

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по оптике

Кольца Ньютона [4.2.1]

Талашкевич Даниил Александрович
Группа Б01-009

Долгопрудный
2022

Содержание

1	Аннотация	1
2	Теоретические сведения	1
3	Экспериментальная установка	2
4	Ход работы	4
4.1	Радиусы колец Ньютона и кривизна линзы	4
4.2	Наблюдение «биений»	4
4.3	Калибровка окулярной шкалы	4
5	Обработка данных	5
5.1	Белые и темные кольца	5
5.2	Радиус линзы	7
6	Вывод	8
7	Литература	8

1 Аннотация

Цель работы : ознакомление с явлением интерференции в тонких пленках (полосы равной толщины) на примере колец Ньютона и с методикой интерференционных измерений кривизны стеклянной поверхности.

В работе используются : измерительный микроскоп с опак-иллюминатором; плосковыпуклая линза; пластинка из черного стекла; ртутная лампа ПРК-4; щель; линзы; призма прямого зрения; объектная пикала.

2 Теоретические сведения

Интерференция – взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.

Кольца Ньютона – кольцеобразные интерференционные максимумы и минимумы, появляющиеся вокруг точки касания слегка изогнутой выпуклой линзы и плоскопараллельной пластины при прохождении света сквозь линзу и пластину.

В нашей установке кольца Ньютона образуются при интерференции световых волн, отраженных от границ тонкой воздушной прослойки, заключенной между выпуклой поверхностью линзы и плоской стеклянной пластинкой (рис. 1). Наблюдение ведется в отраженном свете.

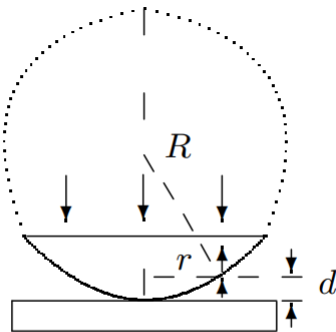


Рис. 1. К расчёту колец Ньютона

Рис. 1: теоретическая модель

Этот классический опыт используется для определения радиуса кривизны

визны сферических поверхностей линз. В этом опыте наблюдается интерференция волн, отражённых от границ тонкой воздушной прослойки, образованной сферической поверхностью линзы и плоской стеклянной пластиной. При нормальном падении света (рис. 1) интерференционные полосы локализованы на сферической поверхности и являются полосами равной толщины.

Геометрическая разность хода между интерферирующими лучами равна удвоенной толщине воздушного зазора $2d$ в данном месте. Для точки на сферической поверхности, находящейся на расстоянии r от оси системы, имеем $r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2$, где R – радиус кривизны сферической поверхности (рис. 1).

При $R \gg d$ получим $d = r^2/2R$. С учётом изменения фазы на π при отражении волны от оптически более плотной среды (на границе воздух-стекло) получим **оптическую разность хода интерферирующих лучей**:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} + 2d = \frac{r^2}{2R} + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Из условия интерференционного минимума $\Delta = \frac{(2m+1)\lambda}{2}$, $m = 0, 1, 2, \dots$. Получим радиусы темных колец r_m , а из аналогичного условия максимума $\Delta = m\lambda$ радиусы светлых r'_m :

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}, \quad r'_m = \sqrt{\frac{(2m-1)m\lambda R}{2}} \quad (2)$$

3 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Опыт выполняется с помощью измерительного микроскопа. На столик микроскопа помещается держатель с полированной пластинкой из чёрного стекла. На пластинке лежит исследуемая линза.

Источником света служит ртутная лампа, находящаяся в защитном кожухе. Для получения монохроматического света применяется призмный монохроматор, состоящий из конденсора, коллиматора (щель S и объектив) и призмы прямого зрения. Эти устройства с помощью рейтеров располагаются на оптической скамье. Свет от монохроматора попадает на расположенный между объективом и окуляром микроскопа опак-иллюминатор (ОИ) специальное устройство, служащее для освещения объекта при работе в отражённом свете. Внутри опак-иллюминатора

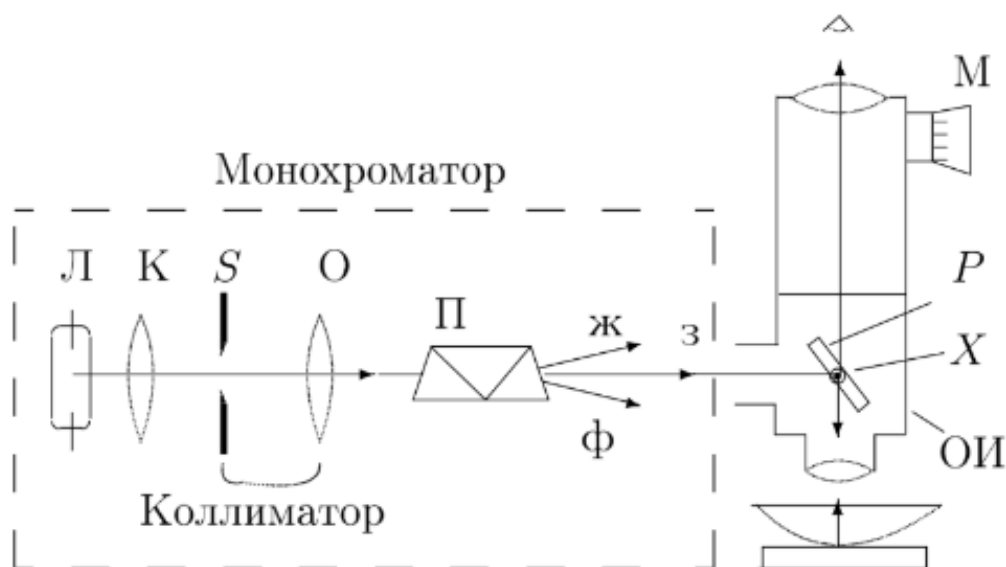


Рис. 2: Экспериментальная установка

находится полупрозрачная стеклянная пластинка P , наклоненная под углом 45° к оптической оси микроскопа. Свет частично отражается от этой пластинки, проходит через объектив микроскопа и попадает на исследуемый объект. Пластинка может поворачиваться вокруг горизонтальной оси X ,opak-иллюминатор вокруг вертикальной оси.

Столик микроскопа может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях помощью винтов препаратопроводителя. Отсчетный крест окулярной шкалы перемещается перпендикулярно оптической оси с помощью микрометрического винта.

Оптическая схема монохроматора позволяет получить в плоскости входного окна opak-иллюминатора достаточно хорошо разделённые линии спектра ртутной лампы. Изображение щели S фокусируется на поверхность линзы объективом микроскопа, т.е. точка источника и точка наблюдения спектра совпадают. Интерференционная картина не зависит от показателя преломления линзы и определяется величиной зазора между линзой и пластинкой (кольца равной толщины).

Сначала микроскоп настраивается на кольца Ньютона в белом свете (свете ртутной лампы), затем при помощи монохроматора выделить из спектра яркую зелёную линию и провести измерения диаметров колец в монохроматическом свете.

4 Ход работы

Сперва настроим микроскоп для наблюдения картины колец Ньютона. Аналогично для получения последних необходимо настроить монохроматор. Измерения будем проводить в безразмерных единицах окулярной шкалы, а для получения реальных величин впоследствии будем использовать калиброванную объектную шкалу.

4.1 Радиусы колец Ньютона и кривизна линзы

Для определения радиуса кривизны линзы будем измерять диаметры колец, результаты измерений занесем в таблицу 1. По этим данным, зная длину волны λ , рассчитаем радиус R кривизны линзы.

4.2 Наблюдение «биений»

При биениях мы наблюдали следующее количество полос между центрами четких систем $\Delta m = 18$. Вычислим отсюда разность длин волн желтого и зеленого света ртутной лампы $\Delta\lambda = \lambda_{\text{ж}} - \lambda_{\text{з}}$:

$$(\Delta m + 1)\lambda_{\text{з}} = \Delta m\lambda_{\text{ж}} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{з}}}{\Delta m} \approx 30 \text{ нм}$$

Теоретические данные:

Длина волны желтого и зеленого света: $\lambda_{\text{ж}} = 583 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{з}} = 550 \text{ нм} \Rightarrow$

$$\Rightarrow \Delta\lambda_{\text{теор}} = 33 \text{ нм}.$$

Относительное отклонение экспериментального значения от теоретического:

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \frac{|30 - 33|}{33} \approx 9\%$$

4.3 Калибровка окулярной шкалы

Для определения цены деления окулярной шкалы сверху на линзу кладем калиброванную объектную шкалу. Объектная шкала размером 1 мм разбита на 100 делений. Используя всё поле зрения микроскопа, отмечаем, какие из самых дальних штрихов объектной шкалы лучше всего совпадают со штрихами окулярной шкалы.

Отнормировав шкалу с калибровочной объектной шкалы, найдем:

$$\delta x = \frac{0.79_{\text{мм}}}{8} = 0.099 \pm 0.001 \text{ мм}$$

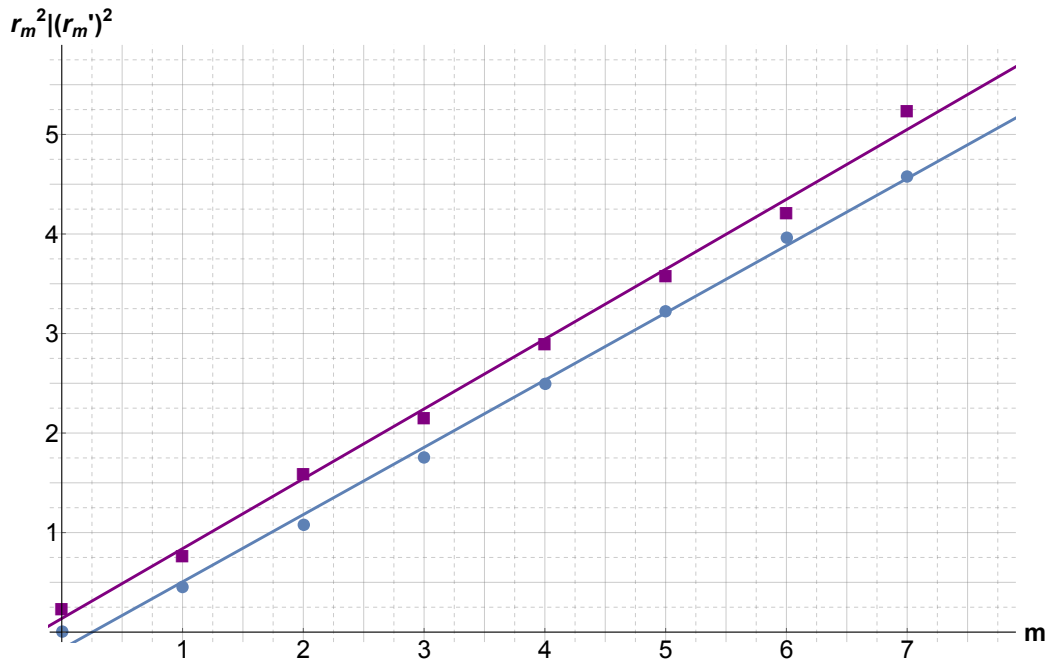
5 Обработка данных

5.1 Белые и темные кольца

m	Темные кольца			Светлые кольца		
	l_1	l_2	$r_{m, \text{темн}}^2$	l_1	l_2	$r_{m, \text{светл}}^2$
0	4,71	3,72	0,25	4,15	4,15	0,00
1	5,00	3,24	0,77	4,78	3,43	0,46
2	5,45	2,92	1,60	5,16	3,08	1,08
3	5,59	2,65	2,16	5,44	2,79	1,76
4	5,83	2,42	2,91	5,70	2,54	2,50
5	6,02	2,23	3,59	5,91	2,32	3,22
6	6,17	2,06	4,22	6,09	2,11	3,96
7	6,47	1,89	5,24	6,25	1,97	4,58

Таблица 1: данные для измерения диаметров колец Ньютона

Построим график зависимости $r_m^2(m)$, откуда сможем найти радиус кривизны линзы:

Рис. 3: график зависимости $r_m^2(m)$

Найдем коэффициент пропорциональности по МНК, также оценим погрешность:

Вычислим коэффициенты a и b уравнения линейной регрессии $\hat{y} = ax + b$ по известным формулам:

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} = \frac{28 \cdot 20,74 - 8 \cdot 102,04}{28^2 - 8 \cdot 140} \approx 0,70;$$

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} = \frac{28 \cdot 102,04 - 140 \cdot 20,74}{28^2 - 8 \cdot 140} \approx 0,14.$$

Вычислим коэффициенты линейной парной корреляции (r_{xy}) и детерминации (R^2):

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2) (n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}} = \frac{8 \cdot 102,04 - 28 \cdot 20,74}{\sqrt{(8 \cdot 140 - 28^2) (8 \cdot 74,5032 - 20,74^2)}};$$

$$r_{xy} \approx 0,998$$

следовательно, $R^2 = r_{xy}^2 = 0,998^2 \approx 0,9959$.

Для оценки значимости параметров регрессии и корреляции сначала:

- найдём x средний: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = \frac{28}{8} = 3.5$;

- составим таблицу вспомогательных величин, где $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$,

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}, A_i = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| :$$

i	x_i	y_i	\hat{y}_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	ε_i	ε_i^2	A_i	$\Delta\varepsilon_i$	$(\Delta\varepsilon_i)^2$
1	0	0,25	0,14	-3,5	12,25	0,11	0,013	0,447	—	—
2	1	0,77	0,84	-2,5	6,25	-0,07	0,005	0,090	-0,181	0,032
3	2	1,6	1,54	-1,5	2,25	0,06	0,004	0,037	0,129	0,017
4	3	2,16	2,24	-0,5	0,25	-0,08	0,007	0,038	-0,141	0,020
5	4	2,91	2,94	0,5	0,25	-0,03	0,001	0,011	0,049	0,002
6	5	3,59	3,64	1,5	2,25	-0,05	0,003	0,015	-0,021	0,001
7	6	4,22	4,35	2,5	6,25	-0,13	0,016	0,030	-0,071	0,005
8	7	5,24	5,05	3,5	12,25	0,19	0,037	0,037	0,319	0,102
\sum	—	—	—	—	42	—	0,08	0,705	—	0,179

Случайные ошибки параметров a, b и коэффициента корреляции r_{xy} :

$$m_a = \sqrt{\frac{1}{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2} \cdot \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{1}{42} \cdot \frac{0.0847}{8-2}} \approx 0,0183;$$

$$m_b = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} \cdot \frac{\sum x_i^2}{n \sum (x_i - \bar{x}_i)^2}} = \sqrt{\frac{0.0847}{8-2} \cdot \frac{140}{8 \cdot 42}} \approx 0,0767;$$

Полученные значения:

$$a_c = 0,70 \pm 0,02$$

$$b_c = 0,14 \pm 0,08$$

Аналогичные расчеты для светлых колец дают:

$$a_T = 0,68 \pm 0,02$$

$$b_T = -0,17 \pm 0,06$$

5.2 Радиус линзы

Из теории и по полученным данным (зависимости $r_m^2(m)$) найдем радиус кривизны линзы:

$$R = \frac{r_m^2}{m\lambda} = \frac{a_T}{\lambda} = (1,26 \pm 0,04) \text{ см.}$$

6 Вывод

В ходе выполнения данной работы экспериментально мы смогли пронаблюдать за картиной интерференционных максимумов и минимумов (кольца Ньютона), был рассчитан радиус кривизны линзы при помощи построения графики зависимости радиусов колец (темных и светлых) от их порядковых номеров. Полученные результаты:

$$R = (1,26 \pm 0,04) \text{ см.}$$

Также мы рассчитали разницу длин волн желтого и зеленого света ртутной лампы:

$$\Delta\lambda_{\text{эксп}} = 30, \Delta\lambda_{\text{теор}} = 33 \text{ нм}$$

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \frac{|30 - 33|}{33} \approx 9\%$$

Разница в результатах объясняется погрешностью определения m .

7 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике. В 3 т. Том 2. Оптика: учебное пособие
2. <http://mathhelpplanet.com> (МНК и регрессионный анализ)
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Свет> (длины волн желтого и зеленого света)