

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»

**Сборник задач по атомной физике.**

(Учебное пособие для студентов 3 курса радиофизического факультета)

Нижний Новгород  
2024

## Квантовая природа электромагнитного излучения.

### Фотоэффект.

**1.1.** При поочередном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн  $\lambda_1 = 0.35$  мкм и  $\lambda_2 = 0.54$  мкм обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются в  $\eta = 2$  раза. Найти работу выхода с поверхности этого металла.

**1.2.** Красная граница фотоэффекта для цезия равна  $\lambda_{\text{кр}} = 6390$  Å. Чему равна максимальная энергия фотоэлектронов, если падающее на цезиевый фотокатод излучение имеет длину волны  $\lambda = 912$  Å.

**1.3.** На металлическую поверхность с работой выхода  $A_{\text{вых}} = 3.6$  эВ воздействует электромагнитное поле  $E = E_0(1 + \cos \omega t) \cos \omega_0 t$  ( $E$  – напряженность электрического поля волны). Найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, если  $\omega = 4.8 \cdot 10^{15}$  рад/с,  $\omega_0 = 6.4 \cdot 10^{15}$  рад/с.

**1.4.** Уединенный медный шарик освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны  $\lambda = 200$  нм. До какого максимального потенциала  $\phi_{\text{max}}$  зарядится шарик, если работа выхода электрона для меди  $A_{\text{вых}} = 4.47$  эВ? Какое количество электронов  $N_e$  покинет шарик?

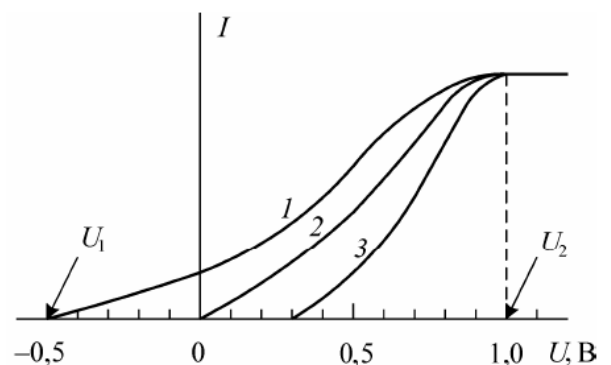
**1.5.** Уединенный медный шарик облучается ультрафиолетовым светом. При каких длинах волн излучения шарик останется электрически нейтральным? Работа выхода для меди  $A_{\text{вых}} = 4.47$  эВ.

**1.6.** Вакуумный фотоэлемент с катодом из молибдена освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 250$  нм. При наложении задерживающей разности потенциалов фототок уменьшается и обращается в нуль, когда она достигает значения  $V = 1.8$  В. Определить внешнюю контактную разность потенциалов между молибденом и материалом анода, если работа выхода электрона из молибдена  $A_{\text{вых}} = 4.27$  эВ.

**1.7.** Свет с длиной волны  $\lambda = 300$  нм падает на фотоэлемент в режиме насыщения. Соответствующая спектральная чувствительность фотоэлемента  $J = 4.8$  мА/Вт. Найти выход фотоэлектронов.

**1.8.** При некотором максимальном значении задерживающей разности на вакуумном фотоэлементе фототок с поверхности лития, облучаемого светом с длиной волны  $\lambda_0$ , прекращается. Изменив длину волны света в  $n = 1.5$  раза, установили, что для прекращения фототока необходимо увеличить задерживающую разность потенциалов в  $\eta = 2$  раза. Определить длину волны  $\lambda_0$ .

**1.9.** Никелевый шарик, играющий роль внутреннего электрода сферического вакуумного фотоэлемента, освещают монохроматическим электромагнитным излучением различных длин волн (1–3). Полученные графики зависимости фототока от подаваемого напряжения  $U$  показаны на рис. 1. Найти с помощью этих графиков соответствующие длины волн.



**1.10.** Электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda = 50$  нм вырывает с поверхности титана (работа выхода  $A = 3.92$  эВ) фотоэлектроны, которые попадают в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 10^3$  Гс, параллельное поверхности данного металла. Найти максимальный радиус кривизны  $R_{\max}$  фотоэлектронов, вылетающих перпендикулярно магнитному полю.

**1.11.** Определить красную границу фотоэффекта для цинка ( $A_{\text{вых}} = 3.74$  эВ) и максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с его поверхности излучением с длиной волны  $\lambda = 250$  нм.

### Повторение специальной теории относительности (Релятивистская механика).

**1.12.** Во сколько раз релятивистская масса частицы, скорость которой отличается от скорости света на  $\eta = 0.01$  %, превышает ее массу покоя?

**1.13.** Найти скорость, при которой релятивистский импульс частицы в  $\eta = 1.4$  раза превышает ее ньютоновский импульс.

**1.14.** Какую работу надо совершить, чтобы увеличить скорость частицы массой  $m$  от  $0.6c$  до  $0.8c$ ? Сравнить с нерелятивистским случаем.

**1.15.** Найти зависимость импульса от кинетической энергии частицы массой  $m_0$ . Вычислить импульс протона с кинетической энергией равной 500 МэВ.

**1.16.** Частица массы  $m$  в момент  $t = 0$  начинает двигаться под действием постоянной силы  $F$ . Найти скорость частицы и пройденный ею путь в зависимости от времени  $t$ .

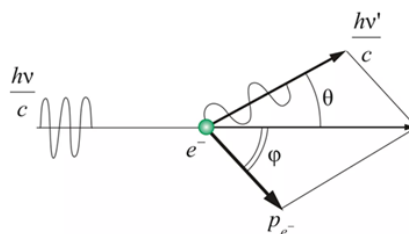
**1.17.** Частица массы  $m$  движется вдоль оси  $x$   $K$ -системы отсчета по закону  $x = \sqrt{d^2 + c^2 t^2}$ , где  $d$  – некоторая постоянная,  $c$  – скорость света,  $t$  – время. Найти силу, действующую на частицу в этой системе отсчета.

**1.18.** При каком значении скорости электрона его импульс равен импульсу фотона с длиной волны  $\lambda = 1$  пм?

**1.19.** При какой скорости кинетическая энергия частицы равна ее энергии покоя?

### Эффект Комптона.

**1.20.** При рассеянии кванта с энергией 1.022 МэВ на свободном покоящемся электроне угол вылета электрона  $\varphi$  (рис. 2) оказался таким, что  $\text{tg}\varphi = 1/3$ . Найти угол рассеяния кванта  $\theta$ .



**1.21.** При рассеянии кванта на свободном покоящемся электроне (рис. 2) угол рассеяния кванта  $\theta$  и угол вылета электрона  $\varphi$  оказались равны, причем  $\theta = \varphi = \pi/4$ . Найти энергии квантов до и после рассеяния.

**1.22.** Фотон испытал рассеяние на покоившемся свободном электроне. Найти импульс налетавшего фотона, если энергия рассеянного фотона равна кинетической энергии электрона отдачи при угле  $90^\circ$  между направлениями их разлета.

**1.23.** При рассеянии кванта на свободном покоящемся электроном угол вылета электрона  $\varphi$  (рис. 2) оказался таким, что  $\operatorname{tg}\varphi = 1/2$ , а угол рассеяния кванта  $\theta = \pi/2$ . Найти энергию кванта в  $mc^2$ .

**1.24.** Определить величину комптоновского смещения, если начальная длина волны фотона  $\lambda_0 = 0.0242 \text{ \AA}$ , а скорость электрона отдачи определяется соотношением  $v/c = 0.6$ . Считать, что до столкновения электрон покоился.

**1.25.** Излучение  $\text{CO}_2$  - лазера ( $\lambda_0 = 10 \text{ мкм}$ ) рассеивается на релятивистском электронном пучке с энергией  $E = 5 \text{ ГэВ}$ , движущемся навстречу. Какова длина волны излучения, рассеиваемого назад?

**1.26.** В результате столкновения фотона с покоившимся свободным электроном углы, под которыми рассеялся фотон и отлетел электрон отдачи, оказались одинаковыми и угол между направлениями их разлета  $\theta = 100^\circ$ . Найти длину волны налетающего фотона.

**1.27.** Найти энергию налетающего фотона, если известно, что при рассеянии под углом  $\theta = 60^\circ$  на покоящемся свободном электроном последний приобрел кинетическую энергию  $K = 450 \text{ кэВ}$ .

**1.28.** Фотон с энергией  $1 \text{ МэВ}$  рассеялся на покоившемся свободном электроном. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, если в результате рассеяния длина волны фотона изменилась на  $\eta = 25\%$ .

**1.29.** Фотон с энергией, превышающей энергию покоя электрона в  $1.5$  раза, испытал лобовое столкновение с покоившемся свободным электроном, который находится в однородном магнитном поле. В результате электрон отдачи стал двигаться по окружности радиусом  $R = 2.9 \text{ см}$ . Найти индукцию магнитного поля.

**1.30.** Фотон с энергией  $h\nu$  испытал столкновение с электроном, который двигался ему навстречу. В результате столкновения направление движения фотона изменилось на противоположное, а его энергия оказалась прежней. Найти скорость электрона до и после столкновения.

**1.31.** При каком значении скорости релятивистского электрона его энергия равна энергии фотона с длиной волны в  $\eta = 5/3$  раза меньше  $\lambda_C$  – комптоновской длины волны электрона?

**1.32.** Фотон с длиной волны  $\lambda = 4,2 \text{ пм}$  испытал лобовое столкновение с электроном, двигавшимся ему навстречу со скоростью  $v$ . Найти  $v$ , если после столкновения фотон движется в обратном направлении с той же длиной волны.

**1.33.** Фотон с энергией  $\varepsilon$  испытал лобовое столкновение с электроном, двигавшимся ему навстречу с кинетической энергией  $K$ . Найти энергию фотона после столкновения, если он движется в обратном направлении, при условии, что  $K \gg m_0c^2$ , где  $m_0$  — масса электрона.

### **Законы равновесного теплового излучения абсолютно черного тела.**

- 2.1.** Лампа накаливания имеет температуру  $T = 2500$  К. Определить какая часть энергии излучается в видимом диапазоне (от 400 нм до 800 нм)?
- 2.2.** Начальная температура абсолютно черного тела  $T = 2000$  К. На сколько градусов изменилась температура равновесного теплового излучения, если длина волны, соответствующая максимуму в спектре  $\lambda_{\text{max}}$  увеличилась на  $\Delta\lambda = 260$  нм?
- 2.3.** Показать связь между законом Стефана-Больцмана и формулой Планка.
- 2.4.** Радиус Солнца  $R = 7 \cdot 10^{10}$  см, а температура его поверхности  $T = 6000$  К. Оценить, используя закон Стефана-Больцмана, величину энергии, излучаемую Солнцем за 1 с.
- 2.5.** Какое количество солнечной энергии каждую секунду приходится на поверхность Земли?
- 2.6.** Оценить число фотонов равновесного электромагнитного излучения в единице объема при температуре 300 К.
- 2.7.** Найти с помощью формулы Планка среднее значение частоты  $\langle\omega\rangle$  в спектре теплового излучения при  $T = 2000$  К.
- 2.8.** Производится облучение поверхности металла с работой выхода  $A_{\text{вых}} = 3$  эВ. Спектральный состав излучения источника соответствует равновесному тепловому с температурой  $T = 5700$  К. Найти среднюю кинетическую энергию фотоэлектронов, считая, что вероятность вырывания электрона фотоном не зависит от длины волны излучения.
- 2.9.** Определить с помощью формулы Планка температуру теплового излучения, средняя длина волны которого  $\langle\lambda\rangle = 2.67$  мкм.
- 2.10.** Вычислить с помощью формулы Планка при  $T = 1000$  К наиболее вероятную и среднюю энергии фотонов.
- 2.11.** Найти число фотонов равновесного электромагнитного излучения в единице объема при температуре 3 К.

### **Теория Бора атома водорода.**

- 3.1.** Используя теорию Бора, вычислить радиус третьей орбиты в атоме водорода и скорость движения электрона на ней.
- 3.2.** Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны  $\lambda = 121.6$  нм. Определить радиус  $R$  электронной орбиты возбужденного атома водорода.
- 3.3.** На какой орбите электрон атома водорода имеет скорость, приблизительно равную 734 км/с?
- 3.4.** Определить частоту света, излучаемого атомом водорода, при переходе электрона на уровень с главным квантовым числом  $n = 2$ , если радиус орбиты электрона уменьшился в 9 раз.

- 3.5.** На сколько изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны  $\lambda = 486 \text{ нм}$ ?
- 3.6.** При переходе электрона в атоме водорода из возбужденного состояния в основное радиус орбиты электрона уменьшился в 16 раз. Определить длину волны излученного фотона.
- 3.7.** Найти скорость фотоэлектронов, вырывааемых электромагнитным излучением с длиной волны  $\lambda = 18 \text{ нм}$  из ионов  $\text{He}^+$ , которые находятся в основном состоянии и покоятся.
- 3.8.** Фотон с длиной волны: а)  $\lambda = 500 \text{ \AA}$ , б)  $\lambda = 0.024 \text{ \AA}$  вырывает электрон из атома водорода. Чему равна скорость вырванного электрона?
- 3.9.** Используя теорию Бора, определить орбитальный магнитный момент электрона, движущегося по второй орбите атома водорода.
- 3.10.** Используя теорию Бора, определить изменение орбитального механического момента электрона при переходе его из возбужденного состояния ( $n = 2$ ) в основное с испусканием фотона с длиной волны  $\lambda = 121.6 \text{ нм}$ .

### **Волновые свойства частиц.**

#### **Волны де Бройля. Соотношение неопределенностей.**

- 4.1.** Электрон ускорен разностью потенциалов 100 В. Найти групповую и фазовую скорости волн де Бройля. То же рассчитайте и при разности потенциалов  $10^5 \text{ В}$ .
- 4.2.** Определить длину волны де Бройля для электрона, движущегося со средней квадратичной скоростью при температуре 290 К.
- 4.3.** При каком значении скорости длина волны де Бройля микрочастицы равна ее комптоновской длине волны?
- 4.4.** В электронном микроскопе энергия пучка электронов  $E = 100 \text{ кэВ}$ . Определить его предельно возможную разрешающую способность.
- 4.5.** Оценить неопределенность скорости электрона в атоме водорода, полагая размер атома порядка 0.1 нм. Сравнить полученное значение со скоростью электрона на первой боровской орбите.
- 4.6.** В некоторый момент область локализации свободного электрона  $\Delta x_0 = 0.1 \text{ нм}$ . Оценить ширину области локализации этого электрона спустя промежуток времени  $t = 1 \text{ с}$ .
- 4.7.** Оценить минимальную кинетическую энергию электрона, локализованного в области размером  $l = 0.1 \text{ нм}$ .
- 4.8.** Электрон с кинетической энергией  $K = 10 \text{ эВ}$  локализован в области размером  $l = 1 \text{ мкм}$ . Оценить относительную неопределенность скорости электрона.
- 4.9.** Частица массы  $m$  локализована в области размером  $l$ . Оценить кинетическую энергию частицы, при которой ее относительная неопределенность будет порядка 1%.

**4.10.** Ширина следа электрона на фотопластинке, полученного с помощью камеры Вильсона, 1 мкм. Определить, можно ли по данному следу обнаружить отклонение в движении электрона от законов классической механики? Кинетическую энергию электрона принять 15 эВ. (воспользоваться соотношением неопределенности)

**4.11.** Прямолинейная траектория частицы в камере Вильсона представляет собой цепочку малых капелек тумана, размер которых 1 мкм. Можно ли, наблюдая след электрона с кинетической энергией  $K = 1$  кэВ, обнаружить отклонение в его движении от классических законов?

#### Дифракция частиц.

**4.12.** Параллельный пучок электронов, разогнанных в электрическом поле с разностью потенциалов 15 В, падает на узкую прямоугольную диафрагму шириной 0,08 мм. Найти ширину главного дифракционного максимума на экране, расположенном на расстоянии 60 см от диафрагмы.

**4.13.** Электроны с энергией 40 кэВ падают нормально на щель шириной  $b = 6 \cdot 10^{-5}$  см. Под какими углами обнаружатся первые дифракционные минимум и максимум.

**4.14.** Пучок электронов с кинетической энергией  $K = 180$  эВ падает нормально на поверхность монокристалла никеля. В направлении, составляющем угол  $\alpha = 55^\circ$  с нормалью к поверхности, наблюдается максимум отражения четвертого порядка. Найти межплоскостное расстояние, соответствующее этому отражению.

**4.15.** Поток моноэнергетических электронов падает нормально на диафрагму с узкой щелью шириной  $b = 2.0$  мкм. Найти скорость электронов, если на экране, отстоящем от щели на  $l = 50$  см, ширина центрального дифракционного максимума  $\Delta x = 0.36$  мм.

**4.16.** Найти кинетическую энергию электронов, падающих нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, если на экране, отстоящем от диафрагмы на  $l = 75$  см, расстояние между соседними максимумами  $\Delta x = 7.5$  мкм. Расстояние между щелями  $d = 25$  мкм.

**4.17.** Поток летящих электронов параллельно друг другу проходит щель шириной 0,01 мм со скоростью  $v_x = 10^5$  м/с. Найти ширину центрального дифракционного максимума, наблюдаемого на экране, отстоящем от щели на расстоянии 1 м. Сравнить с шириной щели.

**4.18.** Ускоряющее напряжение на электронно-лучевой трубке  $U = 10$  кВ. Расстояние от электронной пушки до экрана  $l = 20$  см. Оценить неопределенность координаты электрона на экране, если след электронного пучка на экране имеет диаметр  $d = 0.5$  мм.

**4.19.** Параллельный пучок атомов водорода со скоростью  $V = 600$  м/с падает нормально на узкую щель, за которой на расстоянии  $l = 1$  м расположен экран. Оценить с помощью соотношения неопределенностей ширину  $b$  щели, при которой ширина изображения ее на экране будет минимальной.