

Лабораторная работа 4.2.1
Кольца Ньютона

Яковлева Саша, группа 625

22 мая 2018 г.

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции 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 шкала.

Кольца Ньютона - опыт по интерференции волн, отраженных от границ узкой воздушной прослойки между поверхностью линзы и стеклянной пластиной, используемый для определения кривизны поверхностей. Интерференционные полосы локализованы на сферической поверхности; картина имеет вид концентрических колец, что очевидно из соображений симметрии и подтверждается расчетами ниже; наблюдение проводится в отраженном свете. Иллюстрация эксперимента приведена на рисунке 1.

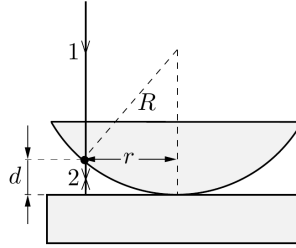


Рис. 1: Ход лучей в опыте

На линзу падает монохроматический пучок параллельных лучей. Найдём радиусы колец Ньютона, пренебрегая отклонениями лучей от вертикали в воздушном зазоре и считая размер зазора d много меньшим радиуса кривизны линзы R : $d \ll R$. Для точки поверхности линзы на расстоянии r от оптической оси из теоремы Пифагора верно:

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2 \approx 2Rd \rightarrow d = r^2/2R$$

Запишем оптическую разность Δ интерферирующих лучей 1, отраженного от сферической поверхности, и 2, прошедшего зазор и отраженного от поверхности пластины (см. рисунок 1), учитывая набег $\lambda/2$, возникающий при отражении волны от более оптически плотной среды:

$$\Delta = 2d + \lambda/2 = r^2/R + \lambda/2$$

Из условия минимума интерференции - разность хода составляет нечетное число полуволен $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$, $m \in \mathbb{Z}$ - получим выражение для радиусов темных колец r_m^d :

$$r_m^d = \sqrt{m\lambda R} \quad (1)$$

Аналогично, из условия максимума интерференции - разность хода составляет четное число полуволен $\Delta = m\lambda$, $m \in \mathbb{Z}$, - запишем выражение для радиусов светлых колец r_m^l :

$$r_m^l = \sqrt{(2m - 1)\lambda R/2} \quad (2)$$

Нижние индексы соответствуют порядку минимума/максимума m интерференционной картины.

Для наблюдения колец собирается установка, показанная на рисунке 2. Свет от ртутной лампы L проходит монохроматор и попадает опак-иллюминатора ОИ, внутри которого расположена пластина P под углом 45° к оси микроскопа. Он частично отражается от пластины и освещает исследуемую систему.

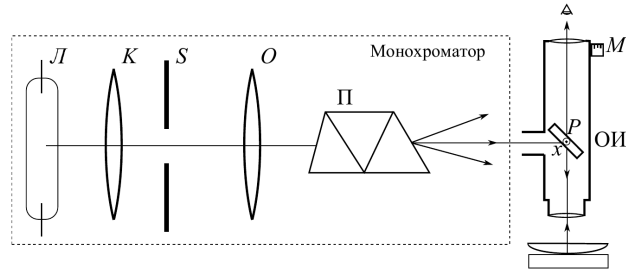


Рис. 2: Схема установки для наблюдения колец Ньютона

1 Калибровка окулярной шкалы

Прежде чем приступить к измерениям радиусов колец, откалибруем окулярную шкалы микроскопа: на линзу положим эталонную объектную шкалу, настроимся на резкое ее изображение и совместим со шкалой окуляра.

В 10 больших делениях по 0,1 мм объектной шкалы уместается 10 целых делений окулярной шкалы. Неточность измерений оценим в половину деления окулярной шкалы, то есть относительная погрешность измерений составит $0,5/10 = 0,05$.

Таким образом, целое деление окулярной шкалы - $(0,100 \pm 0,005)$ мм, а **цена деления микрометрического винта**, отвечающего сотым долям измерений на микроскопе, - $(1 \pm 0,05)$ мкм.

2 Определение радиуса кривизны линзы

Настроим монохроматор в соответствии с описанием работы; при измерении радиусов колец будем использовать желтую линию ртути. Длина волны желтого цвета $\lambda_y = 578$ нм, длина волны зеленого цвета $\lambda_g = 546$ нм. В микроскоп видны кольца Ньютона.

В центре интерференционной картины находится темное пятно диаметром $2r_0 \approx 75$ мкм.

Установим перекрестие на центр удаленного кольца; будем перемещать его, снимая зависимость радиуса кольца от его номера с обеих сторон от центрального пятна интерференционной картины. Измерения представлены в таблице 1 отдельно для темных и светлых колец. Знаки «-» и «+» расставлены условно, и измерения $-m$ и $+m$ относятся к одному и тому же кольцу, но были получены с разных сторон от центрального пятна. Ошибку определения радиуса r_m оценим в 2 сотых окулярной шкалы (2 мкм).

На основании таблицы 1 построим график зависимостей квадрата темных колец от их номера $(r_m^d)^2(m)$ и квадрата светлых колец от их номера $(r_m^l)^2(m)$. Он показан на рисунке 3.

Темные кольца			
m	r_m^d , МКМ	$(r_m^d)^2, 10^3$ МКМ ²	$\Delta(r_m^d)^2, 10^3$ МКМ ²
-10	274	75,1	0,8
-9	260	67,6	0,7
-8	247	61,0	0,7
-7	231	53,4	0,7
-6	216	46,7	0,6
-5	195	38,0	0,6
-4	175	30,6	0,5
-3	150	22,5	0,4
-2	123	15,1	0,3
-1	94	8,8	0,3
1	84	7,1	0,2
2	117	13,7	0,3
3	147	21,6	0,4
4	169	28,6	0,5
5	185	34,2	0,5
6	206	42,4	0,6
7	221	48,8	0,6

Светлые кольца			
m	r_m^l , МКМ	$(r_m^l)^2, 10^3$ МКМ ²	$\Delta(r_m^l)^2, 10^3$ МКМ ²
-10	268	71,8	0,8
-9	254	64,5	0,7
-8	238	56,6	0,7
-7	221	48,8	0,6
-6	204	41,6	0,6
-5	184	33,9	0,5
-4	162	26,2	0,5
-3	138	19,0	0,4
-2	109	11,9	0,3
-1	63	4,0	0,2
1	61	3,7	0,2
2	102	10,4	0,3
3	131	17,2	0,4
4	157	24,6	0,4
5	177	31,3	0,5
6	196	38,4	0,6
7	215	46,2	0,6

Таблица 1: Измерение зависимости радиуса m -ого кольца от номера m

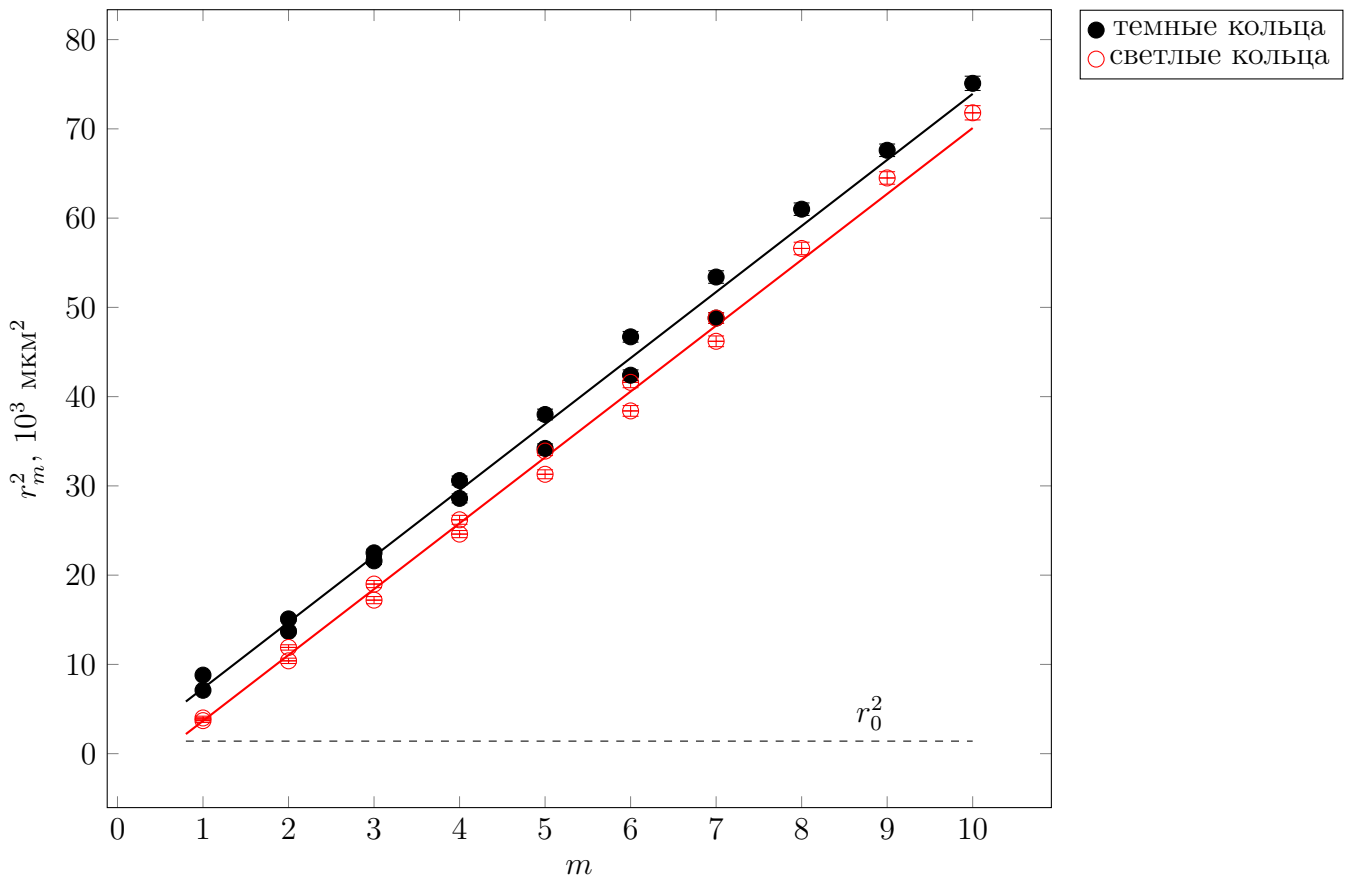


Рис. 3: График зависимости квадрата радиуса кольца Ньютона от его номера

Точки, измеренные для темных колец, обозначены на рисунке 3 черными маркерами, а точки, полученные для светлых, - не закрашенными кружками. Пунктирная прямая соответствует уровню квадрата радиуса центрального темного пятна r_0^2 .

Экспериментальные точки хорошо ложатся на прямые, что соответствует теории (см. формулы (1) для темных колец и (2) для светлых колец). Проведем эти прямые, получим ошибку по методу χ^2 . Искомые наклоны прямых равны b^d и b^l для темных и светлых колец соответственно:

$$b^d = (7,40 \pm 0,04) \cdot 10^3 \text{ мкм}^2$$

$$b^l = (7,38 \pm 0,04) \cdot 10^3 \text{ мкм}^2$$

Из формулы (1) вычислим радиус кривизны линзы R :

$$(r_m^d)^2/m = b^d = \lambda_y R \rightarrow$$

$$\rightarrow R = b^d/\lambda = (1,280 \pm 0,007) \text{ см}$$

Вычисления из наклона графика зависимости $(r_m^l)^2(m)$ имеют меньшую точность.

3 Наблюдение биений

При освещении окна опак-иллюминатора несколькими спектральными компонентами наблюдается картина биений. Измерения проведены в белом свете, однако можно считать, что окно освещалось двумя линиями ртути - желтой и зеленой, так как остальные линии спектра лампы значительно слабее. Общая интерференционная картина размывается при наложении светлых колец интерференционной картины одной линии на темные другой и остается четкой при совпадении светлых колец со светлыми и темных с темными.

Период биений рассчитывается следующим образом. Пусть между двумя центрами четкого участка картины Δm темных колец от волны λ_y , тогда на нем же укладывается $\Delta m + 1$ кольцо волны $\lambda_g < \lambda_y$.

$$\lambda_y \Delta m = \lambda_g (\Delta m + 1)$$

$$(\lambda_y - \lambda_g) \Delta m = \Delta \lambda \Delta m = \lambda + g$$

Количество темных колец в четком участке интерференционной картины $\Delta m = 12$. Таким образом, разность длин волн желтой и зеленой линий ртути $\Delta \lambda$ равна:

$$\Delta \lambda_e = \lambda_g / \Delta m \approx 46 \text{ нм}$$

Согласно справочным данным, эта разность составляет $\Delta \lambda_r = 32 \text{ нм}$.

Вывод: в работе наблюдалась интерференционная картина, полученная в результате отражения от узких границ воздушной прослойки между поверхностью линзы и стеклянной пластины - кольца Ньютона. 1) Проверена теоретическая зависимость квадрата радиуса кольца от его номера $r_m^2(m)$ (см. рисунок 3) - экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую, погрешность коэффициентов фитирующей прямой составила не больше 1%; определен радиус кривизны линзы. 2) Получена картина биений при «совмещении» двух линий ртути, рассчитан ее период Δm , на основании чего экспериментально получена разность длин волн линий $\Delta \lambda_e$, отличающая от истинной $\Delta \lambda_r$ на 30%. Ошибка такого способа определения разности линий высока: по картине биений тяжело определить границу четкой и нечеткой областей.