; г) 1/4.



Задание 137. Если $|\psi(x)|^2$ имеет вид, указанный на рисунке задания 136, то вероятность обнаружить электрон на участке $\frac{\ell}{4} < x < \ell$ равна...

а) 1/2; б) 3/4; в) 0; г) 1/4.

Задание 138. Частица находится в одномерном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками шириной 0,2 нм. Если энергия частицы на втором энергетическом уровне равна 37,8 эВ, то на четвертом энергетическом уровне равна...

а) 9,45 эВ; б) 151,2 эВ; в) 75,6 эВ; г) 18,9 эВ.

Задание 139. Собственные функции электрона в одномерном потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками имеют вид

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin \frac{\pi n}{\ell} x, \text{ где } \ell - \text{ширина ящика; } n - \text{квантовое число (номер энергетического уровня).}$$

Если N – число узлов Ψ_n -функции на участке $0 \leq x \leq \ell$ и

$$\frac{N_{n+1}}{N_{n-1}} = 1,5, \text{ то } n \text{ равно...}$$

а) 2; б) 3; в) 4; г) 6.

Задание 140. Квадрат модуля волновой функции Ψ , входящей в уравнение Шредингера, равен...

- а) импульсу частицы в соответствующем месте пространства;
- б) энергии частицы в соответствующем месте пространства;
- в) плотности вероятности обнаружения частицы в соответствующем месте пространства.

Задание 141. Стационарное уравнение Шредингера имеет вид

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0$$

Это уравнение описывает...

- а) состояние электрона в водородоподобном атоме;
- б) движение свободной частицы;
- в) состояние электрона в трехмерном потенциальном ящике;
- г) линейный гармонический осциллятор.

Задание 142. Стационарное уравнение Шредингера имеет вид

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{kx^2}{2} \right) \psi = 0$$

Это уравнение описывает...

- а) состояние электрона в водородоподобном атоме;
- б) движение свободной частицы;
- в) состояние электрона в трехмерном потенциальном ящике;
- г) линейный гармонический осциллятор.

§ 11.6. Тесты по теме атомное ядро.

Задание 145. В центральной части атома, занимая небольшой объем и обладая его основной массой, находится положительно заряженное ядро. Верным является утверждение...

- а) ядерные силы обладают зарядовой независимостью;

- б) масса ядра равна сумме масс нуклонов;
- в) наименее устойчивые ядра с четными числами протонов и нейтронов;
- г) ядра с одинаковыми массовыми, но разными зарядовыми числами называются изотопами.

Задание 146. В центральной части атома, занимая небольшой объем и обладая его основной массой, находится положительно заряженное ядро. *Неверным* является утверждение...

- а) ядерные силы, удерживающие ядро, обладают зарядовой независимостью;
- б) протоны, входящие в состав ядра, определяют его заряд;
- в) масса ядра равна сумме масс образующих его нуклонов;
- г) наиболее устойчивые ядра с четными числами протонов и нейтронов.

Задание 147. В ядре изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ содержится...

- а) 6 протонов и 8 нейтронов; б) 6 протонов и 14 нейтронов; в) 14 протонов и 6 нейтронов; г) 8 протонов и 6 нейтронов.

Задание 148. Нуклидами с одинаковым атомным номером называют...

- А) изомеры; б) изобары; в) изотопы; г) электроны в свободном состоянии.

Задание 149. Изобарами называются нуклиды...

- а) обладающие одинаковым спином; б) с невозбужденной оболочкой; в) с одинаковым числом нейтронов; г) с одинаковым массовым числом.

Задание 150. Для ядерных сил справедливым является утверждение, что они...

- а) проявляются лишь на малых расстояниях (короткодействие);
- б) являются центральными, т. е. действуют по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов;
- в) обладают зарядовой зависимостью;
- г) не зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов.

Задание 151. Для ядерных сил *не* характерно:

а) действие по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов, что характерно для центральных сил; б) короткодействие; в) насыщение; г) зависимость от взаимной ориентации взаимодействующих нуклонов.

Задание 152. Чем меньше энергия связи ядра, тем...

а) меньше у него энергия покоя; б) больше у него дефект масс; в) меньшую работу нужно совершить, чтобы разделить его на нуклоны; г) меньше энергии выделится в реакции термоядерного синтеза этого ядра с другими ядрами; Д) больше энергии выделится при его распаде на отдельные нуклоны.

Задание 153. Неизвестный радиоактивный химический элемент самопроизвольно распадается по схеме: $X \rightarrow {}_{36}^{91}\text{Kr} + {}_{6}^{142}\text{Ba} + 3n$. Ядро этого элемента содержит...

а) 92 протона и 142 нейтрона; б) 4 протона и 144 нейтрона; в) 94 протона и 142 нейтрона; г) 92 протона и 144 нейтрона.

Задание 154. Неизвестный радиоактивный химический элемент самопроизвольно распадается по схеме: $X \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + n + e^+ + \nu_e$. Ядро этого элемента содержит...

а) 15 протонов и 17 нейтронов; б) 14 протонов и 17 нейтронов; в) 15 протонов и 16 нейтронов; г) 16 протонов и 15 нейтронов.

Задание 155. Неизвестный радиоактивный химический элемент самопроизвольно распадается по схеме: $X \rightarrow {}_{13}^{27}\text{Al} + n + e^+ + \nu_e$. Ядро этого элемента содержит...

а) 14 протонов и 15 нейтронов; б) 15 протонов и 13 нейтронов; в) 15 протонов и 14 нейтронов; г) 14 протонов и 14 нейтронов.

Задание 156. Два ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ слились в одно, при этом был излучен нейтрон. В результате этой реакции образовалось ядро...

А) ${}^7_4\text{Be}$; б) ${}^6_4\text{Be}$; в) ${}^8_3\text{Li}$; г) ${}^6_3\text{Li}$.

Задание 157. При α -распаде...

а) заряд ядра уменьшается на $2e$, масса ядра уменьшается на 4 а.е.м; б) заряд ядра уменьшается на $2e$, масса не изменяется; в) заряд ядра уменьшается на $4e$, масса ядра уменьшается на 2 а.е.м; г) заряд ядра не изменяется, масса ядра уменьшается на 4 а. е. м.

Задание 158. При β -распаде значение зарядового числа Z меняется...

а) на четыре; б) на единицу; в) не меняется; г) на три.

Задание 159. Один из видов радиоактивного излучения представляет собой поток быстро движущихся электронов. Это ...

а) γ -излучение; б) α -излучение; в) β^- -излучение; г) β^+ -излучение.

Задание 160. α -излучение представляет собой поток...

а) γ -излучение; б) α -излучение; в) β^- -излучение; г) β^+ -излучение.

Задание 161. Сколько α - и β^- -распадов должно произойти, чтобы ${}^{238}_{92}\text{U}$ превратился в стабильный изотоп свинца ${}^{206}_{82}\text{Pb}$?

а) 6 α -распадов и 8 β -распадов; б) 8 α -распадов и 6 β -распадов; в) 9 α -распадов и 5 β -распадов; г) 10 α -распадов и 4 β -распада.

Задание 162. Сколько α - и β^- -распадов должно произойти при превращении америция ${}^{241}_{95}\text{Am}$ в стабильный изотоп висмута ${}^{209}_{83}\text{Bi}$?

а) 6 α -распадов и 5 β -распадов; б) 9 α -распадов и 3 β -распадов; в) 8 α -распадов и 4 β -распада; г) 7 α -распадов и 3 β -распада.

Задание 163. Сколько α - и β^- -распадов произошло при превращении ${}^{227}_{89}\text{Ac}$ в ${}^{207}_{82}\text{Pb}$?

а) 4 α -распадов и 5 β -распадов; б) 5 α -распадов и 3 β -распадов; в) 3 α -распадов и 5 β -распада; г) 5 α -распадов и 5 β -распада.

Задание 164. Сколько α - и β^- -распадов должно произойти, чтобы торий ${}^{232}_{90}\text{Th}$ превратился в стабильный изотоп свинца ${}^{208}_{82}\text{Pb}$?

а) 7 α -распадов и 3 β -распадов; б) 5 α -распадов и 5 β -распадов; в) 4 α -распадов и 6 β -распада; г) 6 α -распадов и 4 β -распада.

Задание 165. Сколько α - и β^- -распадов должно произойти, чтобы уран $^{235}_{92}\text{U}$ превратился в стабильный изотоп свинца $^{207}_{82}\text{Pb}$?

а) 8 α -распадов и 3 β -распада; б) 7 α -распадов и 4 β -распада; в) 6 α -распадов и 5 β -распадов; г) 5 α -распадов и 6 β -распадов.

Задание 166. Периодом полураспада называется...

а) время, в течение которого концентрация распавшихся ядер увеличивается в e раз;

б) время, в течение которого распадаются все атомы радиоактивного элемента;

в) время, в течение которого распадается половина атомов радиоактивного элемента;

г) время между моментами распада двух ядер атомов радиоактивного элемента.

Задание 167. Какая доля радиоактивных атомов распадется через интервал времени, равный двум периодам полураспада?

а) 100 %; б) 75 %; в) 50 %; г) 25 %.

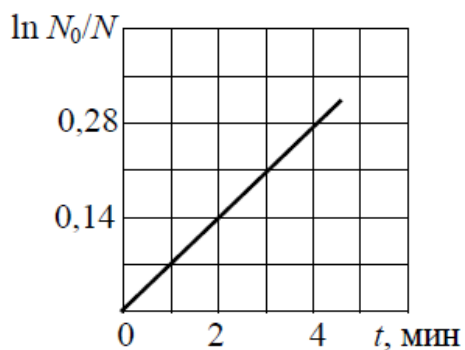
Задание 168. Какая доля радиоактивных атомов останется *нераспавшейся* через интервал времени, равный двум периодам полураспада?

а) 100 %; б) 75 %; в) 50 %; г) 25 %.

Задание 169. Активность некоторого изотопа за 10 суток уменьшилась на 50 %. Период полураспада этого изотопа равен...

а) 10 суток; б) 5 суток; в) 30 суток; г) 20 суток.

Задание 170. Из 10^{10} атомов радиоактивного изотопа с периодом полураспада 20 мин. через 60 мин. не испытает превращения количество атомов, равное...



а) $1,25 \cdot 10^9$; б) $5 \cdot 10^9$; в) $2,5 \cdot 10^9$; г) $7,5 \cdot 10^9$.

Задание 171. На рисунке в полупологарифмическом масштабе показан график зависимости изменения числа радиоактивных ядер изотопа ^{2712}Mg от времени. Среднее время жизни данного изотопа равно...

а) 2 мин; б) 4 мин; в) 10 мин; г) 14 мин.

Задание 172. Найти энергию, освободившуюся при ядерной реакции $^7\text{Li}_3 + ^1\text{H}_1 = ^4\text{He}_2 + ^4\text{He}_2$:

а) $W = 52,5$ МэВ; б) $W = 47$ МэВ; в) $W = 17,3$ МэВ; г) $W = 20,5$ МэВ; д) $W = 12,5$ МэВ.

Задание 173. Некоторый радиоактивный препарат имеет постоянную распада $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Через какое времени распадется 75% первоначального количества атомов:

а) 40 суток; б) 35 суток; в) 50 суток; г) 1 сутки; д) 23 суток.

Задание 174. Период полураспада одного из изотопов фосфора равен 14 дням. На сколько процентов число распавшихся ядер через 28 суток будет отличаться от их количества в момент начала наблюдения?

а) На 75% больше; б) На 75% меньше; в) На 25% больше; г) На 25% меньше.

Задание 175. Какие из нижеприведенных утверждений не справедливы?

- а) изотопы одного и того же элемента отличаются порядковым номером;
- б) изотопы одного и того же элемента отличаются массовым числом;
- в) принцип действия счетчика Гейгера основан на явлении ударной ионизации;
- г) за время равное двум периодам полураспада (радиоактивного элемента) число распавшихся атомов уменьшится на 25%.

Задание 176. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны:

- а) кинетическая энергия; б) энергия связи ядра; в) энергия взаимодействия;
- г) поверхностная энергия; д) энергия Ферми.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Основные физические константы (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение
Нормальное ускорение свободного падения	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная посто- янная	G	$6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \times \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1},$ $6,02 \times 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}.$
Молярная газовая посто- янная	R	$8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \times \text{К}),$ $8,31 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \times \text{К})$
Постоянная Больцмана	K	$1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж/к}$
Объём одного моля иде- ального газа при нор- мальных условиях ($T =$ $273,15 \text{ К}; P = 101325 \text{ Па}$)	V_0	$22,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль},$ $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$
Элементарный заряд	e	$1,60 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	m_0	$9,1 \times 10^{-31} \text{ кг}$
Постоянная Фарадея	F	$9,65 \times 10^3 \text{ Кл/кг} \times \text{экв}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \times 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Стефана– Больцмана	σ	$5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}^4)$
Постоянная Вина в пер- вом законе (смещение)	$b_1, (C_1)$	$2,98 \times 10^{-3} \text{ м} \times \text{К}$
Постоянная Вина во вто- ром законе	$b_2, (C_2)$	$1,30 \times 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}^4)$

Постоянная Планка	h	$6,63 \times 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с}$
	$\hbar$	$1,05 \times 10^{-34} \text{ Дж/с}$
Постоянная Ридберга	R	$2,07 \times 10^{-18} \text{ с}^{-1}$,
		$1,097 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$
Боровский радиус	r_b	$0,529 \times 10^{-10} \text{ м}$
Комптоновская длина волны электрона	Λ	$2,43 \times 10^{-12} \text{ м}$
Энергия ионизации ато- ма водорода	E_0	$2,18 \times 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}$
Атомная единица массы	1 а.е.м.	$1,660 \times 10^{-27} \text{ кг}$
Энергия, соответствую- щая 1 а.е.м.	E_0	931,50 МэВ
Электрическая постоян- ная	ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Магнетрон Бора	μ_B	$9,27 \times 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерный магнетрон	μ_N	$5,05 \times 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$

2. Работа выхода электронов из металла эВ

Вольфрам	4,53	Никель	4,84
Цезий	1,89	Цинк	3,74

3. Периоды полураспада некоторых радиоактивных элементов

${}^3_1\text{H}$	12 лет	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8 суток
${}^{45}_{20}\text{Ca}$	165 суток	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1660 лет

4. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	а.е.м.	Кг	МэВ	Дж
Электрон	0,0005486	$0,000911 \times 10^{-27}$	0,511	$0,00082 \times 10^{-10}$
Протон	1,007377	$1,67251 \times 10^{-27}$	938,27	$1,503 \times 10^{-10}$
Нейтрон	1,008665	$1,67482 \times 10^{-27}$	939,56	$1,505 \times 10^{-10}$
α – частица	4,001507	$6,64422 \times 10^{-27}$	3727,3	$5,972 \times 10^{-10}$

5. Масса некоторых изотопов

Изотоп	а.е.м.	Изотоп	а.е.м.
^1_1H	1,007825	$^{14}_7\text{N}$	14,003074
^2_1H	2,014102	$^{16}_8\text{O}$	15,994915
^3_1H	3,016049	$^{17}_8\text{O}$	16,999133
^4_2He	4,002604	$^{24}_{12}\text{Mg}$	23,98504
^7_3Li	7,016005	$^{48}_{20}\text{Ca}$	47,952363
^7_4Be	7,016930	$^{108}_{47}\text{Ag}$	107,868
$^{10}_5\text{B}$	10,012939	$^{238}_{92}\text{U}$	238,05076
$^{11}_5\text{B}$	11,009305		

6. Краткий словарь терминов

Абсолютное черное тело – это тело способное поглощать полностью при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты. Спектральная поглощательная способность $A_T = 1$. Абсолютно черных тел в природе нет. Есть тела близкие по свойствам (черный бархат, сажа, платиновая чернь).

Активностью А нуклида (общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов Z и нейтронов N) в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с.

Бозоны – частицы с нулевым или целочисленным спином описываемые

симметричными волновыми функциями и подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна.

Волновая функция – основная характеристика состояния микрообъектов (атомов, молекул, элементарных частиц), определяемая положение частицы в пространстве.

Внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) – называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению **фотопроводимости** (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению э.д.с.

Вентильный фотоэффект – это разновидность внутреннего фотоэффекта – возникновение э.д.с. (фото-э.д.с.) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект открывает, таким образом, пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Гипотеза де Бройля – для любой микрочастицы, обладающей импульсом, можно сопоставить волновой процесс.

Дефект массы ядра – это величина $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$, которая определяет разницу между массой атома и массой ядра $m_{\text{я}}$ на массу Z электронов.

Зарядовое число ядра Z – число равное количеству протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева.

Излучение спонтанное – процесс испускания фотона возбужденным атомом (возбужденной микросистемой) без каких-либо внешних воздействий.

Излучение вынужденное – процесс испускания дополнительного фотона в случае если на атом, находящийся в возбужденном состоянии, действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию $h\nu = E_2 - E_1$.

Изотопы – ядра с одинаковыми Z , но разными A (т. е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$).

Изобары – ядра с одинаковыми A , но разными Z .

Квант – порция электромагнитной волны энергией $E = h\nu$.

Квантовая механика – раздел физики, которая описывает законы движения и взаимодействия микрочастиц с учетом волновых свойств.

Квантовые числа – определяют значение волновой функции уравнения Шредингера.

Квантовое число главное – определяет энергетические уровни электрона в атоме. Принимают любые целочисленные значения $n=1,2,3,4,\dots$

Квантовое число магнитное – определяет проекцию момента импульса электрона на заданное направление, причем вектор момента импульса электрона в атоме может иметь в пространстве $2l + 1$ ориентаций. $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$

Квантовое число орбитальное – определяет механический момент импульса в атоме. Принимают любые целочисленные значения $n=0,1,2,3,\dots,(n-1)$

Квантовое число спиновое – определяет собственный механический момент импульса в атоме. Принимает значения $s=\pm 1/2$.

Квантовое число магнитное спиновое – проекция спина на направление внешнего магнитного поля. Принимает значения $m = \pm 1/2$.

Корпускулярно-волновой дуализм – все микрочастицы наряду с корпускулярными свойствами обладают волновыми.

Коэффициент прозрачности потенциального барьера – отношение плотности потока прошедших частиц к плотности потока падающих.

«Красная граница» фотоэффекта – для каждого вещества существует *красная граница* фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Линейный гармонический осциллятор – частица с массой m , которая колеблется с определенной частотой, вдоль некоторой оси под действием квазиупругой силы.

Магические ядра – наиболее устойчивыми оказываются так называемые магические ядра, у которых число протонов или число нейтронов равно одному из магических чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Особенно стабильны дважды магические ядра, у которых магическими являются и число протонов, и число нейтронов.

Массовое число A – общее число нуклонов в атомном ядре.

Масс-спектрометры – измерительные приборы, разделяющих с помощью электрических и магнитных полей пучки заряженных частиц (обычно ионов) с разными удельными зарядами Q/m .

Модель атома Томсона – атом представляет собой непрерывно заряженный положительным электричеством шар радиусом порядка 10^{-10} м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны; суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом нейтрален.

Модель атома Резерфорда (ядерная модель) – атом состоит из положительного ядра, имеющего заряд Ze (Z – порядковый номер элемента в системе Менделеева, e – элементарный заряд), размер 10^{-15} – 10^{-14} м и массу, практически равную массе атома, в области с линейными размерами порядка 10^{-10} м по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Так как атомы нейтральны, то заряд ядра равен суммарному заряду электронов, т. е. вокруг ядра должно вращаться Z электронов.

Модель «потенциальная яма» – называется область пространства, в которой потенциальная энергия U частицы меньше некоторого значения $U_{\max}$.

Модель ядра (протонно-нейтронная) – атомное ядро состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов.

Многофотонный (нелинейный) фотоэффект – при большой интенсивности света электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от N фотонов ($N=2\div 7$).

Оптическая пирометрия – метод измерения высоких температур, использующие зависимость спектральной плотности энергетической светимости или интегральной энергетической светимости тел от температуры.

Постулат Бора первый: в атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн.

Постулат Бора второй (правило частот): при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией $h\nu = E_n - E_m$, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний (E_n и E_m – соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения)).

Период полураспада $T_{1/2}$ – время, за которое исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое.

Принцип суперпозиции волновой функции: если система может находиться в различных состояниях, описываемых волновыми функциями $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$, то она также может находиться в состоянии ψ , описываемом линейной комбинацией этих функций: $\psi = \sum_n c_n \psi_n$, где C_n ($n=1, 2, \dots$) – произвольные, вообще говоря, комплексные числа. Сложение волновых функций (ампли-

туд вероятностей), а не вероятностей (определяемых квадратами модулем волновых функций) принципиально отличает квантовую теорию от классической статистической теории, в которой для независимых событий справедлива теорема сложения вероятностей.

Принцип причинности в квантовой механике – по известному состоянию системы в некоторый момент времени и силам, приложенным к ней, можно абсолютно точно задать ее состояние в любой последующий момент.

Принцип неразличимости тождественных частиц – невозможно экспериментально различить тождественные частицы

Принцип Паули – в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в двух одинаковых состояниях, определяемых набором четырех квантовых чисел: главного n , орбитального l , магнитного m , спинового m_s .

Радиационная температура – это такая температура черного тела, при которой его энергетическая светимость R_e , равна энергетической светимости R_T исследуемого тела. В данном случае регистрируется энергетическая светимость исследуемого тела и по закону Стефана – Больцмана вычисляется его радиационная температура: $T_p = \sqrt[4]{R_T / \sigma}$.

Радиоактивность – способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц. Радиоактивность подразделяется на естественную (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и искусственную (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций).

Радиоактивный распад – естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется материнским, возникающее ядро – дочерним.

Соотношение неопределенности Гейзенберга: микрочастица (микрообъект) не может иметь одновременно и определенную координату (x, y, z), и

определенную соответствующую проекцию импульса (p_x, p_y, p_z), причем неопределенности этих величин удовлетворяют условиям: $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$; $\Delta y \Delta p_y \geq \hbar$; $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$ т. е. произведение неопределенностей координаты и соответствующей ей проекции.

Спектральная плотность энергетической светимости (излучательности) тела – это количественная характеристика теплового излучения, мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины. Единица спектральной плотности энергетической светимости ($R_{\nu,T}$) – джоуль на метр в квадрате ($\text{Дж}/\text{м}^2$).

Спектральная поглощательная способность – это способность тел поглощать падающее на них излучение, показывающее, какая доля энергии, приносимая за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающее на нее электромагнитных волн с частотой от ν до $\nu+d\nu$, поглощаемое телом.

Серое тело – это тела, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела. $A_{\nu,T}^c = A_T = \text{const} < 1$.

Спин – собственный неуничтожимый момент импульса, связанный вращением вокруг своей оси.

Спектр – распределение значений физической величины (обычно энергии, частоты или массы). Обычно под спектром подразумевается электромагнитный спектр – распределение интенсивности электромагнитного излучения по частотам или по длинам волн.

Спектр молекулярный – представляют собой совокупность более или менее широких полос, образованных тесно расположенными спектральными линиями.

Спектр линейчатый – оптические спектры испускания и поглощения, состоящие из отдельных спектральных линий.

Спектр сплошной (непрерывный спектр) – набор разрешённых значений

физической величины, характеризующийся непрерывной функцией распределения этой величины.

Тепловое (температурное) излучение – это свечение тел, обусловленное нагреванием.

«Туннельный эффект» – явление прохождения микрочастицы сквозь потенциальный барьер.

Закон смещения Вина – длина волны $\lambda_{\max}$, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре $\lambda_{\max} = b/T$.

Закон Кирхгофа – это отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной способности, не зависящая от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры: $\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$. Универсальная функция Кирхгофа

имеет смысл спектральная плотность энергетической светимости черного тела.

Закон Стефана-Больцмана – энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры.

$$R_e = \sigma T^4$$

Закон Столетова (первый) – при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности E_e катода).

Закон Столетова (второй) – максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

Закон Столетова (третий) – для каждого вещества существует *красная граница* фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фото-

эффект невозможен.

Закон Мозли – соотношение, называемое $\nu = R(Z - \sigma)^2(1/m_2 - 1/n_2)$, где ν — частота, соответствующая данной линии характеристического рентгеновского излучения, R – постоянная Ридберга, σ – постоянная экранирования, $m=1, 2, 3, \dots$ (определяет рентгеновскую серию), n принимает целочисленные значения с $m+1$ (определяет отдельную линию соответствующей серии). Закон Мозли подобен обобщенной формуле Бальмера для атома водорода.

Эффект Комптона – упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и гамма-излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающейся увеличением длины волны.

Эффект Зеемана – расщепление энергетических уровней атома в магнитном поле.

Эффект Штарка – расщепление энергетических уровней атома в электрическом поле.

Энергия связи ядра – энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны.

Энергия связи ядра удельная - $\delta E_{\text{св}}$ – энергию связи, отнесенную к одному нуклону.

Уравнение Шредингера – основное дифференциальное уравнение квантовой механики относительно волновой функции $\psi = (x, y, z, t)$. Оно определяет пси-функцию для микрочастиц, движущихся в силовом поле с потенциальной энергией $U(x, y, z, t)$ со скоростью $v \leq c$, где c – скорость света в вакууме.

Фотон – квант электромагнитной волны, которая движется со скоростью света c и имеет массу покоя, равную нулю.

Формула Рэлея – Джинса – явный вид функции Кирхгофа. С помощью данной формулы можно определить спектральную плотность энергетической светимости черного тела в области малых частот. В области больших частот

данная формула расходится с экспериментом.

Формула Планка – явный вид функции Кирхгофа. С помощью данной формулы можно определить спектральную плотность энергетической светимости черного тела в любом диапазоне частот.

Фермионы – частицы с полуцелым спином описываемые антисимметричными волновыми функциями и подчиняются статистике Ферми-Дирака.

Цветовая температура – спектральная плотность энергетической светимости (для серых тел или тел, близких к ним по свойствам) $R_{\lambda,T} = A_T \cdot r_{\lambda,T}$ где $A_T = \text{const} < 1$.

Частицы тождественные – частицы, которые имеют одинаковые физические свойства - масса, заряд, спин и другие внутренние характеристики.

Ядерные силы - силы взаимодействия между нуклонами; обеспечивают большую величину энергии связи ядер по сравнению с другими системами.

Ядерные реакции – это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Яркостная температура – это температура черного тела, при которой для определенной длины волны его спектральная плотность энергетической светимости равна спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела.

§ Список библиографических источников

1. Барков Ю.А., Зверев О.М., Перминов А.В. Сборник задач по общей физике. – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета (бывший ПГТУ), 2011. – 457 с.
2. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – Изд. доп. и перераб. – СПб.: СпецЛит, 2002. – 327 с.
3. Задачник по физике. Учеб. пособие. Для подготовительных отделений вузов. / Белолипецкий С.Н., Еркович О.С., Казаковцева В.А. и др. – М.: Физматлит, 2005. – 368 с.
4. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – 13-е изд., стер. – СПб: Издательство «Лань», 2009. – 416 с.
5. Калашников Н.П. Основы физики. Упражнения и задачи: учебное пособие для вузов / Н.П. Калашников, М.А. Смондырев. – М.: Дрофа, 2004. – 464 с.
6. Решение задач по курсу общей физики: Учеб. пособие. / Завершинский И.П., Баландина Г.Ю., Стукалина И.Л. и др.; Под ред. Рогачева Н.М. – 2-е изд. – СПб: Издательство «Лань», 2008. – 304 с.
7. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – 5-е изд. – СПб: Издательство «Лань», 2007. – 288 с.
8. Сборник задач по общему курсу физики. В 5 тт. Кн. 5. Атомная физика. Физика ядра и элементарных частиц / Гинзбург В.Л., Левин Л.М., Рабинович М.С., Сивухин Д.В. и др.; Под ред. Сивухина Д.В. – 5-е изд., перераб. – СПб: Издательство «Лань», 2006. – 184 с.
9. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.
10. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики для втузов / Т.И. Трофимова. – 3-е изд. – М.: ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век»: ООО «Издательство «Мир и образование», 2003. – 384 с.
11. Трофимова Т.И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т.И. Трофимова. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2005. – 400 с.
12. Фирганг Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики: Учеб. пособие. – СПб: Издательство «Лань», 2009. – 352 с.

Электронное учебное издание

Анатолий Леонидович **Суркаев**

Галия Алиевна **Рахманкулова**

Татьяна Александровна **Сухова**

Михаил Маркович **Кумыш**

**ПОСОБИЕ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ. ФИЗИКА. ЧАСТЬ VI.
КВАНТОВАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2019 г. Поз. № 43.

Подписано к использованию 24.06.2019. Формат 60х84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 9,44.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.