

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА**

Филиал государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения» в г. Красноярске

Тихомиров Ю.В., Мороз Ж.М., Смелый В.В.

**ВИРТУАЛЬНЫЙ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО
КУРСУ ФИЗИКИ**

**ЧАСТЬ 3. ОПТИКА
КВАНТОВАЯ ОПТИКА.
АТОМНАЯ ФИЗИКА.
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА
И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

КРАСНОЯРСК - 2007

УДК 530.10

Тихомиров Ю.В., Мороз Ж.М., Смелый В.В.

Виртуальный лабораторный практикум по курсу физики:

Учебное пособие для втузов: в 3 частях.

Часть 3: Оптика. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – Красноярск, 2007 – 59с.

Изложены: основные теории разделов физики, методика и порядок проведения лабораторных работ с компьютерными моделями, методика статистической обработки экспериментальных данных, рекомендации по оформлению отчетов лабораторных работ.

Даны вопросы и задачи для самоконтроля.

Материал пособия размещен в последовательности, обеспечивающей оптимальную работу студентов над выполнением лабораторных работ, которые предусмотрены учебными планами специальностей очной и заочной формы обучения втузов.

РЕЦЕНЗЕНТЫ: профессор кафедры КМАПР КГТУ

д.ф-м.н. Исаков Р.С.

Зав. кафедрой «Физика» КГТУ

к.ф-м.н., профессор Бузмаков А.Е.

© Тихомиров Ю.В., Мороз Ж.М., Смелый В.В., 2007

© Красноярский филиал ИрГУПС, 2007

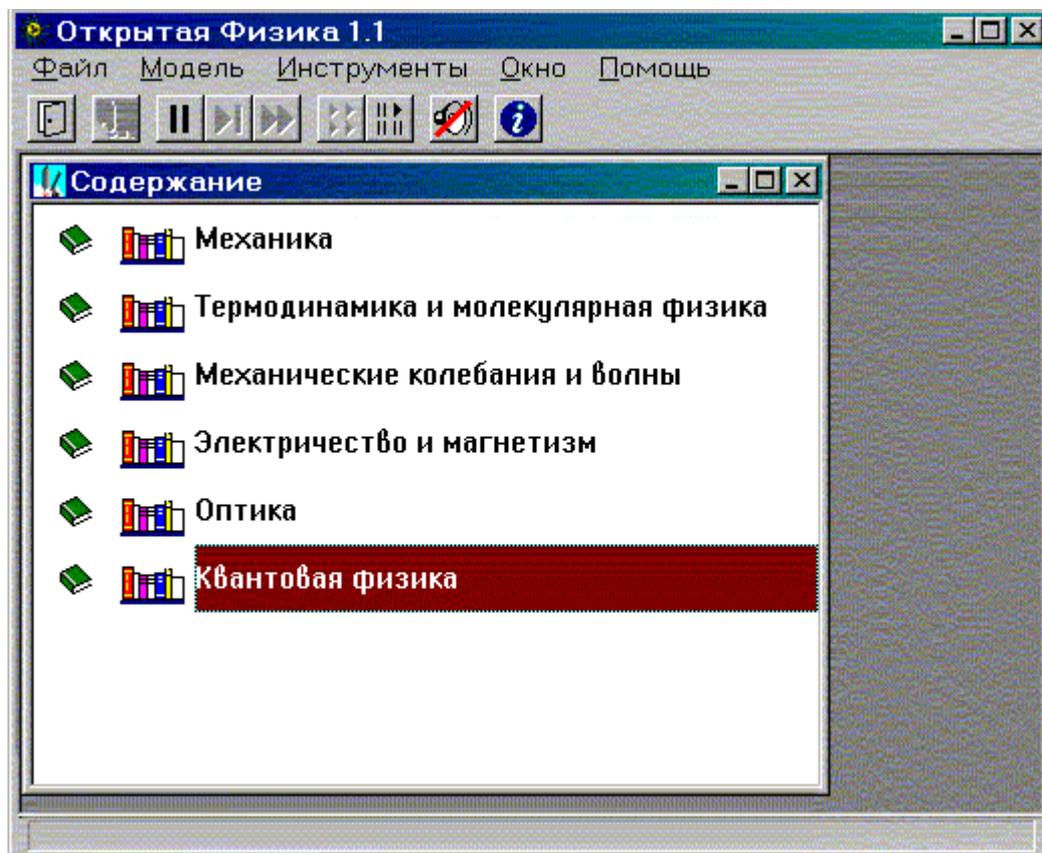
СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	5
ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	6
ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ.....	7
4.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	9
4.2 ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ.....	16
4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА.....	21
4.4 ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА ОТ ОДНОЙ ЩЕЛИ....	26
4.5 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА.....	31
4.6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ.....	36
4.7 ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ	42
4.8 СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА.....	47
4.9 ЭФФЕКТ КОМТОНА.....	53
ЛИТЕРАТУРА.....	57
НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие содержит описание лабораторных работ, в основе которых лежат компьютерные модели, разработанные фирмой «Физикон».

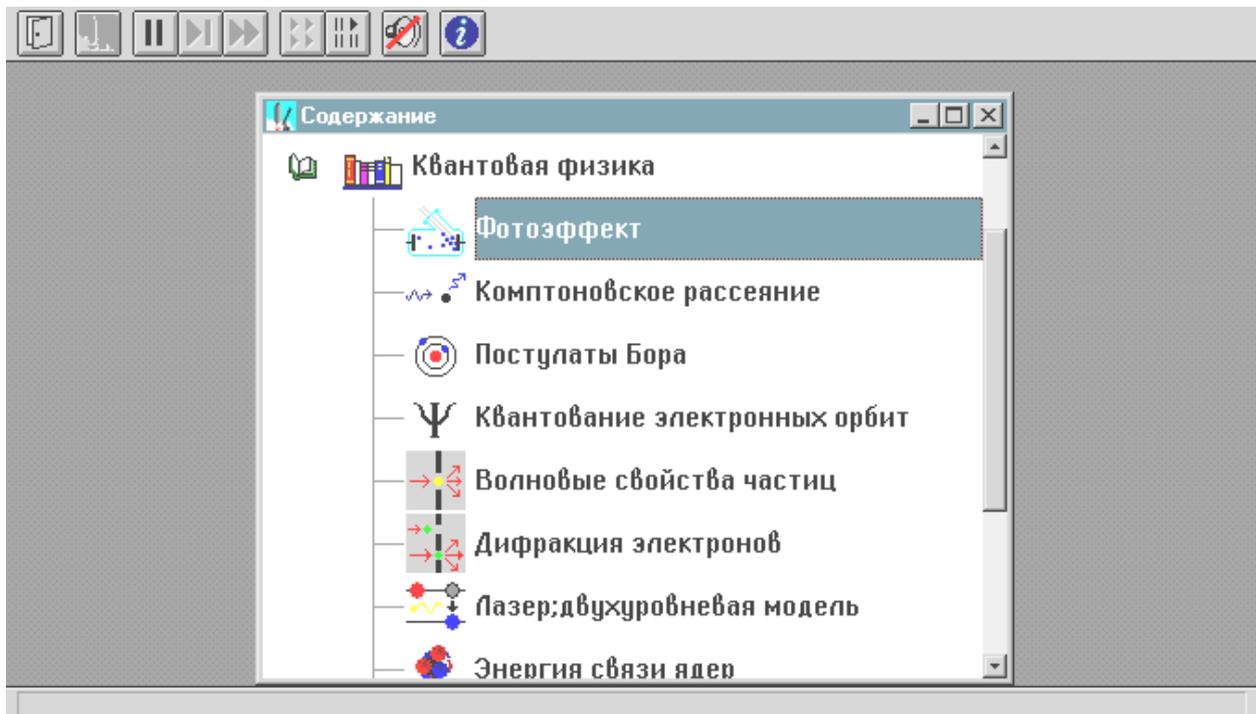
Для начала работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. После этого появится начальная картинка, имеющая вид



После этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, установив ее маркер над названием раздела, в котором расположена данная модель. Для электромагнетизма вы увидите следующую картинку.

Чтобы увидеть дальнейшие пункты содержания данного раздела надо щелкать левой кнопкой мыши, установив ее маркер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу внутреннего окна.

Кнопки вверху картинки являются служебными. Предназначение каждой проявляется когда маркер мыши располагается над ней в течение 1-2 секунд (без нажатия кнопок мыши). Очень важной является кнопка с двумя вертикальными чертами «||», которая служит для остановки эксперимента, а рядом расположенные кнопки – для шага «▶|» и продолжения «▶▶» работы.



Прочитав надписи во внутреннем окне установите маркер мыши над надписью требуемой компьютерной модели и дважды коротко нажмите левую кнопку мыши. Рассмотрите пример на странице 9. В появившемся внутреннем окне сверху также расположены служебные кнопки. Кнопка с изображением страницы служит для вызова теоретических сведений. Перемещать окна можно, зацепив мышью заголовок окна (имеющий синий фон). Для закрытия окна надо нажать мышью кнопку с крестом в верхнем правом углу данного окна.

ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Для допуска:

- * Каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект данной ЛР (см. соответствующие требования).
- * Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов.
- * Студент отвечает на заданные вопросы (письменно или устно).
- * Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Конспект для допуска к ЛР готовится заранее на листах формата А4.
Первая страница (обложка):

Министерство путей сообщения РФ

Иркутский государственный университет путей сообщения
Красноярский филиал

Лабораторная работа N__
(Название)

Выполнил:
студент группы _____
ФИО _____
Дата выполнения: _____
Дата сдачи: _____

Допуск	Измерения	Зачет

Красноярск (год)

Следующие страницы:

Цель работы: (переписать полностью из описания).

Краткая теория (выписать основные формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).

Экспериментальная установка (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).

Таблицы (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).

Оформление отчета (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, **“Обработка результатов и оформление отчета”**.

ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ

Выполнение всех **пунктов** раздела описания «Оформление отчета».

Графики должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.

Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.

Записаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон)

Выписан **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).

Записаны **выводы** по ответу (см. ниже шаблон).

Г Р А Ф И К (требования):

- на компьютере, размер не менее 1/2 листа,
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, индексы величин, единицы измерения, 10^N ,
- на каждой оси - **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок),
- под графиком - полное название графика **СЛОВАМИ**,
- на графике - экспериментальные и теоретические точки ярко,
- форма графика соответствует теоретической зависимости (не ломаная).
-

ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____
название функции словами
_____ имеет вид прямой (проходящей через начало координат,
название аргумента
параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической
зависимостью данных характеристик, имеющей вид _____.
формула

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчетов получено значение

_____, равное _____ = (_____ \pm _____) 10^{-} _____
название физической характеристики символ среднее ошибка степень един.измер

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. § 166. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики § 32.7. Запустите программу «Оптика», «Зрительная труба Кеплера» и «Микроскоп». Нажмите вверху внутренних окон указанных разделов кнопки с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения об этих оптических системах и запишите их в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Ознакомление с оптическими схемами зрительной трубы Кеплера и микроскопа.
- Моделирование этих схем из простых линз.
- Проверка формул увеличения зрительной трубы Кеплера и микроскопа.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Зрительная труба Кеплера представляет собой оптическую систему, предназначенную для наблюдения удалённых предметов. Если лучи от предмета приходят в трубу в виде параллельных пучков, то оптическая система трубы называется телескопической.

На рис. 1 представлена оптическая схема зрительной трубы Кеплера. Она состоит из длиннофокусного объектива 1 и окуляра 2 – линзы с меньшим фокусным расстоянием.

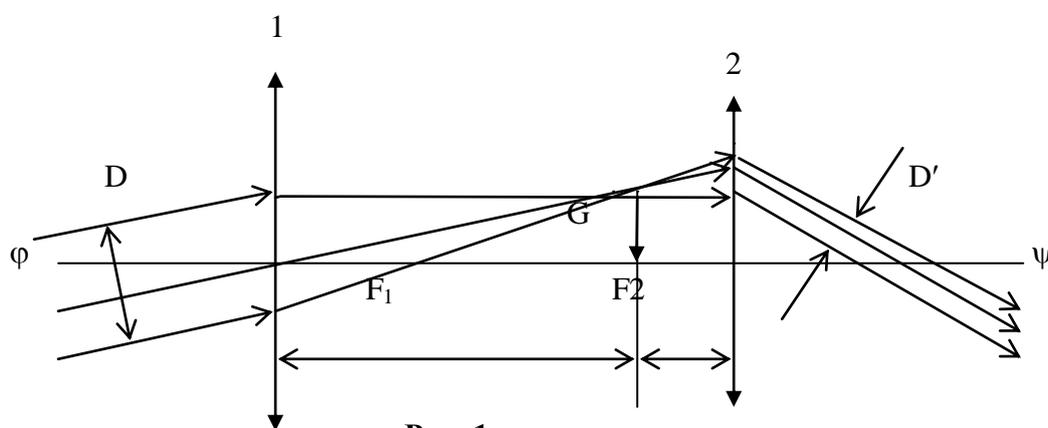


Рис. 1

Второй главный фокус F_1 объектива совпадает с первым главным фокусом F_2 окуляра, благодаря чему падающий в объектив параллельный пучок лучей выходит из окуляра также параллельным пучком. Как показано

на рисунке 1, объектив 1 зрительной трубы образует обратное действительное изображение G бесконечно удалённого предмета, которое рассматривается в окуляре 2.

Увеличение трубы Γ является *угловым увеличением* и равно отношению

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где ψ – угол, под которым предмет наблюдается в трубу (согласно правилу знаков, этот угол отрицательный); φ – угол, под которым предмет виден невооружённым глазом (если глаз поместить вместо объектива трубы на оптической оси).

Ширина параллельного пучка лучей D , входящих в объектив, обычно равна диаметру объектива. Ширина пучка D' , выходящего из окуляра, определяется диаметром выходного зрачка системы. Выходной зрачок является изображением входного зрачка, даваемого окуляром.

Из рис. 1 имеем для увеличения Γ :

$$\Gamma = -\frac{F_1}{F_2} \quad (2), \quad \Gamma = -\frac{D}{D'} \quad (3)$$

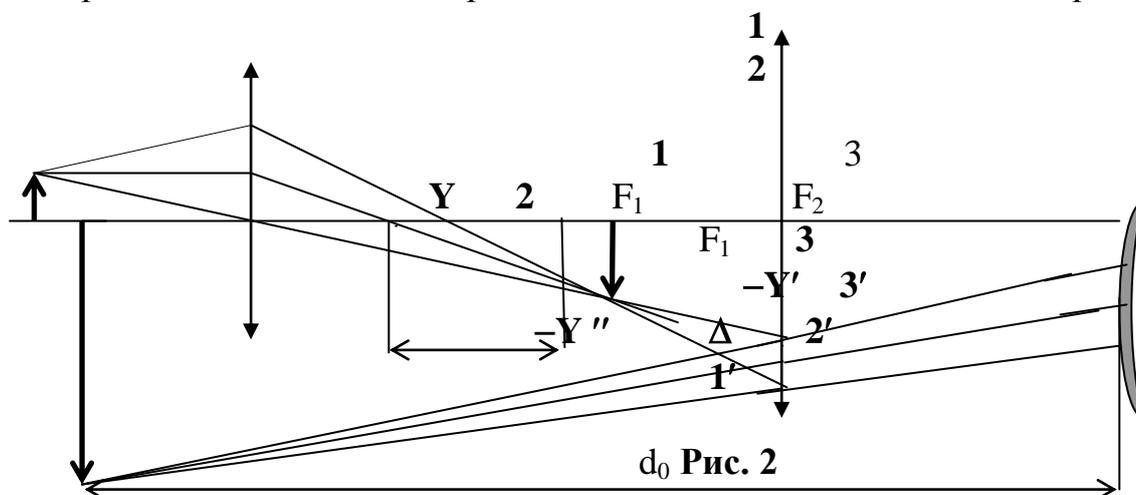
Соотношение (2) показывает, во сколько раз увеличиваются угловые размеры изображения в сравнении с угловыми размерами предмета при наблюдении через трубу.

Линейное увеличение β находится по формулам геометрической оптики:

$$\Gamma\beta = 1 \quad (4), \quad \text{следовательно} \quad \beta = -\frac{F_2}{F_1} = -\frac{D'}{D}. \quad (5)$$

Так как $D' < D$, то зрительная труба даёт уменьшение линейных размеров наблюдаемых объектов.

Микроскоп предназначен для наблюдения мелких предметов, не различимых глазом. На рис. 2 показана оптическая схема микроскопа.



Микроскоп состоит из двух линз: короткофокусного объектива 1 и окуляра 2, фокусное расстояние которого больше, чем у объектива. Предмет Y

располагается вблизи первого фокуса F_1 объектива так, что действительное увеличенное обратное изображение – Y' получается вблизи первого фокуса F_2 окуляра 2 – между ним и окуляром. Окуляр действует как лупа, давая мнимое изображение $-Y''$ на *расстоянии наилучшего зрения* d_0 ($d_0 = 0,25$ м) от глаза 3, который находится непосредственно за окуляром 2. Лучи 1,2,3 позволяют получить изображение $-Y'$; лучи 1', 2', 3', попадая в систему глаза 3, сходятся на сетчатке глаза, где дают изображение, соответствующее мнимому изображению $-Y''$, даваемому окуляром как лупой. Без участия глаза изображения не видно, а из окуляра выходит расходящийся пучок лучей. Расстояние Δ между вторым фокусом объектива и первым фокусом окуляра называется *оптическим интервалом*.

Если предмет Y поместить на расстоянии d_1 от объектива микроскопа, его изображение Y' будет находиться от объектива на расстоянии f_1 , удовлетворяющем уравнению:

$$\frac{1}{F_{об}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}.$$

Изображение предмета будет увеличено при этом в:

$$k_{об} = \frac{f_1}{d_1} \text{ раз.} \quad (6)$$

Окуляр располагают относительно изображения Y' так, чтобы оно рассматривалось через него как через лупу. Окончательное изображение Y'' будет мнимым и будет отстоять от окуляра на расстоянии f_2 . Если расстояние d_2 от окуляра до промежуточного изображения Y' подобрано так, что оно удовлетворяет уравнению:

$$\frac{1}{F_{ок}} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2},$$

то увеличение изображения Y' , даваемое окуляром, при этом окажется равным:

$$k_{ок} = \frac{f_2}{d_2}. \quad (7)$$

Увеличение микроскопа Γ вычисляется как произведение увеличений объектива и окуляра:

$$\Gamma = k_{об}k_{ок} \quad (8)$$

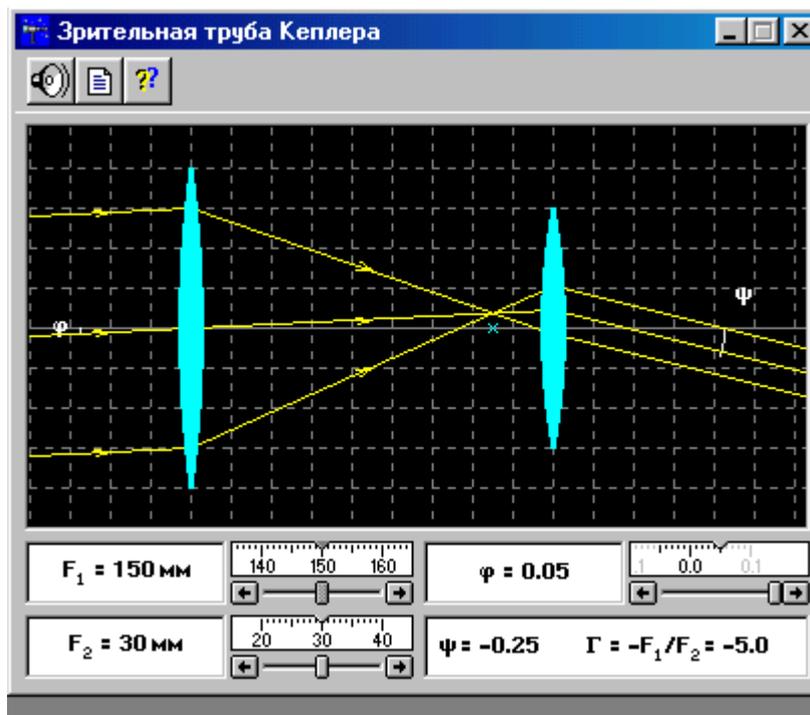
В случае, когда F_1 и F_2 много меньше оптического интервала Δ , увеличение микроскопа выражается простой формулой :

$$\Gamma = \frac{d_0\Delta}{F_1F_2}. \quad (9)$$

ИЗМЕРЕНИЯ:

ЭКСПЕРИМЕНТ 1.

Зрительная труба Кеплера



1. Подведите маркер мыши к движку регулятора F_1 , нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, двигайте движок до установки значения F_1 , взятого из таблицы 1 для вашей бригады.
2. Установите аналогичным образом F_2 и φ .
3. Запишите в таблицу 2 значение $\Gamma_T = -\frac{F_1}{F_2}$, взятое из нижнего правого окна схемы зрительной трубы Кеплера.
4. С помощью миллиметровой линейки измерьте на экране монитора D и D' и запишите эти значения в таблицу 2.
5. Рассчитайте значение $\Gamma_3 = -\frac{D}{D'}$ и запишите это значение в таблицу 2.
6. Сравните полученное значение Γ_3 со значением Γ_T .
7. Устанавливая вторые значения F_1 и F_2 , взятые из таблицы 1 для вашей бригады, повторите измерения по п. 2-6, записывая результаты измерений в табл. 2.
8. Оцените абсолютную погрешность измерений.

ТАБЛИЦА 1.

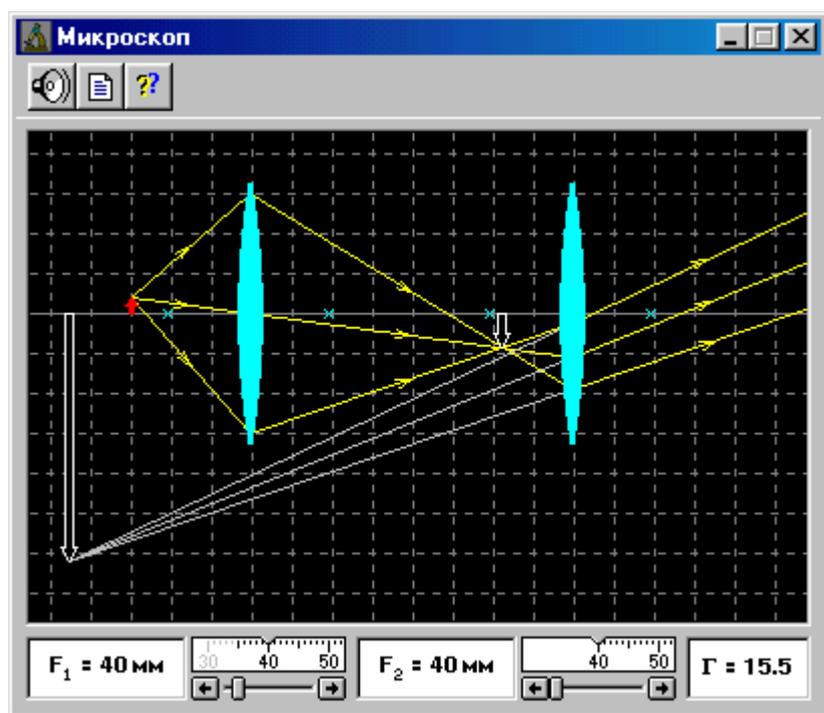
Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
F1	100	110	120	130	140	150	160	170

мм	105	115	125	135	145	155	165	175
F2	20	22	24	26	28	30	34	36
мм	21	23	25	27	29	32	35	38
φ	0,00	0,01	0,02	0,03	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04

ТАБЛИЦА 2.

Γ_T	D мм	D'мм	Γ_9	$\Delta\Gamma_9$

ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Микроскоп.



1. Подведите маркер мыши к движку регулятора фокусного расстояния объектива микроскопа, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, перемещайте движок до установки F_1 , взятого из таблицы 1 для вашей бригады.
2. Установите аналогичным образом фокусное расстояние окуляра F_2 и запишите эти значения в табл. 2.
3. С помощью миллиметровой линейки измерьте расстояния d_1 , d_2 , f_1 , f_2 и запишите их в таблицу 2.

4. По формулам (6) и (7) и (8) рассчитайте $k_{об}$, $k_{ок}$ и Γ и запишите эти значения в табл. 2.
5. Рассчитайте по формуле (9) теоретическое значение оптического интервала Δt по параметрам, указанным в нижней части окна.
6. Определите масштаб шкалы окна оптической схемы микроскопа. Для этого измерьте с помощью миллиметровой линейки на экране монитора фокусное расстояние F_1 и сопоставьте его со значением, указанным в левом нижнем прямоугольнике окна оптической схемы.
7. Измерьте с помощью миллиметровой линейки на экране монитора оптический интервал микроскопа, приведите его в соответствие с масштабом шкалы окна и запишите полученное значение интервала в табл. 2 (графа $\Delta \varepsilon$).
8. Сопоставьте полученные экспериментальные значения оптического интервала и увеличения микроскопа с указанными в окошке опыта значениями и сделайте анализ опыта.
9. Сделайте оценку погрешности измерений.

ТАБЛИЦА 1.

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
F_1 мм	35	39	43	47	51	55	59	63
	37	41	45	49	53	57	61	65
F_2 мм	40	42	44	46	48	50	52	54
	41	43	45	47	49	51	53	55

ТАБЛИЦА 2.

F_1 мм	F_2 мм	d_1 мм	d_2 мм	f_1 мм	f_2 мм	$k_{об}$	$k_{ок}$	Γ	$\Delta \varepsilon$ мм

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется линзой?
2. Какая линза называется тонкой?
3. Что такое главная и побочная оптические оси?
4. Что называется фокусом линзы?
5. Как можно построить изображение произвольной точки в любой линзе?
6. Можно ли с помощью рассеивающей линзы получить увеличенное изображение?
7. Можно ли с помощью собирающей линзы получить уменьшенное изображение предмета?

8. Сформулируйте принцип Ферма.
9. Что называется оптической силой линзы, в каких единицах эта сила измеряется?
10. Запишите формулу тонкой линзы.
11. Назовите aberrации оптических систем.
12. Постройте ход лучей в микроскопе, зрительной трубе Кеплера и фотоаппарате.
13. Какая оптическая система называется телескопической?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_2. **ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике (Савельев, т.2, §119,125-127,129,130). Запустите программу. Выберите «Оптика» и «Интерференционный опыт Юнга». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с моделированием процесса сложения когерентных электромагнитных волн.
- * Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн от двух источников (щелей).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Между ДИФРАКЦИЕЙ и ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ нет существенных физических различий. Оба явления заключаются в перераспределении в пространстве энергии светового потока, возникающем в результате суперпозиции волн.

КОГЕРЕНТНОСТЬЮ называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

КОГЕРЕНТНЫМИ называются волны, для которых разность фаз возбуждаемых ими колебаний остается постоянной во времени. Когерентными являются гармонические волны с кратными частотами.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ называется устойчивое перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным количеством дискретных когерентных источников волн.

ДИФРАКЦИЕЙ называется устойчивое перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых расположенными непрерывно когерентными источниками волн. Одним из проявлений дифракции является распространение волны в область геометрической тени, т.е. туда, куда не попадают световые лучи.

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА: каждый элемент волновой поверхности является источником вторичной сферической волны, а волна в любой точке перед этой поверхностью (с другой стороны от поверхности, нежели реальный источник волны) может быть найдена как результат суперпозиции волн, излучаемых указанными вторичными источниками.

ЗОНАМИ ФРЕНЕЛЯ называются такие участки на поверхности волнового фронта, для которых излучение от двух соседних участков при сложении дает практически нулевой (минимальный) результат (излучение от двух соседних зон Френеля компенсируется). Расстояния от краев каждой зоны до точки наблюдения отличаются на $\lambda/2$.

Величина напряженности электрического поля dE электромагнитной волны (ЭМВ), излучаемой элементарным участком площадью dS волновой поверхности в точке наблюдения, расположенной на расстоянии r от этого участка, равна:

$$dE = K \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0),$$

где множитель a_0 определяется амплитудой светового колебания в том месте, где расположена площадка dS , коэффициент K зависит от угла между нормалью к площадке dS и направлением на точку наблюдения,

$$k = 2\pi/\lambda - \text{волновое число.}$$

Аналогичная формула будет справедлива для любого точечного источника гармонической волны.

Для двух точечных источников (см. рисунок), расположенных на расстоянии d друг от друга на линии, параллельной экрану, отстоящему от линии источников (1 и 2) на расстоянии L , максимум при интерференции волн на экране наблюдается при условии, что разность хода Δr волн, приходящих в данную точку, кратна длине волны:

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

Формула связи:

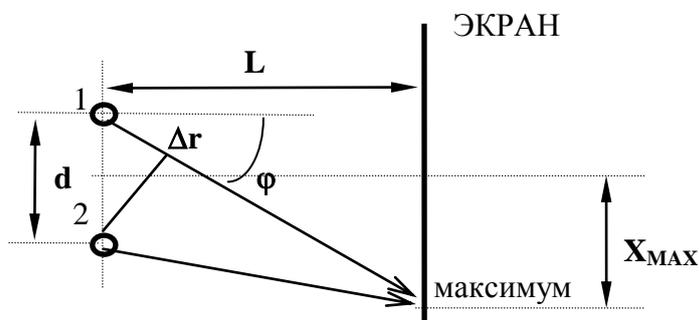
$$d \sin(\varphi) = m\lambda$$

для первого максимума и при большом расстоянии до экрана $L \gg d$, когда

$$\sin(\varphi) \approx \text{tg}(\varphi) \approx \frac{X_{\text{MAX}}}{L},$$

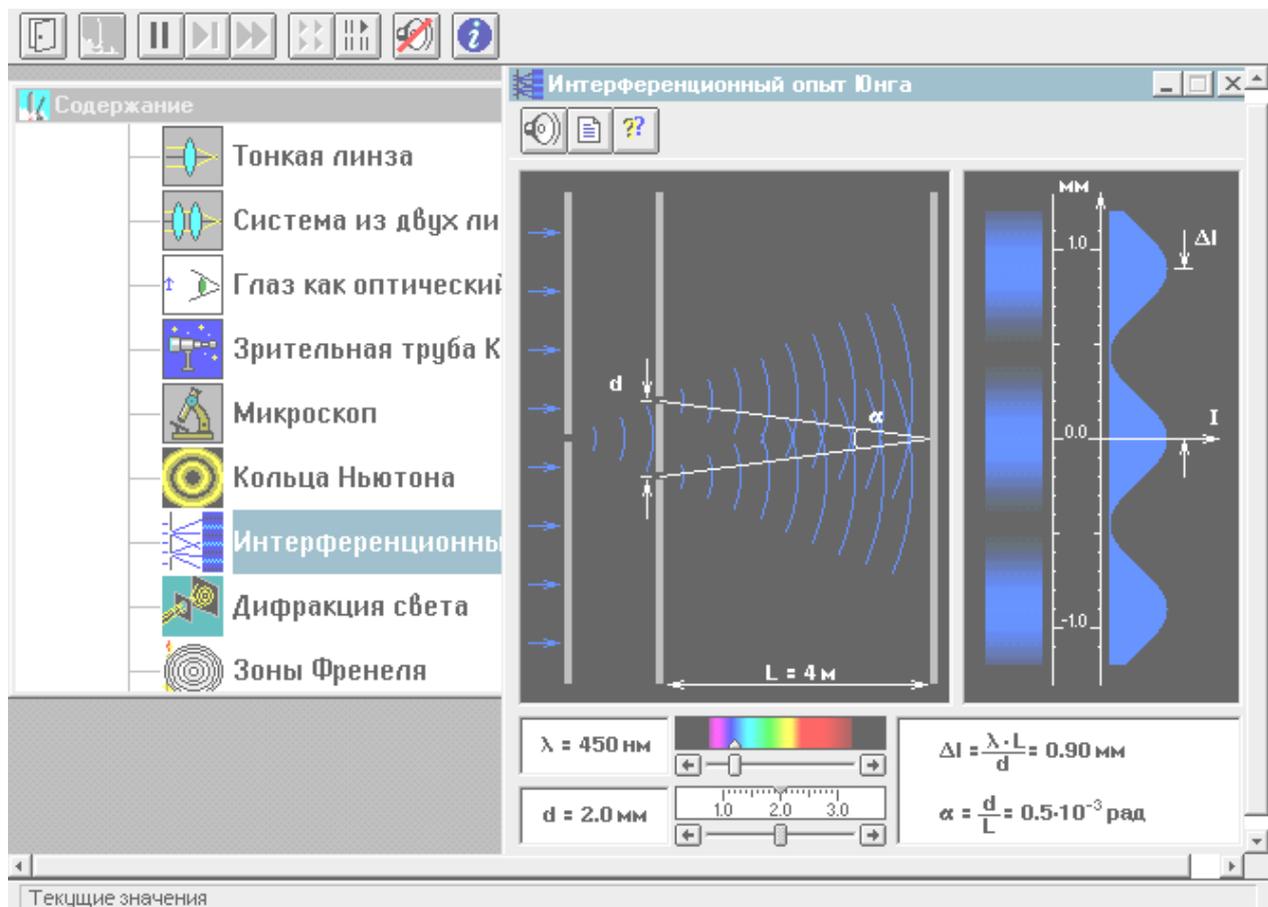
преобразуется так:

$$\frac{X_{\text{MAX}} d}{L} = \lambda, \text{ откуда } X_{\text{MAX}} = \lambda L \frac{1}{d}.$$



МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.



Зарисуйте необходимое с экрана в свой конспект лабораторной работы.
Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ:

Подведите маркер мыши к движку регулятора вблизи картинке спектра, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, двигайте движок, установив числовое значение длины волны λ_1 , взятое из таблицы 1 для вашей бригады.

Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора расстояния между щелями, установите минимальное значение $d = 1$ мм.

Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние X_{MAX} между нулевым и первым максимумами и запишите в таблицу 2.

Увеличивая d каждый раз на 0.3 мм, измерьте еще 9 значений расстояния X_{MAX} .

Устанавливая новые числовые значения длины волны λ , из таблицы 1 для вашей бригады, повторите измерения по п.2, записывая результаты в таблицы 3,4,5.

ТАБЛИЦА 1. Примерные значения длины волны (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
λ_1	400	405	410	415	420	425	430	435
λ_2	500	505	510	515	520	525	530	535
λ_3	580	585	590	595	600	605	610	615
λ_4	630	635	640	645	650	655	660	665

ТАБЛИЦЫ 2-5. Результаты измерений при $\lambda = \underline{\hspace{1cm}}$ нм

d[мм]										
X_{MAX} [мм]										
$1/X_{MAX}$ [мм ⁻¹]										

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Рассчитайте и внесите в таблицы значения обратного расстояния между щелями.

Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей смещения первого максимума X_{MAX} от обратного расстояния между щелями (указав на них длину волны λ).

Для каждой линии определите по графику экспериментальное значение произведения λL , используя формулу:

$$\lambda L = \frac{\Delta(X_{MAX})}{\Delta(\frac{1}{d})}$$

Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного произведения λL и абсолютную ошибку измерений данного произведения.

Запишите ответ и проанализируйте ответы и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля:

1. Что такое волна?
2. Что такое гармоническая волна?
3. Что такое длина волны?
4. Напишите математическое условие того, что функция $f(x,t)$ описывает волну.
5. Что определяет форму волны и направление ее распространения?
6. Напишите математическую функцию, определяющую одномерную гармоническую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси Ox .
7. Что такое когерентность?
8. Дайте определение когерентных волн.
9. Дайте определение явления интерференции.
10. Дайте определение явления дифракции.
11. Что такое волновая поверхность?
12. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
13. Дайте определение зон Френеля.
14. Напишите формулу для напряженности электрического поля dE электромагнитной волны (ЭМВ), излучаемой элементарным участком площадью dS волновой поверхности в точке наблюдения, расположенной на расстоянии r от этого участка. Поясните рисунком.
15. Что такое разность хода двух гармонических волн, излучаемых двумя источниками.
16. При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается максимум?
17. При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается минимум?
18. В опыте Юнга расстояние между двумя щелями 2 мм, экран расположен на расстоянии 4 м от щелей. Определить расстояние между темными интерференционными полосами на экране, если щели освещаются красным светом длиной волны 700 нм. Если на пути одного из интерферирующих лучей поместить тонкую стеклянную пластинку с

показателем преломления 1,5, интерференционная картина на экране сместится на 10 полос. Найти толщину этой пластинки.

19. В опыте Юнга расстояние между щелями 1 мм, расстояние от щелей до экрана 10 м. Щели освещаются зеленым светом длиной волны 500 нм. Найти положение двух первых темных полос на экране. На пути одного из интерферирующих лучей помещают стеклянную пластинку толщиной 15 мкм и с показателем преломления 1,5. В какое положение при этом смещается центральная интерференционная полоса?

20. Найти расстояние между щелями в опыте Юнга, если третий интерференционный максимум находится на расстоянии 3 мм от центральной светлой полосы. Расстояние от щелей до экрана 5 м. Установка освещается монохроматическим светом длиной волны 650 нм. Какой толщины пластинку нужно поместить на пути одного из интерферирующих лучей, чтобы центральная светлая полоса переместилась в положение шестой светлой полосы? Показатель преломления пластинки 1,5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 22, §174; 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 31, § 31.3. Запустите программу «Открытая физика 1.1». Выберите «Оптика» и «Кольца Ньютона». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с моделированием явления интерференции света в тонких плёнках.
- Изучение интерференции полос равной толщины в схеме колец Ньютона.
- Определение радиуса кривизны линзы.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются при отражении света от воздушного зазора,

образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис.1).

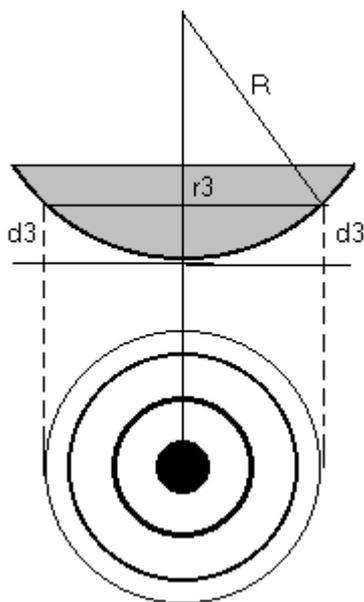


Рис.1

Если на линзу падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, будут интерферировать между собой. При этом образуются интерференционные полосы, имеющие форму концентрических светлых и тёмных колец, убывающей ширины.

В отражённом свете оптическая разность хода с учётом потери полуволны будет равна

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где d - толщина воздушного зазора. Из рис.1 следует, что

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2. \quad (2)$$

Учитывая, что d^2 является величиной второго порядка малости, то из (2) получим:

$$d = \frac{r^2}{2R}. \quad (3)$$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

В точках, для которых оптическая разность хода равна:

$$\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

возникают тёмные кольца. Из формул (4) и (5) радиус k -ого тёмного кольца будет равен:

$$r_k^2 = kR\lambda \quad (6)$$

Формула (6) позволяет определить радиус кривизны линзы:

$$R = \frac{r^2}{k\lambda}.$$

Вследствие деформации стекла, а также наличия на стекле пылинок невозможно добиться плотного примыкания линзы и пластины в одной точке. Поэтому при определении радиуса кривизны линзы пользуются другой формулой, в которую входит комбинация из двух значений радиусов интерференционных колец r_m и r_n , что позволяет исключить возможный зазор в точке контакта линзы и стеклянной пластины:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda}. \quad (7)$$

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Внимательно рассмотрите окно опыта, показанное на рисунке 2, и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.
2. Зацепите мышью движок регулятора длины волны монохроматического света и установите первое значение длины волны из таблицы 1 для вашей бригады. Аналогичным образом установите первое значение радиуса кривизны линзы R .

ВНИМАНИЕ! Цель работы - проверить соответствие установочного значения радиуса кривизны линзы и рассчитанного по формуле (7).

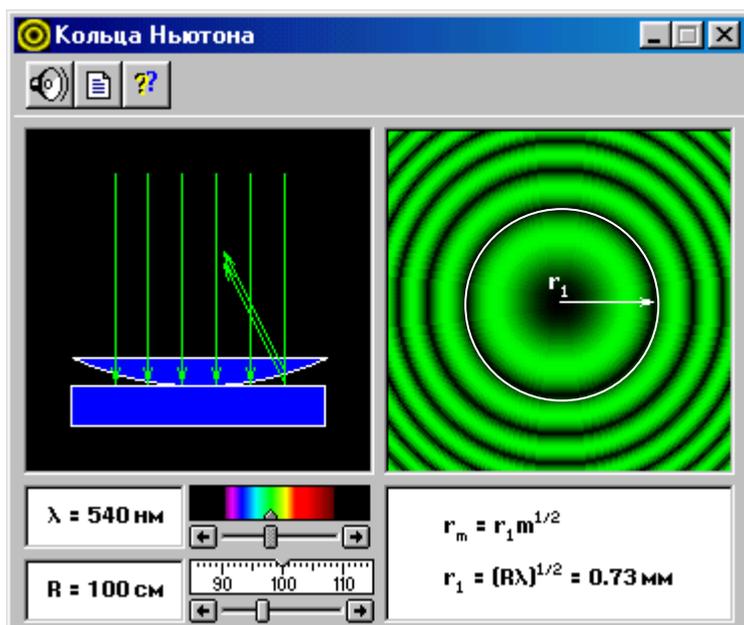


Рис.2

3. По формуле $r_m = r_1 m^{\frac{1}{2}}$ и указанному значению r_1 в правом нижнем прямоугольнике окна опыта рассчитайте значения радиусов 3, 4, 5 и 6-ого тёмных колец Ньютона и запишите эти значения в таблицу 2.
4. По формуле (7) для $m_1 = 3$ и $n_1 = 5$ и $m_2 = 4$ и $n_2 = 6$ рассчитайте радиусы кривизны линзы R_1^* и R_2^* и запишите эти значения в табл.2 .
5. Установите мышью вторые значения радиуса кривизны линзы и длины волны из таблицы 1 и выполните измерения п.п. 3 и 4.
6. Проанализируйте полученные результаты и оцените погрешность проведённых измерений.

Таблица 1. Значения длины волны и радиуса кривизны линзы.

Бригады	λ_1 , нм	λ_2 , нм	R_1 , см	R_2 , см
1,5	400	640	50	180
2,6	460	680	70	160
3,7	520	730	90	140
4,8	560	760	110	120

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов.

$\lambda_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$				$\lambda_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$			
r_3	r_5	r_4	r_6	r_3	r_5	r_4	r_6
$R_1^* =$		$R_2^* =$		$R_3^* =$		$R_4^* =$	

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое полосы равной толщины и равного наклона? Где они локализованы?
2. Проведите расчёт интерференционной картины в тонкой плёнке.
3. Что называется временем когерентности некогерентной волны?
4. Что называется длиной когерентности?
5. Почему для некогерентного света число видимых интерференционных колец будет ограниченным? От чего будет зависеть это число?
6. Объясните, почему расстояние между кольцами изменяется с изменением радиуса кривизны линзы при неизменной длине волны?
7. Как изменится картина колец Ньютона, если воздушный зазор между линзой и пластиной заполнить водой?

8. Почему в отражённом свете в центре наблюдается тёмное кольцо?
9. Как изменится картина колец Ньютона, если наблюдение проводить в проходящем свете?
10. Почему масляное пятно на поверхности жидкости имеет радужную окраску?
11. Объясните, как явление интерференции света в тонких плёнках используется для просветления оптики?
12. На мыльную пленку под углом 30° к ее поверхности падает параллельный пучок лучей белого света. При какой минимальной толщине пленки отраженные от нее лучи желтого цвета с длиной волны 600 нм будут максимально ослаблены вследствие интерференции? В какой цвет будет в этом случае окрашена пленка в проходящем свете?
13. Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона равно 2,7 мм. Радиус кривизны линзы 1,5 м. Наблюдение проводится в отраженном свете. Найти длину волны монохроматического света, падающего нормально на установку.
14. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено водой. Установка освещается монохроматическим светом длиной волны 600 нм, падающим нормально. Радиус кривизны линзы 1,5 м. Определить показатель преломления воды, если радиус третьего светлого кольца в отраженном свете 1,3 мм.
15. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом длиной волны 550 нм, падающим нормально. Определить радиус кривизны линзы, если расстояние между девятым и четвертым светлыми кольцами в проходящем свете 0,81 мм.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_4

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА ОТ ОДНОЙ ЩЕЛИ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте лекций и в учебниках:
1. Трофимова Т.И. Курс физики. § 179; 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 32, § 32.3.

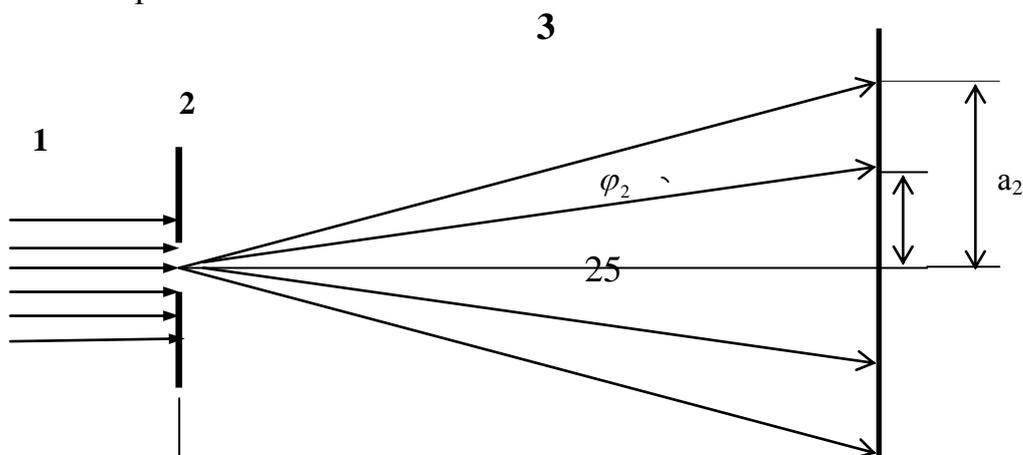
Запустите программы: «Оптика» и «Дифракция света». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте и запишите краткие теоретические сведения в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ :

- Знакомство со схемой дифракции Фраунгофера от одной щели в когерентном свете.
- Определение углов дифракции в параллельных лучах.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Дифракция Фраунгофера наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию. Схема наблюдения дифракции Фраунгофера от одной щели показана на рис. 1.



φ_1 a_1

L

Рис. 1.

Параллельный монохроматический пучок света 1 падает нормально на щель 2, длина которой много больше её ширины d . Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка плоскости щели, до которой дошло световое колебание, становится источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны под углами дифракции $\varphi_1, \varphi_2, \dots$, т.е. свет дифрагирует при прохождении через щель. Дифрагированные пучки являются когерентными и могут интерферировать при наложении. Результат интерференции в виде полос с периодическим распределением интенсивности наблюдается на экране 3, находящемся на расстоянии L .

Условие дифракционного максимума на основе метода зон Френеля определяется формулой:

$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots).$$

Более точный расчёт интерференционной картины от одной щели даёт следующие формулы, определяющие углы дифракции, соответствующие дифракционным максимумам:

$$\begin{aligned} \text{первого порядка} \quad d \sin \varphi_1 &= \pm 1,43\lambda; \\ \text{второго порядка} \quad d \sin \varphi_2 &= \pm 2,46\lambda; \\ \text{третьего порядка} \quad d \sin \varphi_3 &= \pm 3,47\lambda. \end{aligned} \quad (1)$$

Из этих формул, зная ширину щели d и длину волны света λ , можно теоретически рассчитать направления на точки экрана, в которых амплитуда, a , следовательно, и интенсивность света максимальна. Аналогичные расчеты можно сделать из экспериментальных данных по измеренным на опыте значениям a_1, a_2 , и a_3 и заданному расстоянию между щелью и экраном L : (для малых углов допускаем: $\sin \alpha \approx \text{tg } \alpha$). Тогда:

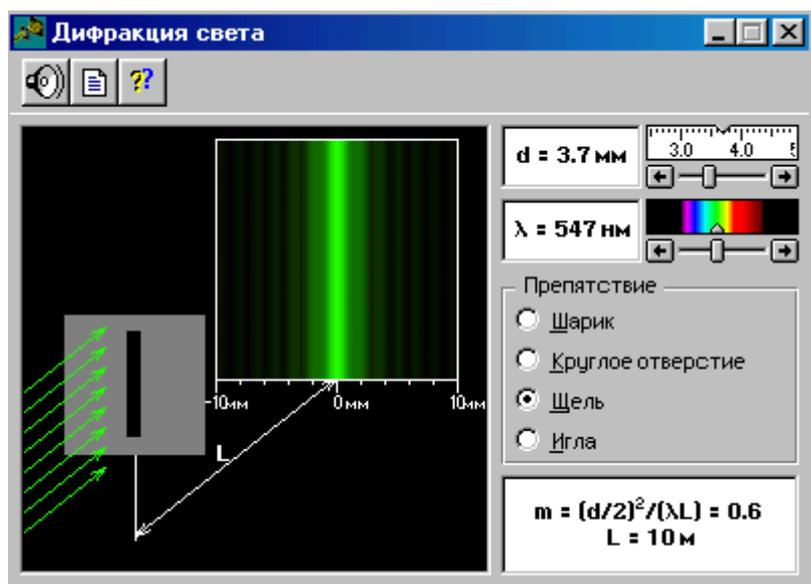
$$\sin \varphi_1 \approx \frac{a_1}{L}; \quad \sin \varphi_2 \approx \frac{a_2}{L}; \quad \sin \varphi_3 \approx \frac{a_3}{L}. \quad (2)$$

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие элементы эксперимента и зарисуйте их в конспект. Получите у преподавателя допуск для выполнения лабораторной работы.

ИЗМЕРЕНИЯ:

1. Подведите маркер мыши к движку регулятора вблизи картинке спектра, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, двигайте движок до установки значения длины волны λ_1 , взятого из таблицы 1 для вашей бригады.



2. Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора расстояния между щелями, установите минимальное расстояние $d = 2$ мм. Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние a_1 между нулевым и первым максимумами, a_2 – между нулевым и вторым максимумами и т. д., до четвёртого максимума. Запишите эти значения в таблицу 2. Увеличивая d на 0,5 мм, проведите эти измерения ещё 4 раза.

3. Согласно таблице 1, устанавливая новые числовые значения длины волны λ для вашей бригады, повторите измерения по п.2, записывая результаты измерения в таблицы 3,4,5.

ТАБЛИЦА 1. Значения длины волны λ (в нм)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
λ_1	400	405	410	415	420	425	430	435

λ_2	500	505	510	515	520	525	530	540
λ_3	580	585	590	595	600	605	610	615
λ_4	630	635	640	645	650	655	660	665

ТАБЛИЦЫ 2-5 Результаты измерений при $\lambda = \underline{\hspace{2cm}}$ нм

d, мм	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
a ₁ , мм					
a ₂ , мм					
a ₃ , мм					
a ₄ , мм					
$\sin \varphi_1 \times 10^3$					
$\sin \varphi_2 \times 10^3$					
$\sin \varphi_3 \times 10^3$					
$\sin \varphi_4 \times 10^3$					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:

1. Измерьте по шкале экрана и внесите в таблицы значения a₁, a₂, a₃, a₄.
2. Рассчитайте по формулам (2) и внесите в таблицы значения синусов углов дифракции.
3. Сравните полученные результаты с теоретическими, рассчитанными по формулам (1).
4. Оцените абсолютную ошибку измерений углов дифракции.
5. Проведите качественные наблюдения изменения дифракционной картины при увеличении размера щели от минимального до его максимального значения при неизменной длине волны и запишите результаты этих наблюдений в свой отчёт.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется дифракцией Фраунгофера?
2. Что называется дифракцией Френеля?

3. Что такое световая волна?
4. Что такое зона Френеля?
5. Что такое пятно Пуассона и почему оно возникает?
6. Запишите условия максимумов и минимумов при дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера.
7. Решите задачу, предложенную в работе под знаком вопроса в верхней части экрана.
8. На дифракционную решетку падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Определить число штрихов решетки на 1 мм, если максимум второго порядка виден под углом 30° к нормали. Чему равен угол между максимумами интенсивности двух первых порядков?
9. Дифракционная решетка содержит 1200 штрихов на 1 мм. На нее падает нормально параллельный пучок белого света. Какой наибольший порядок спектра дает эта решетка? Каково угловое расстояние между границами этого спектра?
10. На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм, падает нормально белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 4 м.
11. На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм, в направлении нормали к ее поверхности падает белый свет. Какой наибольший порядок дифракционного максимума дает эта решетка для длинноволновой границы света и какой для коротковолновой? Определить, под каким углом виден спектр первого порядка.
12. На дифракционную решетку с постоянной 6 мкм нормально падает монохроматический свет. Угол между максимумами первого и второго порядков равен $4^\circ 36'$. Определить длину световой волны.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_5. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике (Савельев, т.2, §129,130). Запустите программу. Выберите «Оптика» и «Дифракционная решетка». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с моделированием процесса сложения когерентных электромагнитных волн.
- * Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн с периодической структурой (дифракционной решеткой).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Зарисуйте с экрана компьютера то, что расположено в трех прямоугольных рамках. ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ называется совокупность большого числа N одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние, прямоугольных щелей в плоском непрозрачном экране.

ПЕРИОДОМ (постоянной) дифракционной решетки называется расстояние d между серединами соседних щелей или сумма ширины щели b и ширины непрозрачного участка a .

При анализе излучения, проходящего через решетку, обычно используют линзу и экран, расположенный в фокальной плоскости линзы на расстоянии L от нее. Линза собирает параллельные лучи в одну точку на экране. Положение X точки на экране зависит от угла падения θ лучей на линзу:

$$X = L \sin(\theta).$$

Для очень малых углов:

$$\sin(\theta) = \theta \text{ и } X = \theta L.$$

РАЗНОСТЬ ХОДА лучей от соседних щелей:

$$\Delta = d \sin(\theta).$$

РАЗНОСТЬ ФАЗ лучей от соседних щелей:

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta).$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ, идущего от решетки под углом θ :

$$I_{\text{РЕШ}} = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)},$$

где I_0 - интенсивность, создаваемая одной щелью против центра линзы, b - ширина щели.

Первый множитель обращается в 0 в точках, для которых $b \sin(\theta_k) = \pm k\lambda$ ($k = 1, 2, \dots$).

Второй множитель принимает значение N^2 в точках, удовлетворяющих условию $d \sin(\theta_m)$

$= \pm m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$). Последнее условие определяет положение ГЛАВНЫХ

МАКСИМУМОВ излучения, а m называется порядком максимума. Интенсивность в главном максимуме преобразуем, раскладывая синус в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами разложения:

$$I_m = N^2 I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \theta_m}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \theta_m}{\lambda}\right)^2} = I_{0N} \frac{\sin^2\left(m\pi \frac{b}{d}\right)}{\left(m\pi \frac{b}{d}\right)^2} = I_{0N} \left[1 - \frac{1}{6} \left(m\pi \frac{b}{d}\right)^2\right]^2.$$

Обозначим $R_m = \frac{I_m}{I_{0N}}$.

Отношение R_m интенсивности в m -том максимуме к интенсивности в нулевом максимуме называется «относительной интенсивностью m -того максимума».

Формулу:

$$\sqrt{R_m} = 1 - \frac{1}{6} (m\pi b)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^2$$

можно проверить экспериментально и из соответствующего графика получить ширину щели.

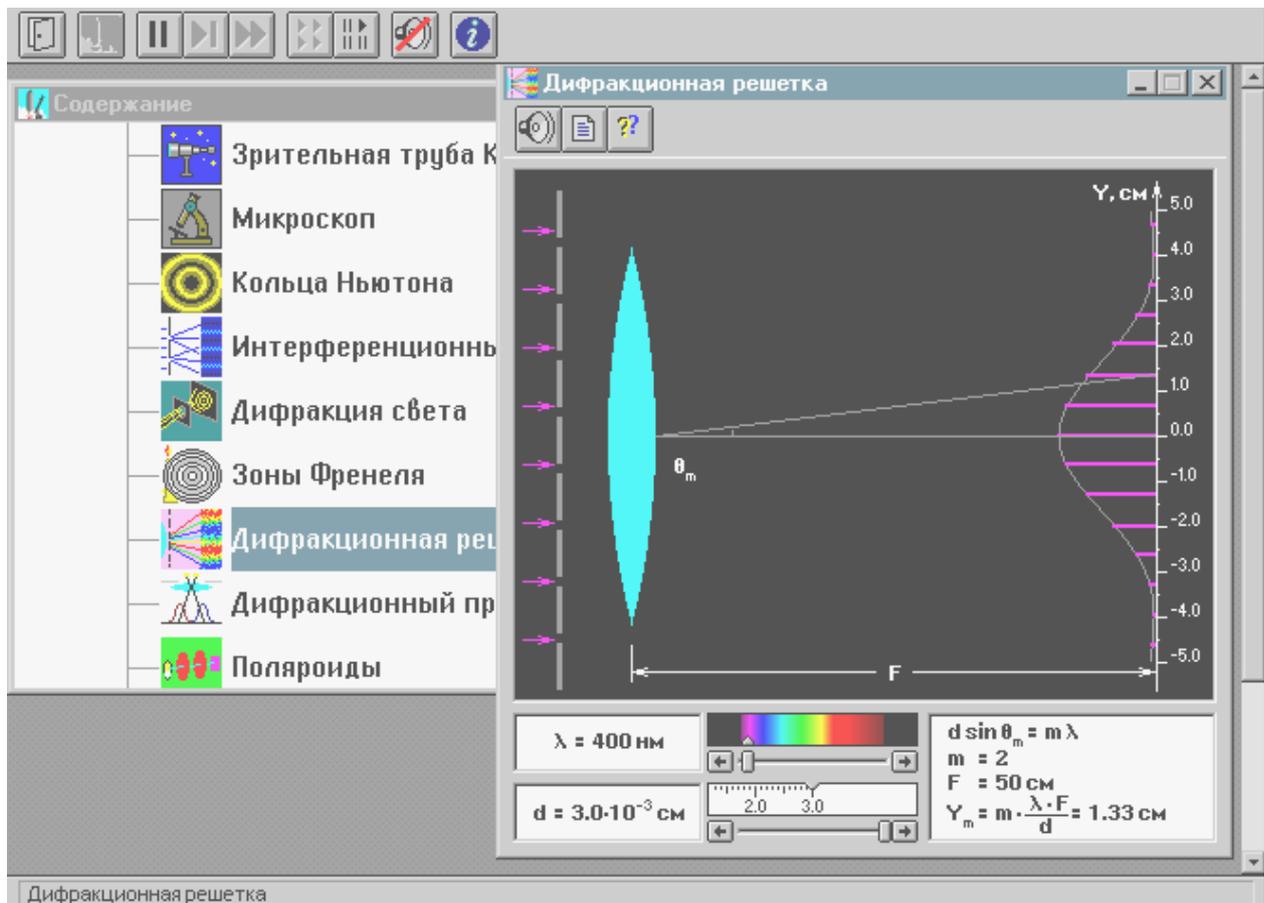
МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

При включении программы моделирования автоматически устанавливаются следующие параметры: порядок максимума $m=1$, длина волны 0.45 мкм, расстояние между щелями $d = 20$ мкм.

Нажимая левую кнопку мыши, установив ее маркер на дифракционной картине, меняйте m от 0 до 3 и наблюдайте изменение числового значения координаты максимума на экране. Установите длину волны излучения, соответствующую желтому цвету и, меняя m и d , снова наблюдайте картину интерференции.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.



ЭКСПЕРИМЕНТ: **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ**

Установите расстояние между щелями $d = 20$ мкм.

Подведите маркер мыши к кнопке на спектре и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом состоянии, перемещайте кнопку до тех пор, пока над спектром не появится значение длины волны, равное взятому из таблицы 1 для вашей бригады

Измерьте линейкой на экране монитора длины светящихся отрезков, соответствующих интенсивности соответствующих максимумов на дифракционной картине. Запишите значения интенсивности в таблицу 2.

Увеличивая d на 1 мкм, повторите измерения по п.3

Установив новое значение длины волны из таблицы 1 повторите измерения, записывая результаты в таблицу 3.

ТАБЛИЦА 1. Примерные значения длины волны (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
λ_1 [нм]	400	410	420	430	440	450	460	470
λ_2 [нм]	600	610	620	630	640	650	660	670

ТАБЛИЦЫ 2,3. Результаты измерений при $\lambda =$ _____ нм.

d[МКМ]	20	21	22	23	24	25	26	28	30
$1/d^2[М]^{-2}$									
$I_{0N}[ММ]$									
$I_1 [ММ]$									
$I_2 [ММ]$									
$I_3 [ММ]$									
$I_4 [ММ]$									
$\sqrt{R_1}$									
$\sqrt{R_2}$									
$\sqrt{R_3}$									
$\sqrt{R_4}$									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицы 2 и 3 корни из относительных амплитуд максимумов. Постройте по таблице 2 на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей корня из относительной амплитуды от обратного периода решетки для всех максимумов (указав на них номер максимума). На втором рисунке постройте результаты по таблице 3.

По наклону каждого графика определите экспериментальное значение ширины щели,

используя формулу
$$b = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sqrt{\frac{\Delta(\sqrt{R_m})}{\Delta(\frac{1}{d^2})}}$$

Вычислите среднее значение ширины щели, проанализируйте ответы и графики.
Истинное значение $b = 5$ мкм.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение световой волны.
2. Дайте определение гармонической волны.
3. Дайте определение электромагнитной волны.
4. Напишите формулу зависимости напряженности электрического поля от времени и координаты для одномерной гармонической ЭМВ, распространяющейся вдоль оси ОХ.
5. Какие волны называются когерентными?
6. Дайте определение дифракции.
7. Что такое дифракционная решетка?
8. Для каких целей используется дифракционная решетка?
9. Что такое постоянная дифракционной решетки?
10. Зачем между дифракционной решеткой и экраном ставится собирающая линза?
11. Напишите формулу разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей дифракционной решетки.
12. Напишите формулу разности фаз лучей от соседних щелей.
13. Как формируются главные максимумы дифракционной картины?
14. Нарисуйте, как распространяется после решетки одна плоская гармоническая волна, падающая перпендикулярно плоскости решетки.

15. Нарисуйте, как будут распространяться после решетки две плоские гармонические волны с близкими длинами волн, падающие перпендикулярно плоскости решетки.
16. Можно ли сделать дифракционную решетку для радиолокационной волны? Как она будет отличаться от обычной дифракционной решетки для видимого света?
17. На дифракционную решетку падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Определить число штрихов решетки на 1 мм, если максимум второго порядка виден под углом 30° к нормали. Чему равен угол между максимумами интенсивности двух первых порядков?
18. Дифракционная решетка содержит 1200 штрихов на 1 мм. На нее падает нормально параллельный пучок белого света. Какой наибольший порядок спектра дает эта решетка? Каково угловое расстояние между границами этого спектра?
19. На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм, падает нормально белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 4 м.
20. На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм, в направлении нормали к ее поверхности падает белый свет. Какой наибольший порядок дифракционного максимума дает эта решетка для длинноволновой границы света и какой для коротковолновой? Определить, под каким углом виден спектр первого порядка.
21. На дифракционную решетку с постоянной 6 мкм нормально падает монохроматический свет. Угол между максимумами первого и второго порядков равен $4^\circ 36'$. Определить длину световой волны.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 28, §213. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 37, §37.1. Запустите программу «Квантовая физика». Выберите: «Дифракция электронов». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Изучение волновых свойств электронов

- Знакомство с компьютерной моделью дифракции электронов при их рассеянии на одномерной монокристаллической решётке (электронография).
- Определение периода кристаллической решётки «плёнки металла».

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ПЕРИОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ - расстояние между атомами в элементарной ячейке кристалла.

ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ - волны, связанные с любой свободно движущейся микрочастицей и отражающие её квантовую природу. Длина волны и частота волн де Бройля связаны соотношениями

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad \nu = \frac{E}{h}. \quad (1)$$

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ - лежащее в основе квантовой теории представление о том, что в поведении микрочастиц проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства.

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ - рассеяние электронов веществом, при котором из начального пучка частиц возникают дополнительно отклонённые пучки этих частиц.

Дифракция электронов может быть объяснена только на основе квантовомеханических представлений о микрочастице (электроне) как о волне. Основные геометрические закономерности дифракции электронов ничем не отличаются от закономерностей дифракции волн других диапазонов.

Общим условием дифракции волн любой природы является соизмеримость длины падающей волны с расстоянием между рассеивающими центрами:

$$\lambda \leq d. \quad (2)$$

Образование дифракционной картины при рассеянии электронов веществом в квантовой физике интерпретируется как распределение вероятности попадания электрона в различные точки экрана.

Прошедший через кристалл электрон в результате взаимодействия с кристаллической решёткой образца отклоняется от первоначального направления движения и попадает в некоторую точку фотопластины, установленной за кристаллом.

При длительной экспозиции постепенно возникает упорядоченная картина дифракционных максимумов и минимумов в распределении электронов, прошедших через кристалл. Точно предсказать, в какое место фотопластины попадёт данный электрон, нельзя, но можно указать

вероятность его попадания после рассеяния в ту или иную точку пластинки. Эта вероятность определяется квадратом модуля волновой функции электрона $|\Psi(x, y, z, t)|^2$, а дифракционная картина на экране возникает как результат вероятностного процесса.

ЭЛЕКТРОНОГРАФИЯ – метод исследования структуры кристаллических веществ, основанный на дифракционном рассеянии ускоренных электрическим полем электронов.

Он применяется для изучения атомной структуры кристаллов, аморфных тел и жидкостей, молекул газов и паров. При прохождении через вещество электроны, обладающие волновыми свойствами, взаимодействуют с атомами, в результате чего образуются дифрагированные пучки, интенсивность и расположение которых связаны с атомной структурой вещества и другими структурными параметрами. Рассеяние электронов определяется электростатическим потенциалом атомов, максимумы которого отвечают положениям атомных ядер.

Сильное взаимодействие электронов с веществом ограничивает толщину просвечиваемых образцов десятими долями мкм. Поэтому методами электронографии изучают атомную структуру мелкокристаллических веществ, структуру поверхностей твёрдых тел, например, при исследовании явлений коррозии металлов, адсорбции и катализа.

В основе расчёта элементов кристаллической ячейки и определения симметрии кристалла лежит измерение упорядоченного расположения дифракционных максимумов - точек или пятен («рефлексов») на электронограммах. С волновой точки зрения дифракция электронов полностью эквивалентна дифракции света на дифракционной решётке. Поэтому при рассеянии электронов на кристаллах положение главных максимумов определяется формулой дифракционной решётки:

$$d \sin \Theta = m\lambda. \quad (3)$$

При малых углах дифракции

$$\Theta \approx \frac{m\lambda}{d}. \quad (4)$$

Если на некотором расстоянии L от решётки поместить фотопластинку, то на ней будет зарегистрирована дифракционная картина в виде узких дифракционных полос – рефлексов, положения которых определяются при малых углах дифракции соотношением

$$x_m \approx L\Theta \approx \frac{mL\lambda}{d}, \quad (5)$$

откуда период кристаллической решётки (межплоскостное расстояние)

$$d \approx \frac{mL\lambda}{x_m} \quad (6)$$

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

Внимательно рассмотрите схему опыта на экране монитора и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

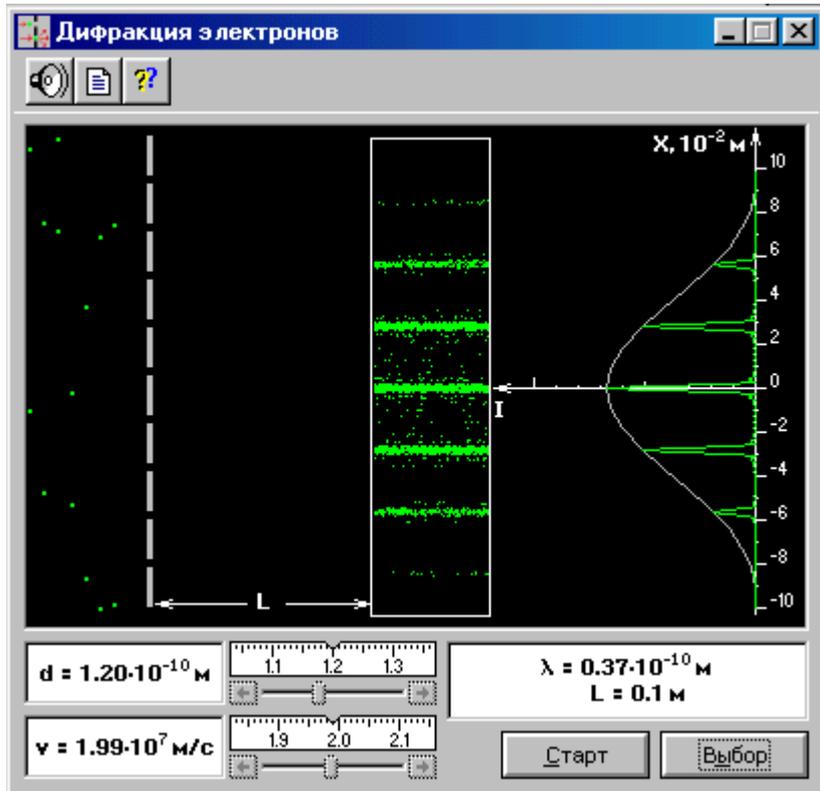


Рис.1

1. Нажмите мышью кнопку «Выбор» и, зацепив мышью движок регулятора периода решётки, установите значение $d = 1,5 \cdot 10^{-10}$ м.
2. Аналогичным образом установите первое значение скорости электронов, указанное в табл.1 для вашей бригады.
3. Нажмите мышью кнопку «Старт» и наблюдайте движение электронов через одномерную модель дифракционной кристаллической решётки и их регистрацию на фотопластинке.
4. Определите по шкале, расположенной в правой части окна, координаты первых трёх максимумов интенсивности дифракционной картины и запишите эти значения в таблицу 2.
5. Установите второе значение скорости для вашей бригады и повторите эти измерения ещё раз.

Таблица 1. Значения скорости электронов

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$v \cdot 10^7$, м/с	1,50 2,00	1,55 2,05	1,60 2,10	1,65 2,15	1,70 2,20	1,80 2,25	1,85 2,30	1,90 2,35

Таблица 2. Результаты измерений и расчётов

$V_1 =$					$V_2 =$				
λ	X_{m1}	X_{m2}	X_{m3}	$d_{\text{э сред}}$	λ	X_{m1}	X_{m2}	X_{m3}	$d_{\text{э сред}}$
$d_{\text{э}}$					$d_{\text{э}}$				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:

1. Рассчитайте для каждого значения x_m по формуле (6) период дифракционной решётки $d_{\text{э}}$, запишите эти данные в табл.2 и сравните полученное среднее значение с установочным.
2. Проведите оценку погрешности измерений.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите основные отличия кристаллических тел от аморфных.
2. Что такое кристаллическая решётка?
3. Что такое узлы кристаллической решётки?
4. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
5. Как можно классифицировать кристаллы?
6. Что такое ионная связь?
7. Что такое ковалентная связь?
8. Какие типы кристаллографических систем Вы знаете?
9. Определите основные свойства волн де Бройля.
10. В чём заключается соотношение неопределённостей?

11. Что такое волновая функция и в чём заключается её статистический смысл?
12. Запишите уравнение Шрёдингера для стационарных состояний.
13. Что такое дифракция микрочастиц?
14. Каковы особенности дифракции на пространственной решётке?
15. Сформулируйте условие Брэгга-Вульфа. Что оно определяет?
16. Кем и когда впервые была доказана возможность дифракции электронов?
17. Какую информацию можно получить из анализа электронограммы?
18. Определить длину волны де Бройля для частицы массой 1 г, движущейся со скоростью 10 м/с. Нужно ли учитывать в этом случае волновые свойства частицы, если она проходит расстояние 2 см? А для протона, движущегося с такой же скоростью через кристалл?
19. Электрон движется по окружности радиусом 0,5 см в однородном магнитном поле с индукцией 8 мТл. Определить длину волны де Бройля электрона.
20. Вычислить дебройлевские длины волн электрона, протона и атома урана, имеющих кинетическую энергию 100 эВ.
21. Какую энергию необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 пм?
22. Найти дебройлевскую длину волны молекул водорода, соответствующую их наиболее вероятной скорости при комнатной температуре (300 К).
23. При анализе рассеяния альфа-частиц на ядрах (опыты Резерфорда) прицельные расстояния принимались порядка 0,1 нм. Волновые свойства альфа-частиц, имеющих кинетическую энергию 7,7 МэВ, при этом не учитывались. Допустимо ли это?
24. Определить, во сколько раз отличаются дебройлевские длины волн электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов.
25. Электрон обладает кинетической энергией 100 эВ. Определить величину дополнительной энергии, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась вдвое.
26. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов 2 кВ, имеет дебройлевскую длину волны 0,215 пм. Найти массу частицы, если ее заряд равен двум элементарным.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_7

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.3, §9). Запустите программу. Выберите «Квантовая физика» и «Фотоэффект». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта.
- * Экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода фотокатода и постоянной Планка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ФОТОНЫ это частицы (кванты), поток которых является одной из моделей электромагнитного излучения (ЭМИ).

ЭНЕРГИЯ ФОТОНА:

$$E_{\text{ф}} = h\nu,$$

ν - частота излучения, h - постоянная Планка, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

ЭНЕРГИЯ часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-вольтах».

1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

МАССА ФОТОНА связана с его энергией соотношением Эйнштейна

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2, \text{ отсюда } m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

ИМПУЛЬС ФОТОНА:

$$p = m_{\phi} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{E_{\phi}}{c},$$

где λ - длина волны ЭМИ.

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ есть явление вылета электронов из вещества (металла, фотокатода) при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например, светом. Вылетевшие электроны называются ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

Кинетическая энергия электрона внутри вещества увеличивается на $h\nu$, но при вылете фотоэлектрона из вещества им совершается работа $A_{\text{ВЫХ}}$ (работа выхода) против сил электростатического притяжения к металлу.

У фотоэлектрона сообщенная ему фотоном порция энергии уменьшается на величину, равную работе выхода из металла (фотокатода), а оставшаяся часть имеет вид кинетической энергии фотоэлектрона вне металла (фотокатода):

$$E_{\text{К.ЭЛ}}^{\text{ВНЕ}} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}}.$$

Это соотношение называют формулой (законом) ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА. КРАСНАЯ ГРАНИЦА фотоэффекта есть минимальная частота ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия фотона равна работе выхода:

$$h\nu_{\text{КР}} = A_{\text{ВЫХ}}.$$

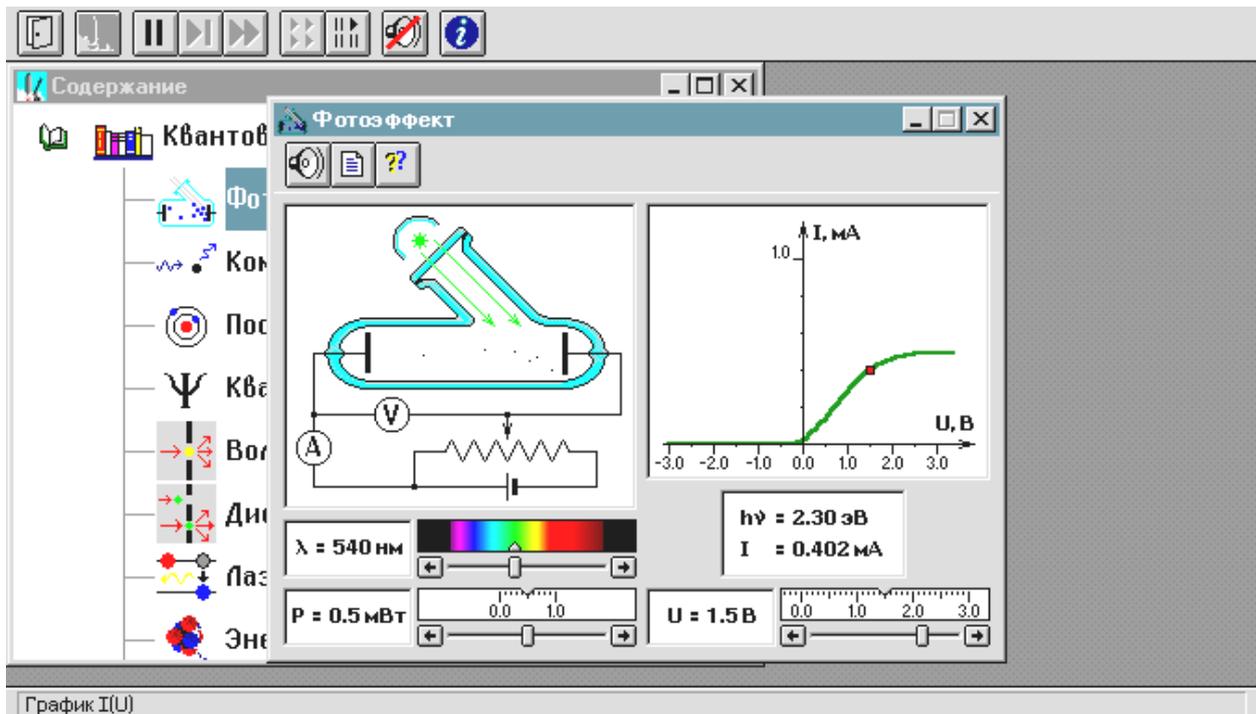
ЗАПИРАЮЩИМ (ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ) НАПРЯЖЕНИЕМ называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода, откуда следует выражение:

$$U_{\text{ЗАП}} = \frac{E_{\text{К.ЭЛ}}^{\text{ВНЕ}}}{e} = \frac{h\nu - A_{\text{ВЫХ}}}{e},$$

где e - заряд электрона.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.



Зацепите мышью движок реостата регулятора интенсивности (мощности) облучения фотокатода и установите его на максимум. Аналогичным образом установите нулевое напряжение между анодом и фотокатодом и минимальную длину волны ЭМИ. Наблюдайте движение электронов в фотоэлементе, изменяя напряжение до запирающего фототока.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно увеличивая длину волны облучения фотокатода. Добейтесь полного отсутствия фототока. Зафиксируйте самую большую длину волны (она будет равна $\lambda_{кр}$), при которой фототок еще присутствует. Запишите в тетрадь значение длины волны красной границы фотоэффекта ($\lambda_{кр}$).
2. Для более точного определения связи запирающего напряжения с длиной волны падающего излучения
 - Сначала установите значение запирающего напряжения в соответствии с таблицей 2.
 - Перемещая мышью вертикальную метку на спектре, установите такое максимальное значение длины волны, при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что практически все электроны долетают до анода и после этого движутся обратно к катоду).
 - Значения λ и $U_{зап}$ занесите в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ
для $U_{ЗАП} = \text{---}$

$i =$	1	2	3	4
$U_{ЗАПi}, \text{В}$				
$\lambda_i, \text{нм}$				
$1/\lambda_i, 10^6 \text{м}^{-1}$				

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИРАЮЩЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ
(не перерисовывать)

Бригады	$U_{ЗАП1}$	$U_{ЗАП2}$	$U_{ЗАП3}$	$U_{ЗАП4}$
1,5	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2,6	-0.2	-0.4	-0.6	-0.9
3,7	-0.3	-0.5	-0.7	-1.0
4,8	-0.4	-0.7	-0.8	-1.1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн.

Постройте график зависимости напряжения запираения ($U_{ЗАП}$) от обратной длины волны ($1/\lambda$).

Определите постоянную Планка, используя график и формулу

$$h = \frac{e \Delta(U_{ЗАП})}{c \Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

Используя длину волны красной границы фотоэффекта, вычислите значение работы выхода материала фотокатода.

Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

ТАБЛИЦА 3. Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{ВЫХ}, \text{эВ}$	2.2	2.3	6.3	2.1	4.7	2.0	4.0

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое фотоны?
2. Назовите все модели электромагнитного излучения.
3. Напишите формулу энергии фотона.
4. Напишите формулу, связывающую энергию фотона и его массу.
5. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
6. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
7. Опишите по шагам, что происходит с фотоном, падающим на границу металла.
8. Опишите по шагам, что происходит со свободным электроном металла, после его взаимодействия с фотоном.
9. Опишите, что происходит с электроном, входящим в состав атома металла, после его взаимодействия с фотоном.
10. Что такое работа выхода? Чья это характеристика?
11. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
12. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
13. Как устроен фотоэлемент?
14. Почему катод фотоэлемента называют фотокатодом?
15. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода.
16. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода ниже потенциала фотокатода?

17. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода выше потенциала фотокатода?
18. Как связана кинетическая энергия электрона у катода с его потенциальной энергией анода и почему?
19. Определить красную границу фотоэффекта для некоторого металла и максимальную скорость фотоэлектронов, если минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект, равно 4,45 эВ, а облучение металла осуществляется светом с длиной волны 200 нм.
20. Квант света с длиной волны 200 нм выбивает с поверхности платинового электрода фотоэлектрон. Определить суммарный импульс, сообщаемый при этом электроду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему кванту.
21. На поверхность металла с работой выхода 4,53 эВ падает электромагнитное излучение с длиной волны 180 нм. Определить красную границу фотоэффекта для этого металла и максимальную скорость вырванных электронов.
22. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 537 нм. Определить работу выхода электронов из металла и энергию фотонов, сообщаемых фотоэлектронам максимальную скорость 0,77 Мм/с.
23. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектронов, если красная граница фотоэффекта равна 600 нм и кинетическая энергия фотоэлектронов 3 эВ?
24. Фотон с энергией 10 эВ падает на серебряную пластину и вызывает фотоэффект. Определить импульс, полученный пластиной, если принять, что направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластины.
25. На пластинку падает монохроматический свет с длиной волны 0,42 мкм. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 0,95 В. Определить работу выхода электронов с поверхности пластины.
26. До какого максимального потенциала зарядится удаленный от других тел медный шарик при облучении его электромагнитным излучением с длиной волны 140 нм?
27. Плоскую цинковую пластинку освещают излучением со сплошным спектром, коротковолновая граница которого соответствует длине волны 30 нм. На какое максимальное расстояние от поверхности пластины может удалиться фотоэлектрон, если вне пластины имеется задерживающее однородное электрическое поле с напряженностью 10 В/см?
28. Кванты света энергией 4,9 эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода 4,5 эВ. Найти максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему фотону.
29. Следует ли учитывать волновые свойства электрона, ускоренного электрическим полем плоского конденсатора с напряженностью 10^3 В/см? Расстояние между пластинами 1 см. Первоначально электрон покоился.

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.3, §12, §28). Запустите программу. Выберите «Квантовая физика», «Постулаты Бора». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.
- * Экспериментальное определение постоянной Ридберга.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

СПЕКТРОМ электромагнитного излучения (ЭМИ) называется совокупность электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых атомами (молекулами) данного вещества.

ЛИНЕЙЧАТЫЙ спектр состоит из отдельных компонент (линий), близких к гармоническим. Расстояние между линиями (по шкале длин волн или частот) много больше ширины линий. Такой спектр излучают атомарные газы.

Кроме линейчатого выделяют еще ПОЛОСАТЫЙ спектр, который излучают молекулярные газы и СПЛОШНОЙ спектр, излучаемый нагретыми твердыми телами.

ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ атома: в центре атома расположено очень малое положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным (разрешенным) стационарным орбитам движутся электроны, масса которых во много раз меньше массы ядра.

ПОСТУЛАТЫ БОРА:

1. При движении по орбите электрон не испускает электромагнитного излучения (ЭМИ).

2. При поглощении ЭМИ (фотона) электрон переходит на более «высокую» разрешенную орбиту, на которой его энергия становится больше на величину $\Delta E_{эл}$, равную энергии поглощенного фотона $E_{ф}$. При обратном переходе электрон испускает фотон с такой же энергии $E_{ф} = |\Delta E_{эл}|$.

КВАНТОВАЯ модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней электрон не имеет точно определенной координаты и скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить (и нарисовать) только границы области его преимущественного движения (орбитали).

УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода используется для анализа квантовой модели атома. В результате решения этого уравнения получается ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ, которая зависит не только от координаты \vec{r} и времени t , но и от 4-х параметров, имеющих дискретный набор значений и называемых квантовыми числами. Они имеют названия: главное, азимутальное, магнитное и магнитное спиновое.

ГЛАВНОЕ квантовое число n может принимать целочисленные значения 1, 2, Оно определяет величину энергии электрона в атоме

$E_n = -\frac{E_i}{n^2}$, где E_i - энергия ионизации атома водорода (13.6 эВ).

АЗИМУТАЛЬНОЕ (ОРБИТАЛЬНОЕ) квантовое число l определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении $|\vec{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$. Оно принимает целочисленные значения $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

МАГНИТНОЕ квантовое число m_l определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона L_z на направление внешнего магнитного поля \vec{B} . Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, по модулю меньше или равные l .

$$L_z = \hbar m_l, \text{ где } m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l.$$

МАГНИТНОЕ спиновое квантовое число m_s определяет проекцию вектора собственного момента импульса электрона (СПИНА \vec{S}) на направление внешнего магнитного поля \vec{B} :

$$S_z = \hbar m_s$$

и принимает только 2 значения: $m_s = +1/2, -1/2$. Для модуля спина $|\vec{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$,

где s – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только одно значение.

Например, для электрона $s = \frac{1}{2}$ (аналогично, для протона и нейтрона). Для фотона $s = 1$.

ВЫРОЖДЕННЫМИ называются состояния электрона с одинаковой энергией.

КРАТНОСТЬ ВЫРОЖДЕНИЯ равна количеству состояний с одной и той же энергией.

КРАТКАЯ запись состояния электрона в атоме: ЦИФРА, равная главному квантовому числу, и БУКВА, определяющая азимутальное квантовое число:

Буква	s	p	d	e	f
Значение l	0	1	2	3	4

ПРАВИЛО ОТБОРА азимутального квантового числа $\Delta l = \pm 1$. Электрон в атоме может переходить только между состояниями, удовлетворяющему указанному правилу.

СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕРИЕЙ называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии:

Серия	Лаймана	Бальмера	Пашена	Брэкета
Переходы	$np \rightarrow 1s$	$ns \rightarrow 2p, nd \rightarrow 2p$	$nf \rightarrow 3d, np \rightarrow 3d$	$ng \rightarrow 4f, nd \rightarrow 4f$

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунки.

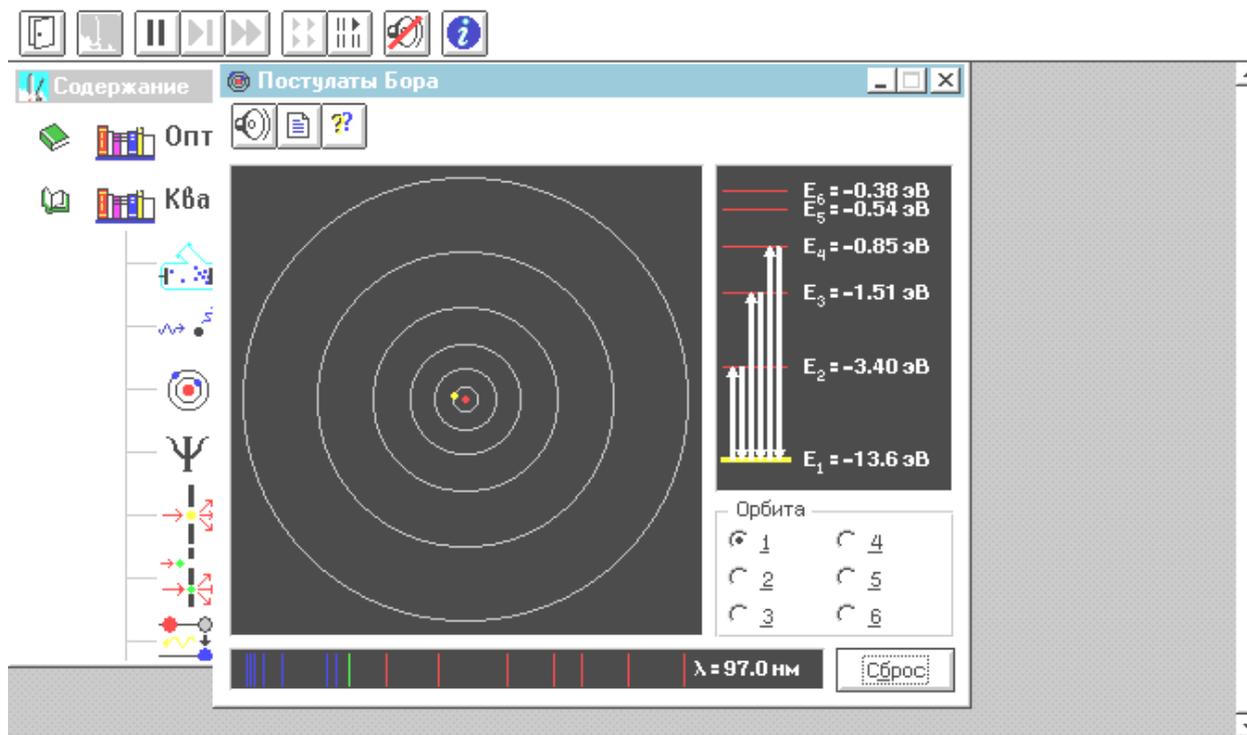


Схема эксперимента

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.

Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером n_0 , указанным в таблице 2 для вашей бригады и нажмите левую кнопку мыши.

Наблюдайте и зарисуйте мигающие стрелки на модели атома водорода (в левом верхнем поле), а также стрелки в правом поле и отметки в нижнем поле, соответствующие линиям в данной серии.

Запишите в таблицу 1 величину главного квантового числа n_0 для нижнего уровня энергии данной серии, название серии и длины волн отдельных линий.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений

Серия _____ . $n_0 =$ _____

Номер линии $i=$	n	λ_i , мкм	$1/\lambda_i$, мкм ⁻¹
1			
2			
3			
4			

ТАБЛИЦА 2 для выбора начальных условий (не перерисовывать)

Номер бригады	Гл. кв. число ниж. уровня n_0
1,5	1
2,6	2
3,7	3
4,8	4

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицу 1 обратные длины волн.

Определите, переходу между какими квантовыми состояниями электрона в атоме водорода соответствует каждая линия излучения. Запишите в таблицу значения n .

Постройте график зависимости обратной длины волны ($1/\lambda$) от обратного квадрата главного квантового числа ($1/n^2$) для данной спектральной серии.

Определите по наклону графика значение постоянной Ридберга

$$R = \frac{\Delta(1/\lambda)}{\Delta(1/n^2)}.$$

Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

ТАБЛИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ: Постоянная Ридберга $R = 1.1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?
2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ?
3. Что является источником линейчатого спектра ЭМИ?
4. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
5. При каких условиях излучается сплошной спектр ЭМИ?
6. Опишите планетарную модель атома.
7. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики фотона и электрона, который излучает данный фотон?
9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.
14. Что определяет главное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
15. Что определяет азимутальное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что определяет магнитное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
17. Что такое спин электрона?
18. Что определяет спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
19. Что определяет магнитное спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
20. Что такое вырожденные состояния?
21. Как определить кратность вырождения состояния?
22. Расшифруйте краткую запись состояния электрона в атоме ($2s^2$, $2p^3$).
23. Может ли электрон иметь состояние $2d$ и почему?
24. Сформулируйте правило отбора.
25. Что такое спектральная серия?
26. Назовите названия спектральных серий излучения атомарного водорода. Запишите условия для их возникновения.
27. В каких пределах должны лежать длины волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света наблюдались три спектральные линии? Вычислить длину волны линии, принадлежащей к серии Бальмера. Решение пояснить схемой.
28. В каких пределах должна находиться энергия электронов, чтобы при возбуждении ударами этих электронов атомов водорода спектр водорода содержал шесть спектральных линий? Вычислить длину волны

- линии, принадлежащей к серии Пашена. Решение задачи пояснить схемой.
29. Какую наименьшую ускоряющую разность потенциалов должны пройти бомбардирующие электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода спектр водорода содержал три спектральные линии? Вычислить длины волн линий, принадлежащих к серии Лаймана. Решение пояснить схемой.
 30. Какую наименьшую скорость должны иметь бомбардирующие электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода спектр водорода содержал шесть спектральных линий? Вычислить длины волн спектральных линий, принадлежащих к серии Лаймана. Решение пояснить схемой.
 31. Найти наименьшую длину волны в серии Лаймана в спектре водорода. Какую ускоряющую разность потенциалов должны пройти электроны, чтобы при возбуждении ими атома водорода появилась эта линия? Решение пояснить схемой.
 32. Найти наименьшую длину волны в серии Бальмера в спектре водорода. Какую наименьшую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении ими атома водорода появилась эта линия? Решение пояснить схемой.
 33. Найти наибольшую длину волны в серии Бальмера в спектре водорода. Какую ускоряющую разность потенциалов должны пройти электроны, чтобы при возбуждении ими атома водорода появилась эта линия? Решение пояснить схемой.
 34. В каких пределах должны лежать значения энергии фотонов, чтобы при возбуждении этими фотонами атомов водорода наблюдались три спектральные линии? Вычислить длину волны линии, принадлежащей к серии Бальмера. Решение пояснить схемой.
 35. В каких пределах должны лежать значения импульса фотонов, чтобы при возбуждении атомов водорода в спектре этих атомов наблюдалось шесть спектральных линий? Вычислить длину волны линии, принадлежащей к серии Пашена. Решение пояснить схемой.
 36. Какую наименьшую ускоряющую разность потенциалов должны пройти бомбардирующие электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода спектр водорода содержал шесть спектральных линий? Вычислить длины волн спектральных линий, принадлежащих к серии Бальмера. Решение пояснить схемой.

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.3, §12, §28). Запустите программу. Выберите «Квантовая физика», «Комптоновское рассеяние». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с моделями электромагнитного излучения и их использованием при анализе процесса рассеяния рентгеновского излучения на веществе.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей эффекта Комптона.
- * Экспериментальное определение комптоновской длины волны электрона.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

МОДЕЛИ электромагнитного излучения (ЭМИ):

луч – линия распространения ЭМИ (геометрическая оптика)

волна – гармоническая волна, имеющая амплитуду и определенную длину волны или частоту (волновая оптика),

поток частиц (фотонов) используется в квантовой оптике и для объяснения многих эффектов, на которых основана квантовая теория строения вещества.

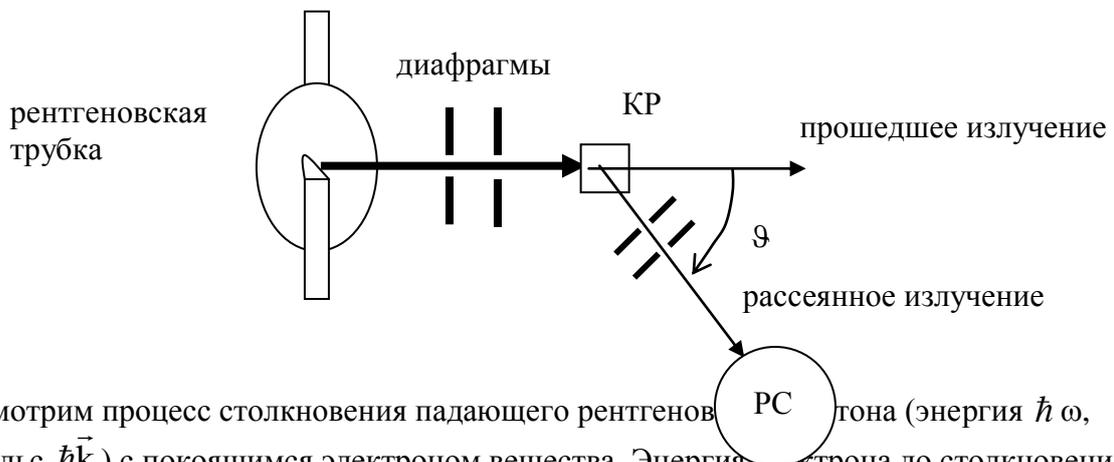
Характеристики всех моделей связаны друг с другом.

ЭФФЕКТОМ КОМПТОНА называется появление рассеянного излучения с большей длиной волны при облучении вещества монохроматическим рентгеновским излучением.

РЕНТГЕНОВСКИМ называется электромагнитное излучение, которое можно моделировать с помощью электромагнитной волны с длиной от 10^{-8} до 10^{-12} м, или с помощью потока фотонов с энергией от 100 эВ до 10^6 эВ.

Первая модель применяется для описания рентгеновского излучения, распространяющегося от источника до вещества. Оно представляется, как монохроматическая волна с длиной λ .

Волновая модель применяется и для описания рассеянного под углом ϑ рентгеновского излучения, идущего от вещества (КР) до регистрирующего устройства (рентгеновского спектрометра РС).



Рассмотрим процесс столкновения падающего рентгеновского фотона (энергия $\hbar \omega$, импульс $\hbar \vec{k}$) с покоящимся электроном вещества. Энергия электрона до столкновения равна его энергии покоя mc^2 , где m – масса покоя электрона. Импульс электрона равен 0. После столкновения электрон будет обладать импульсом \vec{p} и энергией, равной $c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$. Энергия фотона станет равной $\hbar \omega'$, а импульс $\hbar \vec{k}'$. Из закона сохранения импульса и энергии вытекают два равенства

$$\hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2} \quad \text{и} \quad \hbar \vec{k} = \vec{p} + \hbar \vec{k}'.$$

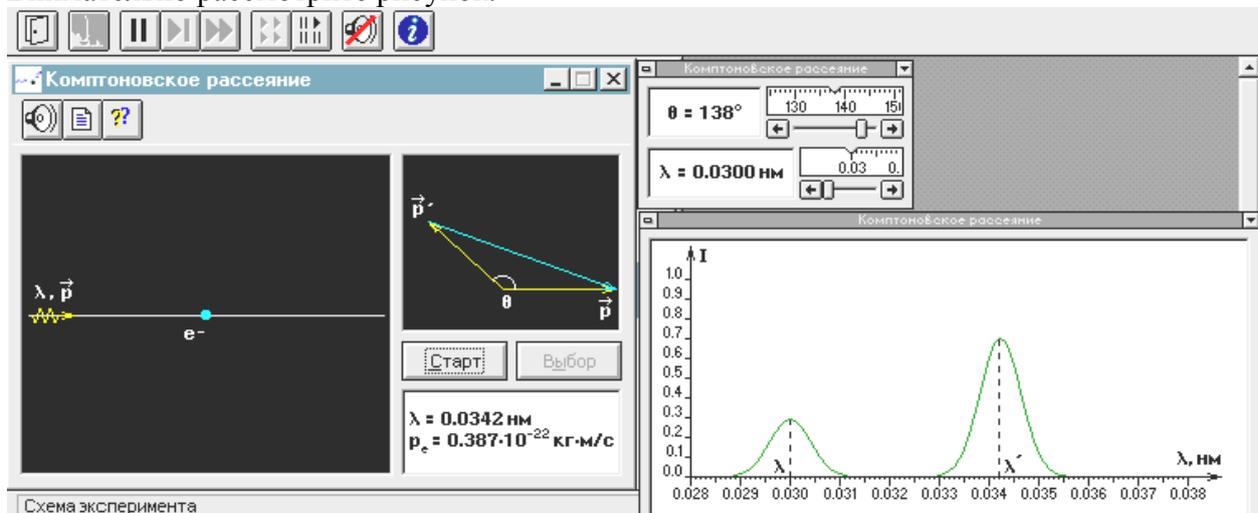
Разделив первое равенство на второе, возведя в квадрат и проведя некоторые преобразования (см. учебник (3) стр.45), получим формулу Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta),$$

где комptonовская длина волны $\lambda_C = \frac{h}{mc}$. Для электрона $\lambda_C = 2.43 \cdot 10^{-12}$ м.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок.



Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.
Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Нажмите мышью кнопку «Старт» сверху экрана.
2. Подведите маркер мыши к движку регулятора длины волны падающего ЭМИ и установите первое значение длины волны из таблицы 2, соответствующее номеру вашей бригады.
3. Подведите маркер мыши к движку регулятора угла приема рассеянного ЭМИ и установите первое значение 60^0 из таблицы 1.
4. По картине измеренных значений определите длину волны λ' рассеянного ЭМИ и запишите в первую строку таблицы 1.
5. Изменяйте угол наблюдения с шагом 10^0 , а записывайте измеренные значения λ' в соответствующие строки таблицы 1.
6. Заполнив все строки таблицы 1, измените значение длины волны падающего ЭМИ в соответствии со следующим значением для вашей бригады из таблицы 2. Повторите измерения длины волны рассеянного ЭМИ, заполняя сначала таблицу 3, а затем и таблицу 4 (аналогичные таблице 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений

Длина волны $\lambda =$ _____ пм

Номер измер.	ϑ град	λ' , пм	$1 - \cos\vartheta$
1	60		
2	70		
.....			
11	160		

ТАБЛИЦА 2 для выбора значений
(не перерисовывать)

Номер бригады	Длина волны падающего ЭМИ (пм)		
1,5	3	5	7
2,6	3.5	5.5	8
3,7	4	6	9
4,8	4.5	6.5	10

Таблицы 3 и 4 аналогичны таблице 1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

1. Вычислите и запишите в таблицы 1,3 и 4 величины $1 - \cos\vartheta$.
2. Постройте график зависимости изменения длины волны ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$) от разности ($1 - \cos\vartheta$) для каждой серии измерений.
3. Определите по наклону графика значение комптоновской длины волны электрона:

$$\lambda_C = \frac{\Delta(\Delta\lambda)}{\Delta(1 - \cos\vartheta)}.$$

4. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите модели, с помощью которых описывается электромагнитное излучение.
2. Назовите области физики в которых используются соответствующие модели ЭМИ.
3. Что такое луч?
4. Что такое гармоническая волна?
5. Сформулируйте связь между характеристиками ЭМИ в волновой и квантовой моделях.

6. Назовите эффекты, для описания которых надо использовать и волновую и квантовую модели ЭМИ. Проиллюстрируйте один из эффектов.
7. Как моделируется процесс взаимодействия падающего рентгеновского фотона и свободного электрона вещества?
8. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона с электроном в эффекте Комптона.
9. Сравните поведение фотонов после взаимодействия с электронами в эффекте Комптона и фотоэффекте.
10. Что такое комптоновская длина волны частицы?
11. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии фотонов на электронах, сильно связанных с ядром атома?
12. Как меняется энергия фотона при его комптоновском рассеянии?
13. Что происходит с электроном после рассеяния на нем фотона?
14. Чем отличается масса от массы покоя? Когда они совпадают?
15. Напишите уравнение для импульса фотона.
16. Напишите формулу для эффекта Комптона.
17. Напишите формулу для комптоновской длины волны электрона.
18. Чему равно максимальное изменение длины волны рассеянного фотона и когда оно наблюдается?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа , 1989. 293с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3 М.: Наука , 1989. 293с
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989. 607с.
4. Яворский В.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М., 1990. 622с.
5. Мясников С.П., Осанова Г.Н. Пособие по физике. М. , 1988. 399с.
6. Корсунски'й М. И.. "Оптика. Строение атома. Атомное ядро" М.: Наука , 1987.
7. Зисман Г.А. и Тодес О.М. Курс общей физики, т.3 М: Наука , 1987
8. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики, М: Наука, 1973.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	γ или G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н м}^2 \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9.8	м с^{-2}
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	м с^{-1}
Постоянная Авогадро	N_A	$6.02 \cdot 10^{26}$	кмоль^{-1}
Универсальная газовая постоянная	R	$8.31 \cdot 10^3$	$\text{Дж кмоль}^{-1} \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	Дж К^{-1}
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Постоянная Фарадея	F	$9.65 \cdot 10^4$	Кл моль^{-1}
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$	Ф м^{-1}
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Гн м^{-1}
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	Дж с

ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	10^1
гекто	г	10^2
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	10^{-1}
санتي	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}