

Министерство образования и науки Российской Федерации
Омский государственный педагогический университет

А. В. Репин

**КАК РЕШАТЬ ЗАДАЧИ
ПО КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ**

Учебное пособие

Омск
Издательство ОмГПУ
2014

УДК 530.145
ББК 22.3я73
Р41

Печатается по решению редакционно-издательского совета Омского государственного педагогического университета

Рецензент:

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики
и методики обучения физике Омского государственного
педагогического университета *П. П. Бобров*

Репин, А. В.

Р41 Как решать задачи по квантовой физике : учебное
пособие / А. В. Репин. – Омск : Изд-во ОмГПУ, 2014. – 104 с.

ISBN 978-5-8268-1910-4

В пособии приведена краткая теория, разобраны типовые задачи и предложены задания для самостоятельного решения. Содержание пособия соответствует программе подготовки студентов по направлению подготовки «Педагогическое образование», профили «Физика и математика», «Физика и технология». Пособие будет также полезно для студентов физических факультетов педагогических вузов.

УДК 530.145
ББК 22.3я73

ISBN 978-5-8268-1910-4

© Репин А. В., 2014
© Омский государственный
педагогический университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ АВТОРА	4
1. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ.....	5
1.1. Тепловое излучение	5
1.2. Фотоэффект	8
1.3. Эффект Комптона	9
2. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ.....	20
2.1. Гипотеза де Бройля. Волны де Бройля	20
2.2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.....	21
3. УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА И ЕГО ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ	31
3.1. Стационарное уравнение Шредингера	31
3.2. Поведение частицы в потенциальной яме.....	33
3.3. Поведение частицы на потенциальном барьере	34
4. МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА – БОРА	41
4.1. Опыты Резерфорда.....	41
4.2. Постулаты Бора. Модель водородоподобного атома.....	44
4.3. Спектральные серии водородоподобных атомов	46
5. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ АТОМА	56
5.1. Квантово-механическая теория атома водорода	56
5.2. Принцип Паули. Периодическая система элементов	59
5.3. Характеристические рентгеновские спектры	61
6. АТОМНОЕ ЯДРО.....	68
6.1. Состав атомного ядра.....	68
6.2. Ядерные силы. Энергия связи.....	70
6.3. Модели ядра	72
6.4. Радиоактивность	74
7. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ.....	81
7.1. Виды ядерных реакций	81
7.2. Реакции деления и синтеза.....	84
8. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ	91
8.1. Классификация элементарных частиц	91
8.2. Характеристики элементарных частиц.....	93
8.3. Кварковая модель адронов.....	96
ПРИЛОЖЕНИЯ	100
ЛИТЕРАТУРА	103

ОТ АВТОРА

Возникнув в начале XX в., квантовая механика перевернула многие представления о природе. Человек научился понимать и применять казавшиеся странными законы и принципы квантовой механики.

В данном учебном пособии приведена краткая теория по основным разделам квантовой и атомной физики. Разобраны типовые задачи и предложены задания для самостоятельного решения.

При решении следует придерживаться общего принципа решения физических задач. Особое внимание нужно обращать на систему единиц, рекомендуется переводить все величины в систему СИ, за исключением специальных случаев, которые указаны в тексте и приведены в примерах решения задач. При решении многих задач полезно проводить проверку формулы на размерность. В основе решения многих задач лежит закон сохранения энергии.

1. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

В конце XIX в. осталось очень мало экспериментальных явлений, которые не могли бы быть объяснены с помощью электромагнитной теории Максвелла. Первой из необъясненных проблем являлся спектр теплового излучения твердых тел. Классическая физика также не смогла объяснить фотоэлектрический эффект и немного позже обнаруженное явление изменения частоты волны рентгеновского излучения при прохождении через легкие вещества, которое получило название эффекта Комптона. Именно эти явления и стали экспериментальными предпосылками к возникновению квантовой физики.

1.1. Тепловое излучение

Падающий на тело поток тепла Φ_0 частично отражается, а частично поглощается и переходит во внутреннюю энергию. Отношение

$$\rho_{\lambda, T} = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_0} \quad (1.1)$$

называют отражательной способностью тела. А отношение

$$a_{\lambda, T} = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_0} \quad (1.2)$$

называют поглощательной способностью тела. Они зависят от длины волны и температуры. Отражательная и поглощательная способности связаны между собой следующим выражением:

$$\rho_{\lambda, T} + a_{\lambda, T} = 1. \quad (1.3)$$

Тело, которое бы поглощало все лучи и не отражало их, называется абсолютно черным телом $a_{\lambda, T} = 1$ и $\rho_{\lambda, T} = 0$. Тело, погло-

щательная способность которого меньше единицы, но одинакова во всем диапазоне частот, называется серым телом.

Наряду с поглощением и отражением тела, имеющие температуру выше 0 К, излучают электромагнитные волны. Излучение связано с тепловым движением молекул, поэтому оно называется тепловым излучением. Главной особенностью теплового излучения является равновесный характер. Основной количественной характеристикой излучения тела является испускательная способность e_T , т. е. энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени. Она зависит от температуры тела T . Энергия излучается в виде электромагнитных волн широкого спектра, поэтому полная испускательная способность находится как интеграл:

$$e_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{\lambda,T} d\lambda . \quad (1.4)$$

При тепловом излучении энергия излучается в виде электромагнитных волн, при поглощении электромагнитных волн она вновь превращается в тепло. В 1860 г. Кирхгоф, исходя из термодинамических представлений, нашел связь между поглощательной и лучеиспускательной способностями тела:

$$\frac{e_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T} . \quad (1.5)$$

Отношение лучеиспускательной способности к поглощательной способности для любых тел при одинаковой температуре T и для одной и той же длины волны λ одинаково и не зависит от природы этих тел. Это отношение является универсальной функцией длины волны и температуры и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела $E_{\lambda,T}$. Поскольку для абсолютно черного тела $a = 1$, а для других тел $a < 1$, то при одинаковой температуре излучение абсолютно черного тела будет интенсивнее, чем нечерного.

Главной проблемой при дальнейшем изучении теплового излучения стало нахождение вида функции Кирхгофа. В 1878 г. Стефан показал на основе опытных данных, а 1884 г. Больцман теоретически вывел, что энергетическая светимость, т. е. количество энергии, излучаемой с единичной поверхности за единицу времени во всем интервале частот от 0 до ∞ при данной температуре T , абсолютно черного тела определяется выражением:

$$R = \sigma T^4, \quad (1.6)$$

которое получило название закона Стефана – Больцмана, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная величина, определяемая экспериментально. Если тело «серое», то энергетическая светимость определяется выражением:

$$R = k\sigma T^4, \quad (1.7)$$

где k – безразмерный коэффициент серости.

Вин установил, что максимум лучеиспускательной способности приходится на некоторую длину волны λ_{max} , которая связана с абсолютной температурой следующим выражением:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (1.8)$$

где $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина, которую определили из опыта. Формула известна как закон смещения Вина и хорошо подтверждается экспериментальными данными.

В 1900 г. М. Планк предположил, что энергия излучается не непрерывно, а порциями – квантами. Энергия каждого кванта пропорциональна его частоте:

$$W = h\nu, \quad (1.9)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – универсальная постоянная, названная постоянной Планка. Исходя из этой идеи, Планк пришел к следующему выражению для функции Кирхгофа:

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (1.10)$$

Из формулы Планка вытекают законы Вина, Стефана – Больцмана и Рэлея, и можно вычислить постоянные для этих законов.

1.2. Фотоэффект

Фотоэффект – физическое явление, заключающееся в выходе свободных электронов на поверхность твердых и жидких веществ под действием света. Этот фотоэффект называют внешним.

Основные закономерности фотоэффекта экспериментально обнаружил Столетов:

1. Фототок насыщения (число фотоэлектронов, вырываемых с поверхности вещества за единицу времени) пропорционален энергетической освещенности поверхности, т. е. отношению потока излучения к площади облучаемой поверхности.

2. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует «красная» граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света, при которой еще возможен внешний фотоэффект. Граничная частота зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Теорию фотоэффекта сформулировал А. Эйнштейн на основе гипотезы М. Планка. Он отказался от волновой теории света и рассматривал свет как поток частиц света, обладающих дискретным значением энергии. Применяв закон сохранения энергии, он пришел к следующему уравнению:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e V_{\text{max}}^2}{2}, \quad (1.11)$$