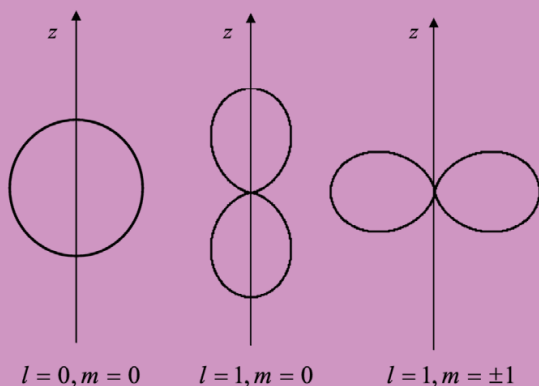


Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт математики, физики  
и информационных технологий  
Кафедра «Общая и теоретическая физика»

И.В. Мелешко  
В.А. Решетов

# КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

Электронное  
учебно-методическое пособие



© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2015

ISBN 978-5-8259-0850-2



УДК 53(075.8)  
ББК 22.33 я73

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор Самарского государственного  
университета *Е.К. Башкиров*;

д-р физ.-мат. наук, доцент Тольяттинского государственного  
университета *А.П. Воленко*.

Мелешко, И.В. Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра : электрон. учеб.-метод. пособие / И.В. Мелешко, В.А. Решетов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 1 оптический диск.

Электронное учебно-методическое пособие содержит конспект лекций и сборник задач с примерами решений по разделам курса общей физики «Квантовая физика и физика атома» и «Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц».

Предназначено для изучения студентами технических специальностей высшего профессионального образования.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Reader.

---

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2015

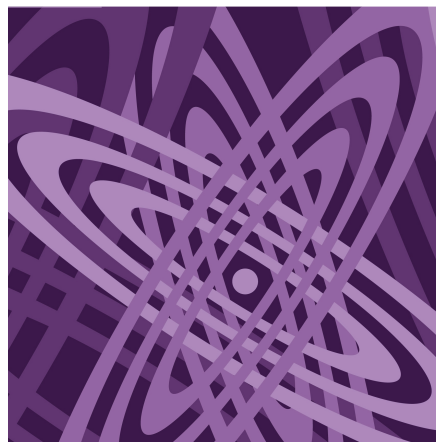


Редактор *Г.В. Данилова*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 06.04.2015.  
Объем издания 10,8 Мб.  
Комплектация издания: компакт-диск,  
первичная упаковка.  
Заказ № 1-20-14.

---

Издательство  
Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14  
тел. 8(8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)



## Содержание

Предисловие .....	5
1. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ .....	7
1.1. Тепловое излучение .....	7
1.2. Внешний фотоэффект. Эффект Комптона. Давление света .....	13
1.3. Примеры решения задач .....	17
1.4. Задачи для самостоятельного решения .....	22
2. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ .....	40
2.1. Волновая функция. Уравнение Шредингера .....	40
2.2. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками ....	42
2.3. Прохождение частицы сквозь потенциальный барьер. Туннельный эффект .....	44
2.4. Атом водорода. Квантовые числа .....	47
2.5. Спин электрона. Принцип Паули. Многоэлектронные атомы .....	51
2.6. Примеры решения задач .....	53
2.7. Задачи для самостоятельного решения .....	55
3. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ .....	65
3.1. Состав и характеристики атомного ядра .....	65
3.2. Дефект массы и энергия связи ядра .....	66
3.3. Ядерные силы. Модели ядра .....	68
3.4. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада .....	71
3.5. Ядерные реакции .....	73
3.6. Деление ядер. Цепная ядерная реакция .....	74
3.7. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия .....	76
3.8. Примеры решения задач .....	78
3.9. Задачи для самостоятельного решения .....	82
Список рекомендуемой литературы .....	91
Приложение .....	92

## Предисловие

Настоящее учебно-методическое пособие подготовлено в рамках процесса унификации учебных программ курса общей физики для студентов технических специальностей, осуществляемого в соответствии с ФГОС на кафедре общей и теоретической физики Тольяттинского государственного университета, и включает следующие дидактические единицы.

1. Квантовая физика, физика атома.
  - 1.1. Спектр атома водорода. Правило отбора.
  - 1.2. Дуализм свойств микрочастиц. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
  - 1.3. Уравнение Шредингера (общие свойства).
  - 1.4. Уравнение Шредингера (конкретные ситуации).
2. Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц.
  - 2.1. Ядро. Элементарные частицы.
  - 2.2. Ядерные реакции.
  - 2.3. Законы сохранения в ядерных реакциях.
  - 2.4. Фундаментальные взаимодействия.

Рассматриваемые в пособии разделы являются частью необходимой естественно-научной подготовки, позволяющей студентам успешно осваивать общепрофессиональные и специальные дисциплины по профилю выбранной специальности, а также ориентироваться в потоке научной и технической информации. Цель данного пособия – помочь студентам в изучении рассматриваемых дидактических единиц курса физики, критерием усвоения которых является успешное прохождение тестов, разработанных Министерством образования и науки РФ.

Каждый раздел пособия содержит теоретическую и практическую части. В отличие от традиционных пособий для проведения практических занятий по физике, включающих лишь сводку основных формул, в данном пособии теоретическая часть представлена в виде краткого конспекта лекций, содержащих минимальный, но в то же время достаточный объем понятий, определений, формул и примеров, необходимых для формирования у студентов четкого представления об изучаемых физических явлениях. При изложении

материала авторы стремились подчеркнуть иерархию физических понятий и законов. Базовые понятия и законы формулируются аксиоматически, а при рассмотрении приложений этих законов к частным явлениям либо приводится вывод основных формул, характеризующих данные явления, в рамках математического аппарата, доступного студентам начальных курсов, либо указываются основные этапы такого вывода.

Практическая часть представлена большим количеством задач различной степени сложности, включая задачи, просто иллюстрирующие основные формулы раздела («задачи в одно действие»), а также задачи, для решения которых требуется знание ранее изученных разделов физики («задачи в два действия»), и задачи повышенной сложности, для решения которых требуется уверенное владение математическим аппаратом. Преподаватель, использующий данное пособие при проведении практических занятий и при формировании домашних заданий, имеет возможность сделать выборку задач, адекватную уровню подготовленности студенческой группы. Практическая часть также включает подробные примеры решения задач по каждой теме с иллюстрациями, выводом общей формулы, проверкой размерности и методическими рекомендациями.

В конце пособия приведен минимальный объем справочных сведений, необходимых для решения представленных в пособии задач.

Сочетание достаточно подробного теоретического материала с большим количеством разнообразных задач в пособии предполагает его использование не только на практических занятиях под руководством преподавателя, но и при самостоятельном изучении студентами соответствующих разделов курса физики, для выполнения домашних заданий, для подготовки к сдаче промежуточных и итоговых тестов, зачетов и экзаменов.

# 1. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

## 1.1. Тепловое излучение

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение тел, находящихся в состоянии термодинамического равновесия.

Энергетической светимостью тела называется величина

$$R = \frac{dW}{dSdt},$$

где  $dW$  – количество энергии электромагнитного поля, излучаемой телом с участка поверхности площадью  $dS$  за время  $dt$ . Энергетическая светимость тела зависит от его абсолютной температуры  $T$ :

$$R = R(T).$$

Излучательной способностью, или спектральной плотностью энергетической светимости, тела называется величина

$$r = \frac{dW}{dSdt dv},$$

где  $dW$  – количество энергии электромагнитного поля, излучаемой телом с участка поверхности площадью  $dS$  за время  $dt$  в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu+dv$ .

Излучательная способность тела зависит от его абсолютной температуры  $T$  и от частоты  $\nu$ :

$$r = r(\nu, T).$$

Энергетическая светимость тела связана с его излучательной способностью соотношением

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu.$$

Поглощательной способностью тела называется величина

$$a = \frac{dW_{\text{ногл}}(\nu)}{dW_{\text{над}}(\nu)},$$

где  $dW_{\text{над}}(\nu)$  – количество энергии электромагнитного поля, падающей на участок поверхности тела площадью  $dS$  за время  $dt$  в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu+dv$ ;  $dW_{\text{ногл}}(\nu)$  – количество энергии электромагнитного поля, поглощаемой тем же участком поверхности площадью  $dS$  за то же время  $dt$  в том же интервале частот от  $\nu$  до  $\nu+dv$ . Поглощательная способность тела зависит от его абсолютной температуры  $T$  и от частоты  $\nu$ :

$$a = a(\nu, T).$$

Абсолютно черным называется тело, поглощающее все падающее на него электромагнитное излучение любой частоты. Величины, относящиеся к абсолютно черному телу, будем отмечать знаком \*. Для абсолютно черного тела:

$$a^*(\nu, T) = 1.$$

Абсолютно черных тел в природе нет, однако такие тела, как сажа и черный бархат в определенном интервале частот близки к ним. Идеальной моделью черного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена. Луч, попавший внутрь такой полости, полностью поглощается. Наряду с понятием черного тела используют понятие серого тела – тела, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела:

$$a_c(\nu, T) = a_c^*(\nu, T) < 1.$$

Из условия термодинамического равновесия следует *закон Кирхгофа*. Отношение испускательной и поглощательной способностей тела не зависит от природы тела и является универсальной для всех тел функцией частоты и температуры тела, называемой функцией Кирхгофа:

$$\frac{r(\nu, T)}{a(\nu, T)} = r^*(\nu, T).$$

Поскольку  $a^*(\nu, T) = 1$ , то функция Кирхгофа  $r^*(\nu, T)$  представляет собой излучательную способность абсолютно черного тела. Нахождение явной зависимости  $r^*(\nu, T)$  от частоты и температуры является основной задачей теории теплового излучения.

Для теплового излучения экспериментально были установлены законы Стефана – Больцмана и Вина.

### ***Закон Стефана – Больцмана***

Энергетическая светимость  $R^*$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры  $T$ :

$$R^* = \sigma T^4,$$



где  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана – Больцмана.  
Для произвольного тела

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu = \int_0^{\infty} a(\nu, T) r^*(\nu, T) d\nu.$$

Для серого тела

$$a_c(\nu, T) = a_c(T);$$

$$R_c(T) = a_c(T) \int_0^{\infty} r^*(\nu, T) d\nu = a_c(T) \sigma T^4.$$

Закон Стефана – Больцмана ничего не говорит о спектральном составе излучения черного тела. Положение максимума в спектре его излучения описывается экспериментальным *законом смещения Вина*: длина волны  $\lambda_m$ , при которой излучательная способность  $r^*(\lambda, T)$  абсолютно черного тела максимальна, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где  $b = 2,9 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

### **Формула Рэлея – Джинса**

Излучательную способность абсолютно черного тела можно записать в виде:

$$r^*(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle,$$

где  $\langle \varepsilon \rangle$  – средняя энергия колебаний с частотой  $\nu$ , а коэффициент перед  $\langle \varepsilon \rangle$  пропорционален числу колебательных степеней свободы электромагнитного поля (стоячих волн) в единице объема и в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ . Согласно классическому закону равномерного распределения энергии по степеням свободы на одну колебательную степень свободы приходится средняя энергия

$$\langle \varepsilon \rangle = kT,$$

$k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура. Следовательно, в классической физике излучательная способность абсолютно черного тела описывается формулой

$$r^*(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

называемой формулой Рэлея – Джинса. Эта формула хорошо согласуется с экспериментальными данными только в области малых

частот. При больших частотах из формулы Рэлея – Джинса следует, что энергетическая светимость  $R^*$  абсолютно черного тела стремится к бесконечности:

$$R^* = \int_0^{\infty} r^*(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi}{c^2} kT \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty,$$

что противоречит опыту. Данное противоречие получило название «ультрафиолетовая катастрофа». Таким образом, классическая физика не смогла удовлетворительным образом объяснить законы теплового излучения.

### ***Квантовая гипотеза Планка***

Объяснить законы теплового излучения удалось М. Планку на основе предложенной им *квантовой гипотезы*: энергия электромагнитного поля излучается определенными порциями – квантами, причем энергия  $\varepsilon_0$  кванта прямо пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$\varepsilon_0 = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  Дж·с называется постоянной Планка. Энергия излучения с частотой  $\nu$  принимает не любые, а только дискретные значения:

$$\varepsilon_n = n\varepsilon_0 = nh\nu, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Тогда из распределения Больцмана следует, что средняя энергия колебаний с частотой  $\nu$  при температуре  $T$  определяется формулой

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n e^{-\varepsilon_n/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\varepsilon_n/kT}} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

а излучательная способность абсолютно черного тела описывается формулой Планка

$$r^*(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Формула Планка согласуется с экспериментальными данными для всех частот и температур. В области малых частот  $h\nu \ll kT$  формула Планка совпадает с формулой Рэлея – Джинса. На рис. 1 приведены графики зависимостей  $r^*(\nu)$  при двух различных температурах тела  $T_1$  (штрихованная линия) и  $T_2 = 1,5T_1$  (сплошная линия).

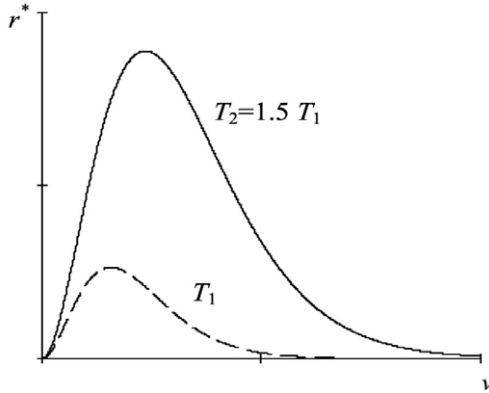


Рис. 1

Из формулы Планка следуют законы Стефана – Больцмана и Вина, причем постоянные Стефана – Больцмана и Вина выражаются через фундаментальные физические постоянные. Действительно, после замены переменной  $x = hv/kT$  в интеграле

$$R^* = \int_0^{\infty} r^*(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^{\infty} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{2\pi h}{c^2} \left( \frac{kT}{h} \right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1},$$

с учетом того, что

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}.$$

Получим

$$R^* = \sigma T^4, \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}.$$

Закон смещения Вина получается при численном анализе формулы Планка

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad b = \frac{hc}{4,965k}.$$

Таким образом, формула Планка обобщает все законы теплового излучения и является полным решением основной задачи теории теплового излучения.

### **Оптическая пирометрия**

Приборы для измерения температуры нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра называют пирометрами.

Наибольшее распространение получил метод определения температур, основывающийся на сравнении излучения светящегося тела с излучением абсолютно черного тела на одном и том же фиксированном узком участке спектра. Обычно используется участок, лежащий в окрестности  $\lambda = 0,66$  мкм (красная часть спектра). Схема такого пирометра, обычно называемого пирометром с исчезающей нитью, показана на рис. 2.

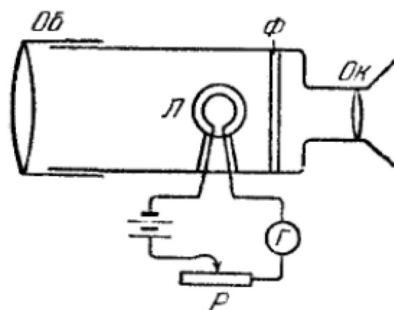


Рис. 2

Нить лампочки  $L$  лежит в плоскости, перпендикулярной к оси прибора. Объектив  $Об$  создает в этой же плоскости изображение поверхности исследуемого излучателя. Светофильтр  $\Phi$  пропускает к окуляру  $Ок$  лишь красные лучи с длиной волны вблизи  $0,66$  мкм. Наблюдая через окуляр, подбирают с помощью реостата  $P$  такой накал нити, чтобы ее яркость совпала с яркостью изображения излучателя (в этом случае нить «исчезает», т. е. становится неразличимой на фоне изображения). Предварительно прибор градуируют по абсолютно черному телу. Для нечерного тела пирометр определяет не истинную температуру тела  $T$ , а яркостную температуру  $T_{я}$ . Яркостная температура  $T_{я}$  тела – это температура такого абсолютно черного тела, излучательная способность которого  $r^*(\lambda, T_{я})$  равна излучательной способности  $r(\lambda, T)$  данного тела при данной температуре  $T$ :

$$r^*(\lambda, T_{я}) = r(\lambda, T).$$

С учетом закона Кирхгофа

$$\frac{r(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = r^*(\lambda, T),$$

получим

$$a(\lambda, T) = \frac{r^*(\lambda, T_y)}{r^*(\lambda, T)} = \frac{e^{hc/\lambda kT} - 1}{e^{hc/\lambda kT_y} - 1}.$$

Таким образом, истинную температуру тела  $T$  можно определить по его яркостной температуре  $T_y$  и поглощательной способности  $a(\lambda, T)$  на данном участке спектра.

## 1.2. Внешний фотоэффект. Эффект Комптона. Давление света

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Фотоэффект был обнаружен Г. Герцем (1887) и детально исследован А. Столетовым (1888–1889). Схема для исследования внешнего фотоэффекта приведена на рис. 3.

Два электрода (катод  $K$  из исследуемого металла и анод  $A$ ) в вакуумной трубке подключены к батарее так, что можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. Ток, возникающий при освещении катода моно-

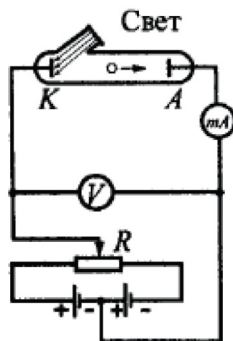


Рис. 3

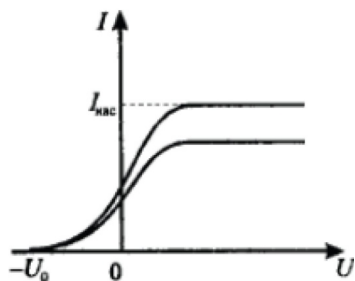


Рис. 4

хроматическим светом (через кварцевое окошко), измеряется включенным в цепь миллиамперметром. Зависимость фототока  $I$ , образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения  $U$  между катодом и анодом называется вольт-амперной характеристикой фотоэффекта (рис. 4).

По мере увеличения  $U$  фототок постепенно возрастает, пока не выходит на насыщение. Максимальное значение тока  $I_{\text{нас}}$  — фототок насыщения — определяется таким значением  $U$ , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:  $I_{\text{нас}} = en$ , где

$n$  — число электронов, испускаемых катодом в 1 с. При  $U = 0$  фототок не исчезает, поскольку фотоэлектроны при вылете из катода обладают некоторой начальной скоростью. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение  $U_0$ . При  $U = U_0$  ни один из электронов, даже обладающий при вылете максимальной начальной скоростью, не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода:

$$E_{k \max} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_0,$$

то есть, измерив задерживающее напряжение  $U_0$ , можно определить максимальное значение скорости  $v_{\max}$  и кинетической энергии  $E_{k \max}$  фотоэлектронов.

### ***Законы фотоэффекта***

1. Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, испускаемых фотокатодом в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности  $E_e$  катода).

2. Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта — минимальная частота  $\nu_0$  света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Законы фотоэффекта противоречат классической волновой теории света. Согласно этой теории электроны вещества под действием электрического поля световой волны совершают вынужденные колебания, энергия которых пропорциональна квадрату амплитуды поля, и, следовательно, энергия испускаемых электронов должна возрастать с ростом интенсивности падающей волны.

Для объяснения механизма фотоэффекта Эйнштейн предположил, что свет частотой  $\nu$  не только испускается отдельными квантами (согласно гипотезе Планка), но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых  $\epsilon_0 = h\nu$ . Кванты электромагнитного излучения, движущиеся со скоростью  $c$  распространения света в вакууме, называются

фотонами. Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода  $A$  из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Это уравнение объясняет зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего света. Предельная частота

$$\nu_0 = \frac{A}{h},$$

при которой кинетическая энергия фотоэлектронов становится равной нулю, и есть красная граница фотоэффекта. Другая форма записи уравнения Эйнштейна:

$$eU_0 = h(\nu - \nu_0).$$

### *Эффект Комптона*

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового (рентгеновского) электромагнитного излучения на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Этот эффект был обнаружен А. Комптоном в 1923 году при изучении рассеяния рентгеновского излучения парафином. Эффект Комптона противоречит классической волновой теории, согласно которой падающее и рассеянное излучения должны иметь одинаковую длину волны. Эффект Комптона можно объяснить с помощью квантовой гипотезы, согласно которой фотон можно рассматривать как частицу с энергией

$$\varepsilon_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \text{ и импульсом } p_\gamma = \frac{\varepsilon_\gamma}{c}.$$

В результате упругого рассеяния (рис. 5) фотона на покоящемся электроне с энергией покоя  $E_0 = mc^2$ , где  $m$  – масса электрона, фотон меняет направление движения на угол  $\theta$  (угол рассеяния). После рассеяния фотон имеет энергию  $\varepsilon'_\gamma = h\nu' = \frac{hc}{\lambda'}$  и импульс  $p'_\gamma = \frac{\varepsilon'_\gamma}{c}$ , а электрон приобретает импульс  $\vec{p}$  и энергию  $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$ . Законы сохранения энергии и импульса запишутся в виде

$$\varepsilon_\gamma + mc^2 = \varepsilon'_\gamma + E; \quad \vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}.$$

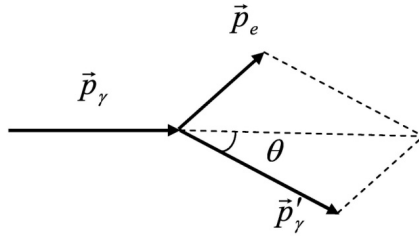


Рис. 5

Возведя второе равенство скалярно в квадрат и выразив модули импульсов через энергии, получим

$$E^2 - m^2 c^4 = \varepsilon_\gamma^2 + \varepsilon_e'^2 - 2\varepsilon_\gamma \varepsilon_e' \cos \theta.$$

Получив в этом равенстве энергию электрона  $E$  из закона сохранения энергии, имеем

$$\varepsilon_\gamma \varepsilon_e' (1 - \cos \theta) = m c^2 (\varepsilon_e - \varepsilon_\gamma').$$

Наконец, выразив в этом последнем равенстве энергии фотонов через длины волн падающего  $\lambda$  и рассеянного  $\lambda'$  фотонов, получим формулу Комптона

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta), \quad \lambda_c = \frac{h}{m c},$$

где постоянная  $\lambda_c = 2,43 \times 10^{-12}$  м называется комptonовской длиной волны электрона.

Эффект Комптона не может наблюдаться в видимой области спектра, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона в атоме, при этом даже внешние электроны в атомах нельзя считать свободными.

Эффект Комптона, законы теплового излучения и фотоэффект служат доказательством квантовых (корпускулярных) представлений о свете как о потоке фотонов.

### *Давление света*

Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. Пусть поток монохроматического излучения частоты  $\nu$  падает перпендикулярно поверхности. Если за единицу времени на единицу площади поверхности тела падает  $N$  фотонов, то при коэффициенте отражения  $\rho$  света от поверх-



ности тела отразится  $\rho N$  фотонов, а  $(1-\rho)N$  фотонов – поглотится. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс  $p_\gamma$ , а каждый отраженный фотон –  $2p_\gamma$ . Давление  $p$  света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности за единицу времени  $N$  фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c}\rho N + \frac{h\nu}{c}(1-\rho)N = \frac{Nh\nu}{c}(1+\rho).$$

Энергетическая освещенность поверхности:  $Nh\nu = E_e$  (энергия всех фотонов, падающих на единицу площади поверхности в единицу времени). Объемная плотность энергии излучения:  $w = E_e/c$ . Отсюда

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

В волновой теории света, основанной на уравнениях Максвелла, давление света определяется той же самой формулой.

### 1.3. Примеры решения задач

1. 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.

Дано:	СИ:	Решение:
$T_{\text{рад}} = 1,4$ кК	$1,4 \cdot 10^3$ К	
$T = 3,2$ кК	$3,2 \cdot 10^3$ К	
$a_T = ?$		

Связь радиационной  $T_{\text{рад}}$  и истинной  $T$  температур:

$$T_{\text{рад}} = \sqrt[4]{a_T} \cdot T. \quad (1)$$

Выразим поглощательную способность  $a_T$  серого тела из соотношения (1)

$$\sqrt[4]{a_T} = \frac{T_{\text{рад}}}{T}. \quad (2)$$

Возведем в четвертую степень обе части равенства (2):

$$\begin{aligned} (\sqrt[4]{a_T})^4 &= \left(\frac{T_{\text{рад}}}{T}\right)^4; \\ a_T &= \left(\frac{T_{\text{рад}}}{T}\right)^4. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставим численные значения:

$$a_T = \left( \frac{T_{\text{рад}}}{T} \right)^4 = \left( \frac{1,4 \cdot 10^3}{3,2 \cdot 10^3} \right)^4 = \left( \frac{1,4}{3,2} \right)^4 \approx 0,037.$$

**Ответ:**  $a_T = 0,037$ .

2. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{m1} = 780$  нм) на фиолетовую ( $\lambda_{m2} = 390$  нм)?

Дано:	СИ:	Решение:
$\lambda_{m1} = 780$ нм	$780 \cdot 10^{-9}$ м	
$\lambda_{m2} = 390$ нм	$390 \cdot 10^{-9}$ м	
$Re_1/Re_2 - ?$		

Энергетическая светимость (закон Стефана – Больцмана):

$$R = \sigma \cdot T^4. \quad (1)$$

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}; \quad (2)$$

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (1):

$$R = \sigma \cdot T^4 = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4;$$

$$R = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4. \quad (4)$$

Определим, во сколько раз и как изменится энергетическая светимость, а значит, и поток излучения абсолютно черного тела при смещении максимума энергии излучения:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max 1}} \right)^4}{\sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max 2}} \right)^4} = \left( \frac{\lambda_{\max 2}}{\lambda_{\max 1}} \right)^4;$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{\lambda_{\max 2}}{\lambda_{\max 1}} \right)^4. \quad (5)$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{\lambda_{\max 2}}{\lambda_{\max 1}} \right)^4 = \left( \frac{390 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{780 \cdot 10^{-9} \text{ м}} \right)^4 = \left( \frac{1}{2} \right)^4 = \frac{1}{16}.$$

**Ответ:** поток излучения увеличился в 16 раз.

3. Найти значение солнечной постоянной для Марса  $K_M$ , т. е. количество лучистой энергии, посылаемой Солнцем в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную солнечным лучам и находящуюся на таком же расстоянии от него, как и Марс. Температура поверхности Солнца  $T = 5800 \text{ К}$ . Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела.

Дано:	СИ	Решение:
$T = 5800 \text{ К}$	$228 \cdot 10^9 \text{ м}$	
$r_M = 228 \cdot 10^6 \text{ км}$		
$R_c = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$		
$K_M - ?$		

По определению, солнечная постоянная для Марса:

$$K_M = \frac{N}{S_{CM}}, \quad (1)$$

где  $N$  – мощность излучения поверхности Солнца.

Так как излучение Солнца близко к излучению абсолютно черного тела, то энергетическая светимость по закону Стефана – Больцмана:

$$Re = \sigma \cdot T^4, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Мощность излучения поверхности Солнца:

$$N = R_e S_c, \quad (3)$$

где  $S_c$  – площадь поверхности Солнца.

Площадь поверхности Солнца равна площади сферы радиусом, равным радиусу Солнца:

$$S_c = 4\pi \cdot R_c^2, \quad (4)$$

где  $R_c = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$  – радиус Солнца.

Подставим (4) в (3), мощность излучения примет вид

$$N = R_e S_c = R_e \cdot 4\pi \cdot R_c^2;$$

$$N = 4\pi \cdot R_e \cdot R_C^2. \quad (5)$$

Учитывая выражение (2), выражение (5) примет вид:

$$N = 4\pi \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot R_C^2. \quad (6)$$

Мощность, излучаемая Солнцем, падает на внутреннюю поверхность сферы, радиус которой равен среднему расстоянию от Солнца до Марса  $r_M = 228 \cdot 10^6$  км. Площадь поверхности такой сферы равна:

$$S_{CM} = 4\pi \cdot r_M^2. \quad (7)$$

Подставим (6) и (7) в (1), получим выражение для солнечной постоянной для Марса:

$$K_M = \frac{N}{S_{CM}} = \frac{4\pi \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot R_C^2}{4\pi \cdot r_M^2} = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot R_C^2}{r_M^2};$$

$$K_M = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot R_C^2}{r_M^2}. \quad (8)$$

Проверка размерности

$$[K_M] = \frac{[\sigma] \cdot [T]^4 \cdot [R_C]^2}{[r_M]^2} = \frac{\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot \text{К}^4 \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot \text{К}^4 = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Численный расчет

$$K_M = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot R_C^2}{r_M^2} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5800^4 \cdot (6,95 \cdot 10^8)^2}{(228 \cdot 10^9)^2} \approx$$

$$\approx \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1,13 \cdot 10^{15} \cdot 48,3 \cdot 10^{16}}{51984 \cdot 10^{18}} = 0,00595 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 595 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

**Ответ:**  $K_M = 595 \text{ Вт/м}^2$ .

4. На пластину падает монохроматический свет с длиной волны 0,42 мкм. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 0,95 В. Определить работу выхода электронов с поверхности пластины.

Дано:	СИ	Решение
$U_3 = 0,95 \text{ В}$	$0,42 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	
$\lambda = 0,42 \text{ мкм}$		
$A_{\text{вых}} = ?$		

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}, \quad (1)$$

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

Работа выхода электронов с поверхности металлов отсюда:

$$A_{\text{ВЫХ}} = h\nu - \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$

По условию задачи фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, а это значит, что кинетическая энергия электронов полностью уравнивается потенциальной энергией:

$$\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = eU_3, \quad (3)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона

Подставим (3) в (2), учитывая, что частота связана с длиной волны соотношением  $\nu = c/\lambda$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). Получим:

$$A_{\text{ВЫХ}} = h\nu - \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - eU_3 = h\frac{c}{\lambda} - eU_3; \quad (4)$$
$$A_{\text{ВЫХ}} = h\frac{c}{\lambda} - eU_3.$$

Проверка размерности

$$[A_{\text{ВЫХ}}] = [h] \frac{[c]}{[\lambda]} - [e][U_3] = \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м/с}}{\text{м}} - \text{Кл} \cdot \text{В} = \text{Дж} - \text{Кл} \cdot \text{В} = \text{Дж} - \text{Дж} = \text{Дж}.$$

Численный расчет

$$A_{\text{ВЫХ}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{0,42 \cdot 10^{-6}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,95 \approx 47,36 \cdot 10^{-20} - 1,52 \cdot 10^{-19} = 4,74 \cdot 10^{-19} - 1,52 \cdot 10^{-19} = 3,22 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Для перевода значения работы выхода в электронвольты разделим ее на величину  $1,6 \cdot 10^{-19}$ . Получим:

$$A_{\text{ВЫХ}} = \frac{3,22 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot 1 \text{ эВ}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} \approx 2,01 \text{ эВ}.$$

**Ответ:**  $A_{\text{вых}} = 3,22 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,01 эВ.

#### 1.4. Задачи для самостоятельного решения

1. Энергия излучения Солнца, падающая за пределами атмосферы Земли на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, за 1 с (солнечная постоянная), равна  $1,35 \cdot 10^3$  Дж. Принимая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело, определите: а) температуру поверхности Солнца; б) длину волны, соответствующую максимуму излучения Солнца. Расстояние от Земли до Солнца  $15 \cdot 10^{10}$  м. Радиус Солнца  $6,96 \cdot 10^8$  м.

2. Мощность потока энергии, излучаемой из смотрового окошка мартеновской печи,  $P = 2,17$  кВт. Площадь смотрового окошка  $S = 6 \text{ см}^2$ . Определите температуру печи.

3. Нагретая до  $2500 \text{ К}$  поверхность площадью  $10 \text{ см}^2$  излучает в 1 с  $6,7 \cdot 10^2$  Дж энергии. Чему равен коэффициент поглощения поверхности?

4. Площадь поверхности вольфрамовой нити накала 25-ваттной вакуумной лампы  $S = 0,403 \text{ см}^2$ . Температура накала  $T = 2177 \text{ К}$ . Во сколько раз эта лампа излучает меньше энергии, чем абсолютно черное тело при тех же значениях поверхности и температуры? Каков коэффициент поглощения вольфрама при этой температуре?

5. Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током  $I_1 = 1 \text{ А}$  до температуры  $T_1 = 1000 \text{ К}$ . Какое значение должен иметь ток  $I_2$ , чтобы температура нити была  $T_2 = 3000 \text{ К}$ ? Потерями энергии вследствие теплопроводности и изменениями линейных параметров нити пренебречь.

6. Термостат потребляет от сети мощность  $N = 0,5$  кВт. Температура его внутренней поверхности, определенная по излучению из открытого круглого отверстия диаметром  $d = 5 \text{ см}$ , равна  $700 \text{ К}$ . Какая часть потребляемой мощности рассеивается внешней поверхностью термостата?

7. Вольфрамовая нить диаметром  $d_1 = 0,1 \text{ мм}$  соединена последовательно с другой вольфрамовой нитью. Нити накаляются в вакууме электрическим током, причем первая нить имеет температуру  $T_1 = 2000 \text{ К}$ , а вторая –  $T_2 = 3000 \text{ К}$ . Каков диаметр второй нити?

8. Мощность излучения абсолютно черного тела  $P = 10^5$  Вт. Чему равна площадь излучающей поверхности тела, если длина волны, на которую приходится максимум излучения,  $\lambda_{\max} = 7 \cdot 10^{-7}$  м?

9. Вследствие изменения температуры тела максимум его спектральной энергетической светимости переместился с  $\lambda_1 = 2,5$  мкм до  $\lambda_2 = 0,175$  мкм. Тело абсолютно черное. Во сколько раз изменилась: а) температура тела; б) интегральная энергетическая светимость?

10. Максимальная спектральная светимость абсолютно черного тела  $r_{\lambda T_{\max}} = 4,16 \cdot 10^{11}$  Вт·м<sup>2</sup>. На какую длину волны она приходится?

11. В электрической лампе вольфрамовая нить диаметром  $d = 0,05$  мм накаливается при работе лампы до температуры  $T_1 = 2700$  К. Через сколько времени после выключения тока температура нити упадет до  $T_2 = 600$  К? При расчете принять, что нить излучает как серое тело с коэффициентом поглощения  $\alpha = 0,3$  и энергия передается только излучением.

12. В черный тонкостенный металлический сосуд, имеющий форму куба, налита вода массой 1 кг при температуре  $t_1 = 50$  °С, целиком заполняющая сосуд. Определите время остывания сосуда до температуры  $t_2 = 10$  °С, если сосуд помещен в черную полость, температура стенок которой близка к абсолютному нулю.

13. Вычислите спектральную энергетическую светимость черного тела, нагретого до температуры  $T = 3000$  К для длины волны  $\lambda = 500$  нм.

14. Принимая положительный кратер электрической дуги за абсолютно черное тело, определите отношение мощности излучения в диапазоне длин волн от  $\lambda_1 = 695$  нм до  $\lambda_2 = 705$  нм к полной мощности излучения. Температура кратера дуги  $T = 4000$  К.

15. Мощность излучения, измеренная в интервале  $\Delta\lambda_1 = 0,5$  нм вблизи длины волны, соответствующей максимуму излучения  $\lambda_{\max}$ , равна мощности излучения в интервале  $\Delta\lambda_2$  вблизи длины волны  $\lambda = 2\lambda_{\max}$ . Определите ширину интервала  $\Delta\lambda_2$ .

16. Определите значения спектральных мощностей излучения абсолютно черного тела для следующих длин волн:  $\lambda_1 = \lambda_{\text{макс}}$ ,  $\lambda_2 = 0,75 \lambda_{\text{макс}}$ ,  $\lambda_3 = 0,5 \lambda_{\text{макс}}$ ,  $\lambda_4 = 0, \lambda_{\text{макс}}$ . Температура тела  $T = 3000$  К.

17. По найденным данным постройте график зависимости спектральной мощности излучения от длины волны.

18. Сколько фотонов за 1 с будет испускать  $1 \text{ см}^2$  поверхности абсолютно черного тела, нагретого до  $T = 2400$  К, если среднюю энергию кванта излучения считать равной  $2,75 kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана?

19. Коэффициент поглощения вещества для монохроматического света равен  $k$ . Слой какой толщины этого вещества надо взять, чтобы ослабить свет: а) в 2 раза; б) в  $e$  раз ( $e$  – основание натуральных логарифмов); в) в 10 раз?

20. Свет, представляющий собой совокупность двух монохроматических излучений с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , проходит в поглощающую среду. При падении на поверхность поглощающей среды интенсивности  $I_{01}$  и  $I_{02}$  равны, а на глубине  $l$  интенсивность света с длиной волны  $\lambda_1$  в 2 раза больше интенсивности света с длиной волны  $\lambda_2$ . На какой глубине интенсивности будут отличаться в 10 раз?

21. Пластина (пленка) поляроида имеет толщину 0,05 мм. При падении на поляроид монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм интенсивность вышедшего света составляет 40 % от интенсивности падающего света. Чему равен коэффициент поглощения поляроида?

22. Многие прозрачные для видимого света вещества сильно поглощают более коротковолновые электромагнитные колебания. Например, измерено, что поглощается 50 % падающего излучения  $\lambda = 350$  нм слоем органического стекла толщиной 10 мм;  $\lambda = 338$  нм слоем толщиной 5 мм;  $\lambda = 332$  нм слоем толщиной 2 мм. Чему равны коэффициенты поглощения органического стекла для этих трех длин волн?

23. Точечный монохроматический источник испускает световой поток  $\Phi$ . На расстоянии  $l$  от источника находится плоскопараллель-



ная пластина толщиной  $d$ , коэффициент поглощения которой линейно изменяется по толщине от значения  $k_1$  до  $k_2$ . Пренебрегая отражением света от поверхностей пластины, найдите интенсивность света, выходящего из нее.

24. Источник монохроматического света силой  $I$  кд находится в среде, коэффициент поглощения которой изменяется с расстоянием от источника света по закону  $k = k_0 - ax$ , где  $k_0$  – коэффициент поглощения света непосредственно около источника;  $a$  – постоянный множитель;  $x$  – расстояние от источника света. Определите интенсивность света на расстоянии  $l$  от источника.

25. Оцените температуру поверхности Солнца, если известно, что расстояние от Земли до Солнца  $1,5 \cdot 10^8$  км, радиус Солнца  $6,9 \cdot 10^5$  км и солнечная постоянная  $1,35$  кВт/м<sup>2</sup>. Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно черного тела.

26. В спектре излучения огненного шара радиусом  $100$  м, возникающего при ядерном взрыве, максимум энергии излучения приходится на длину волны  $0,289$  мкм. Определите температуру поверхности шара; энергию, излучаемую поверхностью шара за время  $10^{-3}$  с; максимальное расстояние, на котором будут воспламеняться деревянные предметы, если их поглощательная способность равна  $0,7$ . Теплота воспламенения сухого дерева  $5 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>.

27. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум испускательной способности приходится на длину волны  $0,480$  мкм. Расстояние между Землей и Солнцем  $1,5 \cdot 10^8$  км, радиус Солнца  $6,9 \cdot 10^5$  км. Пренебрегая поглощением в атмосфере, определите мощность суммарного излучения Солнца; энергию, поступающую на  $1$  м<sup>2</sup> поверхности Земли; ежесекундное уменьшение массы Солнца вследствие излучения; время, в течение которого масса Солнца уменьшится на величину массы Земли.

28. Волосок лампы накаливания, рассчитанной на напряжение  $3$  В, имеет длину  $10$  см и диаметр  $0,03$  мм. Полагая, что волосок излучает как абсолютно черное тело, определите температуру нити и длину волны, на которую приходится максимум энергии в спектре

излучения. Вследствие теплопроводности лампа рассеивает 8 % потребляемой мощности, удельное сопротивление материала волоска  $6,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

29. Определите поглощательную способность серого тела, имеющего температуру  $10^3$  К, если его поверхность  $10^{-3}$  м<sup>2</sup> излучает за 1 мин энергию 1,3 кДж.

30. По тонкой нихромовой пластинке шириной 1 см и площадью поперечного сечения 0,001 см<sup>2</sup> идет ток. Коэффициент поглощения пластинки 0,25. При каком значении силы тока пластинка будет наиболее эффективным источником света, если максимальная чувствительность человеческого глаза соответствует электромагнитному излучению с длиной волны 0,55 мкм?

31. Оцените среднюю температуру поверхности земного шара, считая, что она излучает как абсолютно черное тело и энергия этого излучения находится в равновесии с получаемой от Солнца. Диаметр Солнца виден с Земли под углом  $30'$ , температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К. Приток теплоты от внутренних источников планеты не учитывать.

32. Земля, проходя афелий, находится на 3,3 % дальше от Солнца, чем когда она проходит перигелий. Принимая земной шар за серое тело со средней температурой 288 К, определите разность температур, которые Земля имеет в этих положениях.

33. Небольшой абсолютно черный шарик диаметром  $d$  нагрет солнечными лучами. Какова установившаяся температура шарика, если на нем сфокусировать изображение Солнца посредством линзы, обладающей светосилой  $I$ . Температура окружающей среды  $T_0$ , солнечная постоянная  $k$ , угловой диаметр Солнца  $\varphi$ . Поглощением света в линзе пренебречь.

34. Вольфрамовая нить лампы накаливания диаметром  $d$  и длиной  $l$  имеет температуру  $T_0$ . По какому закону изменяется с течением времени температура нити после выключения тока? Всеми потерями энергии, кроме излучения, пренебречь. Поглощательная способность нити  $a$ , теплоемкость  $C$ .

35. На сколько градусов понизилась бы температура земного шара за столетие, если бы на Землю не поступала солнечная энергия? Радиус Земли принять равным  $6,4 \cdot 10^6$  м, удельную теплоемкость  $200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , плотность  $5500 \text{ кг}/\text{м}^3$ , среднюю температуру  $300 \text{ К}$ , коэффициент поглощения  $0,8$ . За какое время температура понизилась бы на  $27 \text{ К}$ ?

36. Температура вольфрамовой нити накала, измеренная оптическим пирометром со светофильтром, пропускающим излучение с длиной волны  $0,665 \text{ мкм}$  (яркостная температура), равна  $2190 \text{ К}$ . Коэффициент излучения нити  $0,38$ . Чему равна истинная температура нити? Яркостная температура тела равна температуре абсолютно черного тела, при которой монохроматическая яркость обоих тел одинакова.

37. Исходя из формулы Планка для спектральной объемной плотности энергии  $u_\nu$  излучения абсолютно черного тела: а) получите приближенные выражения для функции  $u_\nu$ , если  $h\nu \ll kT$  (формула Рэлея – Джинса) и  $h\nu \gg kT$  (формула Вина); б) выведите законы Стефана – Больцмана и Вина.

38. Селеновый фотоэлемент имеет чувствительность по току, равную  $200 \text{ мкА}/\text{лм}$ . Принимая, что такая чувствительность имеет место при освещении фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $550 \text{ нм}$ , определите число фотонов, приходящихся на 1 электрон, участвующий в фототоке.

39. Определите энергию одного фотона: а) для красного света ( $\lambda = 600 \text{ нм}$ ); б) для жестких рентгеновских лучей ( $\lambda = 0,01 \text{ нм}$ ).

40. Средняя длина волны излучения лампочки накаливания  $\lambda = 620 \text{ нм}$ . Найдите число фотонов, испускаемых  $200$ -ваттной лампочкой в единицу времени (считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение).

41. Найдите импульс фотона ( $\lambda = 500 \text{ нм}$ ). Сравните его с импульсом молекулы водорода при комнатной температуре. Массу молекулы водорода считать равной  $2,35 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

42. При какой длине волны импульс фотона будет равен импульсу молекулы водорода при комнатной температуре?

43. Монохроматический пучок параллельных световых лучей падает нормально на щель и создает на экране дифракционную картину. Найдите энергию и импульс фотонов светового потока, если ширина щели  $b = 5$  мм, а первый минимум возникает в направлении угла  $\varphi = 6^\circ$ .

44. На дифракционную решетку с постоянной  $d = 3 \cdot 10^{-6}$  м падает нормально плоский монохроматический световой поток. Углы дифракции, отвечающие двум соседним максимумам на экране, соответственно равны  $\varphi_n = 23^\circ 35'$  и  $\varphi_{n+1} = 36^\circ 52'$ . Вычислите энергию фотонов данного светового потока.

45. Чему равны максимальные скорости фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цезия и платины излучением с длиной волны: а)  $\lambda_1 = 185$  нм; б)  $\lambda_2 = 422,7$  нм?

46. «Красная граница» фотоэффекта для калия соответствует длине волны  $\lambda_0 = 577$  нм. Вычислите минимальную энергию кванта, необходимую для освобождения фотоэлектрона из данного металла.

47. «Красная граница» для цезия  $\lambda_0 = 6,6 \cdot 10^{-7}$  м. Найдите: а) работу выхода электронов из цезия; б) максимальную скорость и энергию электронов, вырываемых из цезия излучением с длиной волны  $\lambda = 220$  нм.

48. Медный шарик, удаленный от других тел, облучают монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$  м. До какого максимального потенциала зарядится шарик, теряя фотоэлектроны?

49. Плоскую цинковую пластинку освещают излучением со сплошным спектром, коротковолновая граница которого соответствует длине волны  $\lambda = 30$  нм. Вычислите, на какое максимальное расстояние от поверхности пластинки может удалиться фотопоток, если вне пластинки имеется задерживающее однородное электрическое поле с напряженностью  $E = 10$  В/см?

50. Фотоэффект у некоторого металла начинается при частоте падающего света  $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14}$  Гц. Определите частоту света, при которой освобождаемые им с поверхности данного металла электроны

полностью задерживаются разностью потенциалов 5 В. Найдите работу выхода для данного металла.

51. При освещении некоторого металла излучением с длиной волны  $\lambda_1 = 279$  нм задерживающий потенциал равен 0,66 В, при длине волны  $\lambda_2 = 245$  нм задерживающий потенциал становится равным 1,26 В. Считая заряд электрона и скорость света известными, определите постоянную Планка и работу выхода электрона из данного металла.

52. Квант света длиной волны  $\lambda = 232$  нм освобождает с поверхности платинового электрода фотоэлектрон. Определите импульс, сообщаемый при этом электроду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему кванту.

53. Интенсивность параллельного монохроматического светового потока  $I = 30$  Дж/(м<sup>2</sup>·с). Определите, пользуясь квантовыми представлениями, импульс, переносимый данным потоком за время  $t = 5$  с через площадку  $S = 100$  см<sup>2</sup>.

54. Найдите величину нормального давления на плоскую поверхность при отражении параллельного светового потока с интенсивностью  $I = 3,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·с), если коэффициент отражения  $R = 0,6$ , а угол падения  $i = 60^\circ$ .

55. Часть стенки колбы электролампы накаливания, представляющей сферу радиусом  $r = 4$  см, посеребрена и является зеркально отражающей. Лампа потребляет мощность 50 Вт, из которых 90 % идет на излучение. Что больше: давление газа в колбе ( $10^{-8}$  мм рт. ст.) или световое давление на посеребренную часть стенки?

56. Поверхность площадью 100 см<sup>2</sup> каждую минуту получает 63 Дж световой энергии. Найдите световое давление в случаях, когда поверхность: а) полностью отражает все лучи; б) полностью поглощает все падающие на нее лучи.

57. Прибор П.Н. Лебедева для исследования светового давления на твердые тела состоял из легкого подвеса на тонкой нити, к которому были прикреплены тонкие и легкие крылышки, имевшие форму кружка диаметром 5 мм. Одно из крылышек было за-

чернено, а другое оставалось блестящим. Подвес помещался в отквачанном сосуде, образуя весьма чувствительные крутильные весы. Определите силу светового давления на зачерненный кружок, если каждую минуту падает на него поток лучистой энергии  $W = 6,3$  Дж.

58. Прибор П.Н. Лебедева для измерения светового давления (см. предыдущую задачу) был снабжен зеркальцем, которое служило для зеркального отсчета угла закручивания нити подвеса. В одном из опытов отклонение зайчика по шкале, удаленной от зеркальца на расстояние 1,2 м, было равно 76 мм. Диаметр кружка 5 мм, расстояние от центра кружка до оси вращения 9,2 мм. Коэффициент отражения света от блестящего кружка  $R = 0,5$ . Постоянная кручения нити  $k = 2,2 \cdot 10^{11}$  Н·м/рад. Определите: а) световое давление на блестящий кружок; б) интенсивность падающего света.

59. Найдите световое давление на зачерненный кружок, если угол поворота нити в приборе П.Н. Лебедева (см. предыдущие задачи) составил  $10'$ .

60. Длина волны света, падающего на вещество со свободными электронами,  $\lambda = 0,003$  нм. Какую энергию приобретут электроны отдачи при рассеянии кванта под углом  $\beta = 60^\circ$ ?

61. При облучении вещества со свободными электронами рентгеновыми лучами с длиной волны  $\lambda = 0,01$  нм было обнаружено под углом  $\beta$  по отношению к первоначальному излучению излучение с длиной волны  $\lambda' = \lambda + 0,0024$  нм. Найдите угол рассеяния  $\beta$  и энергию, переданную электронам отдачи.

62. При облучении вещества фотонами с длиной волны  $0,05 \text{ \AA}$  рассеяние фотонов происходит под углом  $\beta = 20^\circ$ . Каков импульс электрона отдачи?

63. Первоначальная длина волны падающего излучения  $\lambda = 0,003$  нм, скорость электрона отдачи равна  $0,6c$  ( $c$  – скорость света). Определите изменение длины волны и угол рассеяния фотона.

64. Найдите длину волны, соответствующую фотону, если известно, что энергия рассеянного фотона и электрона отдачи равны между собой при угле  $\varphi = 90^\circ$  между направлениями их движений.

65. В одном из опытов по наблюдению комптоновского рассеяния было обнаружено, что угол рассеяния фотона  $\beta = 60^\circ$ , а электрон отдачи описал окружность радиусом  $r = 1,5$  м в магнитном поле с индукцией  $B = 2 \cdot 10^{-2}$  Тл. Найдите длину волны, соответствующую падающему фотону, если магнитное поле перпендикулярно плоскости движения электрона.

66. Какова энергия рассеянного фотона, если рассеяние произошло под углом  $\beta = 120^\circ$  и энергия падающего фотона была 250 кэВ?

67. Излучение лазера мощностью 600 Вт продолжалось 20 мс. Излученный свет попал в кусочек идеально отражающей фольги массой 1 мг, расположенный перпендикулярно направлению его распространения. Какую скорость (в см/с) приобретет кусочек фольги?

68. Рентгеновская трубка, работающая при напряжении 66 кВ и силе тока 15 мА, излучает каждую секунду  $10^{16}$  фотонов. Считая длину волны излучения равной  $10^{-10}$  м, определите КПД установки (в процентах). Постоянная Планка  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

69. Во сколько раз энергия фотона, обладающего импульсом  $8 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с, больше кинетической энергии электрона, полученной им при прохождении разности потенциалов 5 В? Заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

70. Лазер излучает в импульсе  $2 \cdot 10^{19}$  световых квантов с длиной  $6,6 \cdot 10^{-5}$  см. Чему равна мощность вспышки лазера, если ее длительность 2 мс? Постоянная Планка  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

71. Солнечная батарея космической станции площадью  $50$  м<sup>2</sup> ориентирована перпендикулярно направлению на Солнце. Она отражает половину падающего на нее солнечного излучения. Чему равна сила давления (в мкН) излучения на батарею, если мощность излучения, падающего на 1 м поверхности, равна 1,4 кВт?

72. Пары некоторого металла в разрядной трубке начинают излучать при напряжении на электродах 9,9 В. Во сколько раз длина волны возникающего излучения меньше одного микрометра? Постоянная Планка  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-10}$  Кл.

73. При облучении литиевого фотокатода светом с длиной волны 300 нм из него выбиваются электроны, которые, пройдя ускоряющую разность потенциалов 5 В, попадают в мишень. Определите импульс, передаваемый мишени одним электроном, если работа выхода электрона из лития 2,3 эВ. Постоянная Планка  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, скорость света в вакууме  $3 \cdot 10^8$  м/с, заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, его масса  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

74. Если поочередно освещать поверхность некоторого металла светом с длинами волн 350 и 540 нм, то максимальные скорости фотоэлектронов будут отличаться в два раза. Определите работу выхода электрона из этого металла.

75. Квант света, соответствующий длине волны  $5 \cdot 10^{-7}$  м, вырывает с поверхности металла фотоэлектрон, который описывает в однородном магнитном поле с индукцией  $10^{-3}$  Тл окружность радиусом 1 мм. Найдите работу выхода электронов из металла. Масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, постоянная Планка  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

76. Свет с энергией кванта 3,5 эВ вырывает из металлической пластинки электроны, имеющие максимальную кинетическую энергию 1,5 эВ. Найдите работу выхода (в эВ) электрона из этого металла.

77. Какой максимальной кинетической энергией (в эВ) обладают электроны, вырванные из металла при действии на него ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,33 мкм, если работа выхода электрона  $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж?

78. Чему равно задерживающее напряжение для фотоэлектронов, вырываемых с поверхности металла светом с энергией фотонов  $7,8 \cdot 10^{-19}$  Дж, если работа выхода из этого металла  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж?

79. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла соответствует длине волны  $6,7 \cdot 10^{-7}$  м. Чему равно напряжение, полностью задерживающее фотоэлектроны, вырываемые из этого металла излучением с длиной волны  $1,6 \cdot 10^{-5}$  см?

80. Определите длину волны (в нм) света, которым освещается поверхность металла, если фотоэлектроны имеют максимальную



кинетическую энергию  $5 \cdot 10^{-20}$  Дж, а работа выхода электронов из этого металла  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

81. Работа выхода электронов из некоторого металла 3,6 эВ. Найдите скорость электронов (в км/с), вылетающих с поверхности металла при освещении его светом с длиной волны  $2 \cdot 10^{-7}$  м. Масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

82. Работа выхода электронов из некоторого металла  $5,4 \cdot 10^{-19}$  Дж. На металл падают фотоны с импульсом  $2,6 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с. Во сколько раз максимальный импульс электронов, вылетающих с поверхности металла при фотоэффекте, больше импульса падающих фотонов?

83. На уединенный медный шарик падает монохроматический свет, длина волны которого  $\lambda = 0,18$  мкм. До какого максимального потенциала зарядится шарик, если работа выхода электронов из меди  $A_{\text{вых}} = 4,5$  эВ?

84. Какова доля энергии фотона, израсходованная на работу вырывания фотоэлектронов, если красная граница фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} = 450$  нм и максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона равна 1,3 эВ?

85. Найдите постоянную Планка, если фотоэлектроны, вырываемые с поверхности некоторого металла электромагнитным излучением с частотой  $\nu_1 = 1,2 \cdot 10^{15}$  Гц, задерживаются потенциалом 3,1 В, а вырываемые электромагнитным излучением с длиной волны  $\lambda_2 = 125$  нм – потенциалом 8,1 В.

86. Давление  $p$  монохроматического света ( $\lambda = 600$  нм) на черную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно 0,2 мкПа. Определите число  $N$  фотонов, падающих за время  $t = 1$  с на поверхность площадью  $S = 1$  см<sup>2</sup>.

87. Монохроматическое излучение с длиной волны  $\lambda = 500$  нм падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на нее с силой  $F = 20$  нН. Определите число  $N$  фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

88. Определите поверхностную плотность  $I$  потока энергии излучения, падающего на зеркальную поверхность, если световое давление  $p$  при перпендикулярном падении лучей равно  $10 \text{ мкПа}$ .

89. Сколько энергии должно приносить световое давление на каждый квадратный миллиметр черной поверхности за секунду, чтобы световое давление на эту поверхность равнялось  $2 \text{ Н/м}^2$ ?

90. Чему равен фототок с поверхности фотоэлемента, если на нее падает световой поток мощностью  $1 \text{ мкВт}$  и длиной волны  $0,40 \text{ мкм}$ ?

91. Точечный источник красного света ( $\lambda_1 = 0,650 \text{ мкм}$ ) излучает световой поток мощностью  $10 \text{ Вт}$ . На каком расстоянии можно заметить этот источник, если пороговая чувствительность глаза соответствует потоку из  $60$  фотонов в секунду желтого света ( $\lambda_2 = 0,550 \text{ мкм}$ )? Диаметр зрачка принять равным  $0,5 \text{ см}$ , поглощением света в воздухе пренебречь.

*Указание.* При одинаковой мощности источников чувствительность глаза к желтому свету в  $20$  раз больше, чем к красному.

92. Атом тяжелого элемента, летящий со скоростью  $V \ll c$ , испускает фотон видимого света под углом  $\varphi \ll \pi/2$  к направлению движения. Определите относительную величину доплеровского смещения частоты фотона.

93. Параллельный пучок монохроматического света, поляризованного по кругу, падает по нормали на диск диаметром  $5 \text{ мм}$  и массой  $0,1 \text{ г}$ . Мощность светового потока  $100 \text{ Вт}$ , длина волны падающего света  $0,50 \text{ мкм}$ , диск может вращаться без трения вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно плоскости диска. Определите угловую скорость вращения диска после часового облучения.

94. Баллон электрической лампы мощностью  $100 \text{ Вт}$  представляет собой сферический сосуд радиусом  $5 \text{ см}$ . Стенки лампы отражают  $10 \%$  падающего на них света. Полагая, что вся потребляемая мощность идет на излучение, определите давление света на стенки лампы.

95. Рубиновый лазер излучает в импульсе длительностью  $0,1 \text{ мс}$  энергию  $15 \text{ Дж}$  в виде узкого, почти параллельного пучка монохроматического света. Найдите среднее за время импульса давление пучка

света, если его сфокусировать в пятнышко диаметром 10 мкм на поверхность, перпендикулярную пучку, с коэффициентом отражения 0,5.

96. Параллельный пучок монохроматических лучей с длиной волны 0,4 мкм падает нормально на зачерненную поверхность и производит давление  $10^{-6}$  Па. Определите концентрацию фотонов в потоке и его интенсивность (число частиц, падающих на единичную поверхность в единицу времени).

97. Пренебрегая абсорбцией в атмосфере, оцените величину силы давления солнечного излучения на земной шар. Максимум энергии излучения Солнца приходится на длину волны 48 мкм. Угловой диаметр Солнца  $30'$ . Рассмотрите три случая: земная поверхность абсолютно черная; зеркальная с коэффициентом отражения 0,40; абсолютно отражающая, но матовая.

98. Какой диаметр должен иметь алюминиевый шарик, находящийся в космическом пространстве, чтобы его притяжение к Солнцу уравновешивалось силой светового давления солнечных лучей? Коэффициент отражения шарика 0,9. При решении задачи считать, что Солнце излучает как абсолютно черное тело, поверхность которого имеет температуру 6000 К.

99. Найдите давление теплового излучения во внутренних областях Солнца, где температура оценивается в  $1,3 \cdot 10^6$  К. Сравните это давление с кинетическим давлением плазменного газа, полагая, что он целиком состоит из протонов и электронов, и считая, что газ подчиняется уравнению состояния идеальных газов. Плотность вещества в центре Солнца принимаем равной  $8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

100. В центре тонкого кольца радиусом  $R$ , по которому равномерно распределен заряд с линейной плотностью  $\tau$ , находится частица, имеющая массу  $m$  и заряд  $q$ . Частицу смещают на расстояние  $x \ll R$  и отпускают. Под действием кулоновских сил частица начинает совершать колебания. Чему равна мощность излучения такого осциллятора? Какова величина радиационного затухания колебаний (отношение энергии, излучаемой за одно колебание, к первоначальной энергии осциллятора)?

101. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цинка светом с длиной волны  $0,25 \text{ мкм}$ . Чему равна красная граница фотоэффекта?

102. Красная граница фотоэффекта у рубидия равна  $0,81 \text{ мкм}$ . Определите скорость фотоэлектронов при облучении рубидия монохроматическим светом с длиной волны  $0,40 \text{ мкм}$ . Какую задерживающую разность потенциалов нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратился фототок? На сколько нужно изменить задерживающую разность потенциалов при уменьшении длины волны падающего света на  $4 \text{ нм}$ ?

103. При некотором минимальном значении задерживающей разности потенциалов фототок с поверхности лития, освещаемого светом с частотой  $\nu_0$ , прекращается. Изменив частоту света в  $1,4$  раза, установили, что для прекращения фототока достаточно увеличить задерживающую разность потенциалов в  $1,8$  раза. Чему равна частота падающего света?

104. Уединенный железный шарик облучается монохроматическим светом длиной волны  $150 \text{ нм}$ . До какого максимального потенциала зарядится шарик, теряя фотоэлектроны?

105. Между точечной лампой и фотоэлементом на расстоянии  $20 \text{ см}$  от лампы помещена линза диаметром  $15 \text{ см}$  с оптической силой  $4 \text{ дптр}$ . Определите ток насыщения в цепи фотоэлемента, если чувствительность фотоэлемента  $20 \text{ мкА/лм}$ , рабочая площадь фотокатода  $20 \text{ см}^2$ , сила света лампы  $60 \text{ кд}$  и коэффициент пропускания линзы  $0,9$ . Сколько фотонов ежесекундно падает на катод?

106. Электроды вакуумного фотоэлемента (один цезиевый, другой медный) замкнуты снаружи накоротко. Цезиевый электрод освещается монохроматическим светом. Найдите: *а)* длину волны света, при которой в цепи фотоэлемента появляется ток; *б)* максимальную скорость фотоэлектронов, подлетающих к медному электроду, если длина волны света  $0,22 \text{ мкм}$ ; *в)* скорость фотоэлектронов при условии, что к электродам приложено ускоряющее напряжение  $2,2 \text{ В}$ .

107. При взаимодействии свободного электрона с квантом света длиной волны  $0,1 \text{ \AA}$  комптоновское смещение оказалось равным

0,022 Å. Определите угол рассеяния кванта; энергию рассеянного кванта; энергию, переданную электрону отдачи.

108. Фотон с энергией 0,38 МэВ рассеялся под углом  $120^\circ$  на покоившемся свободном электроне. Найдите: *a)* энергию рассеянного кванта; *б)* относительное изменение частоты фотона; *в)* энергию, переданную электрону отдачи (поглощенную покоившимся электроном).

109. Фотон с энергией  $\epsilon_0$ , равной энергии покоя электрона, испытывает комптоновское рассеяние на свободном электроне. Определите: *a)* максимально возможное изменение длины волны фотона; *б)* максимальную энергию и импульс электрона отдачи; *в)* энергию и импульс электрона отдачи при условии, что фотон рассеивается на угол  $90^\circ$ .

110. На какой угол рассеялся  $\gamma$ -квант с энергией 0,8 МэВ в результате столкновения с покоившимся электроном, если известно, что: *a)* длина волны рассеянного кванта равна комптоновской длине волны электрона; *б)* скорость электрона отдачи составляет 0,5 с?

111. Покажите с помощью законов сохранения энергии и импульса, что свободный электрон не может: *a)* излучать энергию; *б)* поглотить квант.

112. При столкновении с релятивистским электроном фотон, обладающий энергией покоя электрона, рассеялся под углом  $60^\circ$ , а электрон остановился. Определите комптоновское смещение длины волны рассеянного кванта и кинетическую энергию электрона до столкновения.

113. Монохроматический пучок электромагнитных волн падает на тонкую металлическую фольгу, находящуюся в вакууме в однородном магнитном поле с индукцией  $1,8 \cdot 10^{-3}$  Тл. Радиус кривизны траектории электронов, выбитых из металла в плоскости, перпендикулярной полю, оказался равным 0,1 м. Определите длину волны падающего излучения, если длина волны, соответствующая работе выхода электронов из фольги, равна 0,15 Å.

114. По классической электромагнитной теории света поток световой энергии непрерывно распространяется от источника во все

стороны. Через какое время, согласно этой теории, отдельный атом танталового катода может накопить столько энергии, чтобы стал возможен вылет фотоэлектрона, если катод находится на расстоянии 10 м от лампочки мощностью 25 Вт? Работа выхода электрона из тантала равна 4 эВ. Считать, что фотоэлектрону передается вся энергия, накапливающаяся в атоме тантала, диаметр которого равен 0,3 нм.

115. Излучение гелий-неонового лазера мощностью  $W = 1,5$  МВт сосредоточено в пучке диаметром  $d = 0,5$  см. Длина волны излучения  $\lambda = 0,63$  мкм. Вычислите плотность потока фотонов в пучке.

116. Возбужденный атом водорода летит со скоростью  $V = 3$  км/с. На сколько процентов изменится скорость атома вследствие отдачи при излучении фотона длиной волны 0,07 мкм в направлении движения атома?

117. На зеркальную поверхность площадью  $15 \text{ см}^2$  падает под углом  $45^\circ$  пучок фотонов интенсивностью 1050 фотон/с. Длина волны падающего света 500 нм. Найдите величину светового давления на поверхность, если коэффициент отражения поверхности 0,75.

118. Определите красную границу фотоэффекта для серебра, у которого работа выхода равна 4,74 эВ.

119. Какова максимальная скорость электронов, вылетающих с поверхности цезия под действием излучения с длиной волны 320 нм? Работа выхода цезия равна 1,97 эВ.

120. Красная граница фотоэффекта для рубидия равна 540 нм. Определите работу выхода и максимальную скорость электронов при освещении поверхности металла светом с длиной волны 450 нм.

121. Исходя из классического закона преломления, выведите закон сохранения тангенциальной компоненты импульса фотонов при прохождении плоской границы прозрачных сред.

122. В результате эффекта Комптона фотон с энергией 0,3 МэВ испытал рассеяние под углом  $120^\circ$ . Определите энергию рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона отдачи.

123. Фотоны длиной волны  $\lambda = 1,4 \text{ \AA}$  испытывают комптоновское рассеяние на угол  $\theta = 60^\circ$ . Рассеянные фотоны попадают в рентгеновский спектрограф, использующий принцип интерференционного отражения Брэгга – Вульфа. При какой минимальной толщине кристаллической пластинки спектрографа можно обнаружить изменение длины волны рассеянного излучения (комptonовское смещение) в первом порядке, если постоянная кристаллической решетки  $d = 1 \text{ \AA}$ ?

124. В результате комптоновского рассеяния фотона на покоящемся электроны последний получил импульс отдачи  $p$ . Определите, под какими углами по отношению к направлению падающего фотона мог вылететь электрон с таким импульсом.

125. В результате комптоновского рассеяния фотона на покоящемся электроны последний вылетел под углом  $70^\circ$  к направлению падающего фотона. Какую кинетическую энергию мог приобрести электрон отдачи в этом случае?

126. При прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество образуются две группы быстрых электронов: одна – в результате фотоэффекта, другая – комптоновского рассеяния. Каково должно быть энергетическое разрешение регистрирующей аппаратуры, чтобы отличать фотоэлектроны от комптоновских электронов с максимальной энергией? Энергия  $\gamma$ -квантов  $W = 5 \text{ МэВ}$ .

## 2. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

---

---

### 2.1. Волновая функция. Уравнение Шредингера

В 1924 году французский физик Луи де Бройль выдвинул гипотезу, согласно которой движение каждой частицы связано с волновым процессом. Длина волны этого процесса

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $p = mv$  – импульс частицы.

Эта гипотеза была экспериментально подтверждена в 1927 году в опытах Дэвиссона и Джермера по дифракции электронных пучков на кристаллах никеля.

Теория, которая описывает волновые свойства частиц, называется *квантовой механикой*. Квантовую механику необходимо применять тогда, когда размер области движения частицы  $\Delta x$  сравним с ее длиной волны де Бройля  $\lambda$ :

$$\Delta x \sim \lambda.$$

В частности, квантовая механика описывает движение электронов в атомах и молекулах.

Квантовая частица не имеет определенной траектории при движении в пространстве. Ее координата  $x$  и соответствующая проекция импульса  $p_x$  не могут одновременно иметь определенные значения. Возможные значения координаты и импульса лежат в интервалах  $(x - \Delta x/2, x + \Delta x/2)$  и  $(p_x - \Delta p_x/2, p_x + \Delta p_x/2)$ . Неопределенности координат  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  и импульса  $\Delta p_x$ ,  $\Delta p_y$ ,  $\Delta p_z$  удовлетворяют соотношениям, называемым соотношениями неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Для неопределенности энергии  $\Delta E$  некоторого состояния системы и промежутка времени  $\Delta t$ , в течение которого это состояние существует, также выполняется соотношение неопределенностей

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

Волны де Бройля имеют вероятностный смысл. Состояние квантовой частицы полностью описывается комплексной функцией ее координат и времени



$$\Psi = \Psi(x, y, z, t),$$

которая называется волновой функцией частицы. Физический смысл волновой функции определяется равенством

$$dw = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dV,$$

где  $dw$  – вероятность того, что частица в момент времени  $t$  находится внутри бесконечно малого элемента объема  $dV$ , содержащего точку с координатами  $x, y, z$ .

Квантовая частица не имеет определенного положения в пространстве. С разной вероятностью она может находиться во всех точках пространства. Вероятность  $w$  нахождения частицы внутри конечного объема  $V$  определяется интегралом по этому объему:

$$w = \int_V |\Psi(x, y, z, t)|^2 dV.$$

Волновая функция удовлетворяет условию нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x, y, z, t)|^2 dV = 1.$$

Эволюция состояния квантовой частицы во времени определяется дифференциальным уравнением в частных производных для волновой функции:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z) \Psi,$$

называемым уравнением Шредингера. В этом уравнении

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

представляет собой оператор Лапласа;  $m$  – масса частицы;  $U(x, y, z)$  – ее потенциальная энергия.

Состояния, в которых энергия  $E$  частицы имеет определенные значения, называются стационарными. Зависимость волновой функции стационарного состояния от времени  $t$  определяется соотношением

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \exp\left(-\frac{iEt}{\hbar}\right),$$

где  $\psi(x, y, z)$  не зависит от времени и называется стационарной волновой функцией. Эта волновая функция удовлетворяет стационарному уравнению Шредингера

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

Решение стационарного уравнения Шредингера позволяет определить собственные значения энергии частицы и соответствующие им собственные волновые функции. Собственными значениями физической величины называются те значения, которые данная физическая величина может принимать в эксперименте.

Собственные значения энергии частицы называют также ее энергетическими уровнями.

## 2.2. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками

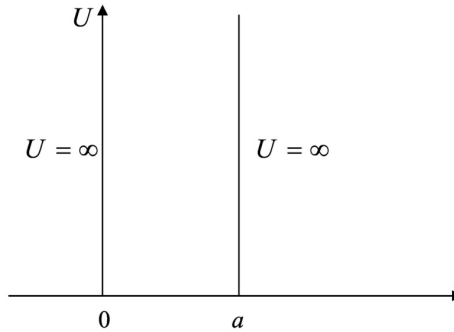


Рис. 6

Пусть потенциальная энергия частицы зависит только от одной координаты  $x$  по закону (рис. 6):

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0 \\ 0, & 0 \leq x \leq a \\ \infty, & x > a \end{cases}$$

Стационарное уравнение Шредингера для частицы имеет вид:

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

При  $x < 0$  и  $x > a$  это уравнение имеет нулевое решение  $\psi = 0$ . Внутри ямы при  $0 < x < a$  имеем

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0, \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}.$$

Общее решение данного уравнения:

$$\psi(x) = A \sin(kx + \delta).$$

Волновая функция должна быть всюду непрерывной, т. е.

$$\psi(0) = \psi(a) = 0,$$

откуда  $\delta = 0$  и  $\sin(ka) = 0$ .

Следовательно, параметр  $k$  может принимать только дискретные значения

$$k_n = \frac{\pi n}{a}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

соответственно, собственные значения энергии  $E_n$  имеют вид:

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2ma^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Состояниям с данной энергией соответствуют волновые функции:

$$\psi_n(x) = A \sin(k_n x) = A \sin\left(\frac{\pi n x}{a}\right).$$

Постоянная  $A$  находится из условия нормировки волновой функции:

$$\int_0^a |\psi_n(x)|^2 dx = A^2 \int_0^a \left| \sin\left(\frac{\pi n x}{a}\right) \right|^2 dx = A^2 \frac{a}{2} = 1,$$

откуда нормированные волновые функции частицы имеют вид

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi n x}{a}\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Состояние с наименьшим значением энергии называется основным состоянием частицы, все остальные состояния называются возбужденными. Найдем длину волны де Бройля в стационарном состоянии:

$$\lambda_n = \frac{2\pi\hbar}{p_n} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE_n}} = \frac{2a}{n} \quad \text{или} \quad a = \frac{\lambda_n}{2} n.$$

Для частицы в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками возможны только такие значения энергии, при которых на ширине ямы укладывается целое число полуволен де Бройля.

Данное решение иллюстрирует общую закономерность, характерную для квантовых частиц. Если частица движется в ограниченной области пространства, то собственные значения энергии частицы принимают дискретный ряд значений, при этом разность соседних собственных значений, т. е. расстояние между соседними уровнями, тем больше, чем меньше размер области, в которой движется частица.

### 2.3. Прохождение частицы сквозь потенциальный барьер. Туннельный эффект

Пусть потенциальная энергия частицы имеет вид потенциального барьера (рис. 7):

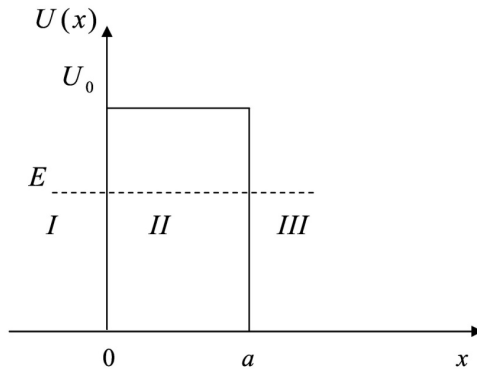


Рис. 7

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ U_0, & 0 \leq x \leq a, \\ 0, & x > a \end{cases}$$

где  $U_0$  — высота барьера;  $a$  — его ширина.

Частица налетает на барьер слева, энергия частицы  $E$  меньше высоты барьера:  $E < U_0$ . В классической механике частица отразится от барьера и полетит назад. Она не может попасть внутрь барьера, где ее кинетическая энергия отрицательна:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = E - U_0 < 0.$$

В квантовой механике частица может пройти сквозь барьер. Уравнение Шредингера для частицы имеет вид

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

При  $x < 0$

$$\frac{d^2\psi_1}{dx^2} + k^2\psi_1 = 0, \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}.$$

Общее решение:

$$\psi_1(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}.$$

Слагаемое  $\psi_{\text{пад}} = Ae^{ikx}$  описывает падающую волну, а слагаемое  $\psi_{\text{отр}} = Be^{-ikx}$  – волну, отраженную от барьера.

При  $0 < x < a$

$$\frac{d^2\psi_2}{dx^2} - q^2\psi_2 = 0, \quad q = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}}.$$

Общее решение:

$$\psi_2(x) = Ce^{-qx} + De^{qx}.$$

При  $a < x$

$$\frac{d^2\psi_3}{dx^2} + k^2\psi_3 = 0, \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}.$$

Общее решение:

$$\psi_3(x) = Fe^{ik(x-a)}.$$

Слагаемое  $\psi_{\text{пр}} = Fe^{ik(x-a)}$  описывает волну, прошедшую через барьер, а отраженной волны в этой области быть не может.

Вероятность прохождения частицы через барьер характеризуется коэффициентом прохождения

$$D = \left| \frac{F}{A} \right|^2,$$

который равен отношению плотности потока прошедших частиц к плотности потока падающих частиц. Этот коэффициент находится из граничных условий – волновая функция и ее первая производная должны быть всюду непрерывны:

$$\psi_1(0) = \psi_2(0); \quad \psi_1'(0) = \psi_2'(0);$$

$$\psi_2(a) = \psi_3(a); \quad \psi_2'(a) = \psi_3'(a).$$

Из этих условий следует система линейных уравнений для коэффициентов  $A, B, C, D, F$  волновой функции:

$$\begin{cases} A + B = C + D \\ ik(A - B) = q(D - C) \\ Ce^{-qa} + De^{qa} = F \\ q(De^{qa} - Ce^{-qa}) = ikF \end{cases}$$

Обычно имеет место соотношение  $qa \gg 1$ , так что  $D \sim 0$ . Решая систему при этом условии, найдем, что

$$\frac{F}{A} = \frac{4kq}{(k + iq)(q - ik)} e^{-2qa},$$

так что коэффициент прохождения

$$D = \left| \frac{F}{A} \right|^2 = D_0 e^{-2qa} = D_0 \exp \left\{ -\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} \right\}.$$

Коэффициент

$$D_0 = \frac{16k^2 q^2}{(k^2 + q^2)^2}$$

порядка единицы, а множитель  $e^{-2qa}$  экспоненциально мал.

В случае барьера произвольной формы (рис. 8) коэффициент прохождения определяется приближенной формулой

$$D = D_0 \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m(U(x) - E)} dx \right\}.$$

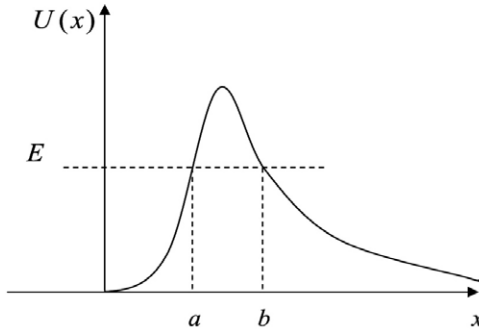


Рис. 8

Таким образом, в квантовой механике существует отличная от нуля вероятность прохождения частицы сквозь барьер. Это явление носит название туннельного эффекта. Туннельный эффект лежит в основе ряда физических явлений, таких как  $\alpha$ -распад атомных ядер, эффект Джозефсона в сверхпроводниках.

## 2.4. Атом водорода. Квантовые числа

Экспериментальные исследования спектров излучения разреженных газов (отдельных атомов) показали, что характерный линейчатый спектр каждого элемента представляет собой серии линий. Положение линий атома водорода описывается эмпирической формулой Бальмера

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

где  $\lambda$  – длина волны спектральной линии;  $R = 1,097 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга;  $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  – определяет серию;  $n = m + 1, m + 2, \dots$  – определяет отдельные линии этой серии. Серия Лаймана ( $m = 1$ ) располагается в ультрафиолетовой области спектра, серия Бальмера ( $m = 2$ ) – в видимой области, а серии Пашена ( $m = 3$ ), Брэкета ( $m = 4$ ), Пфунда ( $m = 5$ ) и Хэмфри ( $m = 6$ ) – в инфракрасной.

Для объяснения закономерностей в линейчатых спектрах Бор объединил планетарную модель атома Резерфорда с гипотезой Планка о квантовой природе света. Теория атома Бора основывается на двух постулатах.

1. Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные круговые орбиты, по которым движутся электроны. На стационарных орбитах электрон имеет квантованные значения момента импульса:

$$mv_n r_n = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

где  $m$  – масса электрона;  $v_n$  – его скорость;  $r_n$  – радиус орбиты.

2. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон с частотой  $\nu$  и энергией

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

равной разности энергий  $E_n$  и  $E_m$  соответствующих стационарных состояний.

Рассматривая движение электрона по орбите под действием кулоновской силы классически

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2},$$

при условии квантования момента импульса, Бор получил выражение для энергии электронов на стационарных орбитах

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2},$$

из которого следует формула Бальмера, при этом постоянная Ридберга выражается через фундаментальные физические постоянные. Однако теория Бора не смогла объяснить все особенности поведения электронов в атоме водорода, как и спектры более сложных многоэлектронных атомов.

Наиболее последовательное описание строения атомов достигается в квантовой механике.

Потенциальная энергия электрона в атоме водорода

$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

где  $r$  – расстояние от электрона до ядра имеет вид потенциальной ямы (рис. 9).

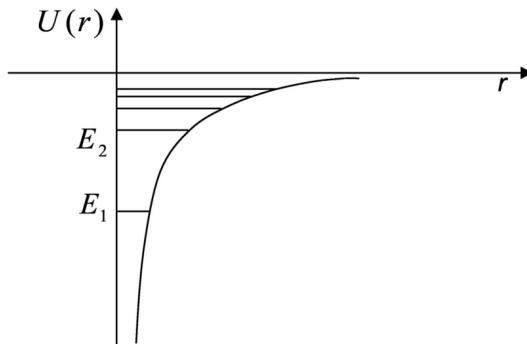


Рис. 9

Уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0$$

удобно решать в сферической системе координат  $r, \theta, \varphi$ . Решения этого уравнения

$$\psi = \psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$$

определяются тремя квантовыми числами  $n, l, m$ .



Главное квантовое число  $n$  принимает значения  $n = 1, 2, 3, \dots$  и определяет собственные значения энергии электрона

$$E_n = -\frac{Ry}{n^2}, \quad Ry = \frac{me^4}{8h^2\epsilon_0^2} = 13,6 \text{ эВ.}$$

Орбитальное квантовое число  $l$  принимает значения  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$  и определяет собственные значения орбитального момента импульса электрона

$$L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}.$$

Магнитное квантовое число  $m$  принимает значения  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$  и определяет собственные значения проекции орбитального момента импульса электрона на ось  $Z$

$$L_{zm} = \hbar m.$$

Если одному и тому же уровню энергии (собственному значению энергии) соответствует несколько различных состояний (волновых функций), отличающихся значениями других квантовых чисел, то такие уровни называются вырожденными. Число различных состояний, соответствующих одному уровню энергии, называется кратностью вырождения этого уровня.

Уровни энергии электрона в атоме водорода являются вырожденными.

Состояния с малыми значениями орбитального квантового числа обозначаются латинскими буквами:

состояние с  $l = 0$  называется  $s$ -состоянием,

состояние с  $l = 1$  называется  $p$ -состоянием,

состояние с  $l = 2$  называется  $d$ -состоянием,

состояние с  $l = 3$  называется  $f$ -состоянием.

Волновая функция основного состояния с  $n = 1, l = 0, m = 0$  имеет вид

$$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}, \quad a = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{me^2} = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м,}$$

где постоянная  $a$  называется боровским радиусом.

Вероятность найти электрон внутри шарового слоя  $(r, r + dr)$ :

$$dw = |\psi_{100}|^2 dV = \frac{1}{\pi a^3} e^{-\frac{2r}{a}} 4\pi r^2 dr,$$

следовательно, боровский радиус представляет собой наиболее вероятное расстояние от электрона до ядра в атоме водорода в основном состоянии.

Электрон при своем движении как бы «размазан» по всему объему, образуя электронное облако, плотность которого характеризует вероятность нахождения электрона в различных точках объема атома. Квантовые числа  $n$  и  $l$  характеризуют размер и форму электронного облака, а квантовое число  $m$  – ориентацию электронного облака в пространстве. На рис. 10 показаны графические изображения (полярные диаграммы) плотностей вероятности для  $s$  и  $p$  электронов.

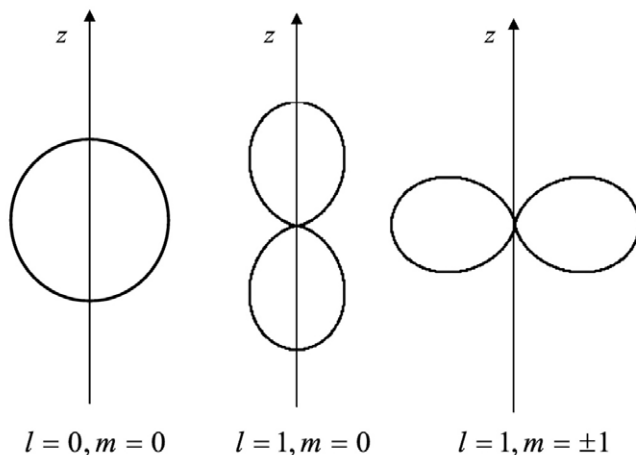


Рис. 10

Излучательные переходы между электронными состояниями возможны только в том случае, если выполняются следующие *правила отбора*:

- 1) изменение  $\Delta l$  орбитального квантового числа  $l$  удовлетворяет условию  $\Delta l = \pm 1$ ;
- 2) изменение  $\Delta m$  магнитного квантового числа  $m$  удовлетворяет условию  $\Delta m = 0, \pm 1$ .

Например, в атоме водорода переходы  $np \rightarrow 1s$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) образуют серию Лаймана, а переходы  $np \rightarrow 2s$ ,  $ns \rightarrow 2p$ ,  $nd \rightarrow 2p$  ( $n = 3, 4, \dots$ ) – серию Бальмера.

## 2.5. Спин электрона. Принцип Паули. Многоэлектронные атомы

Помимо орбитального момента импульса электрон обладает собственным моментом импульса, не связанным с его движением в пространстве, который называется спином. Спин был обнаружен в экспериментах Штерна и Герлаха при прохождении узкого пучка атомов серебра, находящихся в  $s$ -состоянии, через сильное неоднородное магнитное поле (рис. 11).

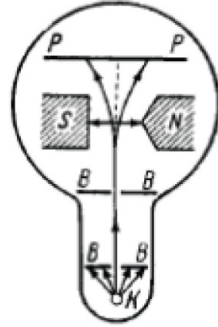


Рис. 11

В этом состоянии  $l = 0$ , момент импульса равен нулю, и магнитное поле не должно было влиять на движение атомов. Однако пучок атомов расщеплялся на два пучка, следовательно, было обнаружено пространственное квантование механического момента, не связанного с орбитальным движением электрона. Спин следует рассматривать как внутреннее неотъемлемое квантовое свойство микрочастицы: подобно тому, как частицы имеют массу, а заряженные частицы — заряд, они имеют еще и спин. Спин, как и орбитальный момент импульса, квантуется по закону

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)},$$

где  $s$  — спиновое квантовое число.

Проекция спина на ось  $Z$  может принимать  $2s + 1$  значений. Так как опыты Штерна и Герлаха обнаружили только две ориентации спина, то  $2s + 1 = 2$ , откуда:  $s = 1/2$ . Проекция

$$L_{sz} = \hbar \sigma,$$

где  $\sigma$  — магнитное спиновое квантовое число, которое может иметь только два значения:

$$\sigma = \pm s = \pm \frac{1}{2}.$$

С учетом спина состояние электрона в атоме водорода определяется набором четырех квантовых чисел  $n, l, m, \sigma$ .

В многоэлектронном атоме состояние каждого электрона так же, как и в атоме водорода, определяется четырьмя квантовыми числами  $n, l, m, \sigma$ .

Для электронов справедлив *принцип запрета Паули*: в одном и том же атоме не может быть более одного электрона с одинаковым набором четырех квантовых чисел  $n, l, m, \sigma$ .

Состояние электрона в атоме обозначают двумя квантовыми числами  $n$  и  $l$  (главным и орбитальным), поскольку только от этих квантовых чисел зависит его энергия. Электроны, находящиеся в состояниях с одинаковыми квантовыми числами  $n$  и  $l$ , имеют одинаковую энергию и называются эквивалентными. Число эквивалентных электронов  $z$  указывается в показателе степени:  $n\bar{l}$ , например,  $1s^2, 2p^3$ .

Распределение электронов в атоме по состояниям с заданными квантовыми числами  $n$  и  $l$  называется электронной конфигурацией атома. Например, электронная конфигурация атома кислорода в основном состоянии имеет вид:  $1s^2 2s^2 2p^4$ .

Совокупность электронов в многоэлектронном атоме, имеющих одно и то же главное квантовое число  $n$ , называется электронной оболочкой. Максимальное число электронов на оболочке:  $2n^2$ . Оболочки обозначают латинскими буквами:

$$K (n = 1), L (n = 2), M (n = 3), N (n = 4).$$

В каждой из оболочек электроны распределяются по подоболочкам, соответствующим данному  $l$ . Поскольку  $l$  принимает значение от 0 до  $n-1$ , то число подоболочек равно порядковому номеру  $n$  оболочки. Количество электронов в подоболочке определяется квантовыми числами  $m$  и  $\sigma$  — максимальное число электронов в подоболочке с данным  $l$ :  $2(2l + 1)$ .

Электронные оболочки в атомах заполняются последовательно в соответствии с принципом Паули. Химические свойства элементов определяются числом электронов на внешней, не полностью заполненной оболочке. Периодичность химических свойств элементов объясняется повторяемостью электронных конфигураций внешних оболочек. Так, электронная конфигурация атома O кислорода, содержащего  $Z = 8$  электронов, имеет вид:  $1s^2 2s^2 2p^4$ , т. е. на внешней  $L$ -оболочке имеется 6 электронов. Электронная конфигурация атома S серы, содержащего  $Z = 16$  электронов, имеет вид:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$ , т. е. на внешней  $M$ -оболочке также имеется 6 электронов. Кислород и сера принадлежат шестой группе элементов и обладают сходными химическими свойствами.

## 2.6. Примеры решения задач

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

Дано: $r_n/r_m = 9$ $m = 2$ $\nu = ?$	СИ:	Решение:
--	-----	----------

Частота света, излучаемого атомом водорода:

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

где  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

Для решения задачи необходимо найти выражение для  $n$  (номера орбиты, с которой переходит электрон).

Электрон движется по окружности радиуса  $r_n$  под действием кулоновской силы, которая равна результирующей силе:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n^2} = m_e a_{u.c} = m_e \cdot \frac{v_n^2}{r_n}. \quad (2)$$

С другой стороны момент импульса электрона, движущегося по орбите  $n$ :

$$m_e v_n r_n = n\hbar. \quad (3)$$

Решим систему уравнений (2) и (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n^2} = m_e \cdot \frac{v_n^2}{r_n} \\ m_e v_n r_n = n\hbar \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} = m_e \cdot v_n^2 \\ m_e v_n r_n = n\hbar \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} = m_e \cdot v_n^2 \\ m_e v_n r_n = n\hbar \end{array} \right.$$

Выразим скорость из второго уравнения системы и подставим в первое:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} = m_e \cdot v_n^2 \\ v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} = m_e \cdot \left( \frac{n\hbar}{m_e r_n} \right)^2 \\ v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \end{array} \right. ;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} = m_e \cdot \frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r_n^2} \\ v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot e^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e r_n} \\ v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \end{array} \right.$$

Выразим радиус из первого уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_e r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot e^2} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{e^2} \\ v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot e^2} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{e^2 m_e} \\ v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \end{array} \right. ;$$

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{e^2 m_e} \quad (4)$$

По аналогии:

$$r_m = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 m^2 \hbar^2}{e^2 m_e} \quad (5)$$

Поделим (4) на (5):

$$\frac{r_n}{r_m} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{e^2 m_e} \cdot \frac{e^2 m_e}{4\pi\epsilon\epsilon_0 m^2 \hbar^2} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{e^2 m_e} \cdot \frac{e^2 m_e}{4\pi\epsilon\epsilon_0 m^2 \hbar^2} = \frac{n^2}{m^2};$$

$$\frac{r_n}{r_m} = \frac{n^2}{m^2} \quad (6)$$

Выразим  $n^2$  из уравнения (6) и подставим в (1):

$$n^2 = m^2 \frac{r_n}{r_m};$$

$$v = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{m^2 \frac{r_n}{r_m}} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{m^2} \cdot \frac{r_m}{r_n} \right);$$

$$v = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{m^2} \cdot \frac{r_m}{r_n} \right) \quad (7)$$

Проверка размерности

$$[v] = [R] \left( \frac{1}{[m]^2} - \frac{1}{[m]^2} \cdot \frac{[r_m]}{[r_n]} \right) = c^{-1} \cdot \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{1} \cdot \frac{M}{M} \right) = c^{-1}.$$

Подставим численные значения:

$$v = 3,29 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{2^2} \cdot \frac{1}{9} \right) = 3,29 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{9} \right) = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{1}{9} \right) =$$

$$= 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{8}{9} = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \frac{2}{9} \approx 7,31 \cdot 10^{14} c^{-1}.$$

**Ответ:**  $v = 7,31 \cdot 10^{14} c^{-1}$ .

## 2.7. Задачи для самостоятельного решения

127. Согласно классической электродинамике электрон, движущийся с ускорением  $a$ , излучает в единицу времени энергию  $E = \frac{2e^2 a^2}{12\pi\epsilon_0 c^3}$ , где  $e$  – заряд электрона;  $c$  – скорость света. Исходя из классических представлений и ограничиваясь допущением, что полное ускорение электрона все время совпадает с центростремительным, оцените «время жизни» атома. Начальный радиус орбиты электрона принять равным  $r = 10^{-10}$  м.

128. Пользуясь теорией Бора, определите для первой орбиты в атоме водорода радиус орбиты, скорость и ускорение электрона, энергию основного состояния атома. На одном графике с кулоновским потенциалом постройте систему уровней энергии электрона для трех первых орбит.

129. Пользуясь теорией Бора, определите для электрона, находящегося на первой и второй орбитах в атоме водорода, отношение: а) радиусов орбит; б) магнитного момента электрона к механическому. На какой орбите и во сколько раз полная энергия электрона больше?

130. Как изменится орбитальный момент импульса электрона в атоме водорода при переходе электрона из возбужденного состояния в основное с испусканием одного кванта с длиной волны  $\lambda = 97,25$  нм?

131. Пользуясь теорией Бора, определите для однократно ионизованного атома гелия ( $\text{He}^+$ ): а) радиус первой орбиты; б) скорость электрона на этой орбите; в) потенциал ионизации; г) первый потенциал возбуждения; д) длину волны в спектре, соответствующую переходу электрона со второй орбиты на первую.

132. Определите (в длинах волн) спектральные диапазоны, принадлежащие сериям Лаймана, Бальмера, Пашена, Бреккета и Пфунда. Изобразите на шкале длин волн их расположение относительно друг друга.

133. В спектре атомарного водорода интервал между первыми двумя линиями, принадлежащими серии Бальмера, составляет  $\Delta\lambda = 1,71 \cdot 10^{-7}$  м. Определите постоянную Ридберга.

134. Разница между головными линиями серий Лаймана и Бальмера в длинах волн в спектре атомарного водорода равна  $\Delta\lambda = 534,7$  нм. Определите по этим данным постоянную Планка.

135. Квант света с энергией  $E = 15$  эВ выбивает электрон из атома водорода, находящегося в нормальном состоянии. С какой относительной скоростью будет двигаться электрон вдали от ядра?

136. Электрон, имеющий вдали от покоящегося протона скорость  $1,830 \cdot 10^6$  м/с, захватывается последним, в результате чего образуется возбужденный атом водорода. Определите длину волны фотона, который испускается при переходе атома в нормальное состояние.

137. Какие спектральные линии появятся при возбуждении атомарного водорода электронами с энергией: а) 12,5 эВ; б) 14 эВ?

138. Пользуясь теорией Бора, определите для двукратно ионизованного атома лития ( $\text{Li}^{++}$ ) радиус первой орбиты; первый потенциал возбуждения; длину волны резонансной линии (линии, возникающей при переходе из первого возбужденного состояния в основное); потенциал ионизации.

139. Квант света, возникающий при резонансном переходе в однократно ионизованном атоме гелия ( $\text{He}^+$ ), вырывает фотоэлектрон из атома водорода, который находится в основном состоянии. Определите скорость этого электрона вдали от ядра атома.

140. При наблюдении спектра атомарного водорода, полученного с помощью дифракционной решетки с периодом  $d = 2$  мкм, обнаружено, что одна из спектральных линий серии Бальмера в спектре второго порядка соответствует углу дифракции  $\alpha = 29^\circ 05'$ . Определите главное квантовое число энергетического уровня атома, переходу с которого отвечает данная линия.

141. В качестве экрана от рентгеновского излучения используется пластина свинца толщиной  $l = 0,5$  см. Его коэффициент поглощения равен  $\mu_1 = 52,5$  см<sup>-1</sup>. Какой толщины нужно взять пластину из алюминия, коэффициент поглощения которого  $\mu_2 = 0,765$  см<sup>-1</sup>, чтобы она экранировала в такой же степени?



142. Солнечная радиация при прохождении через слой воды толщиной 10 м теряет 82 % энергии, а рентгеновское излучение ( $\lambda = 10^{-10}$  м) слоем воды ослабляется в  $e$  раз. Определите коэффициент поглощения воды для этого рентгеновского излучения и сравните его с коэффициентом поглощения солнечной радиации.

143. Какова наибольшая скорость электронов, подлетающих к антикатоде рентгеновской трубки, если минимальная длина волны в сплошном спектре рентгеновых лучей равна 1 нм?

144. Длина волны одного из видов  $\gamma$ -лучей, испускаемых радием (RaC), равна  $1,6 \cdot 10^{-3}$  нм. Какую разность потенциалов надо приложить к рентгеновской трубке, чтобы получить рентгеновы лучи с этой длиной волны?

145. При напряжении  $U = 31$  кВ, приложенном к рентгеновской трубке, длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра оказалась равной  $\lambda = 4 \cdot 10^{-2}$  нм. Определите постоянную Планка.

146. Вычислите длину волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра, если известно, что при увеличении ускоряющего напряжения на трубке в 2 раза длина волны уменьшается на  $\Delta\lambda = 5 \cdot 10^{-2}$  нм.

147. Скорость электронов, подлетающих к антикатоде рентгеновской трубки, составляет половину скорости света. Определите: а) длину волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра; б) ускоряющее напряжение на трубке.

148. Излучение рентгеновской трубки падает на кристалл кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ). Наименьший угол между плоскостью кристалла и пучком рентгеновых лучей, при котором можно отметить отражение, равен  $\varphi = 2^\circ 36'$ . Постоянная решетки кальцита равна  $d = 3,04 \cdot 10^{-8}$  см. Под каким напряжением работает рентгеновская трубка?

149. Разность длин волн между  $K_\alpha$ -линией никеля и коротковолновой границей сплошного рентгеновского спектра равна  $\Delta\lambda = 0,084$  нм. Определите напряжение на рентгеновской трубке с никелевым антикатодом.

150. При увеличении напряжения на рентгеновской трубке от  $U_1 = 10$  кВ до  $U_2 = 20$  кВ интервал длин волн между  $K_\alpha$ -линией и коротковолновой границей увеличился в 3 раза. Определите порядковый номер элемента антикатада этой трубки.

151. Кристалл с постоянной решетки  $d = 0,281$  нм установлен так, что угол скольжения рентгеновых лучей  $\varphi = 14^\circ$ . Постепенно увеличивая напряжение, приложенное к рентгеновской трубке, при напряжении  $U = 9100$  В получили первый максимум. Найдите по этим данным постоянную Планка.

152. В рентгеновской трубке антикатод сделан из серебра  $_{47}\text{Ag}$ . Определите длину волны и энергию кванта для линии  $K_\alpha$  (без учета ионной структуры), а также наименьшее напряжение, необходимое для возбуждения  $K$ -серии серебра.

153. Коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра  $0,5$  нм. Будут ли при этом наблюдаться в спектре  $K$ -линии характеристического излучения алюминия  $_{13}\text{Al}$ ?

154. Определите длину волны де Бройля: а) электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $10^3$  В; б) молекулы водорода ( $m = 3,4 \cdot 10^{-24}$  г), движущейся со средней квадратичной скоростью, при температуре  $300$  К; в) тела массой  $1$  г, имеющего скорость  $1$  м/с.

155. При каком значении кинетической энергии электрона его де-бройлевская длина волны равна комптоновской длине волны?

156. Пучок электронов падает на естественную грань монокристалла под углом скольжения  $\theta = 30^\circ$ . Отраженные электроны наблюдаются под углом, равным углу падения. Постоянная кристаллической решетки  $d = 0,25$  нм. Найдите первую и вторую ускоряющие разности потенциалов, при которых наблюдается максимальное отражение электронов.

157. Определите: а) на какое расстояние приближается  $\alpha$ -частица с кинетической энергией  $W_0 = 0,96$  МэВ к покоящемуся ядру атома золота при рассеянии частицы на угол  $\theta = \pi$  (лобовом соударении), на угол  $\theta = \pi/2$ ? б) чему равен прицельный параметр взаимодействия в первом и втором случаях? в) чему равно приращение

импульса рассеянной  $\alpha$ -частицы?  $z$ ) при каком значении  $W_0$  это приращение будет максимальным, если прицельный параметр взаимодействия  $b = 1,6 \cdot 10^{-13}$  м?

158. Узкий пучок  $\alpha$ -частиц с энергией 1 МэВ и интенсивностью  $10^4$  частиц/с падает нормально на золотую фольгу толщиной 1 мкм. Сколько частиц рассеивается фольгой за 10 мин в интервале углов:  $a)$   $\theta > 60^\circ$ ?  $b)$   $\theta < 20^\circ$ ?

159. Для основного состояния атома водорода вычислите:  $a)$  радиус  $n$ -й боровской орбиты и скорость электрона на ней;  $b)$  кинетическую энергию и энергию связи электрона на этой орбите;  $в)$  первый потенциал возбуждения;  $z)$  индукцию магнитного поля в центре невозбужденного атома, обусловленную орбитальным движением электрона;  $d)$  отношение магнитного момента атома, обусловленного орбитальным движением электрона к его механическому моменту.

160. Зная максимальную длину волны спектральной линии серии Бальмера  $\lambda = 0,656$  мкм, определите длины волн граничных линий в серии Лаймана и Пашена.

161. Длины волн головной линии серии Лаймана и границы серии Бальмера в спектре атомного водорода равны соответственно 1215 и 3650 Å. Определите по этим данным энергию ионизации невозбужденного атома водорода.

162. В пламени водорода находится  $6,02 \cdot 10^{23}$  атомов водорода при температуре 3200 К. Чему равна мощность излучения, если известно, что средняя продолжительность возбужденного состояния атомов водорода составляет  $10^{-8}$  с и атомы находятся в основном или в первом возбужденном состоянии?

163. В результате захвата летящего электрона протоном образовался возбужденный атом водорода. При переходе атома в нормальное состояние был испущен фотон:  $a)$  частоты  $5,6 \cdot 10^9$  МГц;  $b)$  с импульсом  $1,2 \cdot 10^{-26}$  кг·м/с. Определите скорость электрона, которую он имел вдали от протона.

164. Атом водорода поглощает фотон, вследствие чего электрон, находившийся на второй боровской орбите, вылетает из атома со скоростью  $8 \cdot 10^5$  м/с. Определите частоту фотона.

165. Атомарный водород возбуждается электронами, прошедшими ускоряющую разность потенциалов 12,5 В. Определите: а) частоты фотонов, которые будут излучаться атомами водорода, находившимися перед возбуждением в основном состоянии; б) при каких скоростях электронов будут излучаться все спектральные линии водорода?

166. Вычислите энергию связи электрона в возбужденном состоянии атома водорода, если известно, что при переходе в основное состояние атом излучил: а) фотон с длиной волны 972,5 Å; б) последовательно два фотона с длинами волн 6563 и 1216 Å.

167. Во сколько раз изменяется момент импульса и энергия электрона атома водорода, находившегося в первом возбужденном состоянии при поглощении атомом кванта с импульсом  $6,45 \cdot 10^{27}$  кг·м/с? На сколько изменится при этом орбитальный магнитный момент электрона? Какова кинетическая энергия электрона при возбуждении атома квантом с энергией 15 эВ?

168. Первоначально покоившийся атом водорода испускает фотон, соответствующий головной линии серии Лаймана. Определите: а) скорость, которую приобрел атом, перейдя в основное состояние; б) изменение длины волны фотона, вызванное отдачей атома.

169. Найдите для однозарядных ионов гелия: а) силу кулоновского взаимодействия между ядром и электроном; б) потенциал ионизации, соответствующий основному состоянию; в) первый потенциал возбуждения.

170. Какова должна быть минимальная скорость сближения атома водорода и однозарядного иона гелия, чтобы испущенный гелием фотон, соответствующий головной линии видимой части спектра, смог возбудить атом водорода из основного состояния?

*Указание.* Нужно использовать точную формулу доплеровского эффекта.

171. Для дважды ионизованного атома лития вычислите: а) длину волны в спектре излучения, соответствующую переходу электрона с третьего на второй энергетический уровень; б) минимальную

энергию кванта, необходимую для возбуждения полного спектра;  
в) скорость электрона на  $n$ -й орбите.

172. Позитроний, представляющий собой электрон и позитрон, обращающиеся вокруг общего центра масс частиц, находится в состоянии с минимальной энергией. Чему равен: а) радиус боровской орбиты в позитронии; б) потенциал ионизации?

173. Мезоатом водорода состоит из протона и отрицательного мезона, имеющего массу  $207 m_e$ . Вычислите для мезоатома: а) расстояние между ядром и мезоном в основном состоянии; б) энергию связи и кинетическую энергию мезоатома в основном состоянии; в) длину волны фотона, испускаемого при переходе мезоатома из второго в первое возбужденное состояние.

174. Вычислите де-бройлевскую длину волны: а) частицы массой 1 г, летящей со второй космической скоростью (11,2 км/с); б) электрона, имеющего импульс  $6 \cdot 10^{-24}$  кг·м/с.

175. На сколько нужно увеличить кинетическую энергию нерелятивистской частицы, чтобы де-бройлевская длина волны уменьшилась вдвое? Вычислите это изменение для нерелятивистского электрона, имеющего  $\lambda = 2 \text{ \AA}$ .

176. Определите теоретически возможную разрешающую способность электронного микроскопа с числовой апертурой 0,1 и ускоряющим напряжением 100 В.

177. Пучок электронов падает нормально на поверхность монокристалла никеля. В направлении, составляющем угол  $55^\circ$  с нормалью к поверхности, наблюдается максимум отражения четвертого порядка при скорости электронов  $8 \cdot 10^6$  м/с. Пренебрегая преломлением электронных волн в кристалле, вычислите межплоскостное расстояние, соответствующее данному отражению.

178. Узкий пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов  $10^4$  В, пролетает через тонкую поликристаллическую алюминиевую фольгу и дает на экране дифракционную картину. Отражение третьего порядка от кристаллических плоскостей соответствует кольцу радиусом 1,6 см. Расстояние от фольги до экрана

10 см. Пренебрегая преломлением электронных волн в кристалле, определите постоянную решетки алюминия.

179. Пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов  $= 100$  В, падает под углом  $48,5^\circ$  на естественную грань монокристалла серебра. После зеркального отражения пучок электронов образует максимум третьего порядка. Определите внутренний потенциал серебра, если известно, что постоянная кристаллической решетки для данного отражения  $2,04 \text{ \AA}$ . Коэффициент преломления электронных волн в кристалле равен  $n = \sqrt{1 - \frac{U_i}{U_0}}$ .

180. Выведите зависимость длины волны де Бройля от ускоряющей разности потенциалов  $U$  релятивистской частицы. Вычислите длину: а) для электрона, прошедшего разность потенциалов  $200$  кВ; б) протона, обладающего кинетической энергией  $75$  ГэВ. При каких значениях кинетической энергии электронов ошибка в определении де-бройлевской длины волны по нерелятивистским формулам не превышает  $1\%$ ?

181. Какую кинетическую энергию нужно сообщить протону, чтобы его де-бройлевская длина волны стала равной: а)  $1 \text{ \AA}$ ; б) комптоновской длине волны?

182. Исходя из принципа неопределенностей Гейзенберга, оцените: а) радиус первой борновской орбиты атома водорода; б) скорость электрона на этой орбите; в) минимальную ошибку, с которой можно определить эту скорость.

183. Исходя из принципа неопределенностей Гейзенберга, оцените: а) низший энергетический уровень (минимальную кинетическую энергию) электрона в атоме водорода (линейные размеры атома принять равными  $10^{-10}$  м); б) неопределенность кинетической энергии нуклона в ядре (линейные размеры ядра принять равными  $10^{-14}$  м).

184. Типичное время существования возбужденного состояния ядер имеет порядок  $10^{-12}$  с. Какова неопределенность энергии  $\gamma$ -квантов, испускаемых ядрами?

185. Чему равна предельная резкость спектральной линии с длиной волны  $5000 \text{ \AA}$ , допускаемая принципом неопределенностей,

если считать, что средняя продолжительность возбужденного состояния атомов  $10^{-8}$  с?

186. Вычислите с помощью соотношения неопределенностей энергию основного состояния позитрония и оцените минимальную ошибку, которую мы допускаем, определяя эту энергию. Среднее время жизни позитрония  $1,25 \cdot 10^{-10}$  с.

187. Рассчитайте длину волны де Бройля для  $\alpha$ -частицы, протона и молекулы кислорода, двигающихся с тепловой скоростью при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

188. Электрон, движущийся со скоростью  $3000$  км/с, попадает в однородное ускоряющее электрическое поле напряженностью  $15$  В/см. Какое расстояние должен пройти электрон в поле, чтобы длина его де-бройлевской волны стала равной  $1 \text{ \AA}$ ?

189. Оцените размеры щели, на которой было бы возможно наблюдать дифракцию в потоке стальных дробинок диаметра  $\sim 1$  мм, летящих со скоростью  $150$  м/с.

190. Оцените минимальный размер пятна  $d_{\min}$ , создаваемого на детекторе пучком атомов золота, испускаемых печью с температурой  $t = 1200^\circ\text{C}$ . Расстояние от выходной щели печи до детектора равно  $l = 1$  м.

191. При комптоновском рассеянии фотонов на атомных электронах явление осложняется тем, что электроны в атоме не находятся в покое. Оцените связанный с этим разброс в углах вылета электронов отдачи, выбиваемых из атомов водорода при рассеянии рентгеновских квантов ( $\lambda = 0,2$  нм) строго назад.

192. Действие силы на свободно движущуюся частицу массы  $m$  можно обнаружить, наблюдая изменение ее координаты во времени. Какую минимальную силу, действующую по направлению движения частицы, можно обнаружить таким образом за время наблюдения  $t$ ?

193. Процесс измерения координаты электрона путем облучения его фотоном приводит к неконтролируемому возникновению виртуальных пар, и в силу неразличимости электронов мы не можем отличить исходный электрон от электрона рожденной пары. К какой погрешности  $\Delta x$  это приводит?

194. Возбужденный атом испускает фотон в течение 0,01 мкс. Длина волны излучения равна 5000 Å. Найти, с какой точностью могут быть определены энергия, длина волны и положение фотона.

195. Коллимированный пучок электронов с кинетической энергией  $E_k = 1,65$  кэВ пропускается через резонатор лазера, генерирующего на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм. При некоторых углах падения пучка относительно оси лазера, близких к прямому, может наблюдаться брэгговское рассеяние электронов на электромагнитной волне (эффект Капицы – Дирака). Найти эти углы.



### 3. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

---

#### 3.1. Состав и характеристики атомного ядра

В 1911 году Э. Резерфорд установил ядерную структуру атома. В опытах Резерфорда было показано, что размер ядер составляет величину порядка  $10^{-15}$  м. Атомное ядро характеризуется электрическим зарядом и массой. Заряд ядра –  $Ze$ ,  $Z$  – порядковый номер элемента в таблице Менделеева,  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд. Ядро атома водорода – протон, его заряд равен  $+e$ , масса –  $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$  кг =  $1836 m_e$ ,  $m_e$  – масса электрона. В 1932 году Д. Чедвиком был открыт нейтрон, его электрический заряд равен нулю, а масса близка к массе протона:  $m_n = 1,6749 \times 10^{-27}$  кг =  $1839 m_e$ . В том же году была высказана гипотеза о том, что ядро состоит из протонов и нейтронов, называемых нуклонами. Ядро характеризуется зарядовым числом  $Z$  – числом протонов в ядре, и массовым числом  $A$  – числом нуклонов в ядре. Атомное ядро обозначается символом

$${}^A_Z X,$$

где  $X$  – химический символ элемента;  $A$  – массовое число;  $Z$  – зарядовое число.

Ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными  $A$  называются изотопами, а ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  – изобарами. Например, известны изотопы водорода:  ${}^1_1H$  – водород,  ${}^2_1H$  – дейтерий,  ${}^3_1H$  – тритий. Изотопы одного элемента обладают одинаковыми химическими свойствами. В природе встречаются элементы с  $Z = 1 \div 92$ .

Размеры ядер хорошо описываются эмпирической формулой

$$r = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м.}$$

Эта формула означает, что объем ядра пропорционален числу нуклонов  $A$  в нем, т. е. плотность всех ядер примерно одинакова и составляет

$$\rho_{\text{я}} \cong 10^{17} \text{ кг/м}^3.$$

Ядро обладает также спином и магнитным моментом. Протон и нейтрон, как и электрон, являются фермионами, их спины

$$s_p = s_n = \frac{1}{2}.$$

Магнитные моменты протона и нейтрона:

$$\mu_p = 2,79\mu_g, \quad \mu_n = -1,91\mu_g,$$

где  $\mu_g = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  – ядерный магнетон.

При сложении спинов  $s_1$  и  $s_2$  результирующий спин может принимать значения

$$s = |s_1 - s_2|, \dots, s_1 + s_2.$$

Спин ядра  $I$  будет полуцелым при нечетном числе нуклонов, и целым – при четном. Спины ядер не превышают нескольких единиц. Магнитный момент ядра пропорционален его спину:

$$\mu = g\mu_g I,$$

где безразмерный коэффициент  $g$  называется ядерным гиромагнитным отношением.

### 3.2. Дефект массы и энергия связи ядра

Энергией связи  $E_{cb}$  ядра называется работа, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны. Масса ядра  $m_j$  всегда меньше суммы масс составляющих ядро нуклонов, их разность называется дефектом массы ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_j.$$

Энергия связи ядра определяется формулой

$$E_{cb} = \Delta m \cdot c^2.$$

Удельной энергией связи ядра  $\Delta E_{cb}$  называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра:

$$\Delta E_{cb} = \frac{E_{cb}}{A}.$$

Удельная энергия связи характеризует устойчивость ядра – чем она больше, тем ядро устойчивее. Зависимость удельной энергии связи от массового числа приведена на рис. 12.

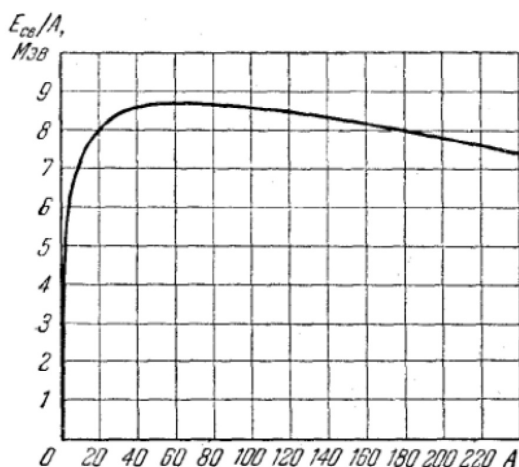


Рис. 12

У гелия  $\text{He}$   $\Delta E_{\text{cb}} = 7,1$  Мэв. Максимальная энергия связи ( $\Delta E_{\text{cb}})_{\text{max}} = 8,7$  Мэв наблюдается у ядер с массовым числом  $A = 50 \div 60$  (от хрома  $\text{Cr}$  до цинка  $\text{Zn}$ ). При дальнейшем росте массового числа  $A$  удельная энергия связи  $\Delta E_{\text{cb}}$  медленно уменьшается и у урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  она принимает значение  $\Delta E_{\text{cb}} = 7,5$  Мэв. Такая зависимость показывает, что энергетически возможны два процесса: 1) деление тяжелых ядер на более легкие; 2) синтез легких ядер в одно ядро. В этих процессах выделяется большое количество энергии. Например, при делении ядра урана с  $A_1 = 240$  на два ядра с  $A_2 = 120$  выделяется энергия  $\Delta E = (\Delta E_{\text{cb}2} - \Delta E_{\text{cb}1}) A_1 = (8,5 - 7,5)240$  Мэв = 240 Мэв. Для сравнения: энергия связи валентных электронов в атомах составляет порядка 10 эв. В химических реакциях, например горения, при образовании одной молекулы выделяется энергия порядка 10 эв. При слиянии двух ядер дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  в ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  выделяется энергия 24 Мэв.

Большинство тяжелых ядер не распадаются самопроизвольно на более легкие ядра, хотя это энергетически выгодно. Это объясняется тем, что в процессе деления ядро проходит через промежуточное состояние, энергия которого значительно больше, чем энергия основного состояния ядра. То есть для осуществления деления ядру нужно сообщить дополнительную энергию, называемую энергией

активации. А для слияния легких ядер они должны подойти друг к другу на расстояние порядка  $10^{-15}$  м, на котором начинают действовать ядерные силы, преодолев электромагнитные силы отталкивания. Для этого они должны двигаться с большими скоростями, соответствующими нескольким сотням миллионов градусов. Поэтому реакции синтеза называются термоядерными.

### 3.3. Ядерные силы. Модели ядра

Ядерное взаимодействие между нуклонами получило название сильного взаимодействия. Сильное взаимодействие значительно превышает электромагнитное.

Свойства ядерных сил:

- 1) ядерные силы являются силами притяжения;
- 2) ядерные силы являются короткодействующими. Радиус их действия порядка  $10^{-15}$  м. На расстояниях меньше чем  $10^{-15}$  м ядерные силы значительно превышают кулоновские силы, а уже на расстояниях больше чем  $2 \cdot 10^{-15}$  м ядерные силы становятся меньше кулоновских;
- 3) ядерные силы являются зарядово-независимыми, т. е. они не зависят от электрического заряда нуклонов. Между протоном и протоном, протоном и нейтроном, нейтроном и нейтроном действуют одинаковые ядерные силы;
- 4) ядерным силам свойственно насыщение, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов, ближайших к нему. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи остается приблизительно постоянной при увеличении числа нуклонов в ядре;
- 5) ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Так, протон и нейтрон образуют дейтрон только тогда, когда их спины параллельны;
- 6) ядерные силы не являются центральными, т. е. они не направлены вдоль прямой, соединяющей центры нуклонов.

Согласно квантовым представлениям, всякое взаимодействие между двумя частицами осуществляется посредством обмена виртуальными частицами. Виртуальными называются частицы, кото-

рые не могут быть обнаружены за время их существования. Каждая частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая виртуальные частицы — кванты данного поля. Действие поля на другую частицу проявляется в результате поглощения этой частицей одной из виртуальных частиц, испущенных первой частицей. Так, электромагнитное взаимодействие осуществляется за счет обмена виртуальными фотонами.

Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга время жизни виртуальной частицы  $\Delta t$  связано с неопределенностью ее энергии  $\Delta E$  соотношением

$$\Delta E \cdot \Delta t \cong \hbar.$$

Максимальное расстояние, на которое пролетит такая частица,

$$r = c \cdot \Delta t_{\max} = \frac{\hbar c}{\Delta E_{\min}}.$$

Это расстояние и определяет радиус взаимодействия. В случае электромагнитного взаимодействия энергия виртуальных фотонов  $\Delta E = \hbar \omega$ , где частота  $\omega$  может принимать любые значения от нуля до бесконечности, так что  $\Delta E_{\min} = 0$ , и радиус электромагнитного взаимодействия равен бесконечности. Если же взаимодействие переносится частицами с ненулевой массой покоя  $m_0$ , то  $\Delta E_{\min} = m_0 c^2$ , и радиус такого взаимодействия

$$r_0 \approx \frac{\hbar}{m_0 c}.$$

В 1935 году Х. Юкава высказал гипотезу о том, что ядерные взаимодействия переносятся некими частицами с ненулевой массой покоя. Масса этих частиц

$$m_0 \approx \frac{\hbar}{r_0 c},$$

где  $r_0$  — радиус ядерных сил, должна быть в  $200 \div 300$  раз больше массы электрона  $m_e$ .

Такие частицы были названы мезонами. В 1936 году К. Андерсон обнаружил в космических лучах частицы с массой покоя  $m_\mu = 207m_e$ . Эти частицы были названы  $\mu$ -мезонами, или мюонами. Но оказалось, что мюоны слабо взаимодействуют с нуклонами и не могут быть переносчиками ядерного взаимодействия. В 1947 году С. Пауэлл открыл в космических лучах еще один тип мезонов —  $\pi$ -мезоны, или

пионы, которые и оказались носителями ядерных сил. Существуют положительно заряженный  $\pi^+$ -мезон, отрицательно заряженный  $\pi^-$ -мезон и нейтральный  $\pi^0$ -мезон. Масса заряженных  $\pi^\pm$ -мезонов составляет  $m_{\pi^\pm} = 273m_e$ , а масса нейтрального  $\pi^0$ -мезона —  $m_{\pi^0} = 264m_e$ . Их спин  $s = 0$ .

Из-за сложного характера ядерных сил до сих пор не существует единой последовательной теории атомного ядра. Поэтому для описания свойств ядер используются приближенные модели. Наиболее распространенными являются капельная и оболочечная модели.

Капельная модель была предложена Я. Френкелем в 1936 году и затем развита Н. Бором. Эта модель основана на аналогии поведения нуклонов в ядре и молекул в капли жидкости. В обоих случаях силы взаимодействия являются короткодействующими и им свойственно насыщение. И в ядре, и в капле плотность постоянна и пропорциональна числу частиц. В отличие от капли ядро имеет электрический заряд и подчиняется законам квантовой механики. Капельная модель позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре, объяснила механизм некоторых ядерных реакций.

Оболочечная модель ядра была предложена М. Гепперт-Майером и Х. Йенсенем в 1949–1950 годах. Согласно этой модели нуклоны в ядре движутся в центрально-симметричном поле, как и электроны в атоме. Их состояния характеризуются главным и орбитальным квантовыми числами. Заполнение состояний происходит в соответствии с принципом запрета Паули. Как и электроны в атоме, нуклоны в ядре образуют подоболочки и оболочки. Наиболее устойчивыми являются ядра с полностью заполненными оболочками. Оболочечная модель позволила объяснить спины и магнитные моменты ядер, особую устойчивость некоторых ядер, называемых магическими, а также периодичность изменений свойств ядер с ростом массового числа.

### 3.4. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение ядер одного химического элемента в ядра другого, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер. Явление радиоактивности было обнаружено в 1896 году А. Беккерелем. Рассмотрим закон радиоактивного распада. Число ядер  $dN$ , распавшихся за время  $dt$ , пропорционально числу  $N$  нераспавшихся ядер и времени  $dt$ :

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

где  $\lambda$  называется постоянной радиоактивного распада, а знак минус показывает, что число нераспавшихся ядер убывает со временем.

Данное дифференциальное уравнение можно решить, разделяя переменные,

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \quad \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t,$$

откуда получаем закон радиоактивного распада:

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

здесь  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ;  $N_0$  – число нераспавшихся ядер в начальный момент времени  $t = 0$ .

Периодом полураспада  $T$  называется время, за которое распадается половина всех ядер:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}, \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

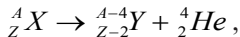
Активностью  $A$  радиоактивного источника называется число распадов ядер за единицу времени:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

Единица активности в системе СИ называется беккерель и обозначается Бк,  $\text{Бк} = 1$  распад/с. Используется также внесистемная единица активности кюри (Ки),  $\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

Радиоактивный распад ядер сопровождается излучением трех типов –  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .  $\alpha$ -излучение представляет собой поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ ,  $\beta$ -излучение – поток электронов,  $\gamma$ -излучение – электромагнитное излучение с длиной волны менее чем  $10^{-10}$  м.

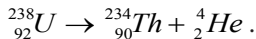
Альфа-распад ядер протекает по схеме



где  $X$  – символ материнского ядра;  $Y$  – символ дочернего ядра.

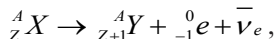
Альфа-распад сопровождается также  $\gamma$ -излучением.

Пример альфа-распада:



При альфа-распаде частицы вылетают с большими скоростями от  $1,4 \cdot 10^7$  до  $2 \cdot 10^7$  м/с ( $4 \div 8,8$  МэВ). Пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе составляет несколько сантиметров, в твердом теле – несколько микрометров. Энергии  $\alpha$ -частиц, испускаемых данным ядром, оказываются строго определенными. Эти энергии связаны с периодом полураспада ядер: чем меньше период полураспада, тем больше энергии вылетающих  $\alpha$ -частиц.

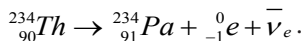
Бета-распад протекает по схеме



где символ  $\bar{\nu}_e$  обозначает антинейтрино, частицу с нулевой массой покоя, спином  $1/2$ , с нулевым электрическим зарядом.

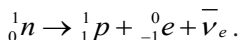
Гипотеза о существовании нейтрино была высказана В. Паули в 1931 году для объяснения законов бета-распада, а в 1956 году эта частица была обнаружена экспериментально.

Пример бета-распада:



Энергетический спектр электронов, вылетающих при бета-распаде, является непрерывным и имеет вид, представленный на рис. 13.

Энергия  $E_{\max}$  соответствует разности между энергиями материнского и дочернего ядер. При  $E < E_{\max}$  нарушается закон сохранения энергии. В. Паули предположил, что недостающая энергия  $E_{\max} - E$  приходится на долю нейтрино. При бета-распаде спины материнского и дочернего ядер одинаковы, а спин электрона равен  $1/2$ . Из закона сохранения спина следует, что спин нейтрино также равен  $1/2$ . Бета-распад происходит так, как будто один из нейтронов в ядре превращается в протон по схеме





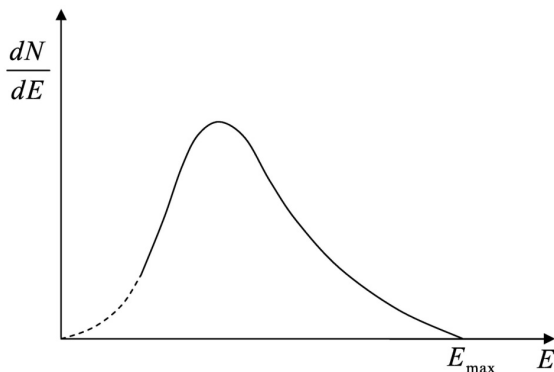
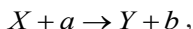


Рис. 13

В 1950 году был обнаружен распад свободных нейтронов по данной схеме. Бета-распад также может сопровождаться  $\gamma$ -излучением. Нейтрино не участвует ни в электромагнитных, ни в сильных взаимодействиях. Вид взаимодействий, в которых участвует нейтрино, получил название слабых взаимодействий. Бета-распад ядер обусловлен слабыми взаимодействиями.

### 3.5. Ядерные реакции

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом. Ядерные реакции происходят за счет действия ядерных сил. Наиболее распространенным типом реакции является реакция вида:



где  $a$  и  $b$  – легкие частицы (фотоны, протоны, нейтроны,  $\alpha$ -частицы и т. д.);  $X$  и  $Y$  – ядра.

Вероятность взаимодействия характеризуется эффективным сечением рассеяния  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx},$$

где  $N$  – число частиц, падающих на мишень за единицу времени на единицу площади поверхности вещества;  $n$  – концентрация ядер в объеме вещества;  $dN$  – число частиц, вступивших в реакцию в слое

$dx$  вещества за единицу времени на единице площади. Эффективное сечение имеет размерность площади. Единица эффективного сечения, используемая для характеристики ядерных реакций, называется барн,  $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$ .

Поток частиц в веществе убывает за счет реакции по закону:

$$dN = -\sigma n N dx, \quad N = N_0 e^{-\sigma n x},$$

где  $N_0$  – падающий поток;  $N$  – поток частиц на расстоянии  $x$  в веществе.

В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения: электрического заряда, массового числа, энергии, импульса и момента импульса.

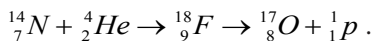
В отличие от радиоактивного распада ядерные реакции могут быть как экзотермическими (с выделением энергии), так и эндотермическими (с поглощением энергии). Энергию ядерной реакции можно определить по разности суммарных масс ядер до и после реакции.

Реакции, вызываемые медленными частицами, как показал Н. Бор в 1936 году, протекают в два этапа, через образование составного ядра  $C$  по схеме:



Время жизни составного ядра составляет величину порядка  $10^{-16} \div 10^{-12}$  с, что значительно превышает характерное ядерное время (время пролета частицы внутри ядра), составляющее порядка  $10^{-22}$  с.

Ядерные реакции, вызываемые быстрыми частицами, протекают без образования составного ядра. Такие реакции называются прямыми ядерными взаимодействиями. Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году:



### 3.6. Деление ядер. Цепная ядерная реакция

В 1938 году О. Ган и Ф. Штрассман показали, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины периодической системы – барий и лантан. О. Фриш и Л. Мейтнер предположили, что ядро урана, захватившее нейтрон, делится на две примерно равные части – осколки деления. Дальнейшие исследования показали,

что деление происходит разными способами, всего образуется около 80 разных осколков. Наиболее вероятное отношение масс осколков — 2:3. Деление сопровождается выделением большой энергии (около 1 Мэв на нуклон). Так как относительное число нейтронов в тяжелых ядрах больше, чем в легких, то деление сопровождается также испусканием нейтронов. В среднем при каждом делении ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  испускается 2,5 нейтрона. Большая часть нейтронов испускается за время порядка  $10^{-14}$  с (мгновенные нейтроны), а часть — через время 0,05÷60 с после деления (запаздывающие нейтроны). Образованные нейтроны имеют широкий энергетический спектр — от 0 до 7 Мэв (в среднем около 2 Мэв на нейтрон). Часть испускаемых вторичных нейтронов вызывает новые акты деления ядер. Коэффициент размножения нейтронов  $k$  называется отношение числа нейтронов в данном поколении к числу нейтронов в предыдущем поколении. Пусть  $\tau$  — среднее время жизни нейтронов одного поколения, т. е. среднее время от рождения нейтрона до захвата его ядром делящегося вещества. За время  $dt$  образуется число нейтронов

$$dN = N(k - 1) \frac{dt}{\tau},$$

где  $N$  — число нейтронов в момент времени  $t$ .

Решая данное дифференциальное уравнение, получим

$$N = N_0 e^{\frac{(k-1)t}{\tau}},$$

где  $N_0$  — число нейтронов в начальный момент времени.

Если коэффициент размножения нейтронов  $k > 1$ , то число нейтронов, и соответственно число актов деления ядер, нарастает лавинообразно, что приводит к цепной ядерной реакции. Если  $k < 1$ , то число нейтронов убывает со временем, и цепная реакция не возникает. Коэффициент размножения зависит от природы делящегося вещества, от его количества, от размеров и формы активной зоны, где протекает реакция. С увеличением массы делящегося вещества коэффициент размножения возрастает, так как число рождающихся нейтронов пропорционально массе, и следовательно объему вещества, а число нейтронов, вылетающих из активной зоны, пропорционально площади поверхности вещества, но с увеличением размеров  $R$  объем  $V$  растет быстрее, чем площадь поверх-

ности  $S$  ( $V \sim R^3$ ,  $S \sim R^2$ ). Минимальная масса делящегося вещества, при которой происходит цепная реакция деления, называется критической массой. Для чистого урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  критическая масса составляет порядка 9 кг. Для уменьшения потерь нейтронов делящееся вещество окружают отражателем нейтронов. Основные вещества, используемые для получения цепных реакций деления, — изотопы урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и плутония  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ . В естественном уране делящийся изотоп  ${}^{235}_{92}\text{U}$  составляет всего 1/140 часть, большую часть составляет не делящийся изотоп  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . В качестве отражателей нейтронов используют тяжелую воду  $D_2O$ , графит.

Цепная реакция деления может быть как неуправляемой (например, в атомной бомбе), так и управляемой (например, в атомном реакторе). Для управления реакцией используются стержни, содержащие кадмий или бор, которые интенсивно поглощают нейтроны.

### 3.7. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия

Под элементарными частицами понимают такие микрочастицы, внутреннюю структуру которых нельзя представить как объединение других частиц. Во всех явлениях каждая такая частица ведет себя как единое целое. Элементарные частицы могут превращаться друг в друга. У всех элементарных частиц существуют античастицы, обладающие такими же свойствами, как и частицы, но имеющие при этом противоположный электрический заряд. При столкновении частицы и античастицы происходит их аннигиляция — частицы превращаются в  $\gamma$ -излучение или частицы других типов. Процесс, обратный аннигиляции, представляет собой образование пар частица-античастица. Существование античастиц было предсказано теоретически П. Дираком в 1930 году, а в 1932 году К. Андерсон обнаружил экспериментально античастицу электрона, названную позитроном.

Элементарные частицы принято классифицировать по их отношению к фундаментальным взаимодействиям. В настоящее время различают четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Сильное взаимодействие проявляется в ядерных силах, обеспечивающих существование атомных ядер. В электромагнитном взаимодействии участвуют

электрически заряженные частицы и фотоны. Одно из его проявлений — кулоновские силы, обуславливающие существование атомов. Слабое взаимодействие присуще всем частицам, кроме фотонов. Наиболее известное его проявление — бета-превращения атомных ядер. Гравитационное взаимодействие свойственно всем телам Вселенной, проявляясь в виде сил всемирного тяготения. Гравитационное взаимодействие предельно слабое и в мире элементарных частиц при обычных энергиях непосредственной роли не играет. Фундаментальные взаимодействия различаются интенсивностями и радиусами действия (табл. 1).

Таблица 1

Взаимодействие	Интенсивность	Радиус действия, м
Сильное	1	$10^{-16}$
Электромагнитное	$10^{-3}$	$\infty$
Слабое	$10^{-14}$	$10^{-18}$
Гравитационное	$10^{-40}$	$\infty$

Элементарные частицы объединяются в три группы: фотоны, лептоны и адроны.

Группа фотонов состоит из одной частицы — фотона — кванта электромагнитного взаимодействия.

Группа лептонов состоит из электрона, мюона, электронного и мюонного нейтрино, тяжелого лептона —  $\tau$ -лептона (таона), таонного нейтрино, а также соответствующих им античастиц. Они участвуют только в электромагнитном и слабом взаимодействиях.

К группе адронов относятся мезоны и барионы. При распаде бариона наряду с другими частицами всегда образуется новый барион — закон сохранения барионного заряда. Адроны участвуют в сильных взаимодействиях, а также в электромагнитных и слабых. Адроны состоят из кварков. Каждый мезон строится из одного кварка и одного антикварка, каждый барион — из трех кварков.

Число лептонов равно числу типов кварков — принцип кварк-лептонной симметрии. Имеются кварки шести типов, которые подобно лептонам образуют три дублета ( $u, d$ ), ( $c, s$ ), ( $t, b$ ):  $u$  (up) — верхний,  $d$  (down) — нижний,  $c$  (charm) — очарованный,  $s$  (strange) — странный,  $t$  (true) — истинный,  $b$  (beauty) — прелестный.

### 3.8. Примеры решения задач

1. Масса радиоактивного изотопа натрия  ${}_{11}^{25}\text{Na}$  равна  $0,248 \cdot 10^{-6}$  кг. Период полураспада  $T = 62$  с. Чему равны начальная активность препарата и его активность через 10 мин?

Дано: $m = 0,248 \cdot 10^{-6}$ кг $T = 62$ с $t = 10$ мин	СИ:  600 с	Решение:
$a_0 - ?$ $a - ?$		

Активность препарата

$$a = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Начальную активность определяем, полагая  $t = 0$ :

$$a_0 = \lambda N_0. \quad (2)$$

Постоянная радиоактивного распада

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}. \quad (3)$$

Количество препарата в начальный момент

$$N_0 = \frac{m_0}{M} N_A, \quad (4)$$

где  $N_A$  – число Авогадро.

Подставив выражения (3) и (4) в (2), получаем:

$$a_0 = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m_0}{M} N_A.$$

Активность препарата изменяется со временем по закону:

$$a = a_0 e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

Так как  $e^{\ln 2} = 2$ , то

$$a = a_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} = \frac{a_0}{2^{\frac{t}{T}}};$$

$$a = \frac{a_0}{2^{\frac{t}{T}}}. \quad (6)$$

Проверка размерности

$$[a_0] = \frac{\ln 2}{[T]} \cdot \frac{[m_0]}{[M]} [N_A] = \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}}{\text{с} \cdot \text{кг/моль}} = \frac{1}{\text{с}} = \text{Бк};$$

$$[a] = \frac{[a_0]}{2^{[T]}} = \frac{\text{Бк}}{2^c} = \text{Бк}.$$

Численный расчет:

$$a_0 = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m_0}{M} N_A = \frac{0,693}{62} \cdot \frac{0,248 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 6,67 \cdot 10^{16} \text{ Бк};$$

$$a = \frac{a_0}{2^T} = \frac{6,67 \cdot 10^{16}}{2^{600}} = \frac{6,67 \cdot 10^{16}}{2^{62}} = \frac{6,67 \cdot 10^{16}}{2^{9,68}} \approx 8,13 \cdot 10^{13} \text{ Бк}.$$

**Ответ:**  $a_0 = 6,67 \cdot 10^{16}$  Бк,  $a = 8,13 \cdot 10^{13}$  Бк.

2. Какая энергия выделится при образовании 1 г  ${}^4_2\text{He}$  из протонов и нейтронов?

Дано: $m = 1 \text{ г}$ $E - ?$	СИ: 0,001 кг	Решение:
---------------------------------------	-----------------	----------

Ядро атома гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов.

Масса атома гелия  $m_{\text{He}} = 4,00337 \text{ а.е.м} = 6,646 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Масса покоя нейтрона  $m_n = 1,00897 \text{ а.е.м} = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Масса покоя протона  $m_p = 1,00758 \text{ а.е.м} = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

При образовании атома гелия дефект массы

$$\Delta m = 2(m_p + m_n) - m_{\text{He}}. \quad (1)$$

Энергия, выделяющаяся при образовании одного атома гелия:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \quad (2)$$

Подставив (1) в (2), получим:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (2(m_p + m_n) - m_{\text{He}}) \cdot c^2;$$

$$\Delta E = (2(m_p + m_n) - m_{\text{He}}) \cdot c^2. \quad (3)$$

В 1 г гелия содержится атомов:

$$N = \frac{m}{M} N_A. \quad (4)$$

Следовательно, при образовании 1 г гелия выделится энергия

$$E = \Delta E N. \quad (5)$$

Подставим (3) и (4) в (5):

$$E = \Delta E N = (2(m_p + m_n) - m_{\text{He}}) \cdot c^2 \cdot \frac{m}{M} N_A;$$

$$E = (2(m_p + m_n) - m_{\text{He}}) \cdot c^2 \cdot \frac{m}{M} N_A \quad (6)$$

Проверка размерности

$$\begin{aligned} [E] &= (2([m_p] + [m_n]) - [m_{\text{He}}]) \cdot [c^2] \cdot \frac{[m]}{[M]} [N_A] = \\ &= (\text{кг} + \text{кг} - \text{кг}) \cdot (\text{м/с})^2 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{кг/моль}} \cdot \text{моль}^{-1} = \\ &= (\text{кг} + \text{кг} - \text{кг}) \cdot (\text{м/с})^2 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{кг/моль}} \cdot \text{моль}^{-1} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = \text{Дж}. \end{aligned}$$

Численный расчет:

$$\begin{aligned} E &= (2(m_p + m_n) - m_{\text{He}}) \cdot c^2 \cdot \frac{m}{M} N_A = \\ &= (2(1,672 \cdot 10^{-27} + 1,674 \cdot 10^{-27}) - 6,646 \cdot 10^{-27}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot \frac{0,001}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = \\ &= 4,6 \cdot 10^{-29} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 1,505 \cdot 10^{23} = 6,23 \cdot 10^{11} \text{ Дж} = 62,3 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 3,89 \cdot 10^{30} \text{ эВ} = \\ &= 3,89 \cdot 10^{24} \text{ МэВ} = 38,9 \cdot 10^{23} \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

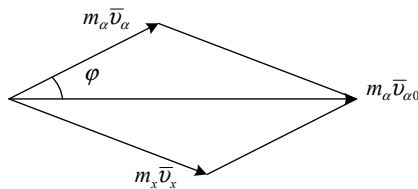
**Ответ:**  $E = 62,3 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 38,9 \cdot 10^{23} \text{ МэВ}$ .

3. При пролете  $\alpha$ -частицы в парах воды со скоростью  $v_{\alpha 0}$  наблюдалось упругое соударение  $\alpha$ -частицы с ядром неизвестного элемента. Определите, с ядром какого элемента произошло столкновение, если после соударения направление движения  $\alpha$ -частицы изменилось на угол  $\varphi = 30^\circ$ . Ядро отдачи вылетело также под углом  $30^\circ$ .

Дано:  
 $\varphi = 30^\circ$   
 $m - ?$

СИ:

Решение:



По закону сохранения импульса

$$m_\alpha \bar{v}_{\alpha 0} = m_\alpha \bar{v}_\alpha + m_x \bar{v}_x \quad (1)$$

или в проекции на оси OX и OY

$$m_\alpha v_{\alpha 0} = m_\alpha v_\alpha \cos \varphi + m_x v_x \cos \varphi; \quad (2)$$



$$m_{\alpha}v_{\alpha} \sin \varphi - m_x v_x \sin \varphi = 0, \quad (3)$$

где  $m_{\alpha}$  – масса  $\alpha$ -частицы;  $v_{\alpha 0}$  – скорость  $\alpha$ -частицы до соударения;  $v_{\alpha}$  – скорость  $\alpha$ -частицы после соударения;  $m_x$  – масса ядра неизвестного элемента;  $v_x$  – скорость ядра неизвестного элемента после соударения его с  $\alpha$ -частицей;  $\varphi$  – угол между первоначальным и новым направлениями движения  $\alpha$ -частицы.

По закону сохранения энергии

$$m_{\alpha}v_{\alpha 0}^2 = m_{\alpha}v_{\alpha}^2 + m_x v_x^2. \quad (4)$$

Из соотношения (3) получаем:

$$m_x v_x = m_{\alpha} v_{\alpha}. \quad (5)$$

Подставляя это значение в (2), получаем:

$$m_{\alpha}v_{\alpha 0} = 2m_{\alpha}v_{\alpha} \cos \varphi,$$

откуда

$$v_{\alpha} = \frac{v_{\alpha 0}}{2 \cos \varphi}. \quad (6)$$

Запишем выражения (4) и (5) в виде

$$m_x v_x^2 = m_{\alpha} v_{\alpha 0}^2 - m_{\alpha} \frac{v_{\alpha 0}^2}{4 \cos^2 \varphi}; \quad (7)$$

$$m_x^2 v_x^2 = \frac{m_x^2 v_{\alpha 0}^2}{4 \cos^2 \varphi}. \quad (8)$$

Разделив (8) на (7), получим:

$$m_x = \frac{m_{\alpha}}{4 \cos^2 \varphi - 1}.$$

Так как  $\varphi = 30^{\circ}$ , то

$$m_x = \frac{m_{\alpha}}{2}. \quad (9)$$

Масса  $\alpha$ -частицы  $m_{\alpha} = 4,00337$  а.е.м =  $6,646 \cdot 10^{-27}$  кг.

Проверка размерности

$$[m_x] = \frac{[m_{\alpha}]}{2} = \text{кг}.$$

Численный расчет:

$$m_x = \frac{m_{\alpha}}{2} = \frac{6,646 \cdot 10^{-27}}{2} = 3,323 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Сравнивая значения с табличными значениями масс элементов, находим, что столкновение произошло с дейтерием.

**Ответ:**  $m_x = 3,323 \cdot 10^{-27}$  кг.

### 3.9. Задачи для самостоятельного решения

196. Период полураспада  $T_{1/2}$  радиоактивного нуклида равен 3 ч. Определите среднюю продолжительность  $\tau$  жизни этого нуклида.

197. За время  $t = 12$  сут распалось  $\alpha = 0,6$  начального количества ядер радиоактивного изотопа. Определите период полураспада  $T_{1/2}$ .

198. Сколько ядер  $N$  распадается за время  $t = 1$  с из  $10^{12}$  ядер изотопа йода  $^{137}\text{I}$ ? Период полураспада изотопа  $T_{1/2} = 8$  сут.

199. Найдите массу радона  $^{222}\text{Rn}$ , активность которого  $A = 3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Период полураспада изотопа  $T_{1/2} = 3,8$  сут.

200. За  $t_1 = 1$  год начальное количество радиоактивного изотопа уменьшилось в  $n_1 = 5$  раз. Во сколько раз оно уменьшится за  $t_1 = 3$  года?

201. За какое время  $t$  распадается 25 % ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада  $T_{1/2} = 36$  ч?

202. Радиоактивный натрий  $^{23}\text{Na}$  распадается, испуская электроны. Период полураспада натрия  $T_{1/2} = 14,8$  ч. Вычислите количество  $\Delta N$  атомов, распавшихся в  $m = 1$  г данного радиоактивного препарата за  $t = 10$  ч.

203. При распаде  $N_0 = 2,93 \cdot 10^{23}$  ядер радиоактивного полония  $^{210}\text{Po}$  в течение времени  $t = 1$  ч образовался гелий  $^4\text{He}$ , который при нормальных условиях занял объем  $V = 85,4$  см<sup>3</sup>. Определите период полураспада  $T_{1/2}$  полония.

204. В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего  $^{24}\text{Na}$ , имеющего активность  $A_0 = 2300$  Бк. Активность 1 см<sup>3</sup> крови, взятой через  $t = 5$  ч после этого, оказалась  $A_1 = 0,32$  Бк. Найдите объем крови человека. Период полураспада  $^{24}\text{Na}$  15 ч.

205. Активность препарата  $^{32}\text{P}$  равна 2 мКи. Сколько весит такой препарат?

206. Во сколько раз число распадов ядер радиоактивного йода  $^{131}\text{I}$  в течение первых суток больше числа распадов в течение вторых суток? Период полураспада изотопа  $^{131}\text{I}$  равен 193 ч.

207. Определите энергию  $W$ , выделяемую 10 мг препарата  $^{210}\text{Po}$  за время, равное среднему времени жизни, если при одном акте распада выделяется энергия  $E = 5,4 \text{ МэВ}$ .

208. Определите верхнюю границу возраста Земли, считая, что весь имеющийся на Земле  $^{40}\text{Ar}$  образовался из  $^{40}\text{K}$  в результате захвата. В настоящее время на каждые 300 атомов  $^{40}\text{Ar}$  приходится один атом  $^{40}\text{K}$ .

209. В результате  $\alpha$ -распада радий  $^{226}\text{Ra}$  превращается в радон  $^{222}\text{Rn}$ . Какой объем радона при нормальных условиях будет находиться в равновесии с 1 г радия? Период полураспада  $^{226}\text{Ra}$   $T_{1/2}(\text{Ra}) = 1600$  лет,  $^{222}\text{Rn} - T_{1/2}(\text{Rn}) = 3,82$  дня.

210. Единицей радиоактивности изотопа в системе СГС является кюри (Ки) – это активность препарата, численно равная активности 1 г радия, т. е. тому числу распадов, которое происходит в 1 г радия за 1 с. Найдите это число, зная, что период полураспада радия  $T = 1620$  лет.

211. Найдите массу и объем радона при нормальных условиях, если радиоактивность его равна 1 Ки.

212. Фотон  $\gamma$ -излучения взаимодействует с ядром атома бериллия и вызывает ядерную реакцию  $^9\text{Be} + \gamma \rightarrow 2\alpha + n$ . Чему равна длина волны фотона?

213. Какая доля атомов радиоактивного изотопа  $^{234}\text{Th}$ , имеющего период полураспада  $T = 24,1$  дня, распадается за 1 минуту; сутки; месяц?

214. Крупинка минерала, содержащего радий, находится на расстоянии 1,2 см от флуоресцирующего экрана. Какое количество радия имеется в крупинке, если в течение 1 мин на площади экрана, равной  $0,03 \text{ см}^2$ , видно 56 сцинтилляций? Продукты распада радия быстро отсасываются насосом. Принять, что все выбрасываемые при распаде атомов радия  $\alpha$ -частицы вылетают из крупинки.

215. В человеческом организме 0,36 % массы приходится на калий. Радиоактивный изотоп калия  $^{40}\text{K}$  составляет 0,012 % от общей

массы калия. Какова активность  $^{40}\text{K}$ , если масса человека 80 кг? Период полураспада  $T = 1,42 \cdot 10^8$  лет.

216. Так как свинец, содержащийся в урановой руде, является конечным продуктом распада семейства урана, то из отношения количества урана в руде к количеству свинца в ней можно установить возраст руды. Определите возраст урановой руды, если на каждый килограмм урана  $^{238}\text{U}$  в руде приходится 320 г свинца  $^{206}\text{Pb}$ .

217. Найдите дефект  $\Delta m$  массы и энергию связи  $E_{\text{св}}$  ядра атома дейтерия  $^2\text{H}$ .

218. Определите удельную энергию  $E_{\text{уд}}$  связи ядра  $^{12}\text{C}$  ( $m_{\text{A}} = 12$  а. е. м.).

219. Какую наименьшую энергию  $E$  нужно затратить, чтобы разделить на отдельные нуклоны ядра  $^7\text{Li}$  ( $m_{\text{A}} = 7,01601$  а. е. м.) и  $^7\text{Be}$  ( $m_{\text{A}} = 7,01693$  а. е. м.)?

220. Определите энергию  $E$ , которая выделяется при образовании из протонов и нейтронов ядер гелия  $^4\text{He}$  массой  $m = 10^{-3}$  г.

221. Какую наименьшую энергию  $E$  нужно затратить, чтобы разделить ядро  $^4\text{He}$  на два дейтрона?

222. При соударении фотона с дейтроном дейтрон может расщепиться на два нуклона. Напишите уравнение ядерной реакции и определите минимальную энергию фотона  $E$ , способного вызвать такое расщепление.

223. Найдите энергию  $E$  ядерной реакции  $^{14}\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^1_1\text{H}$ , если для ядра  $^{14}\text{N}$  энергия связи  $E_{\text{св}1} = 104,66$  МэВ, а ядра  $^{14}\text{C}$   $E_{\text{св}2} = 105,29$  МэВ.

224. Определите кинетическую энергию  $E$  и скорость  $V$  теплового нейтрона при температуре окружающей среды  $t = 5^\circ\text{C}$ .

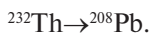
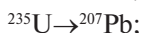
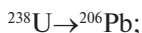
225. Ядро урана  $^{235}\text{U}$ , захватив один нейтрон, разделилось на два осколка, причем освободились два нейтрона. Одним из осколков оказалось ядро  $^{140}\text{Xe}$ . Определите порядковый номер  $Z_2$  и массовое число  $A_2$  второго осколка.

226. При делении одного ядра урана-235 выделяется энергия  $\varepsilon = 200$  МэВ. Какую долю  $\eta$  энергии покоя  $E_0$  ядра урана-235 составляет выделившаяся энергия?

227. Определите энергию  $E$ , которая освободится при делении всех ядер, содержащихся в уране-235 массой  $m = 10^{-3}$  г. Энергия, выделяющаяся при распаде одного ядра урана-235, равна 200 МэВ.

228. Найдите электрическую мощность  $P$  атомной электростанции, расходующей  $m = 0,15$  кг урана-235 в сутки, если КПД станции  $\eta = 18\%$ , а энергия  $\varepsilon$ , выделяющаяся при распаде одного ядра урана-235, равна 200 МэВ.

229. Заданы исходные и конечные элементы трех радиоактивных семейств:



Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений произошло в каждом семействе?

230. Определите энергию связи нуклонов в ядре дейтерия и у  $\alpha$ -частицы.

231. Найдите энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре атома кислорода  ${}^{17}\text{O}$ .

232. Неподвижное ядро атома азота  ${}^{14}\text{N}$  бомбардируется  $\alpha$ -частицами, кинетическая энергия которых  $E_\alpha = 7,9$  МэВ. После реакции появляется протон с кинетической энергией  $E_p = 8,6$  МэВ. Вектор скорости протона составляет угол  $\varphi$  с вектором скорости  $\alpha$ -частицы. Напишите ядерную реакцию и определите угол  $\varphi$ .

233. Протон, обладающий энергией  $E_p = 2,5$  МэВ, попадает в неподвижное ядро лития, при этом происходит ядерная реакция, продуктами которой являются две  $\alpha$ -частицы, движущиеся со скоростями  $V = 2,2 \cdot 10^7$  м/с в направлениях, составляющих одинаковые углы  $\varphi$  с направлением движения протона. Определите угол  $\varphi$ .

234. На атомной электростанции за год расходуется 18,7 кг урана  ${}^{235}\text{U}$ . Полагая, что при каждом акте деления ядра освобождается энергия 200 МэВ и коэффициент полезного действия при выработ-

ке электроэнергии равен 28 %, найдите электрическую мощность атомной электростанции.

235. Сравните энергии, выделяющиеся при термоядерном синтезе  ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$  и делении ядра урана  ${}^{235}\text{U}$  (каждый акт деления сопровождается выделением 200 МэВ энергии), если в обоих случаях расходуются одинаковые массы ядерного горючего.

236. Эмпирическая зависимость радиуса ядра  $R$  от числа нуклонов  $A$  ( $A > 10$ )  $R \approx r_0 A^{1/3}$ . Параметр  $r_0 \approx 1,23 \cdot 10^{-13}$  см = 1,23 Фм приблизительно одинаков для всех ядер. Оцените радиусы атомных ядер  ${}^{28}\text{Al}$ ,  ${}^{93}\text{Nb}$ ,  ${}^{244}\text{Pu}$ .

237. Оцените плотность ядерной материи.

238. Массы нейтрона и протона в энергетических единицах равны соответственно  $m_n = 939,6$  МэВ и  $m_p = 938,3$  МэВ. Определите массу ядра  ${}^2\text{H}$  в энергетических единицах, если энергия связи дейтрона  $E_{\text{св}}(2,1) = 2,2$  МэВ.

239. Масса нейтрального атома  ${}^{16}\text{O}$   $m_{\text{ат}}(A,Z) = 15,9949$  а. е. м. Найдите удельную энергию связи ядра  ${}^{16}\text{O}$ .

240. Массы нейтральных атомов в а. е. м.:  ${}^{16}\text{O} - 15,9949$ ,  ${}^{15}\text{O} - 15,0030$ ,  ${}^{15}\text{N} - 15,0001$ . Чему равны энергии отделения нейтрона и протона в ядре  ${}^{16}\text{O}$ ?

241. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые энергии  $E = 0,9$  МэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определите длину волны, соответствующую фотону.

242. Фотон с энергией 3,3 МэВ в поле тяжелого ядра превратился в пару электрон – позитрон. Определите кинетические энергии этих частиц, если скорости их движения одинаковы.

243. Счетчик Гейгера зарегистрировал в 1 мин 4000  $\beta$ -частиц, возникших при распаде ядер радиоактивного изотопа  ${}^{24}\text{Na}$ , а через сутки только 1000 распадов в 1 мин. Вычислите период полураспада изотопа.

244. Из ядра радиоактивного изотопа платины  ${}^{180}\text{Pt}$  при распаде вылетает  $\alpha$ -частица, обладающая энергией 4,23 МэВ. Напишите

уравнение реакции распада. Определите скорость отдачи ядра – продукта распада.

245. При прохождении через слой свинца толщиной 5 см интенсивность моноэнергетического  $\gamma$ -излучения уменьшилась в 12 раз. Определите толщину слоя половинного поглощения.

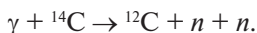
246. Серпуховский синхрофазотрон ускоряет протоны до энергии 70 ГэВ. На сколько процентов скорость протонов отличается от скорости света в вакууме? Чему равна длина волны де Бройля для ускоренных протонов?

247. Перечислите несколько ядерных реакций, в которых может образоваться изотоп  $^{10}\text{B}$ .

248. Какую минимальную кинетическую энергию в лабораторной системе  $T_{\min}$  должен иметь нейтрон, чтобы стала возможной реакция  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$ ?

249. Является ли реакция  $^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$  эндотермической или экзотермической? Даны удельные энергии связи ядер в МэВ:  $\varepsilon(d) = 1,11$ ;  $\varepsilon(\alpha) = 7,08$ ;  $\varepsilon(^6\text{Li}) = 5,33$ .

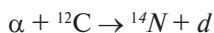
250. Определите пороги  $T_{\text{пор}}$  реакций фоторасщепления  $^{12}\text{C}$ .



251. Определите пороги реакций:  $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$  и  $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ .

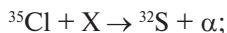
252. Определите, какую минимальную энергию должен иметь протон, чтобы стала возможной реакция  $p + d \rightarrow p + p + n$ .

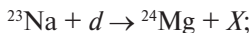
253. Возможны ли реакции:



под действием  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T = 10$  МэВ?

254. Идентифицируйте частицу  $X$  и рассчитайте энергии реакции  $Q$  в следующих случаях:

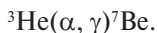
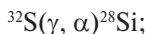
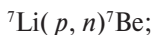
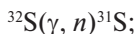
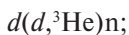
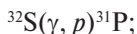
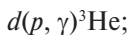




255. Какую минимальную энергию  $T_{\min}$  должен иметь дейтрон, чтобы в результате неупругого рассеяния на ядре  $^{10}\text{B}$  возбудить состояние с энергией  $E_{\text{возб}} = 1,75 \text{ МэВ}$ ?

256. Вычислите порог реакции:  $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + p$  в двух случаях, если налетающей частицей является: 1)  $\alpha$ -частица; 2) ядро  $^{14}\text{N}$ . Энергия реакции  $Q = 1,18 \text{ МэВ}$ . Объясните результат.

257. Рассчитайте энергии и пороги следующих реакций:



258. Какие ядра могут образовываться в результате реакций под действием: 1) протонов с энергией 12 МэВ на мишени из  $^7\text{Li}$ ; 2) ядер  $^7\text{Li}$  с энергией 12 МэВ на водородной мишени?

259. Ядро  $^7\text{Li}$  захватывает медленный нейтрон и испускает  $\gamma$ -квант. Чему равна энергия  $\gamma$ -кванта?

260. Определите в лабораторной системе кинетическую энергию ядра  $^9\text{Be}$ , образующегося при пороговом значении энергии нейтрона в реакции  $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ .

261. При облучении мишени из натурального бора наблюдалось появление радиоактивных изотопов с периодами полураспада 20,4 мин и 0,024 с. Какие образовались изотопы? Какие реакции привели к образованию этих изотопов?

262. Мишень из натурального бора бомбардируется протонами. После окончания облучения детектор  $\beta$ -частиц зарегистрировал активность 100 Бк. Через 40 мин активность образца снизилась до  $\sim 25$  Бк. Каков источник активности? Какая ядерная реакция происходит?



263.  $\alpha$ -частица с кинетической энергией  $T = 10$  МэВ испытывает упругое лобовое столкновение с ядром  $^{12}\text{C}$ . Определите кинетическую энергию в л. с. ядра  $^{12}\text{C}$  после столкновения.

264. Определите максимальную и минимальную энергии ядер  $^7\text{Be}$ , образующихся в реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$  ( $Q = -1,65$  МэВ) под действием ускоренных протонов с энергией  $T_p = 5$  МэВ.

265.  $\alpha$ -частицы, вылетающие под углом  $\theta_{\text{неупр}} = 30^\circ$  в результате реакции неупругого рассеяния с возбуждением состояния ядра  $^{12}\text{C}$  с энергией  $E_{\text{возб}} = 4,44$  МэВ, имеют такую же энергию в л. с., что и упруго рассеянные на том же ядре  $\alpha$ -частицы под углом  $\theta_{\text{упр}} = 45^\circ$ . Определите энергию  $\alpha$ -частиц, падающих на мишень.

266.  $\alpha$ -частицы с энергией  $T = 5$  МэВ взаимодействуют с неподвижным ядром  $^7\text{Li}$ . Определите величины импульсов в с.ц.и., образующихся в результате реакции  $^7\text{Li}(\alpha, n)^{10}\text{B}$  нейтрона  $n$  и ядра  $^{10}\text{B}$ .

267. С помощью реакции  $^{32}\text{S}(\alpha, p)^{35}\text{Cl}$  исследуются низколежащие возбужденные состояния  $^{35}\text{Cl}$  (1,219; 1,763; 2,646; 2,694; 3,003; 3,163 МэВ). Какие из этих состояний будут возбуждаться на пучке  $\alpha$ -частиц с энергией 5,1 МэВ? Определите энергии протонов, наблюдаемых в этой реакции под углами  $0$  и  $90^\circ$  при  $E = 5,1$  МэВ.

268. Используя импульсную диаграмму, получите связь между углами в л.с. и с.ц.и.

269. Протон с кинетической энергией  $T_p = 5$  МэВ налетает на ядро  $^2\text{H}$  и упруго рассеивается на нем. Определите энергию  $T_d$  и угол рассеяния  $\theta_d$  ядра отдачи  $^2\text{H}$ , если угол рассеяния протона  $\theta_p = 30^\circ$ .

270. Для получения нейтронов широко используется реакция  $t(d, n)\alpha$ . Определите энергию нейтронов  $T_n$ , вылетающих под углом  $90^\circ$  в нейтронном генераторе, использующем дейтроны, ускоренные до энергии  $T_d = 0,2$  МэВ.

271. Для получения нейтронов используется реакция  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ . Энергия протонов  $T_p = 5$  МэВ. Для эксперимента необходимы нейтроны с энергией  $T_n = 1,75$  МэВ. Под каким углом  $\theta_n$  относительно направления протонного пучка будут вылетать нейтроны с такой энергией? Какой будет разброс энергий нейтронов  $\Delta T$ , если их вы-

делять с помощью коллиматора размером 1 см, расположенного на расстоянии 15 см от мишени?

272.  $\pi^0$ -мезон, кинетическая энергия которого равна энергии покоя, распадается на два  $\gamma$ -кванта, энергии которых равны. Каков угол между направлениями движения  $\gamma$ -квантов?

273. Определите величину суммарной кинетической энергии  $\pi$ -мезонов, образующихся при распаде покоящегося  $K^+$ -мезона:  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ . Массы покоя частиц в энергетических единицах:

$$m_{K^+} = 493,646 \text{ МэВ}, m_{\pi^\pm} = 139,658 \text{ МэВ}.$$

274. Определите частицы  $X$ , образующиеся в реакциях сильного взаимодействия:



## Список рекомендуемой литературы

1. Сивухин, Д.В. Общий курс физики : учеб. пособие : в 5 т. Т. 5. Атомная и ядерная физика / Д.В. Сивухин. — 3-е изд., стер. — М. : Физматлит, 2006. — 782 с.
2. Иродов, И.Е. Квантовая физика: основные законы : учеб. пособие для вузов / И.Е. Иродов. — М. : Физматлит : Лаборатория Базовых знаний, 2002. — 271 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов : в 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. — М. : Астрель : АСТ, 2005. — 368 с.
4. Матвеев, А.Н. Атомная физика : учеб. пособие для вузов / А.Н. Матвеев. — 2-е изд. — М. : ОНИКС : Мир и Образование, 2007. — 431 с.
5. Трофимова, Т.И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. — 14-е изд., стер. — М. : Академия, 2007. — 558 с.
6. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике : учеб. пособие для вузов / И.Е. Иродов. — 3-е изд., испр. — СПб. : Лань, 2001. — 416 с.
7. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова, З.Г. Павлова. — 4-е изд., стер. — М. : Высш. шк., 2003. — 591 с.
8. Чертов, А.Г. Задачник по физике : учеб. пособие для вузов / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. — 6-е изд., испр. — М. : Интеграл-Пресс, 1997. — 544 с.

*Десятичные приставки*

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
гига	Г	$10^9$	санти	с	$10^{-2}$
мега	М	$10^6$	милли	м	$10^{-3}$
кило	к	$10^3$	микро	мк	$10^{-6}$
гекто	г	$10^2$	нано	н	$10^{-9}$
деци	д	$10^{-1}$	пико	п	$10^{-12}$
			фемто	ф	$10^{-15}$

*Константы*

Число $\pi$	$\pi = 3,14$
Ускорение свободного падения на Земле	$g = 10 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Коэффициент пропорциональности в законе Кулона	$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
Элементарный заряд (модуль заряда электрона)	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Планка	$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса Земли	$6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Масса Солнца	$2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Радиус Земли	$R = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$
Астрономическая единица	$1 \text{ а. е.} \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Примерное число секунд в году	$3 \cdot 10^7 \text{ с}$

### *Соотношение между различными единицами*

Температура	0 К = -273,15 °С
Атомная единица массы	1 а. е. м. = 1,66·10 <sup>-27</sup> кг
1 атомная единица массы эквивалентна	931,5 МэВ
1 электронвольт	1 эВ = 1,6·10 <sup>-19</sup> Дж

### *Масса частиц*

Электрон	9,1·10 <sup>-31</sup> кг ≈ 5,5·10 <sup>-4</sup> а. е. м.
Протон	1,673·10 <sup>-27</sup> кг ≈ 1,0073 а. е. м.
Нейтрон	1,675·10 <sup>-27</sup> кг ≈ 1,0087 а. е. м.

### *Массы лёгких нуклидов*

Z	Нуклид	Избыток массы нуклида M-A, а. е. м.	Z	Нуклид	Избыток массы нуклида M-A, а. е. м.
0	n	0,00867	6	<sup>11</sup> C	0,01143
1	<sup>1</sup> H	0,00783		<sup>12</sup> C	0
	<sup>2</sup> H	0,01410		<sup>13</sup> C	0,00335
	<sup>3</sup> H	0,01605	7	<sup>13</sup> N	0,00574
2	<sup>3</sup> He	0,01603		<sup>14</sup> N	0,00307
	<sup>4</sup> He	0,00260		<sup>15</sup> N	0,00011
3	<sup>6</sup> Li	0,01513	8	<sup>15</sup> O	0,00307
	<sup>7</sup> Li	0,01601		<sup>16</sup> O	-0,00509
4	<sup>7</sup> Be	0,01693		<sup>17</sup> O	-0,00087
	<sup>8</sup> Be	0,00531	9	<sup>19</sup> F	-0,00160
	<sup>9</sup> Be	0,01219	10	<sup>20</sup> Ne	-0,00756
	<sup>10</sup> Be	0,01354	11	<sup>23</sup> Na	-0,01023
5	<sup>10</sup> B	0,01294		<sup>24</sup> Na	-0,00903
	<sup>11</sup> B	0,00930	12	<sup>24</sup> Mg	-0,01496

*Примечание.* Здесь M – масса нуклида в а. е. м., A – массовое число.

# ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Группы	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ																														
	I	II	III	IV	V	VI	VII	б	VIII	б	б	б	б	б	б	б	б	б													
1	<b>Li</b> 3 6.941 ЛИТИЙ	<b>Be</b> 4 9.012 БЕРИЛЛИЙ	<b>B</b> 5 10.811 БОР	<b>C</b> 6 12.011 УГЛЕРОД	<b>N</b> 7 14.007 АЗОТ	<b>O</b> 8 15.999 КИСЛОРОД	<b>F</b> 9 18.998 ФТОР	<b>Ne</b> 10 20.180 НЕОН	<b>He</b> 2 4.003 ГЕЛИЙ	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> <p>Атомная масса</p> <p style="text-align: center;"><b>U</b></p> <p>Атомный номер</p> <p style="text-align: center;">92</p> <p>238.02891</p> <p>5<sup>+</sup>Fe<sup>2+</sup>3<sup>+</sup></p> <p>178L</p> </div>																					
2	<b>Li</b> 3 6.941 ЛИТИЙ	<b>Be</b> 4 9.012 БЕРИЛЛИЙ	<b>B</b> 5 10.811 БОР	<b>C</b> 6 12.011 УГЛЕРОД	<b>N</b> 7 14.007 АЗОТ	<b>O</b> 8 15.999 КИСЛОРОД	<b>F</b> 9 18.998 ФТОР	<b>Ne</b> 10 20.180 НЕОН	<b>He</b> 2 4.003 ГЕЛИЙ	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> <p>Распределение электронов по оболочкам и близлежащим подоболочкам</p> </div>																					
3	<b>Na</b> 11 22.990 НАТРИЙ	<b>Mg</b> 12 24.305 МАГНИЙ	<b>Al</b> 13 26.982 АЛЮМИНИЙ	<b>Si</b> 14 28.086 КРЕМНИЙ	<b>P</b> 15 30.974 ФОСФОР	<b>S</b> 16 32.065 СЕРА	<b>Cl</b> 17 35.453 ХЛОР	<b>Ar</b> 18 39.948 АРГОН	<b>He</b> 2 4.003 ГЕЛИЙ																						
4	<b>K</b> 19 39.098 КАЛИЙ	<b>Ca</b> 20 40.078 КАЛЬЦИЙ	<b>Sc</b> 21 44.956 СКАНДИЙ	<b>Ti</b> 22 47.887 ТИТАН	<b>V</b> 23 50.942 ВАНАДИЙ	<b>Cr</b> 24 51.996 ХРОМ	<b>Mn</b> 25 54.938 МАРГАНЦ	<b>Fe</b> 26 55.845 ЖЕЛЕЗО	<b>Co</b> 27 58.933 КОБАЛЬТ	<b>Ni</b> 28 58.693 НИКЕЛЬ																					
5	<b>Rb</b> 37 85.468 РУБИДИЙ	<b>Sr</b> 38 87.621 СТРОНЦИЙ	<b>Y</b> 39 88.906 ИТРИЙ	<b>Zr</b> 40 91.224 ЦЕРОНИЙ	<b>Nb</b> 41 92.906 НИОБИЙ	<b>Mo</b> 42 95.94 МОЛИБДЕН	<b>Tc</b> 43 98 ТЕХНЕЦИЙ	<b>Ru</b> 44 101.07 РУДИЙ	<b>Rh</b> 45 102.905 РОДИЙ	<b>Pd</b> 46 106.42 ПАЛЛАДИЙ																					
6	<b>Cs</b> 55 132.905 ЦЕЗИЙ	<b>Ba</b> 56 137.327 БАРИЙ	<b>La*</b> 57 138.905 ЛАНАН	<b>Hf</b> 72 178.49 ГАФНИЙ	<b>Ta</b> 73 180.948 ТАНТАЛ	<b>W</b> 74 183.84 ВОЛЬФРАМ	<b>Re</b> 75 186.207 РЕНИЙ	<b>Os</b> 76 190.23 ОСМИЙ	<b>Ir</b> 77 192.222 ИРИДИЙ	<b>Pt</b> 78 195.078 ПЛАТИНА																					
7	<b>Fr</b> 87 223 ФРАНЦИЙ	<b>Ra</b> 88 226 РАДИЙ	<b>Ac**</b> 89 227 АКТИНИЙ	<b>Rf</b> 104 261 РЕФЕРМУДИЙ	<b>Db</b> 105 262 ДУБИНИЙ	<b>Sg</b> 106 263 СГЕОРИЙ	<b>Bh</b> 107 264 БОРИЙ	<b>Hs</b> 108 265 ХАССИЙ	<b>Hs</b> 109 266 МЕНТЕНРИЙ	<b>Mt</b> 110 267 МЕНТЕНРИЙ																					

★ ПЛАНТЭНОМДЫ

<b>Ce</b> 58 2 140,254 41,50 <sup>16s2</sup>	<b>Pr</b> 59 2 140,90762 41,56s2	<b>Nd</b> 60 2 144,2413 41,6s2	<b>Pm</b> 61 2 144,9127 41,6s2	<b>Sm</b> 62 2 150,358 41,6s2	<b>Eu</b> 63 2 151,964 41,6s2	<b>Gd</b> 64 2 157,25 41,5s <sup>1</sup> 6s2	<b>Tb</b> 65 2 158,92535 41,6s2	<b>Dy</b> 66 2 162,50087 41,6s2	<b>Ho</b> 67 2 164,93032 41,6s2	<b>Er</b> 68 2 167,25932 41,6s2	<b>Tm</b> 69 2 168,934027 41,6s2	<b>Yb</b> 70 2 173,0473 41,6s2	<b>Lu</b> 71 2 174,967 41,6s2
--	--	--------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	-------------------------------------

★★ ЭНТИНОМДЫ

<b>Th</b> 90 10 232,03772 6d <sup>2</sup> 7s2	<b>Pa</b> 91 2 231,03688 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s2	<b>U</b> 92 2 238,02891 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s2	<b>Np</b> 93 2 237,04817 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s2	<b>Pu</b> 94 2 244,06422 5f <sup>6</sup> 7s2	<b>Am</b> 95 2 243,06115 5f <sup>7</sup> 7s2	<b>Cm</b> 96 2 247,06542 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s2	<b>Bk</b> 97 2 247,06592 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s2	<b>Cf</b> 98 2 251,10888 5f <sup>10</sup> 7s2	<b>Es</b> 99 2 252,08322 5f <sup>11</sup> 7s2	<b>Fm</b> 100 2 257,10372 5f <sup>12</sup> 7s2	<b>Md</b> 101 2 258,10382 5f <sup>13</sup> 7s2	<b>No</b> 102 2 259,10382 5f <sup>14</sup> 7s2	<b>Lr</b> 103 2 260,10382 5f <sup>14</sup> 7s2
---	--	---	--	--	--	--	--	---	---	--	--	--	--

Относительные атомные массы приведены по Международной таблице 1985 года (точность указана для последней значащей цифры). Для элементов, не имеющих стабильных нуклидов (за исключением Th, Pa и U, распространенных в земной коре), в квадратных скобках приведены массовые числа наиболее долгоживущих изотопов.