

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

*Г.С. Якупов*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области «Математические и естественные науки» и «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург  
2019

УДК 531.1(076.5)

ББК 22.21я7

Я49

Рецензент – доцент, кандидат педагогических наук А.В. Дудко

**Якупов, Г.С.**

Я49            Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона. Эффект Комптона: методические указания / Г.С. Якупов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 15 с.

Методические указания содержат требования и необходимый вспомогательный материал для выполнения лабораторных работ по волновой оптике и квантовой физике.

Методические указания предназначены для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области "Математические и естественные науки" и "Инженерное дело, технологии и технические науки".

УДК 531.1(076.5)

ББК 22.21я7

© Якупов Г.С., 2019

© ОГУ, 2019

## Содержание

1 Лабораторная работа № 2опт. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона.....	4
1.1 Цель работы .....	4
1.2 Краткая теория .....	4
1.3 Методика и порядок измерений.....	6
1.4 Вопросы и задания для самоконтроля .....	8
2 Лабораторная работа № 3_3. Эффект Комптона .....	9
2.1 Цель работы .....	9
2.2 Краткая теория .....	9
2.3 Методика и порядок измерений.....	12
2.4 Обработка результатов и оформление отчета .....	14
2.5 Вопросы и задания для самоконтроля .....	14

# 1 Лабораторная работа № 2опт. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

## 1.1 Цель работы

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

## 1.2 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 (рисунок 1.1).

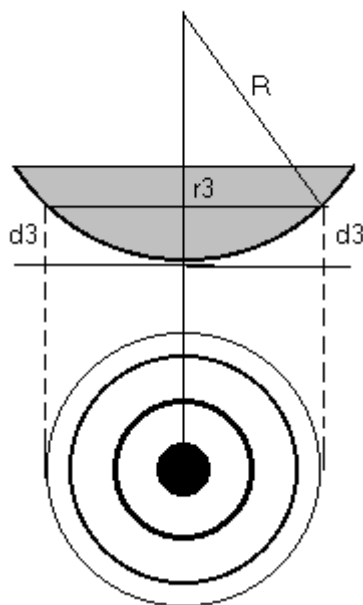


Рисунок 1.1

Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы и частично отражается от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора между линзой и пластинкой. При наложении отраженных лучей возникают полосы равной толщины, при нормальном падении света – полосы, имеющие вид концентрических колец. Центры колец Ньютона совпадают с точкой О соприкосновения линзы с пластинкой.

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 полу-волны будет равна

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}, \quad (1.1)$$

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

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2. \quad (1.2)$$

Учитывая, что  $d^2$  является величиной второго порядка малости, то из (1.2) получим

$$d = \frac{r^2}{2R}. \quad (1.3)$$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (1.4)$$

В точках, для которых оптическая разность хода равна

$$\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (1.5)$$

возникают тёмные кольца.

Из формул (1.4) и (1.5) радиус для  $k$ -ого тёмного кольца будет равен

$$r_k^2 = kR\lambda \quad (1.6)$$

Формула (1.6) позволяет определить радиус кривизны линзы

$$R = \frac{r^2}{k\lambda}. \quad (1.7)$$

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:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda}. \quad (1.8)$$

### 1.3 Методика и порядок измерений

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.

1. Внимательно рассмотрите окно опыта, показанное на рисунке 1.2, 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 (1.8).

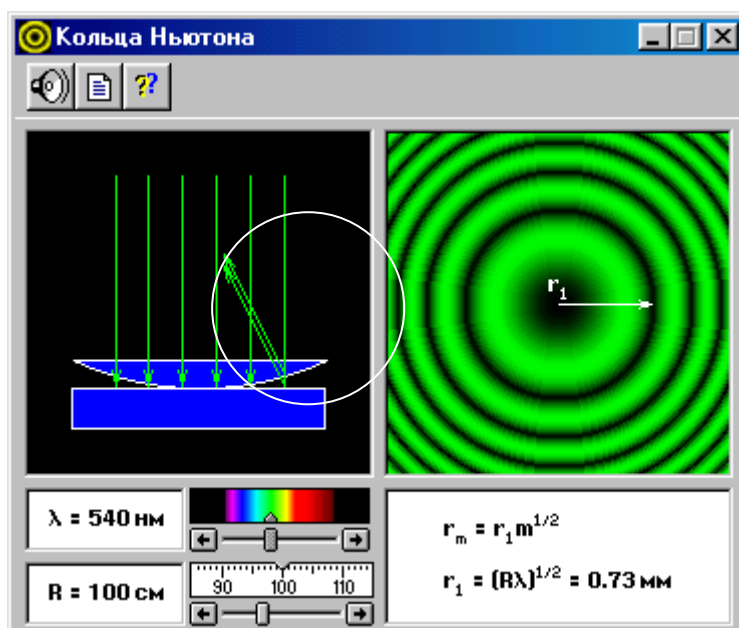


Рисунок 1.2

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 (1.8) 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 таблицу 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	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , 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.

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

#### 1.4 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?



## **2 Лабораторная работа № 3\_3. Эффект Комптона**

### **2.1 Цель работы**

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

### **2.2 Краткая теория**

Модели электромагнитного излучения:

- 1) луч – линия распространения электромагнитного излучения (геометрическая оптика),
- 2) волна – гармоническая волна, имеющая амплитуду и определенную длину волны или частоту (волновая оптика),
- 3) 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.

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комpton (1892–1962), исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также более длинноволновое излучение. Опыты показали, что разность

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \quad (2.1)$$

не зависит от длины волны  $\Delta\lambda$  падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния  $\vartheta$ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \vartheta) \quad (2.2)$$

Таким образом, 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.

Этот эффект не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны при рассеянии изменяться не должна: под действием периодического поля световой волны электрон колеблется с частотой поля и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты. Объяснение эффекта Комптона дано на основе квантовых представлений о природе света. Если считать, как это делает квантовая теория, что излучение имеет корпускулярную природу, т.е. представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона – результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества ( для легких атомов электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными). В процессе этого столкновения фотон передает электрону часть своей энергии и импульса в соответствии с законами их сохранения. Первая модель применяется для описания рентгеновского излучения, распространяющегося от источника до вещества. Оно представляется, как монохроматическая волна с длиной  $\lambda$ .

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

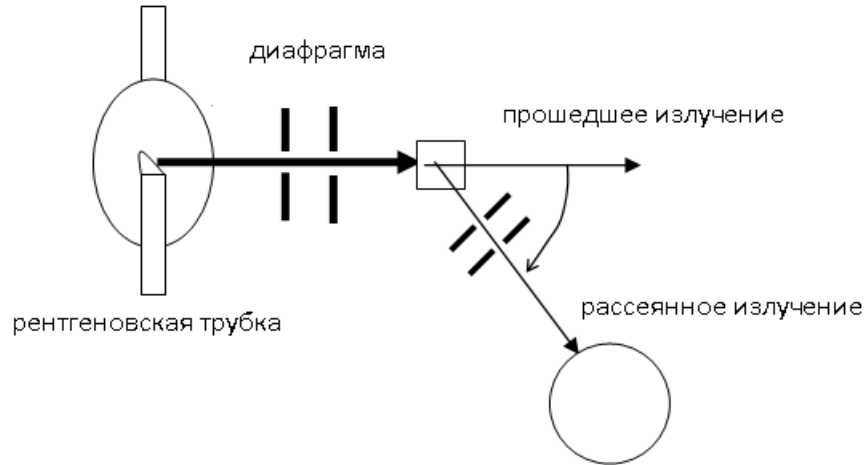


Рисунок 2.1

Рассмотрим процесс столкновения падающего рентгеновского фотона (энергия  $\hbar \omega$ ) с покоящимся электроном вещества (рисунок 2.1). 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 и энергией, равной  $c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$ . Энергия фотона станет равной  $\hbar \omega'$ .

Из закона сохранения импульса и энергии вытекают два равенства:

$$\hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2} \quad (2.3)$$

и

$$\hbar \vec{k} = \vec{p} + \hbar \vec{k}'. \quad (2.4)$$

Разделив первое равенство на второе, возведя в квадрат и проведя некоторые преобразования, получим формулу Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \vartheta), \quad (2.5)$$

где комптоновская длина волны  $\lambda_C = \frac{h}{mc}$ .

Для электрона  $\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м.

Эффект Комптона наблюдается не только на электронах, но и на других заряженных частицах, например, протонах, однако из-за большой массы протона его отдача заметна лишь при рассеянии фотонов очень высоких энергий. Как эффект Комптона, так и фотоэффект на основе квантовых представлений обусловлены взаимодействием фотонов с электронами. В первом случае фотон рассеивается, во втором – поглощается. Рассеяние происходит при взаимодействии фотона со свободным электроном, а фотоэффект – со связанными электронами. Можно показать, что при столкновении фотона со свободным электроном не может произойти поглощения фотона, так как это находится в противоречии с законами сохранения импульса и энергии. Поэтому при взаимодействии фотонов со свободными электронами может наблюдаться только их рассеяние, т. е. эффект Комптона.

### 2.3 Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок.

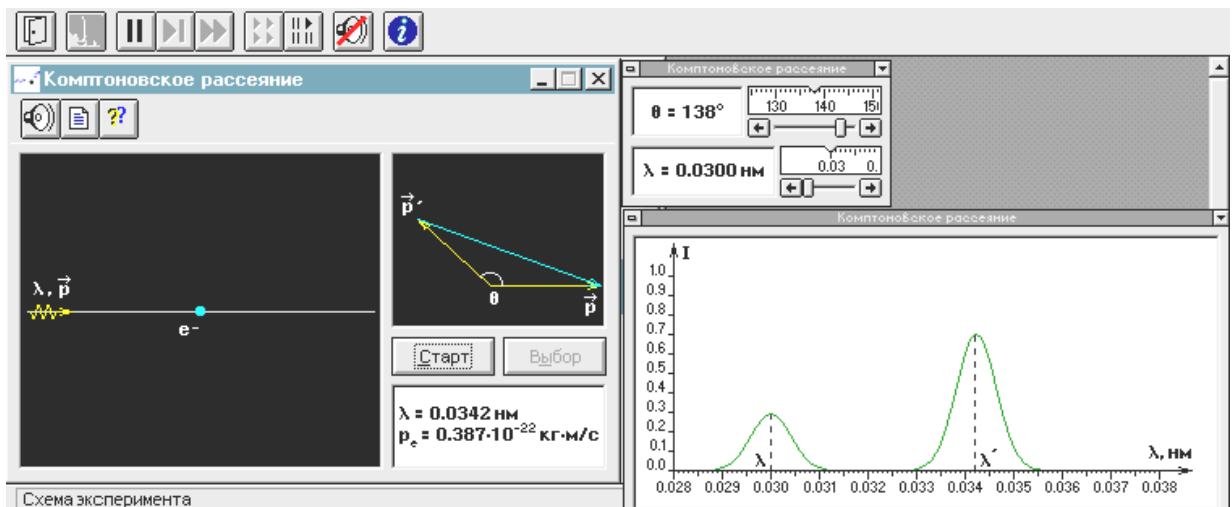


Рисунок 2.2

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

*Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.*

Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.

Подведите маркер мыши к движку регулятора длины волны падающего электромагнитного излучения и установите первое значение длины волны из таблицы 2, соответствующее номеру вашей бригады.

Подведите маркер мыши к движку регулятора угла приема рассеянного ЭМИ и установите первое значение  $60^\circ$  из таблицы 1.

По картине измеренных значений определите длину волны  $\lambda'$  рассеянного ЭМИ и запишите в первую строку таблицы 1.

Изменяйте угол наблюдения с шагом  $10^\circ$  и записывайте измеренные значения  $\lambda'$  в соответствующие строки таблицы 1.

Заполнив все строки таблице 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.

Таблица 1 – Результаты измерений

Длина волны $\lambda =$ _____ пм			
Номер измер.	$\vartheta$ , град	$\lambda'$ , пм	$1 - \cos\vartheta$
1	60		
2	70		
.....			
11	160		

Таблица 2 - Выбор значений (не перерисовывать)

Номер бригады	Длина волны падающего ЭМИ, пм		
1,5	30	50	70
2,6	30,5	50,5	80
3,7	40	60	90
4,8	40,5	60,5	100

Таблицы 3 и 4 аналогичны таблицам 1 и 2.

## 2.4 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.

## 2.5 Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите модели, с помощью которых описывается электромагнитное излучение.
2. Назовите области физики, в которых используются соответствующие модели электромагнитного излучения.
3. Что такое луч?
4. Что такое гармоническая волна?
5. Сформулируйте связь между характеристиками электромагнитного излучения в волновой и квантовой моделях.
6. Назовите эффекты, для описания которых надо использовать и волновую, и квантовую модели электромагнитного излучения. 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?