

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Общая физика»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС РАВНОЙ ТОЛЩИНЫ
(КОЛЬЦА НЬЮТОНА)**

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 31
для студентов направлений: 09.03.04; 15.03.05; 15.03.04; 27.03.04;
20.03.01; 27.03.01; 15.03.01; 13.03.02; 23.03.03; 23.03.01,
специальностей: 10.05.03; 23.05.01; 23.05.02

Курган 2017

Кафедра: «Общая физика».

Дисциплина: «Физика»
(направления: 09.03.04; 15.03.05; 15.03.04; 27.03.04; 20.03.01;
27.03.01; 15.03.01; 13.03.02; 23.03.03; 23.03.01,
специальности: 10.05.03; 23.05.01; 23.05.02)

Составили: канд. физ.-мат. наук, доц. Т.Н. Новгородова,
канд. физ.-мат. наук, доц. В.М. Овсянов.

Утверждены на заседании кафедры «17» мая 2017 г.

Рекомендованы методическим советом университета «12» декабря 2016 г.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1 Ознакомиться с явлением интерференции света на примере колец Ньютона.
- 2 Определить длину световой волны.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

- 1 Источник света.
- 2 Микроскоп.
- 3 Сборка Ньютона с плосковыпуклой собирающей линзой.
- 4 Механизм перемещения и фиксации положения Сборки.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям свет является особым квантовым объектом, который обладает двойственной природой. При одних условиях наблюдения он ведет себя как электромагнитная волна, а при других – как поток частиц – фотонов. Одновременное наличие у него характерных черт при-сущих и волнам и частицам называют корпускулярно-волновым дуализмом. Волновая природа света проявляется в явлениях интерференции, дифракции, поляризации и дисперсии света.

Интерференцией света называется явление наложения двух (или нескольких) когерентных световых волн, при котором происходит пространственное перераспределение световой энергии в области наложения (в одних точках области наложения интенсивность света возрастает, а в других уменьшается).

Обязательным условием наблюдения интерференции является когерентность волн. Волны одинаковой частоты называются **когерентными**, если их разность фаз остается постоянной во времени в любой произвольной точке области наложения.

Идеально этому условию могут удовлетворять только монохроматические волны. **Монохроматические волны** – неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты.

Так как ни один реальный источник не дает строго монохроматического света, то волны, излучаемые независимыми источниками света, всегда не когерентны. Поэтому на опыте невозможно наблюдать интерференцию света, получаемого, например, от двух электрических лампочек.

Для получения когерентных волн и наблюдения картины интерференции волну, идущую от источника, разбивают каким-либо образом на две отдельные части, которые пройдя разное расстояние, вновь накладываются друг на друга. Этим обеспечиваются условия, при которых в любой момент времени в точку наблюдения приходили бы световые волны, излучаемые одной и той же группой атомов и, поэтому, имеющие постоянную разность фаз. Если эти волны проходят до точки наблюдения интерференции различные пути в различных средах, то они приобретают разность фаз δ , равную

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (1)$$

где Δ – оптическая разность хода интерферирующих волн,
 λ_0 – длина световой волны в вакууме.

Оптической разностью хода называется разность оптических длин пути, проходимых волнами

$$\Delta = L_2 - L_1.$$

Оптической длиной пути L называется произведение геометрической длины s пути световой волны в данной среде на показатель преломления n этой среды

$$L = n \cdot s.$$

Пусть две монохроматические световые волны, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке колебания одинакового направления:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_1)$$

и

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \varphi_2),$$

где E – напряженность электрического поля световой волны. Напряженности электрического и магнитного полей подчиняются принципу суперпозиции. Следовательно, амплитуда результирующего колебания равна геометрической сумме векторов E_{01} и E_{02} . Тогда квадрат амплитуды результирующего колебания в данной точке будет определяться выражением:

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (2)$$

Интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim E^2$), поэтому для результирующей интенсивности в точке наблюдения можно записать:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (3)$$

Для некогерентных волн разность фаз $\delta = (\varphi_2 - \varphi_1)$ непрерывно изменяется, поэтому среднее во времени значение $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ равно нулю, и интенсивность результирующей волны всюду одинакова и равна сумме интенсивностей $I = I_1 + I_2$.

Если волны когерентны, то $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ имеет постоянное во времени (но свое для каждой точки пространства) значение. В точках пространства, где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$, интенсивность света $I > I_1 + I_2$, а там где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность $I < I_1 + I_2$. Следовательно, при наложении двух (или нескольких) когерентных световых волн происходит пространственное перераспределение световой энергии, в результате чего в одних местах интенсивность света возрастает, а в других – уменьшается

Согласно уравнению (3) интенсивность будет максимальна в тех точках, для которых $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$, т.е. разность фаз $\delta = \pm 2m\pi$, и колебания, возбуж-

даемые в точке наблюдения обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе. При этом согласно уравнению (1) оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме (или четному числу полуволен)

$$\Delta = \pm m\lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2} \quad (m=0,1,2, \dots). \quad (4)$$

Уравнение (4) является **условием интерференционного максимума**.

Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$, то $\delta = \pm(2m+1)\pi$ и колебания, возбуждаемые обеими волнами, будут происходить в противофазе, а результирующая интенсивность будет минимальна. Следовательно, минимум интенсивности при интерференции наблюдается, если оптическая разность хода волн равна нечетному числу полуволен

$$\Delta = \pm(2m+1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (m=0,1,2, \dots). \quad (5)$$

Уравнение (5) является **условием интерференционного минимума**.

В уравнениях (4) и (5) m – целое число, которое можно рассматривать как номер интерференционного максимума или минимума.

Для осуществления интерференции света необходимы когерентные световые пучки, которые получают разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно осуществить с помощью экранов, щелей, зеркал и преломляющих тел. В данной работе для наблюдения интерференции используется устройство, получившее название – сборка Ньютона, которая состоит из соприкасающихся друг с другом плоскопараллельной толстой стеклянной пластинки и плоско-выпуклой линзы с большим радиусом кривизны (рисунок 1). Наблюдающуюся с ее помощью интерференционную картину называют кольцами Ньютона.

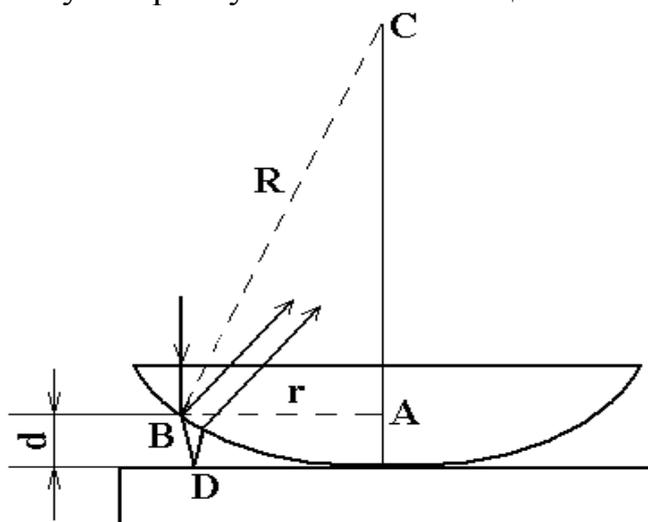


Рисунок 1 – Ход интерферирующих лучей при наблюдении колец Ньютона в отраженном свете.

Кольца Ньютона являются классическим примером полос равной толщины. Они наблюдаются при падении плоскопараллельного пучка лучей на тонкую пленку, поверхности которой не параллельны друг другу. Интерференционная картина возникает в результате наложения лучей, отраженных от обеих поверхностей пленки. В данном случае роль тонкой пленки, от поверхностей которой отражаются когерентные волны, играет воздушный зазор между пластинкой и линзой (вследствие большой толщины пластинки и линзы интерференционные полосы за счет отражений от других поверхностей не возникают). При нормальном падении света полосы равной толщины имеют вид концентрических окружностей, при наклонном падении – эллипсов.

Пусть параллельный пучок лучей падает на линзу как показано на рисунке 1. В точке В падающий луч частично отражается, а частично проходит в воздушный клин. Отражаясь в точке D от пластинки, он возвращается обратно и интерферирует с лучом, отраженным в точке В. На рисунке 1 ход лучей показан для наглядности с нарушением законов геометрической оптики. В действительности из-за большого радиуса кривизны линзы лучи идут практически вертикально.

Найдем радиусы колец Ньютона, получающихся при падении монохроматического света по нормали к пластинке. Так как в точке D происходит отражение от оптически более плотной среды и «теряется» полволны, то оптическая разность хода интерферирующих отраженных лучей равна

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Толщина клина d зависит от расположения точки В, находящейся на расстоянии r от центра интерференционной картины. Из треугольника ABC получим

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = (2R - d)d \approx 2Rd, \quad (7)$$

где R – радиус кривизны линзы,

r – радиус окружности, всем точкам которой соответствует одинаковый зазор d .

Отсюда
$$d \approx \frac{r^2}{2R}. \quad (8)$$

В точках, для которых $\Delta = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}$, возникнут максимумы интенсивности. Подставив выражение (6) и используя (8), найдем радиусы светлых колец Ньютона:

$$r_m = \sqrt{(2m - 1) \frac{\lambda}{2} R} \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (9)$$

Аналогично для темных колец в точках, где $\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2}$, получим

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (10)$$

Значению $m = 0$ соответствует $r_m = 0$, т. е. точка в месте касания пластинки и линзы. В этой точке наблюдается минимум интенсивности, обусловленный изменением фазы на π при отражении световой волны от пластинки.

Измеряя радиусы колец, и зная радиус кривизны линзы, можно определить длину волны света. Используя уравнение (10), запишем выражения для радиусов двух колец Ньютона с номерами m и k :

$$\begin{aligned} r_m^2 &= m\lambda R, \\ r_k^2 &= k\lambda R. \end{aligned}$$

Для диаметров этих колец получим:

$$\begin{aligned} (d_m/2)^2 &= m\lambda R, \\ (d_k/2)^2 &= k\lambda R. \end{aligned}$$

Вычтя из одного уравнения другое, выразим длину световой волны

$$\lambda = \frac{d_m^2 - d_k^2}{4(m - k)R}, \quad (11)$$

где R – радиус кривизны линзы ($R=290$ мм),

d_m и d_k – радиусы темных колец с номерами m и k , соответственно.

При освещении сборки белым светом светлые кольца становятся окрашенными. В соответствии с формулой (9) ближе к центру картины в них будет расположен фиолетовый цвет, т.к. у него самая маленькая длина волны.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Наблюдения колец Ньютона могут проводиться как в отраженном, так и в проходящем свете.

В данной работе экспериментальная установка собрана на базе бинокулярного микроскопа. Один из окуляров микроскопа заменен осветителем. Параллельный пучок лучей от осветителя нормально падает на сборку Ньютона. Кольца Ньютона, полученные в отраженном свете, наблюдаются с помощью другого окуляра. Поднимая или опуская тубус микроскопа, в поле зрения получают отчетливую картину колец Ньютона. Измерение диаметров колец Ньютона производится с помощью механизма перемещения и фиксации с точностью до 0,01 мм.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

- 1 Поместить сборку Ньютона на предметный столик микроскопа непосредственно под его объективом.
- 2 Перемещая тубус микроскопа добиться максимальной резкости изображения интерференционных колец.
- 3 Измерить и занести в таблицу 1 значения диаметров первых восьми темных колец Ньютона. Для этого:
 - а) вращая ручку микровинта в направлении «от себя», установить визирную линию на правый внешний край восьмого темного кольца справа от центра картины и записать в таблицу 1 показание микрометрического винта;
 - б) последовательно установить визирную линию на правый внешний край 7-го, 6-го, ..., 1-го темного кольца, записывая показания микровинта в таблицу 1;
 - в) продолжая движение визирной линии, установить ее последовательно на правый внутренний край 1-го, 2-го, 3-го, ..., 8-го кольца с левой стороны от центра картины, также записывая показания микрометра в таблицу 1.
- 4 Рассчитать диаметры колец.
- 5 По указанию преподавателя с целью повышения точности измерений выполнить указанные выше измерения еще два раза.
- 6 Для каждого кольца найти среднее значение его диаметра.

Таблица 1. Результаты измерений

Но- мер коль ца	Отсчет справа от центра картины, мм			Отсчет слева от центра картины, мм			Диаметр кольца d, мм			Средний диаметр <d>, мм
8										
7										
6										
5										
4										
3										
2										
1										

- 7 По формуле (11) рассчитать четыре или пять значений длины волны λ .
- 8 Найти среднее значение $\lambda_{\text{ср}}$.
- 9 Рассчитать погрешность определения длины волны по формуле:

$$\Delta\lambda = t \times S,$$

где t – коэффициент Стьюдента,

S - средне квадратичное отклонение.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_{cp})^2}{N(N-1)}}$$

Коэффициент Стьюдента зависит от доверительной вероятности и от числа измерений N . Для доверительной вероятности $P = 0,95$ коэффициенты Стьюдента равны:

$$t = 4,3 \text{ при } N = 3;$$

$$t = 3,18 \text{ при } N = 4;$$

$$t = 2,77 \text{ при } N = 5.$$

10 Записать окончательный результат измерения в виде: $\lambda = (\lambda_{cp} \pm \Delta\lambda)$ нм.

11 Сделать вывод по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Что такое оптическая разность хода, оптическая длина пути?
4. Условия максимума и минимума интенсивности при интерференции.
5. Зарисуйте ход лучей и поясните образование колец Ньютона.
6. Выведите формулу радиусов колец Ньютона
7. Как будет выглядеть картина интерференции в белом свете? Какой цвет будет расположен ближе к центру картины, почему?
8. Почему по мере удаления от центра картины кольца становятся все более тесно расположенными?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Трофимова Т. И. Курс физики [Текст] / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2003.
- 2 Федосеев В. Б. Физика [Текст] / В. Б. Федосеев. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009.
- 3 Шкиль Т. В. Конспект лекций по физике [Текст] / Т. В. Шкиль. – Ростов н/Д. : Феникс, 2014.
- 4 Савельев И. В. Курс физики [Текст] / И. В. Савельев. – Т. 1-5. – М. : АКТ, 2005.

Новгородова Татьяна Назаровна
Овсянов Виктор Михайлович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС РАВНОЙ ТОЛЩИНЫ
(КОЛЬЦА НЬЮТОНА)**

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 31
для студентов направлений 09.03.04; 15.03.05; 15.03.04; 27.03.04;
20.03.01; 27.03.01; 15.03.01; 13.03.02; 23.03.03; 23.03.01,
специальностей: 10.05.03; 23.05.01; 23.05.02

Авторская редакция

Подписано в печать 29.11.1	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ.л.0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ №216	Тираж 100	Не для продажи

БИЦ Курганского государственного университета.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.