

Изучение интерференции на примере колец равного наклона

С. Б. Рыжиков^{1,*}, Ю. В. Рыжикова²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет,
¹кафедра общей физики**²кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Статья поступила 25.04.16; Подписана в печать 05.05.16)*

Предложена методика наблюдения интерференционных колец равного наклона с использованием лазера и линз от очков. Приведены расчеты размеров колец в зависимости от параметров линзы. Указанный эксперимент может быть использован в качестве лекционной демонстрации в школе и в вузе, при проведении лабораторных работ, а также стать основой для исследовательских работ школьников.

PACS: 42.25.Nz; 01.40.Fk; 01.50.Mu

УДК: 535.4.

Ключевые слова: оптика, интерференция, демонстрационный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известны ставшими классическими эксперименты Ньютона по наблюдению интерференционных полос равной толщины, которые он наблюдал в месте соприкосновения линзы и плоского стекла — так называемые «кольца Ньютона». Эти эксперименты были подробно описаны им в работе «Оптика...» [1] во второй книге в частях 1, 2 и 3. Менее известны наблюдения Ньютоном интерференционных колец, которые можно условно назвать кольцами равного наклона, изложенные им в 4 части этой же книги.

«Наблюдение 1. Когда солнце светило в мою затемненную комнату сквозь отверстие в одну треть дюйма шириною, я заставлял вошедший пучок света падать перпендикулярно на стеклянное зеркало, вогнуто отшлифованное с одной стороны и выпукло — с другой по сфере с радиусом в пять футов и одиннадцать дюймов и покрытое ртутью с выпуклой стороны. В центре сферы, по которой было отшлифованное зеркало, т. е. на расстоянии около пять футов и одиннадцать дюймов от зеркала, я держал белый непрозрачный картон или бумагу таким образом, что пучок света мог проходить через маленькое отверстие в середине картона к зеркалу и оттуда отражался обратно к тому же отверстию. Я наблюдал тогда на картоне четыре или пять концентрических радуг или цветных колец, подобных дождевой радуге, окружавших отверстие...» [1, с. 227].

Ньютон со свойственной ему скрупулезностью измерил радиусы наблюдаемых колец:

«Если считать белое круглое пятно в середине ... равносильным бесконечно малому кольцу, то квадраты диаметров колец будут в прогрессии: 0, 1, 2, 3, 4 и т.д.» [1, с. 229].

Далее Ньютон описывает наблюдения не в белом свете, а в выделенном диапазоне цветов:

«Когда призма была помещена таким образом, что, преломляя свет смешанных колец цветов, разделяла их... легко насчитывал их восемь или девять, а иногда двенадцать или тринадцать. Если бы свет их не был столь слабым, то я не сомневаюсь, что мог бы увидеть много больше» [1, с. 229].

Малая известность указанных экспериментов, возможно, объясняется сложностью их воспроизведения. Однако сегодня подобную интерференционную картину несложно наблюдать с помощью лазеров. Вместо «шестифутового зеркала» можно использовать обычные линзы от очков.

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Линза от очков кладется на не отражающую поверхность. Лазерная указка зажимается в штативе и луч направляется на линзу от очков в то место, где она касается стола. Тогда на удаленном экране возникает система интерференционных колец, как показано на рис. 1.

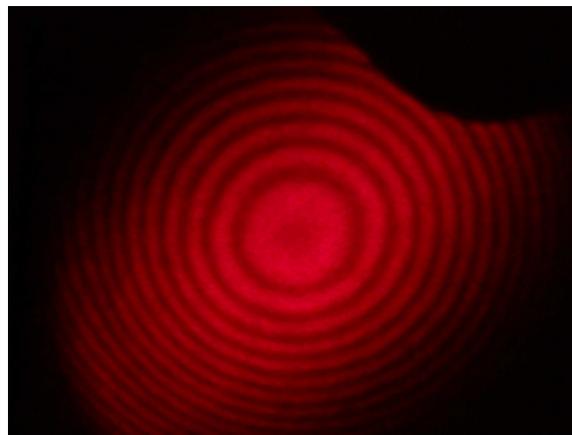


Рис. 1: Вид интерференционных колец

*E-mail: sbr@physics.msu.ru

Если немного наклонить луч, как показано на рис. 2, то нет необходимости прорезать отверстие в экране, а картину можно наблюдать, например, на потолке.

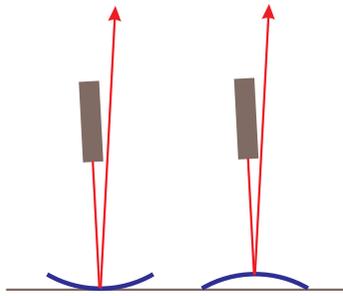


Рис. 2: Схема эксперимента

Линза может лежать на столе как выпуклой стороной вверх, так и вниз. В экспериментах можно использовать как собирающую, так и рассеивающую линзы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Кольца возникают в результате интерференции света от двух точечных источников, образующихся при отражении лазерного луча от поверхностей линзы, как показано на рис. 3. Найдем расстояние l между источниками S_1 и S_2 , используя формулу сферического зеркала и инвариант Аббе [2].

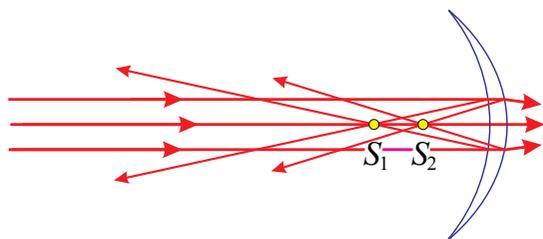


Рис. 3: Формирование точечных источников

Пусть радиус кривизны передней поверхности линзы R_1 , задней — R_2 , толщина линзы — b , показатель преломления — n .

После преломления на передней поверхности параксиальный пучок лучей преобразуется в сферическую волну, распространяющуюся из точки B , как показано на рис. 4. Используя инвариант Аббе, вычислим расстояние x_1 :

$$x_1 = R_1 \frac{n}{n-1}. \tag{1}$$

Соответственно, расстояние от точки B до задней поверхности линзы составит $x_1 + b$.

Используя формулу сферического зеркала, найдем положение центра сферической волны C (рис. 5), образующейся после отражения от задней поверхности

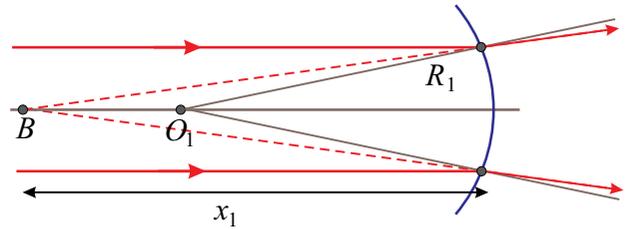


Рис. 4: Преломление луча на первой поверхности

линзы:

$$\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_1 + b} = \frac{2}{R_2}. \tag{2}$$

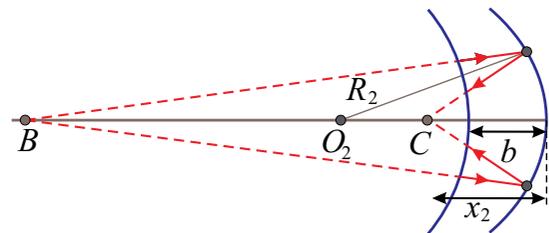


Рис. 5: Отражение луча

Точка C является мнимым источником световой волны, преломляющейся на передней поверхности линзы, находящимся от нее на расстоянии $x_2 - b$. После преломления лучи сойдутся в точке S_2 , как показано на рис. 6. Из инварианта Аббе:

$$\frac{n}{x_2 - b} - \frac{1}{x_3} = \frac{n-1}{R_1}. \tag{3}$$

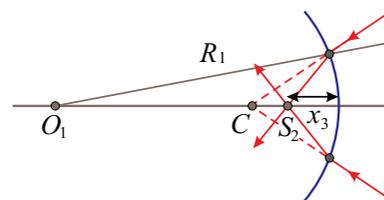


Рис. 6: Второе преломление луча

Из системы уравнений (1)–(3) можно получить значение x_3 . Конечная формула получается очень громоздкой. Она может быть существенно упрощена в приближении тонких линз, когда мы пренебрегаем величиной b по сравнению с x_1 и x_2 :

$$x_3 = \frac{R_1 R_2}{2(nR_1 - nR_2 + R_2)}. \tag{4}$$

По формуле сферического зеркала расстояние от передней поверхности линзы до источника S_1 равно

$R_1/2$. Отсюда получим расстояние l между источниками S_1 и S_2 для тонкой линзы:

$$l = \left| \frac{R_1}{2} - x_3 \right| = \left| \frac{R_1}{2} \frac{n(R_1 - R_2)}{n(R_1 - R_2) + R_2} \right|. \quad (5)$$

Если разница радиусов кривизны линзы мала: $|R_1 - R_2| = \Delta R \ll R$, то формулу (5) можно существенно упростить:

$$l = \frac{n|\Delta R|}{2} = \frac{n}{2(n-1)} R^2 |D_0|, \quad (6)$$

где R — среднее значение радиуса кривизны, а D_0 — оптическая сила линзы, вычисляемая по формуле [2]:

$$|D_0| = (n-1) \left| \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right|.$$

Если луч падает на линзу так, что отражающие поверхности будут выпуклыми, то изображения S_1 и S_2 будут мнимыми, но вид формул (4)–(6) не изменится.

Заметим, что интерференционные кольца можно наблюдать в линзе от очков с нулевой оптической силой. В этом случае уже нельзя пренебрегать толщиной линз и пользоваться приближением (5), а нужно использовать систему уравнений (1)–(3).

Два точечных источника S_1 и S_2 формируют на удаленном экране интерференционные кольца, как показано на рис. 7. Поскольку лучи падают примерно под одним углом φ , то кольца можно условно считать кольцами равного наклона. Разность хода между лучами в приближении малых углов равна:

$$\Delta l = |S_2 E| - |S_1 E| = |S_2 D| = l \cos \varphi = l \left(1 - \frac{\varphi^2}{2} \right).$$

Предположим, что в центре картины наблюдается интерференционный максимум. Тогда размер m -го кольца на экране равен:

$$r = h \sqrt{\frac{2m\lambda}{l}}, \quad (7)$$

где h — расстояние до экрана.

Формула (7) полностью соответствует описанному выше наблюдению Ньютона относительно радиусов колец.

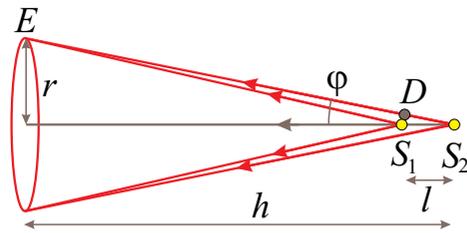


Рис. 7: Формирование колец равного наклона от двух точечных источников

Поскольку в центре картины может быть как максимум, так и минимум, так и промежуточное значение, то для количественных расчетов нужно измерить радиусы нескольких колец. Из формулы (7) следует, что для соседних колец (m и $m+1$) должно выполняться соотношение:

$$r_{m+1}^2 - r_m^2 = \frac{2\lambda h^2}{l}. \quad (8)$$

Измерив экспериментально радиусы нескольких колец, из (8) можно вычислить расстояние l между точечными источниками S_1 и S_2 , и сравнить его со значением l , полученным по формулам (5)–(6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный способ наблюдения интерференционных колец можно использовать как простую и эффективную демонстрацию при изучении интерференции, как в вузе, так и в школе. Заметим, что в физико-математических школах интерференцию можно изучать уже в 8-м классе, как описано в [3, 4].

Поскольку наблюдаемая интерференционная картина позволяет получать количественные закономерности, то она может быть использована в физическом практикуме или стать темой проектно-исследовательской работы одаренных школьников.

В 2016 г. ученик лицея «Вторая школа» выполнил под руководством авторов подобную работу, которая получила Диплом II степени на Московской городской конференции школьных исследовательских работ «Потенциал».

[1] Ньютон И. Оптика или Трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. (М.–Л.: Госиздат, 1927).

[2] Ландсберг Г. С. Оптика. (М.: Наука, 1976).

[3] Рыжиков С. Б. Вестн. Моск. ун-та. Серия 20 (педагогическое образование). №3. С. 100. (2011).

[4] Рыжиков С. Б., Рыжикова Ю. В. Загадки оптики. (М.: ОЛМА Медиа Групп, 2015).

Study of interference by example of equal inclination rings**S. B. Ryzhikov^a, Yu. V. Ryzhikova^b***Faculty of Physics,**M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia**E-mail: ^asbr@physics.msu.ru, ^bryzhikovaju@physics.msu.ru*

The technique of observing the interference rings of equal inclination with a laser and lenses of glasses is suggested. The calculations of the size of the rings depending on the lens parameters are given. This experiment can be used as a lecture demonstration at the school and in high school, for laboratory work as well as students research work.

PACS: 42.25.Hz; 01.40.Fk; 01.50.My

Keywords: optics, interference, demonstration experiment.

Received 25.04.16.

Сведения об авторах

1. Рыжиков Сергей Борисович — докт. пед. наук, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики; тел.: (495) 939-14-89, e-mail: sbr@physics.msu.ru.
2. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru.