

Одесский государственный университет им. И.И.Мечникова
Учебно-производственный центр “Интеллект”
Ришельевский лицей

60 задач
ПО
АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

для учащихся выпускных классов
школ и лицеев с углубленным изучением
естественных наук

под ред. П.А.Виктора и В.Я.Колебошина

Раздел 1

Корпускулярные свойства электромагнитного излучения

Энергия фотона

$$E = h\nu ,$$

где h – постоянная Планка, ν – частота электромагнитных колебаний.

Полная энергия частицы

$$E = mc^2 ,$$

где m – масса частицы, c – скорость света.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта

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

где A – работа выхода электрона, v_{\max} – максимальная энергия фотоэлектрона.

Электрон-вольт – внесистемная единица измерения энергии, равная энергии, приобретаемой частицей с зарядом, равным заряду электрона, при прохождении разности потенциалов 1 В.

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} .$$

Задачи

1

Чему равна энергия фотона с длиной волны а) 400 нм, б) 700 нм и в) фотонов, генерируемых FM-радиостанцией на частоте 106.6 МГц?

2

Интенсивность солнечного света, достигающего поверхности Земли, составляет 1300 Вт/м^2 . Сколько фотонов за каждую секунду падает на площадку в 1 см^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам? Средняя длина волны света 550 нм.

3

Электрическая лампа мощностью 100 Вт испускает 3% потребляемой энергии в форме видимого света (средняя длина волны 550 нм) равномерно по всем направлениям. Сколько фотонов видимого света попадает за 1 с в зрачок наблюдателя (диаметр зрачка 4 мм), находящегося на расстоянии 10 км от лампы?

4

Определить массу и импульс фотона, длина волны которого 500 нм.

5

Найти длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона с кинетической энергией 0.30 МэВ.

6

Параллельный пучок световых лучей с интенсивностью 1.37 кВт/м^2 падает на шарик радиуса 1,0 см. Определить, исходя из корпускулярных представлений, силу, которую испытывает шарик, если его поверхность обладает коэффициентом поглощения, равным 1.

7

Лазер излучает в импульсе длительностью $\tau = 0.13 \text{ мс}$ узкий пучок света энергией $E = 10 \text{ Дж}$. Найти среднее за время τ давление такого пучка света, если его сфокусировать в пятнышко диаметром $d = 10 \text{ мкм}$ на поверхности, перпендикулярной пучку, с коэффициентом отражения $\rho = 0.5$.

8

Короткий импульс света энергией $E = 7.5 \text{ Дж}$ падает узким пучком на зеркальную пластинку с коэффициентом отражения $\rho = 0.6$. Угол падения $\alpha = 30^\circ$. Найти импульс, переданный пластинке.

9

Найти с помощью корпускулярных представлений силу светового давления, которую оказывает плоский световой поток с интенсивностью $I = 1 \text{ Вт/см}^2$ на плоскую зеркальную поверхность, если угол падения $\alpha = 30^\circ$ и площадь освещаемой поверхности $S = 10 \text{ см}^2$.

10*

В эффекте Комптона фотон с длиной волны 0.1 нм претерпевает лобовое столкновение со свободным электроном и отбрасывает его в направлении своего движения. Рассеянный фотон движется в обратном направлении (относительно падающего фотона). С помощью законов сохранения энергии и импульса определите кинетическую энергию электрона и длину волны рассеянного фотона. Предполагается, что кинетическую энергию электрона можно вычислять по нерелятивистской формуле.

11

Работа выхода для бария равна 2.48 эВ. Чему равна максимальная кинетическая энергия электронов, если на металл падает свет с длиной волны 480 нм? Чему равна скорость электронов?

12

Найти работу выхода с поверхности некоторого металла, если при поочередном освещении его излучением с длинами волн 0.35 мкм и 0.54 мкм максимальные скорости фотоэлектронов отличаются в 2 раза.

13

Медный шарик, отдаленный от других тел, облучают электромагнитным излучением с длиной волны 0.2 мкм. До какого максимального потенциала зарядится шарик? Работа выхода электрона из меди 4.47 эВ.

14

Плоский алюминиевый электрод освещается ультрафиолетовым светом с длиной волны 83 нм. На какое максимальное расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода создано задерживающее электрическое поле напряженности 7.5 В/см? Красная граница фотоэффекта для алюминия 332 нм.

15*

Излучение лазера с длиной волны 500 нм сфокусировано на плоском фотокатоде в пятно диаметром 0.1 мм. Работа выхода электрона из фотокатода 2 эВ. На анод, расположенный на расстоянии 30 мм от катода, подано ускоряющее напряжение 4 кВ. Найти диаметр пятна фотоэлектронов на аноде. Анод считать плоским и расположенным параллельно поверхности катода.

Раздел 2

Модели атома Томсона, Резерфорда, Бора

Условие частот Бора для излучательных переходов

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

где E_n и E_m – энергии стационарных состояний.

Радиус круговой орбиты и скорость орбитального движения электрона в боровской модели водородоподобного атома (иона)

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{\hbar^2}{m_e Z e^2} \cdot n^2 \quad , \quad v_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z e^2}{\hbar} \cdot \frac{1}{n} \quad ,$$

где m_e и e – соответственно масса и заряд электрона, Z – заряд ядра в единицах электронного заряда, $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Дирака, $n = 1, 2, 3, \dots$ – квантовое число.

Энергия стационарных состояний водородоподобного атома (иона)

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m_e Z^2 e^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot$$

Формула Ридберга для волновых чисел спектральных линий водородоподобного атома (иона)

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

где R – постоянная Ридберга, $m = 1, 2, 3, \dots$ – номер энергетического уровня, на который происходит переход в атоме при излучении (номер спектральной серии), $n = m+1, m+2, \dots$ – номер энергетического уровня, с которого происходит переход (номер линии внутри серии).

Спектральные серии водородоподобных атомов (ионов)		
m	Название серии	Спектральная область
1	Лаймана	Ультрафиолетовая
2	Бальмера	УФ + видимая
3	Пашена	Инфракрасная
4	Брэкетта	Инфракрасная
5	Пфунда	Инфракрасная
6	Хэмфри	Инфракрасная

Задачи

16

Исходя из томсоновской модели атома, определить:

- радиус атома водорода, энергия ионизации которого 13.6 эВ;
- частоту колебаний электрона, если радиус атома водорода равен r .

При каком значении r длина волны испускаемого света равна 0.6 мкм?

17

В одном из экспериментов Резерфорда α -частицы (с массой $6.68 \cdot 10^{-27}$ кг) имели кинетическую энергию 4.8 МэВ. На какое расстояние они могли приблизиться к ядру атома золота (с зарядом $+79e$)? Отдачей ядра можно пренебречь.

18

Считая ядро неподвижным, вычислить для атома водорода и ионов He^+ и Li^{++} :

- радиусы двух первых боровских орбит и скорости электрона на них;
- кинетическую энергию электрона и его энергию связи в основном состоянии.

19

Начертите схему энергетических уровней иона He^+ .

20

Ион He^+ возбужден на пятый энергетический уровень. Определить длины волн испускаемых спектральных линий.

21

Возбужденный атом водорода в принципе мог бы иметь радиус 1 мм. Какое квантовое число n соответствует боровской орбите таких размеров? Какова скорость электрона на этой орбите? Какова энергия атома?

22

Вычислить для атомарного водорода:

- а) длины волн первых трех спектральных линий серии Бальмера;
- б)* минимальную разрешающую способность $\lambda/\delta\lambda$ спектрального прибора, при которой можно разрешить первые 20 линий серии Бальмера.

23

В спектре испускания атомарного водорода известны длины волн двух линий серии Бальмера: 410.2 и 486.1 нм. К какой серии принадлежит спектральная линия, волновое число которой равно разности волновых чисел этих линий? Какова ее длина волны?

24

Атомарный водород возбуждают на n -й энергетический уровень. Определить:

- а) длины волн испускаемых линий, если $n = 4$; к каким сериям принадлежат эти линии?
- б) сколько линий испускает водород, если $n = 10$?

25

Какие линии содержит спектр поглощения атомарного водорода в диапазоне длин волн от 94.5 до 130 нм?

26

Определить квантовое число n возбужденного состояния атома водорода, если известно, что при переходе в основное состояние атом излучил:

- а) фотон с длиной волны 97.25 нм;
- б) два фотона с длинами волн 656.3 нм и 121.6 нм.

27

У какого водородоподобного иона разность длин волн головных (самых длинноволновых) линий серии Бальмера и Лаймана равна 59.3 нм?

28

В спектре некоторых водородоподобных ионов длина волны третьей линии серии Бальмера равна 108.5 нм. Найти энергию связи электрона в основном состоянии этих ионов.

29

Энергия связи электрона в атоме гелия равна 24.6 эВ. Найти энергию, необходимую для удаления обоих электронов из этого атома.

30

Электроны, ускоренные разностью потенциалов 12.3 В, проходят через атомарный водород при комнатной температуре. Оцените длины волн испускаемого света.

31

Возбужденный одноэлектронный атом испускает свет с длинами волн 1200 и 1000 ангстрем. Допустим, что эти линии соответствуют переходам с третьего и второго энергетических уровней на первый.

а) пучок электронов с энергией 11 эВ падает на газ из этих атомов. С какой энергией будут вылетать электроны из газа?

б) Как изменится ответ на предыдущий вопрос, если увеличить энергию налетающих электронов до 13 эВ ?

32

Вычислить скорость электронов, вырываемых электромагнитным излучением с длиной волны 18.0 нм из ионов He^+ , находящихся в основном состоянии.

33

Фотон, испущенный ионом He^+ при переходе из первого возбужденного состояния в основное, ионизирует атом H, находящийся в основном состоянии. Найти скорость фотоэлектрона.

34

Какой минимальной скоростью должен обладать электрон, вызывающий в одноэлектронном атоме переход из основного состояния в первое возбужденное, если известно что энергия фотона при обратном излучательном переходе равна 7.8 эВ ?

35

В атоме водорода электрон перешел на уровень с главным квантовым числом n , причем радиус орбиты изменился в q раз. Найти частоту испущенного кванта.

36*

На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной атомарным водородом. Постоянная решетки $5 \cdot 10^{-4}$ см. С какой орбиты должен перейти электрон на вторую орбиту, чтобы спектральную линию в спектре пятого порядка можно было наблюдать под углом 41 градус?

Раздел 3

Гипотеза де-Бройля

Движение микрообъекта с импульсом p и энергией E можно представить как процесс распространения волны, длина λ и частота ν которой определяются уравнениями де-Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad , \quad \nu = \frac{E}{h} \quad .$$

Условие отражения волны от атомных плоскостей кристалла (условие Вульфа-Брэгга)

$$2d \sin \varphi = m\lambda \quad ,$$

где d – расстояние между соседними атомными плоскостями, φ – угол скольжения (угол между атомной плоскостью и направлением распространения волны), m – целое число.

Задачи

37

Вычислить дебройлевскую длину волны электрона и протона, движущихся с кинетической энергией 1.00 кэВ. При каких значениях кинетической энергии их длина волны будет равна 100 пм?

38

Найти длину волны де Бройля :

- а) для электронов, прошедших разность потенциалов в 1; 100; 1000 В.
- б) для электронов, имеющих скорость 10^8 м/с;
- в) для шарика массы 1 г, движущегося со скоростью 1 см/с.

39

При увеличении энергии электрона на 200 эВ его дебройлевская длина волны изменилась в два раза. Найти первоначальную длину волны электрона.

40

Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов 200 В, имеет длину волны де Бройля $2.02 \cdot 10^{-12}$ м и заряд, численно равный заряду электрона. Найти массу частицы.

41

В опыте Дэвиссона и Джермера узкий пучок электронов падает под углом скольжения 30° на естественную грань монокристалла алюминия. Расстояние между соседними кристаллическими плоскостями, параллельными этой грани, 0.20 нм. При некотором ускоряющем напряжении V_0 наблюдали максимум зеркального отражения электронов. Найти V_0 , если известно, что следующий максимум зеркального отражения возникал при увеличении ускоряющего напряжения в 2.25 раза.

42

Пучок электронов с кинетической энергией 180 эВ падает нормально на поверхность монокристалла никеля. В направлении, составляющем угол 55° с нормалью к поверхности, наблюдается максимум отражения четвертого порядка. Найти межплоскостное расстояние, соответствующее этому отражению.

43

В опыте Томсона и Тартаковского пучок электронов с кинетической энергией 10 кэВ проходит через тонкую поликристаллическую фольгу и образует систему колец на экране, отстоящем от фольги на 10 см. Найти межплоскостное расстояние, для которого максимум отражения третьего порядка соответствует кольцу с радиусом 1.6 см.

44

Частица массой m движется в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Ширина ямы l . Найти значения энергии частицы, имея в виду, что возможны только такие состояния, для которых в яме укладывается целое число дебройлевских полуолн.

45

Интерпретировать квантовые условия Бора на основе волновых представлений: показать, что стационарным боровским орбитам соответствует целое число дебройлевских волн. Найти длину волны электрона на n -й орбите.

Раздел 4

Соотношение неопределенностей

Невозможно одновременно говорить о координате x и соответствующей проекции импульса p_x микрообъекта с точностью большей, чем дается соотношением

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \hbar .$$

Задачи

46

Оценить наименьшие погрешности, с которыми можно определить скорость электрона, протона и атома урана, локализованных в области размером 1 мкм. Масса атома урана $3.95 \cdot 10^{-25}$ кг.

47

Оценить неопределенность скорости электрона в атоме водорода, полагая размер атома порядка 10^{-8} см. Сравнить полученное значение со скоростью электрона на первой боровской орбите.

48

Какова неопределенность импульса электрона, заключенного в атомном ядре ($R = 10^{-15}$ см)? Какой неопределенности скорости это соответствует?

49

Пуля массой 12 г вылетает из ружейного ствола со скоростью 450 м/с.

а) Какая длина волны соответствует пуле?

б) Положение пули известно с точностью до 0.55 см (радиус ствола). Чему равна неопределенность ее скорости?

в) Как далеко могла бы уклониться от центра мишени пуля при стрельбе с дистанции 300 м, если бы точность попадания определялась принципом неопределенности?

50

Электрон и бейсбольный мяч массой 150 г движутся со скоростью 220 м/с измеренной с точностью 0.065%. Вычислите неопределенность в положении мяча и электрона и сравните полученные результаты.

51

С какой точностью можно измерить положение электрона с энергией 1.50 кэВ, если его энергия известна с точностью 1% ?

Раздел 5

Квантовая теория атома водорода, многоэлектронные атомы

Квантовое состояние электрона в атоме однозначно определяется следующими четырьмя квантовыми числами.

$n = 1, 2, 3, \dots$ – *главное* квантовое число. Определяет энергию электрона в атоме водорода. В многоэлектронных атомах определяет оболочку,

которой принадлежит электрон (энергия зависит также и от орбитального квантового числа).

$l = 0, 1, 2, \dots (n-1)$ – орбитальное квантовое число. Определяет модуль вектора орбитального момента импульса электрона. В многоэлектронных атомах определяет совместно с главным квантовым числом определяет подоболочку, которой принадлежит электрон.

$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$ – магнитное квантовое число. Определяет проекцию орбитального момента импульса электрона на направление внешнего поля.

$m_s = \pm 1/2$ – спиновое магнитное квантовое число. Определяет проекцию спинового (собственного) момента импульса электрона на направление внешнего поля.

Обозначение атомных оболочек						
n	1	2	3	4	5	6
Оболочка	K	L	M	N	O	P

Обозначение атомных подоболочек						
l	0	1	2	3	4	5
Подоболочка	ns	np	nd	nf	ng	nh

Например: символ $3p^2$ означает, что в подоболочке с $n = 3$, $l = 1$ (подоболочка принадлежит K -оболочке) имеется 2 электрона.

Задачи

52

Сколько разных квантовых состояний у электрона с главным квантовым числом $n = 5$?

53

Сколько электронов может находиться в подоболочке с $n = 6$, $l = 3$?

54

Покажите, что максимальное число электронов на подоболочке с орбитальным квантовым числом l равно $2(2l + 1)$.

55

Какие значения могут принимать квантовые числа m_l и m_s при $n = 4$, $l = 3$?

56

Перечислите все квантовые числа каждого электрона в основном состоянии атома углерода ($z = 6$).

57

Найти число электронов в атомах, у которых заполнены:

а) K - и L - оболочки, $3s$ -подоболочка и на 50% $3p$ -подоболочка;

б) K -, L -, M -оболочки, $4s$ - и $4p$ -подоболочки.

Что это за атомы?

58

Найти максимальное число электронов, имеющих в атоме следующие одинаковые квантовые числа:

а) n, l ; б) n .

59

Какая из следующих электронных конфигураций запрещена:

а) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$;

б) $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 4p^2$;

в) $1s^2 2s^2 2p^8 3s^1$?

60

Выписать электронные конфигурации атомов C, N, S, Cl.

ОТВЕТЫ

1. а) $3 \cdot 10$ эВ; б) 1.77 эВ; в) $4.11 \cdot 10^{-7}$ эВ.
2. $3.8 \cdot 10^{17}$ фотонов.
3. $8.3 \cdot 10^4$ фотонов.
4. $4.4 \cdot 10^{-36}$ кг; $1.3 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.
5. $2 \cdot 10^{-12}$ м.
6. 1.43 нН.
7. 5 МПа.
8. $3.5 \cdot 10^{-8}$ кг·м/с.
9. $5 \cdot 10^{-8}$ Н.
10. 570 эВ, 0.105 нм.
11. 0.11 эВ, $1.9 \cdot 10^5$ м/с.
12. 1.9 эВ.
13. 1.74 В.
14. 1.5 см.
15. 1.3 мм.
16. $1.6 \cdot 10^{-10}$ м.
17. $4.7 \cdot 10^{-14}$ м.
18. См. таблицу

Система	r_1 и r_2 , 10^{-10} м		v_1 и v_2 , 10^6 м/с		$E_{\text{кин}}$ и $E_{\text{св}}$, эВ
H	0.529	2.12	2.19	1.09	13.6
He ⁺	0.264	1.06	4.38	54.4	40.8
Li ⁺⁺	0.176	0.70	6.57	3.28	122.5

20. Всего 10 линий с длинами волн от 23.7 нм до 4051 нм.
21. Около 4300 , $-7 \cdot 10^{-7}$ эВ.
22. 657 нм, 487 нм, 434 нм, 1500 .
23. Серии Брэкетта, 2.63 мкм.
24. а) 122 нм, 103 нм, 97 нм (серия Лаймана),
 657 нм, 486 нм (серия Бальмера),
 1875 нм (серия Пашена);
 б) 45 линий.
25. 121.6 нм, 102.6 нм и 97.3 нм.
26. а) 4 ; б) 3 .

27. У лития ($z = 3$).
28. 54.5 эВ (речь идет об ионе гелия).
29. 79 эВ.
30. 103 нм, 122 нм, 657 нм.
31. а) 11 эВ, 0.7 эВ; б) 13 эВ, 10.9 эВ, 2.7 эВ, 0.6 эВ.
32. $2.3 \cdot 10^6$ м/с.
33. $3.1 \cdot 10^6$ м/с.
34. $1.66 \cdot 10^6$ м/с.
35. $\nu = R\alpha(1 - 1/q)/n^2$.
36. С третьей орбиты.
37. 39 пм и 0.91 пм; 0.15 кэВ и 0.082 эВ.
38. а) $12.25 \cdot 10^{-10}$ м, $1.225 \cdot 10^{-10}$ м, $3.87 \cdot 10^{-11}$ м;
б) $7.3 \cdot 10^{-10}$ м; в) $6.63 \cdot 10^{-29}$ м.
39. 0.15 нм.
40. $1.67 \cdot 10^{-27}$ кг (протон).
41. 150 В.
42. 0.21 нм.
43. 0.23 нм.
44. $E_n = (\pi^2 \hbar^2 / 2ml^2) \cdot n^2$, $n = 1, 2, 3, \dots$
45. $\lambda = 2\pi r_1 n$, $n = 1, 2, 3, \dots$ r_1 – первый боровский радиус.
46. Полагая $\Delta x = 0.5$ мкм, получим: $2 \cdot 10^4$, 10, $5 \cdot 10^{-2}$ м/с.
47. $\Delta v \approx 10^6$ м/с, $v_1 = 2.2 \cdot 10^6$ м/с.
48. $\Delta p \approx 1.06 \cdot 10^{-19}$ кг·м/с, $\Delta v \approx 1.2 \cdot 10^{11}$ м/с.
49. а) $1.2 \cdot 10^{-34}$ м; б) $1.9 \cdot 10^{-32}$ кг·м/с; в) $1.1 \cdot 10^{-30}$ м.
50. для мяча $5 \cdot 10^{-33}$ м, для электрона $8 \cdot 10^{-4}$ м.
51. 1 нм.
52. 50 состояний.
53. 14 электронов.
55. $m_l = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$; $m_s = -1/2, +1/2$.
57. а) 15 (фосфор); б) 36 (криптон).
58. а) $2 \cdot (2l + 1)$; б) $2n^2$.
59. Конфигурация в).
60. $1s^2 2s^2 2p^2$; $1s^2 2s^2 2p^3$; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$.
-

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные физические постоянные

Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Элементарный заряд	$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Планка	$h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$R = 1.097 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Первый боровский радиус	$r_1 = 0.53 \cdot 10^{-10}$ м
Энергия связи электрона в атоме Н	$E = 13.56$ эВ
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1.66 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
