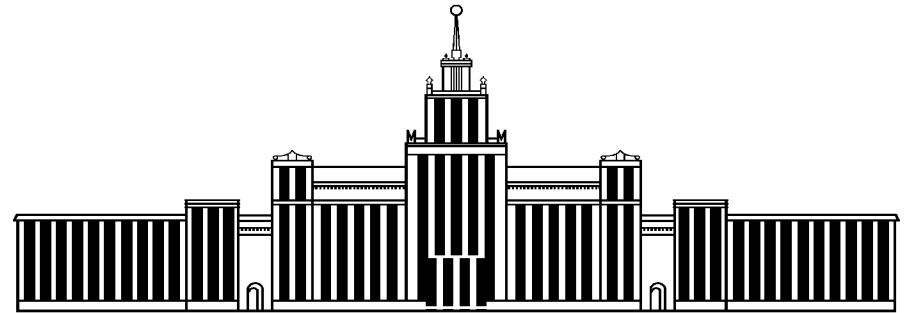

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

535(07)
Ш957

А.А. Шульгинов, Д.Г. Кожевников, А.Я. Лейви

ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Рабочая программа и задания для студентов
МТ и АТ факультетов

Челябинск
2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра общей и экспериментальной физики

535(07)
Ш957

А.А. Шульгинов, Д.Г. Кожевников, А.Я. Лейви

ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Рабочая программа и задания для студентов
МТ и АТ факультетов

Под редакцией А.А. Шульгинова

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2012

УДК 535(076.5)+539.1(076.5)
Ш957

*Одобрено
учебно-методической комиссией
физического факультета*

*Рецензенты:
А.Е. Майер, А.В. Шушарин*

Шульгинов, А.А.

Ш957 Оптика, атомная и ядерная физика: рабочая программа и задания для студентов МТ и АТ факультетов / А.А. Шульгинов, Д.Г. Кожевников, А.Я. Лейви; под. ред. А.А. Шульгинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 38 с.

Пособие предназначено для студентов технических специальностей ЮУрГУ, изучающих заключительную часть трёх семестрового курса физики. Оно содержит рабочую программу по оптике, специальной теории относительности, основам квантовой физики, атомной, ядерной физике и физике элементарных частиц, которая включает план 18 лекций, 8 практических и 9 лабораторных занятий. Для каждого практического занятия имеется список основных понятий, которые студент должен усвоить перед выполнением задания и список вопросов по данной теме, а также примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения. Рабочая программа соответствует примерной программе дисциплины «Физика» федерального компонента цикла общих математических и естественнонаучных дисциплин для ГОС 3-го поколения.

УДК 535(076.5)+539.1(076.5)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2012

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Лекции (36 часов); практика (18 часов); лабораторные работы (18 часов).

Таблица 1

№ лек.	План лекций	Тема практического занятия (ПЗ)
1	<p>Раздел 5. ОПТИКА</p> <p>Тема 1. Интерференция света</p> <p>Когерентность и монохроматичность световых волн. Оптическая длина пути. Опыт Юнга. Расчёт интерференционной картины от двух когерентных источников. Потеря половины длины волны при отражении света. Интерференция в тонких плёнках. Кольца Ньютона.</p>	—
2	<p>Опыты Френеля и Ллойда. Интерферометр Майкельсона. Многолучевая интерференция. Интерферометр Фабри-Перо. Временная и пространственная когерентность. Время и длина когерентности</p>	ПЗ № 1. Интерференция света
3	<p>Тема 2. Дифракция света</p> <p>Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера</p>	—
4	<p>Дифракционная решётка как спектральный прибор. Разрешающая способность. Дифракция на пространственной решётке. Формула Вульфа-Брэгга. Исследование структуры кристаллов. Голография</p>	ПЗ № 2. Дифракция света
5	<p>Тема 3. Поляризация света</p> <p>Форма и степень поляризации монохроматических волн. Получение и анализ линейно-поляризованного света. Закон Малюса. Линейное двулучепреломление. Прохождение света через линейные фазовые пластинки.</p>	—

№ лек.	План лекций	Тема ПЗ
6	<p>Тема 4. Электромагнитные волны в веществе Нормальная и аномальная дисперсия света. Поглощение и рассеяние света. Искусственная оптическая анизотропия. Фотоупругость. Электрооптические и магнитооптические явления Отражение и преломление света на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Эффект Брюстера. Полное отражение и его применение в технике.</p>	<p>ПЗ № 3. Поляризация света</p>
7	<p>Тема 5. Тепловое излучение Тепловое излучение и люминесценция. Спектральные характеристики теплового излучения. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и закон смещения Вина. Абсолютно чёрное тело. Формула Релея-Джинса и «ультрафиолетовая катастрофа»</p>	—
8	<p>Гипотеза квантов. Формула Планка. Квантовое объяснение законов теплового излучения. Корпускулярно-волновой дуализм света.</p>	<p>ПЗ № 4. Законы теплового излучения</p>
9	<p>Тема 6. Квантовые свойства света Фотоны. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Обратный фотоэффект. Давление света. Опыт Лебедева. Эффект Комптона. Вывод формулы Комптона</p>	—
10	<p>Раздел 6. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ Принцип относительности и преобразования Галилея. Экспериментальные обоснования специальной теории относительности. Постулаты специальной теории относительности. Относительность одновременности и преобразования Лоренца. Сокращение длины и замедление времени в движущихся системах отсчета. Релятивистский закон сложения скоростей. Эффект Доплера</p>	<p>ПЗ № 5. Квантовые свойства света</p>

№ лек.	План лекций	Тема ПЗ
11	<p>Релятивистский импульс. Основной закон релятивистской динамики материальной точки.</p> <p>Релятивистское выражение для кинетической энергии. Взаимосвязь массы и энергии. Энергия связи системы. Соотношение между полной энергией и импульсом частицы. Общефизический закон сохранения энергии</p>	—
12	<p>Раздел 7. АТОМНАЯ ФИЗИКА И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА</p> <p>Тема 1. Планетарная модель атома</p> <p>Модель атома Томсона. Опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Ядерная модель атома. Эмпирические закономерности в атомных спектрах. Формула Бальмера. Линейчатые спектры атомов. Комбинационный принцип Ритца</p>	<p>ПЗ № 6.</p> <p>Специальная теория относительности</p>
13	<p>Тема 2. Элементы квантовой механики</p> <p>Гипотеза де Бройля. Опыты Дэвиссона и Джермера. Дифракция микрочастиц. Принцип неопределенности Гейзенберга. Волновая функция, ее статистический смысл и условия, которым она должна удовлетворять. Уравнение Шредингера. Квантовая частица в одномерной потенциальной яме. Одномерный потенциальный порог и барьер.</p>	—
14	<p>Тема 3. Квантово-механическое описание атомов</p> <p>Стационарное уравнение Шредингера для атома водорода. Волновые функции и квантовые числа. Правила отбора для квантовых переходов. Опыт Штерна и Герлаха. Эффект Зеемана. Строение атомов и периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева. Порядок заполнения электронных оболочек. Принцип Паули</p>	<p>ПЗ № 7.</p> <p>Квантовая механика</p>

№ лек.	План лекций	Тема ПЗ
15	<p>Тема 4. Оптические квантовые генераторы Спонтанное и индуцированное излучение. Инверсное заселение уровней активной среды. Основные компоненты лазера. Условие усиления и генерации света. Особенности лазерного излучения. Основные типы лазеров и их применение</p>	—
16	<p>Раздел 8. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ</p> <p>Тема 1. Атомное ядро Состав атомного ядра. Характеристики ядра: заряд, масса, энергия связи нуклонов. Радиоактивность. Виды и законы радиоактивного излучения. Ядерные реакции. Деление ядер. Синтез ядер. Детектирование ядерных излучений. Понятие о дозиметрии и защите.</p>	ПЗ № 8. Ядерная физика
17	<p>Тема 2. Элементарные частицы Фундаментальные взаимодействия и основные классы элементарных частиц. Частицы и античастицы. Лептоны и адроны. Кварки. Электрослабое взаимодействие. Стандартная модель элементарных частиц.</p>	—
18	<p>Раздел 9. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА Особенности классической и неклассической физики. Методология современных научно-исследовательских программ в области физики. Основные достижения и проблемы субъядерной физики. Попытки объединения фундаментальных взаимодействий и создания «теории всего». Современные космологические представления. Достижения наблюдательной астрономии. Теоретические космологические модели. Антропный принцип. Революционные изменения в технике и технологиях как следствие научных достижений в области физики. Физическая картина мира как философская категория. Парадигма Ньютона и эволюционная парадигма.</p>	Итоговая контрольная работа

Для самостоятельного изучения этих разделов рекомендуются пособия [1–4].

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Таблица 2

№ зан.	Тематика лабораторных работ	Названия лабораторных работ (ЛР)
1	Интерференция света	ЛР 1. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона
2		ЛР 3. Измерение показателя преломления воздуха с помощью интерферометра
3	Дифракция света	ЛР 2. Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки
4	Поляризация света	ЛР 4. Определение угла полной поляризации и проверка закона Малюса
5	Тепловое излучение	ЛР 7. Исследование спектра испускания твёрдых тел
6		ЛР 12. Измерение температуры и степени черноты тела методом спектральных отношений
7	Фотоэффект	Выполняется одна работа. ЛР 8. Снятие спектральной характеристики фотоэлемента и определение работы выхода ЛР 13. Исследование внешнего фотоэффекта
8		ЛР 10. Изучение α -распада
9	Ядерная физика	ЛР 11. Определение верхней границы энергии β -спектра

Описания лабораторных работ имеются в пособии [5].

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О РЕШЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

1. Практика показывает, что студент терпит неудачу в решении задач по физике чаще всего из-за неглубоких, формальных знаний теории. Поэтому, прежде чем приступить к решению, тщательно проработайте соответствующий теоретический материал [1–4].

2. Внимательно прочитайте условие задачи. Если позволяет характер задачи, обязательно сделайте схематический рисунок, поясняющий ее сущность. На рисунке необходимо показать все векторные величины, используемые в задаче. Это во многих случаях резко облегчает как поиск решения, так и само решение.

3. Задачи следует решать в общем виде. Для этого нужно обозначить все величины соответствующими буквами, и с помощью физических законов установить математическую связь между исходными данными и искомой величиной. При этом все математические преобразования необходимо сопровождать подробным объяснением. В результате получается одно или несколько уравнений, и физическая задача сводится к математической.

4. Получив для искомой величины решение в общем виде, нужно проверить её наименование в системе СИ. Неверное наименование есть явный признак ошибочности решения.

5. Убедившись, что общее решение верно, в него подставляют числовые значения величин в СИ. Если исходные или конечные величины значительно больше или значительно меньше единицы, то числа пишут в стандартном виде (например, вместо 0,00000056 м писать $5,6 \cdot 10^{-7}$ м или 560 нм, вместо 511000 эВ – число $5,11 \cdot 10^5$ эВ или 0,511 МэВ).

6. Так как числовые значения физических величин всегда бывают приближенными, то при расчетах необходимо округлять результат. В частности, в полученном значении вычисленной величины нужно сохранить последним тот знак, единица которого превышает погрешность этой величины. Все остальные значащие цифры надо отбросить. Обычно при решении физических задач в окончательном ответе, считается достаточным оставлять три значащие цифры и обязательно указать единицы измерения результирующей величины.

7. Получив числовой ответ, нужно оценить его правдоподобность. Такая оценка может в ряде случаев обнаружить ошибочность полученного результата.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

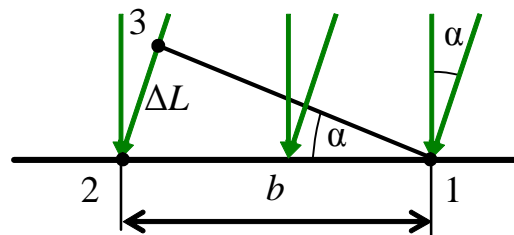
Основные понятия: интерференция, точечный источник света, плоская световая волна, разность фаз, оптический ход луча, световой вектор, интенсивность.

Контрольные вопросы

1. Какие волны называются когерентными?
2. Что такое длина и время когерентности?
3. Чем оптическая длина пути отличается от геометрической?
4. Почему протяженные источники света не дают чёткой интерференционной картины?
5. Почему не наблюдается интерференция света от двух настольных ламп? Почему она не будет наблюдаться, даже если лампы сделать монохроматическими?
6. Почему при наблюдении интерференции на мыльных пленках их цвета все время меняются?
7. Будет ли наблюдаться кольца Ньютона, если плоскую пластинку заменить на выпуклую/вогнутую? Если да, то как изменится диаметр колец Ньютона при прочих равных условиях?
8. Куда исчезает энергия волн, которая не попадает на тёмные участки интерференционной картины?

Примеры решения задач

Задача 1. Две когерентные световые волны ($\lambda = 500$ нм) встречаются под углом 1° . Определить расстояние b между интерференционными полосами на экране, расположенном в месте встречи волновых фронтов перпендикулярно распространению волны 2.



Решение. Допустим, на экран падают две волны. В точке 1 они пришли в одной фазе, то есть в точке 1 наблюдается светлая интерференционная полоса. Тогда соседняя с ней светлая интерференционная полоса должна наблюдаться в точке 2, где разность хода вертикального и наклонного лучей будет равна одной длине волны:

$$\Delta L = \lambda. \quad (1.1)$$

Из прямоугольного треугольника 1-2-3 найдём гипотенузу b :

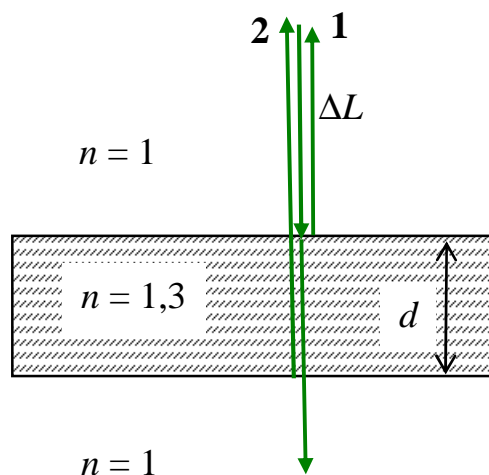
$$b = \frac{\Delta L}{\sin \alpha} = \frac{\lambda}{\sin \alpha}. \quad (1.2)$$

$$b = \frac{\lambda}{\sin \alpha} = \frac{500 \cdot 10^{-9}}{\sin 1^\circ} = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{0,017} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 28 \text{ мкм}. \quad (1.3)$$

Ответ: расстояние между интерференционными полосами на экране равно 28 мкм.

Задача 2. На мыльную плёнку ($n = 1,3$), находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого цвета. При какой наименьшей толщине d плёнки отражённый свет с длиной волны $\lambda = 0,55$ мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

Решение. При падении света на тонкую пленку часть света отражается от верхней поверхности пленки, а часть проходит дальше и отражается от нижней поверхности. Если оптическая разность хода между отражёнными лучами ΔL будет кратна целому числу длин волн λ , то они будут усиливать друг друга. Луч **1** отражается от оптически более плотной среды, поэтому испытывает потерю оптического хода на полволны. Луч **2** проходит путь, равный удвоенной толщине пленки в среде с показателем преломления n и отражается от оптически менее плотной среды. Потери оптического хода волны в этом случае не происходит. Значит, оптическая разность хода двух лучей равна:



$$\Delta L = L_2 - L_1 = 2dn - (-\lambda/2). \quad (2.1)$$

С другой стороны, оптическая разность хода лучей **1** и **2** должна удовлетворять условию максимума:

$$\Delta L = k\lambda. \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.2)$$

Приравнявая (2.1) и (2.2), получаем:

$$2dn + \frac{\lambda}{2} = k\lambda. \quad (2.3)$$

Отсюда:

$$d = \frac{k\lambda - \lambda/2}{2n}. \quad (2.4)$$

Толщина плёнки будет минимальной при $k = 1$:

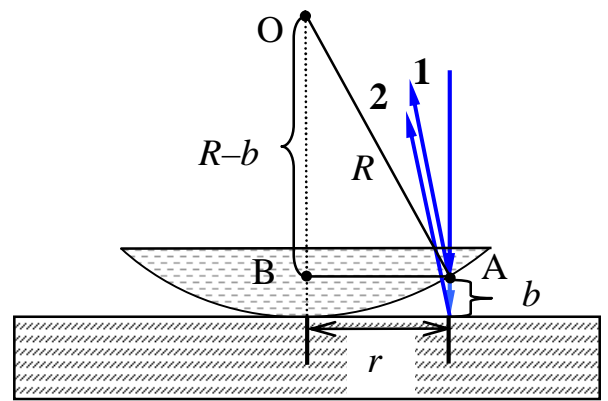
$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}. \quad (2.5)$$

$$d_{\min} = \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{4 \cdot 1,3} = 0,106 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,106 \text{ мкм}. \quad (2.6)$$

Ответ: $d_{\min} = 0,106$ мкм.

Задача 3. Диаметр d_3 третьего светлого кольца Ньютона равен 4,8 мм. Кольца наблюдались в отражённом свете ($\lambda = 0,5$ мкм). Найти радиус R кривизны плоско-выпуклой линзы, взятой для опыта.

Решение. Рассмотрим луч, падающий на линзу там, где наблюдается третье светлое кольцо. Луч **1** отражается от сферической поверхности линзы. Потери оптического хода луча **1** при отражении не происходит, т.к. он отражается от оптически менее плотной среды. Луч **2** отражается от стеклянной пластины. При этом происходит уменьшение оптического хода луча **2** на $\lambda/2$, т.к. он отражается от оптически более плотной среды. Учтём также, что этот луч дважды проходит воздушный зазор толщиной b . Тогда, оптическая разность хода между отражёнными лучами составит:



$$\Delta L = L_2 - L_1 = \left(2b - \frac{\lambda}{2} \right) - 0. \quad (3.1)$$

Поскольку кольцо светлое, то оптическая разность хода ΔL между лучами **1** и **2** кратна целому числу длин волн λ .

$$\Delta L = m\lambda. \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3.2)$$

Приравняем (3.1) и (3.2):

$$2b - \frac{\lambda}{2} = m\lambda. \quad (3.3)$$

Из треугольника OAB находим связь между радиусом линзы R , радиусом кольца Ньютона r и толщиной воздушной прослойки b .

$$r^2 + (R - b)^2 = R^2, \quad (3.4)$$

$$r^2 + R^2 - 2Rb + b^2 = R^2. \quad (3.5)$$

Учитывая, что $b^2 = 2Rb$, получим:

$$2b \approx \frac{r^2}{R}. \quad (3.6)$$

Подставим (3.6) в (3.3):

$$\frac{r^2}{R} - \frac{\lambda}{2} = m\lambda. \quad (3.7)$$

Отсюда радиус кривизны линзы равен:

$$R = \frac{r^2}{\lambda(m + 1/2)}. \quad (3.8)$$

Первое светлое кольцо Ньютона соответствует минимальному числу $m = 0$. Значит, третье кольцо соответствует $m = 2$. Радиус кольца r равен 2,4 мм.

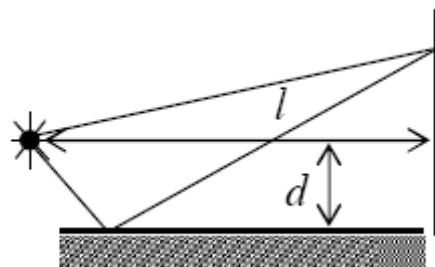
$$R = \frac{(2,4 \cdot 10^{-3})^2}{0,5 \cdot 10^{-6} (2 + 1/2)} = 4,6 \text{ м} \quad (3.9)$$

Ответ: $R = 4,6 \text{ м}$.

Задачи для самостоятельного решения

Эти задачи необходимо представить на проверку к следующему практическому занятию на отдельном листе. Условия задач не переписывать.

1.1. Зеркало Ллойда расположено на расстоянии $d = 1$ мм от луча, исходящего от источника когерентного света. Расстояние до экрана $l = 1$ м. Определить ширину интерференционной полосы на экране b . Длина волны излучения $\lambda = 0,7$ мкм.



1.2. Расстояние d между двумя когерентными источниками света ($\lambda = 0,5$ мкм) равно $0,1$ мм. Расстояние b между интерференционными полосами на экране в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определить расстояние l от источников до экрана.

1.3. Пучок лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм падает по нормали на преграду с двумя узкими щелями, расстояние между которыми $d = 5,00$ мм. На экране, установленном за преградой, наблюдается система интерференционных полос. В какую сторону и на какое число полос сместится интерференционная картина, если одну из щелей перекрыть прозрачной плёнкой толщины $h = 10,0$ мкм, изготовленной из материала с показателем преломления $n = 1,633$?

1.4. Плоскопараллельная плёнка толщиной $d = 1,2$ мкм и показателем преломления $n = 1,5$ помещена между двумя средами с показателями преломления n_1 и n_2 . Свет длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм падает нормально на плёнку. Определить оптическую разность хода ΔL волн, отражённых от верхней и нижней поверхностей плёнки, и указать, усиление или ослабление интенсивности света происходит при интерференции в следующих случаях: а) $n_1 < n < n_2$; б) $n_1 < n > n_2$.

1.5. На тонкий стеклянный клин ($n = 1,55$) падает нормально монохроматический свет. Двугранный угол α между поверхностями клина равен $2'$. Определить длину световой волны λ , если расстояние b между смежными интерференционными максимумами в отражённом свете равно $0,3$ мм.

1.6. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой стеклянной линзой налита жидкость, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла. Радиус r_8 восьмого тёмного кольца Ньютона при наблюдении в отражённом свете ($\lambda = 0,7$ мкм) равен 2 мм. Радиус R кривизны выпуклой поверхности линзы равен 1 м. Найти показатель преломления жидкости n .

1.7. Расстояние между 5-ым и 15-ым светлыми кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, равно 3 мм. Определить радиус кривизны линзы, если наблюдение проводится в лучах с длиной волны 450 нм.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Основные понятия: зоны Френеля, дифракция света, дифракционная решетка, дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера.

Контрольные вопросы

1. Что такое дифракция волн?
2. Сформулировать принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Что такое зоны Френеля?
4. Почему явление дифракции не наблюдается на заборах, решетках и чайном ситечке?
5. Чем дифракция в ближней зоне отличается от дифракции в дальней?

Примеры решения задач

Задача 1. Свет от монохроматического источника ($\lambda = 0,6$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием. Диаметр отверстия $d = 6$ мм. За диафрагмой на расстоянии $l = 3$ м от неё находится экран. 1) Сколько зон Френеля укладывается в отверстие диафрагмы? 2) Каким будет центр дифракционной картины на экране: тёмным или светлым?

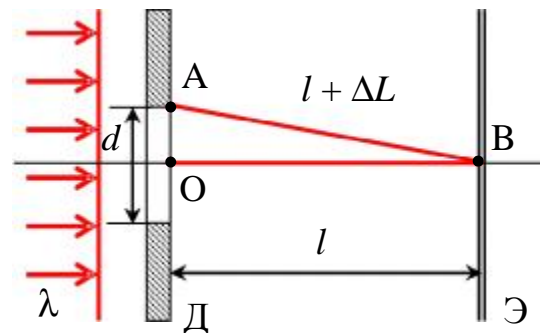
Решение. 1) Каждая точка волнового фронта, прошедшего через отверстие в диафрагме Д, согласно принципу Гюйгенса-Френеля, является источником вторичных сферических волн. Эти волны, попадая на экран Э, интерферируют, в результате чего образуется картина дифракции. Чтобы определить, каким будет центр дифракционной картины (точка В): светлым или тёмным, необходимо определить количество зон Френеля, прошедших через отверстие диафрагмы. Зоной Френеля называется участок волнового фронта, у которого оптическая разность хода лучей, исходящих из краёв, равна $\lambda/2$. Чтобы определить число зон Френеля, проходящих через отверстие диафрагмы, необходимо определить оптическую разность хода ΔL лучей, исходящих их центра отверстия О и от края отверстия А. Для прямоугольного треугольника ОАВ воспользуемся теоремой Пифагора:

$$l^2 + (d/2)^2 = (l + \Delta L)^2, \quad (1.1)$$

$$l^2 + (d/2)^2 = l^2 + 2l\Delta L + \Delta L^2. \quad (1.2)$$

Учтём, что $\Delta L^2 = 2l\Delta L$, тогда:

$$\Delta L \approx \frac{d^2}{8l}. \quad (1.3)$$



На каждую зону Френеля приходится оптическая разность хода лучей $\lambda/2$, поэтому число действующих зон Френеля n определяется по формуле:

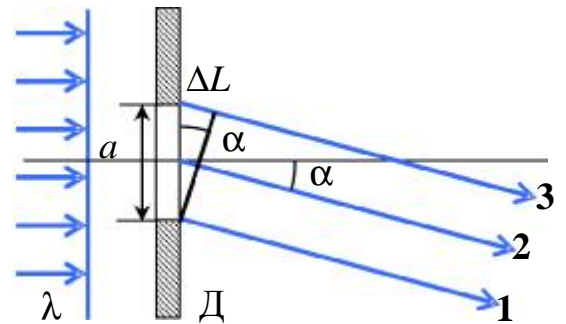
$$n = \frac{\Delta L}{\lambda/2} = \frac{d^2}{4l\lambda} = 5. \quad (1.4)$$

2) Излучения, приходящие в точку наблюдения из соседних зон Френеля, находятся в противофазе, поэтому они гасят друг друга. Если число действующих зон Френеля чётное, то в данной точке будет наблюдаться минимум интенсивности излучения. Если число действующих зон Френеля нечётное, то излучение одной из зон не будет погашено, значит, в данной точке будет наблюдаться максимум интенсивности. Получено, что $n = 5$, число нечётное, значит, центр дифракционной картины будет светлым.

Ответ: $n = 5$, центр дифракционной картины на экране светлый.

Задача 2. На щель в диафрагме падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Ширина щели $a = 6\lambda$. Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

Решение. Каждая точка волнового фронта, прошедшего через щель диафрагмы Д, является источником вторичных сферических волн, которые распространяются во всех направлениях. Поскольку по условию задачи требуется определить угол, под которым наблюдается дифракционный минимум света, необходимо выделить только параллельные лучи, которые идут под одним и тем же углом. Дифракция в параллельных лучах – дифракция Фраунгофера – наблюдается в бесконечно далёкой области там, где сходятся параллельные лучи. Волновой фронт, проходящий через щель, можно разбить на зоны. Максимальная оптическая разность хода ΔL будет между лучами 1 и 3. Она может быть определена следующим образом:



$$\Delta L = a \sin \alpha. \quad (2.1)$$

На каждую зону Френеля приходится оптическая разность хода $\lambda/2$. Поэтому, число действующих зон Френеля равно:

$$n = \frac{\Delta L}{\lambda/2} = \frac{a \sin \alpha}{\lambda/2}. \quad (2.2)$$

Если на щели укладывается чётное число зон Френеля ($n = 2m; m = 1, 2, 3, \dots$), тогда в данном направлении будет наблюдаться дифракционный **минимум**:

$$2m = \frac{a \sin \alpha}{\lambda/2} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{m\lambda}{a} = \frac{3\lambda}{6\lambda} = \frac{1}{2}. \quad (2.3)$$

Ответ: $\alpha = 30^\circ$.

Задача 3. Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решётка, если при наблюдении в монохроматическом свете ($\lambda = 0,6$ мкм) максимум пятого порядка отклонён на угол $\varphi = 18^\circ$?

Решение. Дифракционная решётка это специальная диафрагма, содержащая большое количество параллельных щелей, находящихся на равном расстоянии друг от друга. Допустим, что монохроматический свет с плоским волновым фронтом падает по нормали на дифракционную решётку. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн. Выделим только те лучи, прошедшие через дифракционную решётку, которые распространяются под углом дифракции φ . Если d – период дифракционной решётки (расстояние между соседними щелями), оптическая разность хода между соседними лучами равна:

$$\Delta L = d \sin \varphi. \quad (3.1)$$

Если выполняется условие:

$$\begin{aligned} \Delta L &= m\lambda, \\ (m &= 1, 2, 3, \dots), \end{aligned} \quad (3.2)$$

то лучи будут усиливать друг друга в результате интерференции. Тогда под определёнными углами будут наблюдаться главные максимумы излучения. Приравнявая выражения (3.1) и (3.2), получаем формулу дифракционной решётки:

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (3.3)$$

где m – порядок дифракционного максимума.

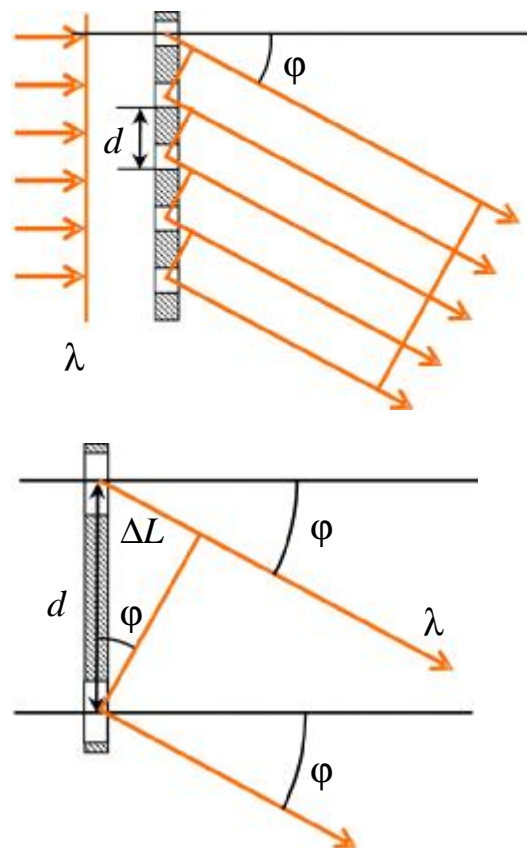
Из формулы (3.3) получаем:

$$d = \frac{m\lambda}{\sin \varphi} = 9,71 \text{ мкм} \approx 0,01 \text{ мм}. \quad (3.4)$$

Расстояние между штрихами равно 0,01 мм значит, на 1 мм дифракционной решётки приходится 100 штрихов.

Ответ: $N = 100$ штрихов на миллиметр.

Задача 4. Параллельный пучок рентгеновского излучения падает на грань кристалла. Под углом $\varphi = 65^\circ$ к плоскости грани наблюдается максимум третьего порядка. Расстояние d между атомными плоскостями кристалла 280 пм. Определить длину волны λ рентгеновского излучения.



Решение. Кристаллы являются естественными объёмными дифракционными решётками для рентгеновских лучей, поскольку длина волны рентгеновских лучей соизмерима с межатомными расстояниями в кристаллах. Рентгеновские лучи, падая на грань кристалла, испытывают множественные отражения от атомных плоскостей. Если φ – угол скольжения (угол между падающим лучом и атомной плоскостью), то оптическая разность хода между ближайшими отражёнными лучами составляет:

$$\Delta L = 2d \sin \varphi. \quad (4.1)$$

Отражённые лучи будут усиливать друг друга, когда выполняется условие:

$$\Delta L = m\lambda, \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (4.2)$$

Из этих выражений получаем условие Вульфа-Брэгга:

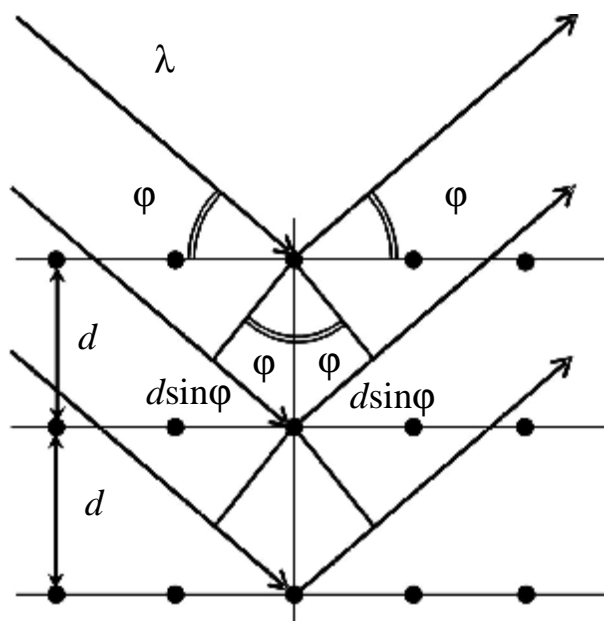
$$2d \sin \varphi = m\lambda. \quad (4.3)$$

Под углами скольжения, которые удовлетворяют условию (4.3), будут наблюдаться эффективные отражения рентгеновских лучей. Это явление называется дифракция Вульфа-Брэгга.

Используя условие (4.3), определяем длину волны рентгеновского излучения, падающего на кристалл:

$$\lambda = \frac{2d \sin \varphi}{m} = 169 \text{ пм}. \quad (4.4)$$

Ответ: $\lambda = 169 \text{ пм}$.



Задачи для самостоятельного решения

Эти задачи необходимо представить на проверку к следующему практическому занятию на отдельном листе. Условия задач не переписывать.

2.1. На диафрагму с круглым отверстием диаметром $d = 4 \text{ мм}$ падает нормально параллельный пучок лучей монохроматического света ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии $b = 1 \text{ м}$ от него. Сколько зон Френеля укладывается в отверстии? Тёмное или светлое пятно получится в центре дифракционной картины, если в месте наблюдений поместить экран?

2.2. На непрозрачную преграду с отверстием радиусом $r = 1,000$ мм падает монохроматическая плоская световая волна. Когда расстояние от преграды до установленного за ней экрана равно $b_1 = 0,575$ м, в центре дифракционной картины наблюдается максимум интенсивности. При увеличении расстояния до значения $b_2 = 0,862$ м максимум интенсивности сменяется минимумом. Определить длину волны λ света.

2.3. На щель шириной $d = 20$ мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Найти ширину b изображения щели на экране, удалённом от щели на $L = 1$ м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещённости.

2.4. На щель в диафрагме шириной $a = 0,05$ мм падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Определить угол φ между первоначальным направлением пучка света и направлением на четвёртую светлую дифракционную полосу, считая от середины (по середине – нулевая полоса).

2.5. На дифракционную решётку, содержащую $n = 100$ штрихов на миллиметр, падает нормально монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум третьего порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, её нужно повернуть на угол $\Delta\varphi = 20^\circ$. Определить длину волны λ света.

2.6. Падающий на дифракционную решетку свет состоит из двух резких спектральных линий с длинами волн $\lambda_1 = 490$ нм (голубой свет) и $\lambda_2 = 600$ нм (оранжевый свет) Первый дифракционный максимум для линии с длиной волны λ_1 располагается под углом $\varphi_1 = 10,0^\circ$. Найти угловое расстояние $\Delta\varphi$ между этими линиями в спектре второго порядка.

2.7. На грань кристалла каменной соли падает параллельный пучок рентгеновского излучения ($\lambda = 147$ пм). Определить расстояние d между атомными плоскостями кристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается, когда излучение падает под углом $\varphi = 31,5^\circ$ к поверхности кристалла.

2.8.* На дифракционную решетку с периодом $d = 2500$ нм падает под углом $\varphi_0 = 20,0^\circ$ к нормали свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Полагая углы, отсчитанные от нормали против часовой стрелки положительными, получить формулу, определяющую угловые положения главных максимумов.

* - дополнительная (необязательная) задача.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Основные понятия: показатель преломления среды, закон преломления света, полное внутреннее отражение, состояние поляризации света, закон Малюса, эффект Брюстера, степень поляризации.

Контрольные вопросы

1. Что такое показатель преломления среды?
2. Сформулировать закон преломления света на границе двух прозрачных сред. В каком случае наблюдается явление полного внутреннего отражения?
3. Чем поляризованный свет отличается от неполяризованного?
4. Какие существуют состояния поляризации?
5. Сформулировать закон Малюса.
6. Как определяется степень поляризации света?
7. Можно ли с помощью одного линейного поляризатора отличить циркулярно поляризованный свет от естественного?
8. В чём состоит эффект Брюстера? Как определить угол полной поляризации?

Примеры решения задач

Задача 1. Предельный угол полного внутреннего отражения $\varphi_{\text{пред}}$ для некоторого вещества равен 45° . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации $\varphi_{\text{Б}}$?

Решение. Луч света распространяется в среде с показателем преломления n и падает на границу раздела с воздухом. Угол преломления β будет больше чем угол падения α :

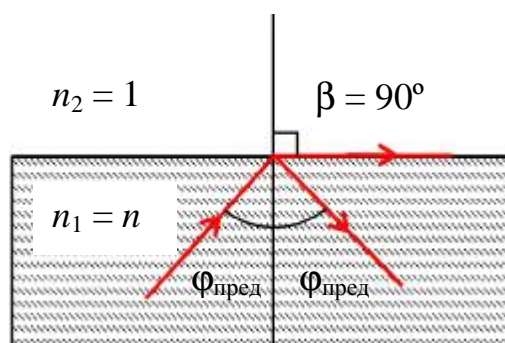
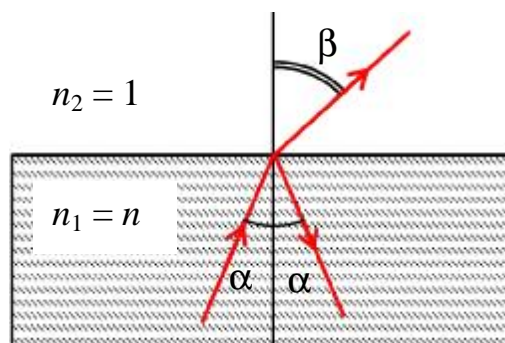
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n}. \quad (1.1)$$

Полное внутреннее отражение света на границе раздела возникает, когда угол преломления становится равным 90° . Минимальный угол падения, при котором наблюдается это явление, называется предельным углом полного внутреннего отражения $\varphi_{\text{пред}}$:

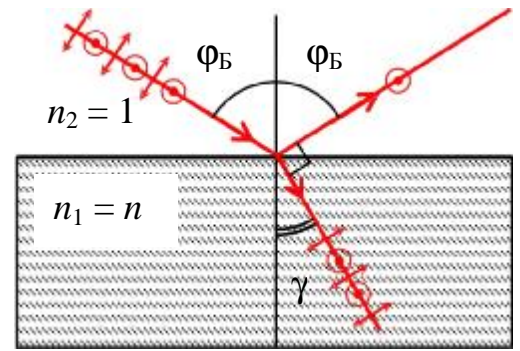
$$\frac{\sin \varphi_{\text{пред}}}{\sin 90^\circ} = \sin \varphi_{\text{пред}} = \frac{1}{n}, \quad (1.2)$$

$$\sin 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{n}, \quad (1.3)$$

$$n = \sqrt{2} \approx 1,41. \quad (1.4)$$



Допустим, что луч неполяризованного света падает на поверхность вещества с показателем преломления n . Если угол падения равен углу полной поляризации (углу Брюстера) φ_B , то отражённый луч будет линейно поляризован в плоскости перпендикулярной плоскости падения. Это явление наблюдается, когда луч отражённый и преломлённый образуют прямой угол.



Угол полной поляризации, он же угол Брюстера, это угол, при падении под которым отраженный свет полностью поляризован. Этот угол можно найти из закона преломления света:

$$\frac{\sin \varphi_B}{\sin \gamma} = \frac{\sin \varphi_B}{\sin(90^\circ - \varphi_B)} = \frac{\sin \varphi_B}{\cos \varphi_B} = \operatorname{tg} \varphi_B = n, \quad (1.5)$$

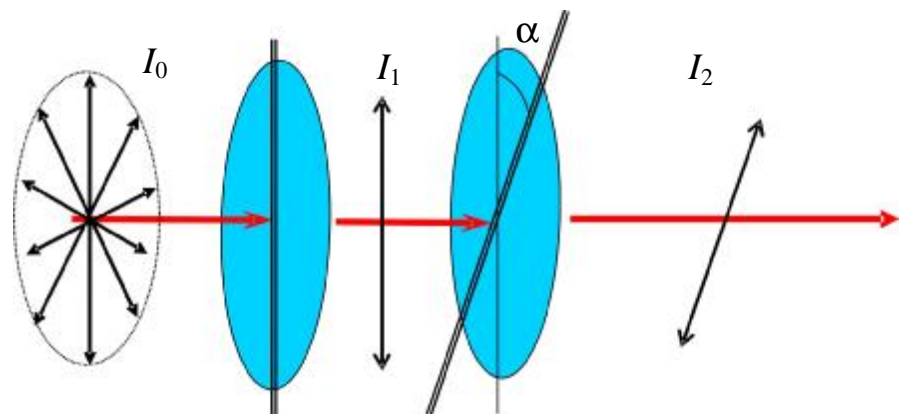
$$\varphi_B = \operatorname{arctg} n = \operatorname{arctg} 1,41 = 54,7^\circ. \quad (1.6)$$

Ответ: $\varphi_B = 54,7^\circ$.

Задача 2. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их главными плоскостями равен α . Оказалось, что интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9% интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найти угол α .

Решение. Естественный свет интенсивности I_0 падает на поляризатор, при этом на выходе из поляризатора свет становится поляризованным, а его интенсивность уменьшается вдвое:

$$I_1 = \frac{I_0}{2}. \quad (2.1)$$



Затем свет проходит через второй поляризатор, поставленный под углом α к первому. По закону Малюса через второй поляризатор проходит свет интенсивностью I_2 :

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha. \quad (2.2)$$

Таким образом, отношение интенсивностей на выходе и на входе равно:

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{\cos^2 \alpha}{2} = 0,09. \quad (2.3)$$

$$\alpha = \arccos \left(\sqrt{2 \frac{I_2}{I_0}} \right) = 64,9^\circ \quad (2.4)$$

Ответ: $\alpha = 64,9^\circ$

Задачи для самостоятельного решения

Эти задачи необходимо представить на проверку к следующему практическому занятию на отдельном листе. Условия задач не переписывать.

3.1. Чему равен показатель преломления стекла n , если при отражении от него света отражённый луч будет полностью поляризован при угле преломления $\gamma_{\text{пр}} = 30^\circ$? Определить скорость света в стекле.

3.2. На какой угловой высоте φ должно находиться Солнце, чтобы солнечный свет, отражённый от поверхности воды, был полностью поляризован? Показатель преломления воды $n = 1,33$.

3.3. Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза, погружённого в воду. При каком угле падения отражённый свет полностью поляризован? Показатель преломления алмаза – $n = 2,42$.

3.4. Естественный свет падает нормально на систему из шести идеальных поляризаторов, каждый из которых повернут главной плоскостью по отношению к предыдущему на 60° . Какая доля света пройдёт через эту систему поляризаторов?

3.5. Угол α между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до $\alpha_1 = 60^\circ$?

3.6. Плоскополяризованный свет интенсивности $I_0 = 100 \text{ Вт/м}^2$ проходит последовательно через 2 совершенных поляризатора, плоскости которых образуют с плоскостью колебаний в исходном луче углы $\alpha_1 = 20,0^\circ$ и $\alpha_2 = 50,0^\circ$ определить интенсивность света I на выходе из второго поляризатора. Рассмотреть 2 случая: 1) оба угла отсчитываются по часовой стрелке; 2) первый угол считается по часовой стрелке, второй – против часовой.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4. ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основные понятия: Тепловое излучение, абсолютно чёрное тело (АЧТ), серое тело, коэффициент поглощения, поток излучения, энергетическая светимость, спектральная плотность энергетической светимости, квант энергии электромагнитного поля, закон смещения Вина, закон Стефана-Больцмана.

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение?
2. Какой физический смысл имеют характеристики теплового излучения: поток излучения, энергетическая светимость, спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность)?
3. Что такое абсолютно чёрное тело?
4. Как выглядит спектр теплового излучения АЧТ?
5. В чём состояла гипотеза Планка для объяснения спектра теплового излучения АЧТ?
6. Сформулировать законы теплового излучения: закон Кирхгофа, закон Стефана-Больцмана, закон смещения Вина, второй закон Вина.

Примеры решения задач

Задача 1. Муфельная печь потребляет мощность $P = 1$ кВт. Температура T её внутренней поверхности при открытом отверстии площадью $S = 25 \text{ см}^2$ равна 1200 К . Считая, что отверстие печи излучает как АЧТ, определить, какая часть W мощности рассеивается стенками?

Решение. Мощность, потребляемая печью P , расходуется на поддержание теплового потока Φ из отверстия и потери энергии стенками $P_{\text{расс}}$:

$$P = \Phi + P_{\text{расс}}. \quad (1.1)$$

Поток теплового излучения можно определить с помощью закона Стефана-Больцмана:

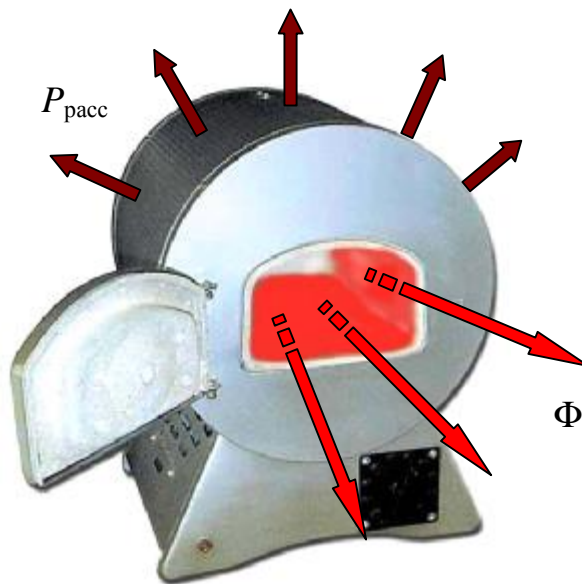
$$\begin{aligned} \Phi &= \sigma T^4 \cdot S = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 1200^4 = \\ &= 294 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Тогда мощность, рассеянная стенками, будет равна:

$$P_{\text{расс}} = P - \Phi = 1000 - 294 = 706 \text{ Вт}, \quad (1.3)$$

а доля мощности: $W = P_{\text{расс}}/P = 706/1000 = 0,706$.

Ответ: $W = 0,706$ или $W = 70,6 \%$.



Задача 2. Планета Сатурн находится в 10 раз дальше от Солнца, чем Земля. Средняя температура её поверхности составляет $t = -173^\circ \text{C}$. Определить отношение мощности поглощённой солнечной энергии к потоку теплового излучения планеты.

Решение. Интенсивность солнечного света в области Сатурна будет в 100 раз меньше, чем в области Земли, т.к. Сатурн находится в 10 раз от Солнца, чем Земля. Если на Землю падает солнечный свет интенсивностью 1395 Вт/м^2 , то на Сатурн будет падать солнечный свет интенсивностью $I \approx 14 \text{ Вт/м}^2$. Допустим, что радиус Сатурна r . Тогда, площадь тени планеты будет составлять $S = \pi r^2$. Будем считать, что планета поглощает равномерно весь спектр излучения Солнца, т.е. является серым телом с коэффициентом поглощения A . Тогда мощность поглощённого излучения планеты составит:

$$P_{\text{погл}} = I \cdot \pi r^2 \cdot A. \quad (2.1)$$

Если считать, что температура планеты приблизительно одинаковая по всей поверхности площадью $S_{\text{пов}} = 4\pi r^2$, то поток излучения, исходящий от неё будет равен:

$$\Phi = A\sigma T^4 \cdot 4\pi r^2, \quad (2.2)$$

где T – абсолютная температура поверхности Сатурна: $T = -173 + 273 = 100 \text{ К}$.
Отношение этих величин равно: $P_{\text{погл}}/\Phi = I/4\sigma T^4 = 0,62$.

Ответ: Сатурн поглощает энергии от Солнца только 62% от энергии его собственного теплового излучения.

Задача 3. Спутник шарообразной формы летает вокруг Земли. Определить: 1) температуру, которая установится на спутнике, если он будет всё время находиться под солнечным освещением; 2) длину волны, на которую приходится максимум испускательной способности поверхности спутника, если считать его абсолютно чёрным телом.

Решение. Если температура на спутнике установилась постоянной, значит, мощность поглощённого излучения от Солнца стала равной потоку теплового излучения спутника:

$$P_{\text{погл}} = \Phi. \quad (3.1)$$

Допустим, что спутник имеет радиус r . Тогда площадь тени спутника будет составлять πr^2 . Мощность поглощённого излучения составляет:

$$P_{\text{погл}} = C \cdot \pi r^2, \quad (3.2)$$

где C – солнечная постоянная (интенсивность солнечного света в области Земли). Поток теплового излучения спутника определим по закону Стефана-Больцмана:

$$\Phi = \sigma T^4 \cdot 4\pi r^2, \quad (3.3)$$

где T – установившаяся абсолютная температура спутника. Подставляя (3.2) и (3.3) в уравнение энергетического баланса, получаем:

$$C \cdot \pi r^2 = \sigma T^4 \cdot 4\pi r^2. \quad (3.4)$$

Отсюда:

$$T = \left(\frac{C}{4\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{1395}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/4} = 280 \text{ К} = 7^\circ\text{С}. \quad (3.5)$$

Длину волны, на которую приходится максимум испускательной способности поверхности спутника, определим по закону смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = b/T = 2,9 \cdot 10^{-3} / 280 = 1,04 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 10,4 \text{ мкм}. \quad (3.6)$$

Ответ: $t = 7^\circ\text{С}$, $\lambda_{\max} = 10,4 \text{ мкм}$.

Задачи для самостоятельного решения

4.1. Определить длину волны, соответствующую максимуму испускательной способности абсолютно чёрного тела, нагретого до температуры: а) 3 К, б) 0°С , в) $36,6^\circ\text{С}$, г) 2000°С .

4.2. Радиус звезды Сириус (α Большого Пса) в 1,8 раза больше, чем у Солнца. Температура её поверхности составляет 11000 К. Найти, во сколько раз Сириус излучает больше энергии, чем Солнце. Температура поверхности Солнца 6000 К.

4.3. Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела $R = 3 \text{ Вт/см}^2$. Определить длину волны, отвечающую максимуму испускательной способности этого тела.

4.4. Небольшой абсолютно чёрный камешек, вращающийся вокруг Солнца круговой орбите, имеет температуру -100°С . Определить расстояние, от камешка до Солнца. Радиус Солнца $R_C = 6,96 \cdot 10^8 \text{ м}$, а температура его поверхности $T_C = 6000 \text{ К}$.

4.5. С поверхности сажи площадью $S = 2 \text{ см}^2$ при температуре $T = 400 \text{ К}$ за время $t = 5 \text{ мин}$ излучается энергия $W = 83 \text{ Дж}$. Определить коэффициент поглощения A сажи.

4.6. Солнечный свет падает перпендикулярно на некоторую область, находящуюся в экваториальной Африке. Если поверхность является абсолютно чёрной, то какая максимальная температура может установиться в этой области? Солнечная постоянная (мощность солнечного излучения, падающего на единицу площади поверхности Земли, которая ориентирована перпендикулярно лучам) равна $C = 1395 \text{ Вт/м}^2$.

4.7*. Температура воды в озере $t = 20^\circ\text{С}$. Средняя глубина $h = 2 \text{ м}$. На сколько будет остывать вода в ясную ночь за 1 час, если не учитывать теплообмен с окружающей средой?

* – дополнительная (необязательная) задача.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

Основные понятия: Квант света, фотоэффект, давление света, эффект Комптона.

Контрольные вопросы

1. Как определяются основные характеристики кванта электромагнитного поля – фотона: энергия, импульс, масса, скорость?
2. В каких экспериментах была доказана квантовая природа света?
3. Что такое красная граница фотоэффекта?
4. Сформулируйте законы фотоэффекта.
5. Напишите формулу Эйнштейна для фотоэффекта.
6. Чем обусловлено давление света? От чего оно зависит?
7. Что такое обратный фотоэффект? Напишите формулу для коротковолновой границы рентгеновского спектра излучения при обратном фотоэффекте.
8. В чём состоит эффект Комптона? Напишите формулу Комптона.

Примеры решения задач

Задача 1. При какой температуре средняя кинетическая энергия молекулы двухатомного газа будет равна энергии фотона с длиной волны $\lambda = 5890$ нм? Определить длину волны, на которой абсолютно чёрное тело при этой температуре имеет максимум испускательной способности.

Решение. Средняя кинетическая энергия молекулы двухатомного газа при температуре T рассчитывается по формуле:

$$\langle E \rangle = \frac{5}{2} kT, \quad (1.1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Энергия фотона определяется по формуле Планка:

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света. Приравнявая эти энергии, находим искомую температуру газа:

$$T = \frac{2hc}{5k\lambda} = 977 \text{ К}. \quad (1.3)$$

Длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности АЧТ при заданной температуре, определяется по закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = 2970 \text{ нм}. \quad (1.4)$$

Ответ: $T = 977$ К, $\lambda_{\max} = 2970$ нм.

Задача 2. Цинковый шарик радиусом $r = 1$ см облучают электромагнитным излучением с длиной волны $\lambda = 250$ нм. Определить красную границу фотоэффекта для цинка. Сколько электронов может покинуть этот шарик под воздействием излучения.

Решение. Красная граница фотоэффекта это минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ (или максимальная длина волны $\lambda_{\text{кр}}$) света, при которой возможен фотоэффект. Она определяется минимальной энергией, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он покинул поверхность металла. Из формулы Эйнштейна для фотоэффекта можно найти:

$$h\nu_{\text{кр}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}} = A_{\text{вых}}. \quad (2.1)$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода для цинка. Из табл. в конце пособия находим: $A_{\text{вых}}(\text{Zn}) = 4 \text{ эВ} = 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Для цинка красная граница фотоэффекта:

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 310 \text{ нм}. \quad (2.2)$$

Таким образом, свет с длиной волны $\lambda = 250$ нм, падающий на цинковый шарик, может вызвать фотоэффект. При этом электроны, покидающие шарик будут обладать максимальной энергией:

$$E_{\text{max}} = h\nu - A_{\text{вых}} = hc/\lambda - A_{\text{вых}} = 1,56 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}. \quad (2.3)$$

Под действием света из шарика вылетают электроны, и он сам приобретает положительный заряд. Когда заряд шарика достигнет такой величины, что вырванные светом электроны не смогут преодолеть притяжение шарика, накопление заряда прекратится. Неизменность заряда шарика Q будет достигнута, когда сумма потенциальной и максимальной кинетической энергии электрона на поверхности шарика станет равной нулю:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q(-e)}{r} + E_{\text{max}} = 0. \quad (2.4)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, r – радиус шарика. Отсюда, находим максимальный заряд шарика с учётом (2.3):

$$Q = \frac{4\pi\epsilon_0 r}{e} E_{\text{max}} = 1,08 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}. \quad (2.5)$$

Этот заряд равен произведению элементарного заряда на количество электронов N , покинувших шарик. Таким образом:

$$N = \frac{Q}{e} = 6,77 \cdot 10^6 \text{ электронов}. \quad (2.6)$$

Ответ: $\lambda_{\text{кр}} = 310$ нм, $N = 6,7 \cdot 10^6$.

Задача 3. Плоская световая волна интенсивности $I = 0,6 \text{ Вт/см}^2$ освещает шар с абсолютно чёрной поверхностью. Радиус шара $R = 5 \text{ см}$. Найти силу светового давления, испытываемую шаром.

Решение. Если свет падает на АЧТ, то все фотоны поглощаются этим телом, а импульс этих фотонов передаётся телу. За ним образуется тень площадью $S = \pi R^2$. Поэтому, сила светового давления, которая действует на шар радиусом R , равна силе светового давления, которая действует на круглую пластину такого же радиуса, ориентированной перпендикулярно лучам. Давление света на такую пластину можно определить по формуле:

$$p = \frac{I}{c}(1 + \rho), \quad (3.1)$$

где I – интенсивность падающего света, c – скорость света, ρ – коэффициент отражения света от поверхности. Для АЧТ $\rho = 0$. Таким образом, давление света на пластину равно:

$$p = \frac{I}{c} = \frac{6000}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}, \quad (3.2)$$

а сила давления:

$$F = pS = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot 0,05^2 = 1,57 \cdot 10^{-7} \text{ Н}. \quad (3.3)$$

Ответ: $F = 1,57 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Задача 4. Фотон с энергией $E = 0,51 \text{ МэВ}$ рассеялся на свободном электроне под углом $\theta = 60^\circ$. Найти импульс электрона и энергию фотона после рассеяния.

Решение. Рассеяние фотона на свободном или слабосвязанном электроне называется эффект Комптона. Фотон и электрон взаимодействуют как обычные тела, обмениваясь энергией и импульсом при столкновении. В замкнутой системе (фотон + электрон) энергия и импульс сохраняются. На основе этих законов сохранения была выведена формула Комптона:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta), \quad (4.1)$$

где λ и λ' – длина волны фотона до и после рассеяния на электроне, $\lambda_c = h/mc = 2,43 \text{ пм}$ – комптоновская длина волны электрона, θ – угол рассеяния фотона. Определим длину волны фотона до рассеяния:

$$\lambda = \frac{hc}{E_\phi} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,51 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,44 \text{ пм}, \quad (4.2)$$

а также после рассеяния:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c (1 - \cos \theta) = 2,44 \text{ пм} + 2,43 \text{ пм} (1 - \cos 60^\circ) = 3,66 \text{ пм}. \quad (4.3)$$

Тогда, энергия фотона после рассеяния:

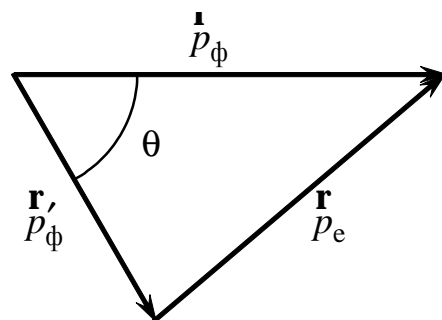
$$E_{\phi}' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,66 \cdot 10^{-12}} = 5,43 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,34 \text{ МэВ}. \quad (4.4)$$

По закону сохранения импульса:

$$\mathbf{p}_{\phi} = \mathbf{p}_{\phi}' + \mathbf{p}_e, \quad (4.5)$$

где \mathbf{p}_{ϕ} , \mathbf{p}_{ϕ}' – импульс фотона до и после рассеяния, \mathbf{p}_e – импульс электрона после рассеяния, который можно определить по теореме косинусов:

$$p_e^2 = p_{\phi}^2 + p_{\phi}'^2 - 2p_{\phi}p_{\phi}' \cos \theta. \quad (4.6)$$



Импульс фотона до и после рассеяния равен: $p_{\phi} = h/\lambda$ и $p_{\phi}' = h/\lambda'$. Тогда:

$$p_e = h\sqrt{1/\lambda^2 + 1/\lambda'^2 - 1/\lambda\lambda'} = (h/\lambda)\sqrt{1 + (\lambda/\lambda')^2 - \lambda/\lambda'} = 2,4 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}. \quad (4.7)$$

Ответ: $E_{\phi}' = 0,34 \text{ МэВ}$, $p_e = 2,4 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Задачи для самостоятельного решения

5.1. Ртутная лампа имеет мощность $P = 125 \text{ Вт}$. Сколько квантов света испускается каждую секунду в излучение с длиной волны $\lambda = 612,3 \text{ нм}$, если интенсивность этой линии равна 2% от интенсивности ртутной лампы? Считать, что 80% мощности идёт на излучение.

5.2. На платиновую пластину, находящуюся в безграничном пустом пространстве, падает излучение с длиной волны $\lambda = 180 \text{ нм}$. Будет ли наблюдаться при этом фотоэффект? Ответ обосновать. При каком потенциале пластины относительно бесконечно удалённой точки фототок прекратится. Работа выхода электронов из платины $A = 6,3 \text{ эВ}$.

5.3. При поочерёдном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн $\lambda_1 = 0,35 \text{ мкм}$ и $\lambda_2 = 0,54 \text{ мкм}$ обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в 2 раза. Найти работу выхода с поверхности этого металла.

5.4. Лазер излучил в импульсе длительностью $\tau = 0,13 \text{ мс}$ пучок света с энергией $E = 10 \text{ Дж}$. Найти среднее давление такого светового импульса, если его сфокусировать в пятнышко диаметром $d = 10 \text{ мкм}$ на чёрную поверхность, перпендикулярную к пучку.

5.5. Фотон с энергией $E = 1,02 \text{ МэВ}$ рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего энергия фотона стала $E' = 0,255 \text{ МэВ}$. Под каким углом рассеялся фотон? Определить импульс электрона после рассеяния на нём фотона.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Основные понятия: принцип относительности Эйнштейна, принцип постоянства скорости света, преобразования Лоренца, сокращение длины, замедление времени, основной закон релятивистской динамики, релятивистский импульс, полная энергия, энергия покоя.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постулаты специальной теории относительности (СТО).
2. Что такое собственная длина стержня и собственное время жизни частицы?
3. Как определить длину стержня, который движется вдоль своей оси?
4. Во сколько раз увеличивается время жизни движущейся частицы?
5. Сформулируйте релятивистский принцип сложения скоростей.
6. Как определяется импульс частицы, движущейся со скоростью близкой к скорости света (релятивистской частицы)?
7. Как формулируется основной закон релятивистской динамики?
8. Напишите выражение для полной энергии, энергии покоя и кинетической энергии релятивистской частицы.
9. Какова связь между релятивистским импульсом и полной энергией частицы?

Примеры решения задач

Задача 1. Мю-мезон родился в верхних слоях атмосферы и пролетел со скоростью $V = 0,995c$ до распада $s = 6$ км. Определить: 1) собственную длину пути, пройденную им до распада; 2) время жизни мю-мезона для наблюдателя на Земле; 3) собственное время жизни мю-мезона.

Решение. 1) Если связать систему отсчета с мю-мезоном, то в этой собственной системе отсчета частица покоится, значит, собственная длина пути L равна нулю.

2) В системе отсчета, связанной с наблюдателем на земле, мю-мезон пролетает расстояние 6 км со скоростью 99,5% скорости света за время:

$$\Delta t = \frac{s}{V} = \frac{6000}{0,995 \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 20 \text{ мкс.} \quad (1.1)$$

3) Собственное время жизни мю-мезона $\Delta\tau$ рассчитаем по формуле, которая следует из преобразований Лоренца:

$$\Delta\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = 20 \text{ мкс} \cdot \sqrt{1 - 0,995^2} = 2 \text{ мкс.} \quad (1.2)$$

Ответ: 1) собственная длина пути $L = 0$ м; 2) время жизни частицы для наблюдателя на Земле $\Delta t = 20$ мкс; 3) её собственное время жизни $\Delta\tau = 2$ мкс.

Задача 2. Ион, вылетев из ускорителя, испустил электрон в направлении своего движения со скоростью $V_0 = 0,4c$ (относительно иона). Определить скорость электрона относительно ускорителя V , если скорость иона относительно ускорителя $V_1 = 0,8c$.

Решение. По релятивистскому закону сложения скоростей:

$$V = \frac{V_1 + V_0}{1 + \frac{V_1 V_0}{c^2}} = \frac{0,8c + 0,4c}{1 + 0,32} = 0,91c.$$

Ответ: скорость электрона относительно ускорителя $V = 0,91c$.

Задача 3. При неупругом столкновении частицы массой m_0 , обладающей импульсом $p = 3m_0c$, с такой же покоящейся частицей образуется составная частица. Определить: 1) скорость частицы до столкновения V_0 ; 2) массу m и скорость V составной частицы; 3) кинетическую энергию составной частицы T .

Решение. 1) Релятивистский импульс частицы определяется по формуле:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{V}_0}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}. \quad (3.1)$$

Тогда:

$$3m_0c = \frac{m_0 V_0}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}} \Rightarrow V_0 = c \frac{3}{\sqrt{10}} = 0,949c. \quad (3.2)$$

2) В замкнутой системе полная энергия и релятивистский импульс сохраняются:

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}} + m_0 c^2 = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad 3m_0 c = \frac{m V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (3.3)$$

Из уравнений (3.3) получаем:

$$V = c \frac{3}{1 + \sqrt{10}} = 0,721c, \quad m = m_0 \sqrt{2(1 + \sqrt{10})} = 2,885m_0. \quad (3.4)$$

Масса составной частицы больше чем сумма масс исходных частиц, т.к. часть энергии движения первой частицы превратилась в энергию покоя составной частицы.

3) Кинетическая энергия релятивистской частицы равна разности полной энергии и энергии покоя:

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} - mc^2. \quad (3.5)$$

Подставляя выражения (3.4) в (3.5), получаем:

$$T = m_0 c^2 \left(1 + \sqrt{10} - \sqrt{2(1 + \sqrt{10})} \right) = 1,277 m_0 c^2. \quad (3.6)$$

Ответ: 1) $V_0 = 0,949c$; 2) $V = 0,721c$, $m = 2,885m_0$; 3) $T = 1,277m_0c^2$.

Задачи для самостоятельного решения

6.1. Стержень, собственная длина которого $l_0 = 5$ м, движется в продольном направлении со скоростью V относительно наблюдателя. При каком значении скорости длина стержня в системе отсчёта наблюдателя будет $l = 3$ м?

6.2. На спутнике, движущемся по круговой орбите вокруг Земли со скоростью $V = 7,9$ км/ч, находятся часы. На сколько они отстанут от часов, находящихся на Земле, за 1 год?

6.3. Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями $V_1 = 0,5c$ и $V_2 = 0,8c$ по отношению к лабораторной системе отсчета. Найти относительную скорость частиц.

6.4. Определить импульс p частицы (в единицах m_0c) и её полную энергию (в единицах m_0c^2), если её кинетическая энергия в два раза больше энергии покоя.

6.5. Чтобы нагреть 1 кг воды на 1°C , необходимо передать ей 4200 Дж тепловой энергии. На сколько при этом увеличится масса воды?

6.6.* Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно чёрного тела, для которого максимум испускательной способности приходится на длину волны $\lambda = 0,48$ мкм. Найти массу, теряемую Солнцем ежесекундно за счёт излучения. Оценить время, за которое масса Солнца уменьшится на 1%. Масса Солнца $M = 2 \cdot 10^{30}$ кг, а его радиус $R = 7 \cdot 10^8$ м.

* - дополнительная (необязательная) задача.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Основные понятия: волновая функция, соотношение неопределенностей, волна де Бройля, стационарное состояние частицы, туннелирование.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте гипотезу де Бройля.
2. Как описывается состояние частицы в квантовой механике?
3. Какой физический смысл имеет волновая функция частицы?
4. Напишите соотношение неопределённости для координат и проекций импульса?
5. Что такое потенциальная яма и потенциальный барьер для частицы?
6. В чём состоит явление туннелирования через потенциальный барьер?

Примеры решения задач

Задача 1. С какой скоростью движется электрон, если длина волны де Бройля λ электрона равна его комптоновской длине волны λ_c .

Решение. Комптоновская длина волны электрона вычисляется по формуле:

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}, \quad (1.1)$$

где m – масса частицы.

Длина волны де Бройля находится по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1.2)$$

где p – импульс частицы. Сравнивая (1.1) и (1.2), получаем:

$$p = mc, \quad (1.3)$$

$$\frac{mV}{\sqrt{1-V^2/c^2}} = mc. \quad (1.4)$$

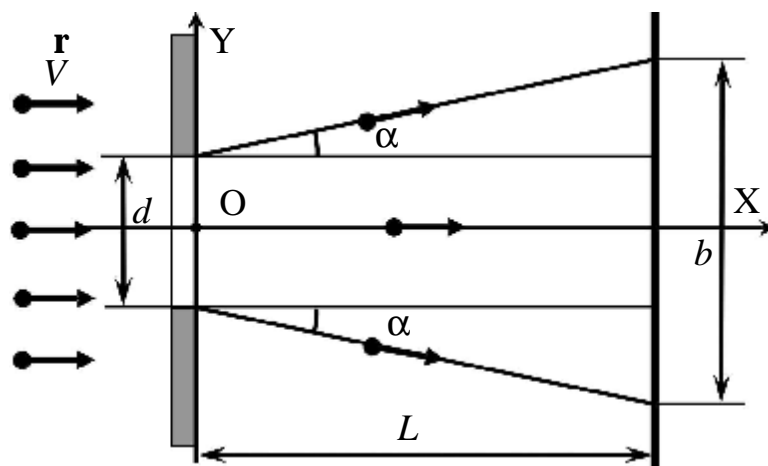
Решая это уравнение, получаем

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

Задача 2. Параллельный пучок протонов со скоростью $V = 600$ м/с падает на диафрагму со щелью шириной $d = 0,1$ мм, за которой на расстоянии $L = 1$ м расположен экран. Оценить с помощью соотношения неопределённости ширину центрального максимума.

Решение. Пучок протонов, проходя через щель в диафрагме, расширяется за счёт действия квантовой неопределённости. В момент прохождения протона через щель неопределённость координаты y становится равной половине ширины щели: $\Delta y = d/2$. По принципу неопределённостей:

$$\Delta p_y \Delta y \geq h, \quad (2.1)$$



т.е. произведение неопределённости проекции импульса Δp_y на неопределённость координаты Δy не может быть меньше чем постоянная Планка. Значит, у протонов после прохождения щели диафрагмы появляется неопределённость проекции скорости на ось OY , минимальная величина которой равна:

$$\Delta V_y = \frac{h}{m\Delta y} = \frac{2h}{md}, \quad (2.2)$$

где $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг – масса протона. Отсюда можно определить тангенс угла расширения пучка частиц:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta V_y}{V} = \frac{2h}{mVd} = 1,32 \cdot 10^{-5}. \quad (2.3)$$

Ширину центрального максимума b можно определить из геометрических соотношений:

$$\frac{b}{2} = \frac{d}{2} + L \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad b = d + 2L \cdot \operatorname{tg} \alpha = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,126 \text{ мм}. \quad (2.4)$$

Ответ: ширина центрального максимума равна 0,126 мм.

Задача 3. Электрон находится в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной L . Найти вероятность нахождения частицы в средней трети ящика, если она находится во втором возбужденном состоянии.

Решение. Вероятность обнаружить частицу в области между точками с координатами x_1 и x_2 определяется интегралом по этой области от квадрата волновой функции частицы.

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi_n(x)|^2 dx, \quad (3.1)$$

где $\psi_n(x)$ – волновая функция электрона, отвечающая данному состоянию.

Для электрона, находящегося в бесконечно глубокой потенциальной яме, волновая функция имеет вид:

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{\pi nx}{L}\right). \quad (3.2)$$

Для второго состояния ($n = 2$):

$$\Psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right). \quad (3.3)$$

Подставляем (3.3) в интеграл (3.1), выносим за знак интегрирования константу и, учитывая пределы интегрирования $x_1 = L/3$ и $x_2 = 2L/3$:

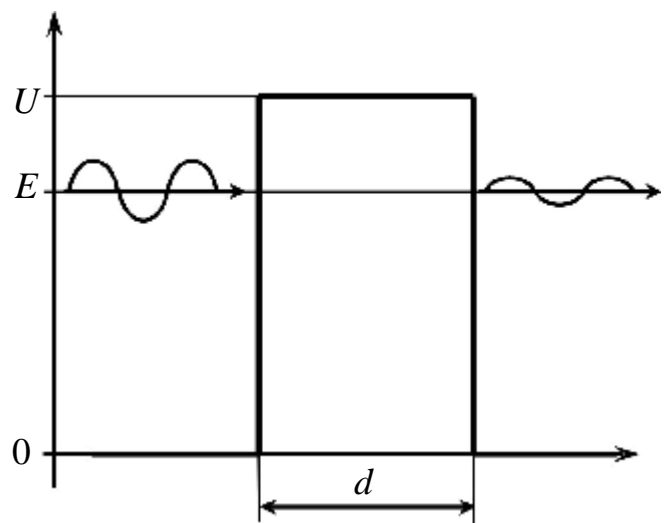
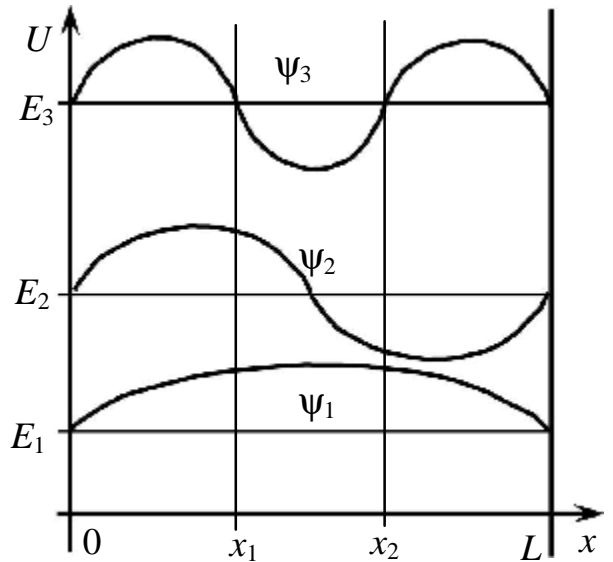
$$W = \frac{2}{L} \int_{x_1}^{x_2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{2}{L} \int_{L/3}^{2L/3} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{4\pi x}{L}\right) \right) dx = \frac{1}{L} \cdot \frac{L}{3} - \frac{1}{L} \cdot \frac{L}{4\pi} \sin\left(\frac{4\pi x}{L}\right) \Big|_{L/3}^{2L/3} = \\ &= \frac{1}{3} - \frac{1}{4\pi} \left(\sin\left(\frac{8\pi}{3}\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) = \frac{1}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0,196. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ответ: $W = 0,196$.

Задача 4. Найти вероятность W прохождения электрона через прямоугольный потенциальный барьер при разности энергий $U - E = 1$ эВ, если ширина барьера $d = 0,1$ нм.

Решение. Частица находится в потенциальном поле сил, которое создаёт потенциальный барьер для неё высотой U и шириной d , причём энергии частицы E недостаточно, чтобы его преодолеть. Однако существует вероятность, что частица окажется за барьером. Этот эффект на-



зывается туннелирование. Если потенциальный барьер имеет прямоугольную форму, то вероятность туннелирования частицы через него можно оценить по формуле:

$$W : \exp(-2\beta d), \quad \beta = \frac{\sqrt{2m(U - E)}}{\hbar},$$

где m – масса частицы.

$$\beta = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}}{1,05 \cdot 10^{-34}} = 5,14 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1},$$

$$W : \exp(-2 \cdot 5,14 \cdot 10^9 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9}) = 0,36.$$

Ответ: вероятность туннелирования электрона через потенциальный барьер $\sim 0,36$.

Задачи для самостоятельного решения

7.1. На грань некоторого кристалла под углом $\alpha = 60^\circ$ к её поверхности падает параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Определить скорость электронов, если они испытывают интерференционное отражение первого порядка. Расстояние d между атомными плоскостями кристалла равно 0,2 нм.

7.2. Параллельный пучок электронов, ускоренных разностью потенциалов $U = 25$ В, падает на диафрагму с двумя щелями, расстояние между которыми $d = 50$ мкм. Определить расстояние между соседними максимумами дифракционной картины на экране, расположенном на расстоянии $L = 1$ м от щелей.

7.3. Оценить с помощью соотношения неопределённостей неопределённость скорости электрона в атоме водорода, полагая размер атома $L = 0,1$ нм. Сравнить полученную величину со скоростью электрона на первой боровской орбите данного атома.

7.4. Электрон находится в одномерной потенциальной яме шириной L . Вычислить отношение вероятностей W_1/W_2 нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях в интервале длиной $1/4$ от ширины ямы, примыкающему к стенке.

7.5. Частица в потенциальной яме находится в третьем возбуждённом состоянии. Какова вероятность W нахождения частицы в средней трети ямы?

7.6. Ядро испускает α -частицу с энергией $E = 5$ МэВ. В грубом приближении можно считать, что α -частица проходит через прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10$ МэВ и шириной $d = 5$ фм. Найти коэффициент прозрачности барьера (вероятность туннелирования) W для α -частиц.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Основные понятия: Ядро, протоны, нейтроны, радиоактивность, α -, β -, γ -частицы, энергия связи ядер, активность и удельная активность препарата, период полураспада, ядерная энергия, виды распадов ядер.

Контрольные вопросы

1. Какие силы удерживают в ядре одноименно заряженные протоны и нейтроны?
2. Что такое α -, β -, γ -радиоактивность?
3. Перечислите правила смещения при различных видах радиоактивного распада.
4. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
5. Как определяется активность радиоактивного препарата?
6. Какой вид распада используется в ядерных реакторах?
7. Что такое термоядерный синтез?

Примеры решения задач

Задача 1. Определить возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа C^{14} у них составляет $3/5$ удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада ядер C^{14} $\tau_{1/2}$ равен 5570 лет.

Решение. В состав деревянных предметов входит углерод, который состоит преимущественно из двух изотопов: основную массу составляет стабильный углерод-12 (C^{12}) и небольшая примесь радиоактивного углерода-14 (C^{14}), который подвержен спонтанному электронному β -распаду:



Поскольку у предметов, изготовленных из старого дерева, обмен веществ с окружающей средой практически не происходит, то количество углерода-14 будет неуклонно уменьшаться. Согласно закону радиоактивного распада количество радионуклидов (радиоактивных ядер) N уменьшается во времени по степенному закону:

$$N(t) = N_0 2^{-t/\tau_{1/2}}, \quad (1.2)$$

где $\tau_{1/2}$ – период полураспада (время, за которое распадётся половина радионуклидов), N_0 – начальное количество радионуклидов. Активность препарата A это число распадов радионуклидов за 1 с:

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \frac{N_0}{\tau_{1/2} \ln 2} \cdot 2^{-t/\tau_{1/2}} = A_0 \cdot 2^{-t/\tau_{1/2}}, \quad (1.3)$$

где A_0 – начальная активность препарата. Активность препарата $A(t)$, как и число радионуклидов, уменьшается по степенному закону. Удельная активность препарата $a(t)$ это активность единицы массы препарата также должна уменьшаться по степенному закону:

$$a(t) = \frac{A(t)}{m} = a_0 \cdot 2^{-t/\tau_{1/2}}, \quad (1.4)$$

где a_0 – начальная удельная активность препарата. По условию задачи удельная активность предмета, сделанного из старого дерева, через промежуток времени Δt составляет $3/5$ от начальной:

$$\frac{a(\Delta t)}{a_0} = \frac{3}{5} \Rightarrow 2^{-\Delta t/\tau_{1/2}} = \frac{3}{5}. \quad (1.5)$$

Решая это уравнение, получаем:

$$\Delta t = -\tau_{1/2} \log_2(3/5) = -\tau_{1/2} \frac{\ln(3/5)}{\ln 2} = 4100 \text{ лет.} \quad (1.6)$$

Ответ: $\Delta t = 4100$ лет.

Задача 2. Определить максимальную энергию, которая выделится при полном превращении 1 моля водорода в дейтерий.

Решение. Реакция идёт по схеме:



Выделенную энергию можно посчитать как разность энергий покоя в левой и правой частях уравнения. Масса протона $m_p = 1,672621777 \cdot 10^{-27}$ кг, дейтрона $m_d = 3,343583202 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса позитрона, уносящего «лишний» положительный заряд $m_e = 9,10938291 \cdot 10^{-31}$ кг. Нейтрино имеет массу в ~ 100000 раз меньшую, чем у позитрона и из дальнейших рассуждений исключается. Масса исходных продуктов $m_{\text{исх}}$ (двух протонов) составляет $3,345243554 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса конечных продуктов $m_{\text{кон}}$ (дейтрона и позитрона) – $3,34449414 \cdot 10^{-27}$ кг. Разница масс исходных и конечных продуктов реакции называется дефектом массы $\Delta m = m_{\text{исх}} - m_{\text{кон}}$. Он возникает в результате частичного преобразования энергии покоя исходных продуктов в энергию движения образовавшихся частиц. В условиях задачи $\Delta m = 7,49414 \cdot 10^{-31}$ кг. Воспользовавшись формулой для связи массы и энергии, получаем энергию, которая выделится при этой реакции синтеза:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 7,49414 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 6,745 \cdot 10^{-14} \text{ Дж.} \quad (2.2)$$

Из одного моля атомарного водорода получается $\nu = 0,5$ моля дейтерия (два протона превращаются в один дейтрон),

$$W = \Delta E \cdot \nu \cdot N_A = 2,02 \cdot 10^{10} \text{ Дж.} \quad (2.3)$$

Ответ: $W = 20$ ГДж.

Задачи для самостоятельного решения

8.1. При распаде радиоактивного полония $^{210}\text{Po}_{84}$ массой $m = 40$ г в течение $\Delta t = 10$ часов образовался гелий $^4\text{He}_2$, который при нормальных условиях занял объем $V = 8,9$ см³. Определить период полураспада $\tau_{1/2}$ полония.

8.2. Препарат U^{238} массы 1 г излучает $1,24 \cdot 10^4$ α -частиц в секунду. Найти период полураспада этого изотопа.

8.3. Сколько энергии выделится при взрыве термоядерной бомбы с зарядом 100 кг дейтерия, если прореагирует половина находящихся в бомбе атомов? Масса дейтерия $m_d = 3,343583202 \cdot 10^{-27}$ кг, а масса ядра гелия – $m_{\text{He}} = 6,644656 \cdot 10^{-27}$ кг.

ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд;

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света;

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

$b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ К·м – постоянная Вина;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2006, 2007, 2010. – 557 с.

2. Детлаф, А.А. Курс физики: Учебное пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 7-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 719 с.

3. Савельев, И.В. Курс физики Т.2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика: учебное пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям и специальностям в 3-х томах / И.В. Савельев – СПб: Лань, 2007, 2008. – 462 с.

4. Савельев, И.В. Курс физики Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям и специальностям в 3-х томах / И.В. Савельев – СПб: Лань, 2007. – 301 с.

5. Андрианов, Б.А. Оптика и ядерная физика: учебное пособие для выполнения лабораторных работ / Б.А. Андрианов, В.Ф. Подзерко, А.С. Соболевский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 62 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Рабочая программа	3
Лабораторные работы	7
Общие замечания о решении физических задач	8
Практическое занятие № 1. Интерференция света	9
Практическое занятие № 2. Дифракция света	13
Практическое занятие № 3. Поляризация света.....	18
Практическое занятие № 4. Тепловое излучение	21
Практическое занятие № 5. Квантовые свойства света	24
Практическое занятие № 6. Специальная теория относительности	28
Практическое занятие № 7. Квантовая механика	31
Практическое занятие № 8. Ядерная физика	35
Значения физических величин	37
Библиографический список	37