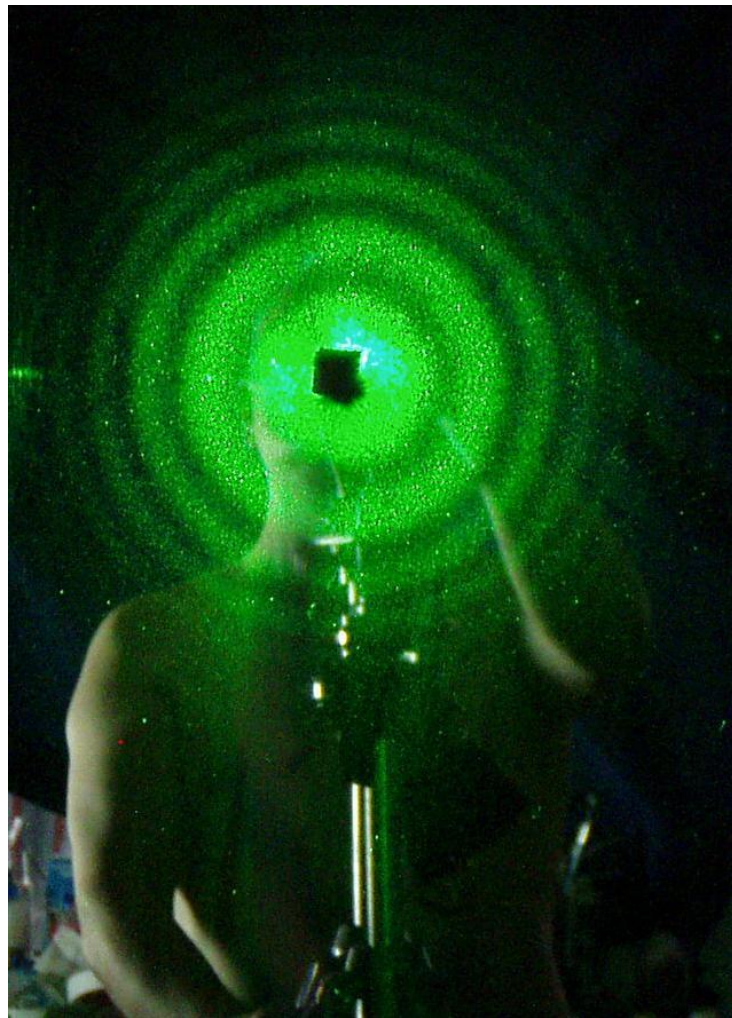


Интерференция света рассеянного частицами, находящимися на поверхности плоского стекла или зеркала

Аннотация

Приведены экспериментальные результаты изучения и теория оптического явления, наблюдаемого в свете, отраженном от запыленных или «запотевших» (то есть покрытых множеством капелек) поверхностей стеклянных пластинок. Наблюдаются светлые и темные кольца или полосы.



На приведенной фотографии автор статьи в необычном виде. В самом центре интерференционных колец на месте головы находится черный квадрат. Вам интересно, как ему удалось получить такую фотографию? Прочитайте эту статью, и вы сами сможете делать аналогичные фото.

Экспериментальные наблюдения

Оборудование и условия для изучения описываемого явления: запыленные (или «запотевшие») плоскопараллельные стеклянные пластинки, источники света малых размеров (точечные), темное помещение, фотоаппарат для фиксации наблюдаемых картин. Наблюдатель (или фотоаппарат) и источник света должны находиться по одну сторону от стеклянной пластины. Для каждого глаза наблюдателя создается свое распределение яркости отраженного света по углам, поэтому удобно держать открытым только один глаз и располагать источник света близко к линии, на которой находятся глаз наблюдателя и его отражение в стеклянной пластинке.

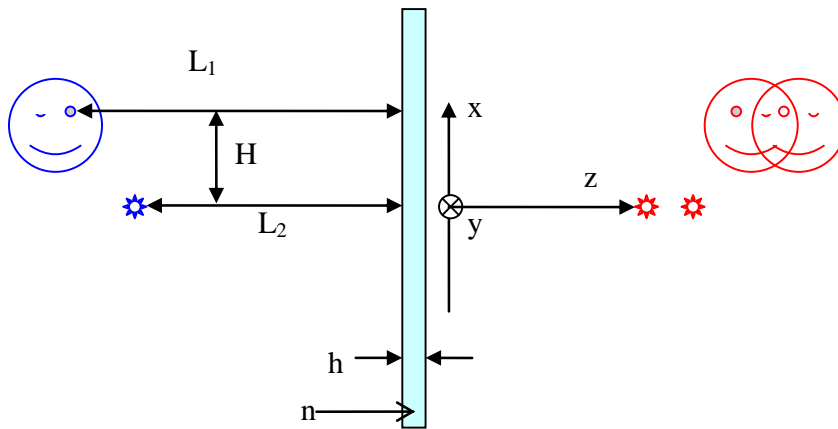


Рисунок 1.

На приведенном рисунке показано взаимное расположение пластинки, наблюдателя с одним открытым глазом и источника света. Для наглядности за пластинкой помещены изображения наблюдателя и источника света. Они парные, поскольку свет отражается от обеих границ раздела стекло / воздух пластинки. Параметр n – коэффициент преломления стекла, из которого сделана пластинка. В зависимости от набора параметров (L_1 , L_2 , H , h , n) можно увидеть светлые и темные кольца или полосы, причем наблюдаемое «геометрическое» изображение источника всегда находится посередине светлого кольца или светлой полосы.

На фотографиях №№ 1 ÷ 4 показаны наблюдаемые картины при разных значениях H и фиксированных значениях L_1 и L_2 . Снимки делались из комнаты в темное время суток. Фотоаппарат был заранее установлен на штатив и подготовлен к съемке. Заранее был включен фонарик (в комнате). Дверь на застекленный балкон открывалась. Через несколько секунд однослойные стекла закрытых балконных окон начинали заметно «туманиться», покрываясь кристалликами льда или капельками воды на стороне, обращенной к теплой комнате. В это время и производилась съемка. На заднем плане приведенных фотографий видны ветки деревьев, рекламные огни на доме напротив и уличные фонари. Фотоаппарат автоматически настраивался на получение резкого изображения ветвей деревьев. Поскольку деревья находились на расстоянии около 10 метров от фотоаппарата, то можно считать, что объектив фотоаппарата был наведен «на бесконечность».

Дополнительные сведения для экспериментов с мелкими капельками воды на стекле:

Толщина оконного стекла $h=4$ мм.

На улице температура минус 10°C .

При получении фотографий №№ 2÷4 температура воздуха в комнате была плюс 25°C , влажность воздуха в комнате около 60%.



Фото №1

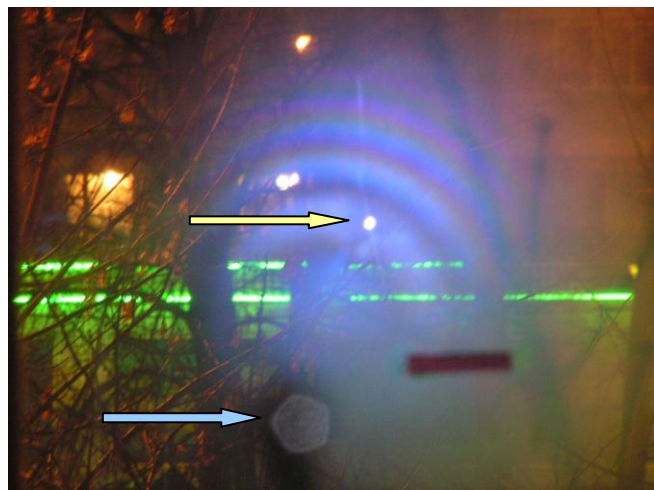


Фото №2

Стрелками желтого цвета показаны «геометрические» изображения источника света, возникшие при отражении от плоского стекла (как от зеркала). Эти изображения, как видно, всегда находятся в середине светлой полосы (фото №№1÷3) либо в центре светлого центрального пятна (фото №4).

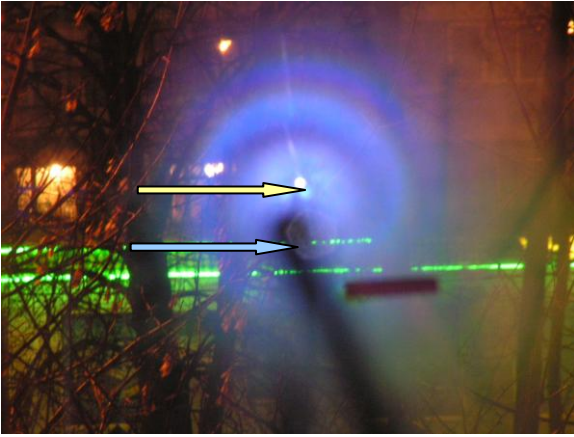


Фото №3

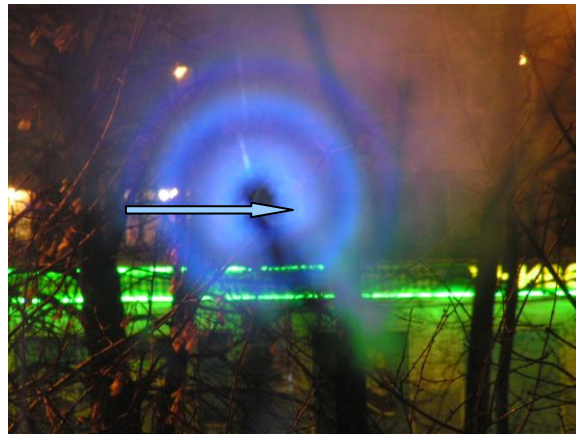


Фото №4

В последнем случае, корпус фонарика загородил собою «геометрическое» изображение источника света. Стрелками голубого цвета на фотографиях №№2÷4 отмечено положение источника света. (светодиодный фонарик обращен к окну, поэтому свет попадает в фотоаппарат только после отражения от стекла). На месте этого нерезкого изображения корпуса фонарика находится светлый пятиугольник – появление этой «детали» обеспечивает диафрагма объектива фотоаппарата, имеющая пять лепестков. Темный нерезкий прямоугольник на фотографии – это полоска штрихованной бумаги длиной ~ 60 мм, наклеенная на стекло. Она использовалась для нахождения угловых расстояний между полосами.

Для фотографий №№ 2÷4 $L_1 = 370$ см, $L_2 = 278$ см.

Совершенно аналогичные картины этого же явления наблюдаются, если стекло запылено. Условия наблюдения в этом случае более комфортные – не нужно работать на сквозняке. А если задняя поверхность стеклянной пластины хорошо отражает свет (зеркало), то в этом случае картина явления более яркая, чем от прозрачной плоской стеклянной пластины (оконного стекла). Приведенные ниже фотографии №№ 5-16 сделаны именно в таких условиях. Фотографии №№ 8, 12, 16 соответствуют освещению запыленного плоского зеркала светом «белого» светодиода. Остальные фотографии получены при освещении зеркала светодиодами красного, зеленого и синего цвета.

Непосредственно перед зеркалом с толщиной стекла 5 мм на нитях висел квадратный кусочек (2см × 2см) черной бархатной ткани для того, чтобы закрыть собою яркое «геометрическое» изображение источника света в зеркале. Кроме того, вдоль зеркала была протянута линейка с миллиметровыми делениями, и она видна на некоторых фотографиях.

При получении фотографий №№ 5 – 8 положение источников света (светодиодов разных цветов) выбиралось одинаковым, $L_2 = 274$ см. Положение фотоаппарата соответствовало параметрам: $H < 1$ см, $L_1 = 397$ см. Входное отверстие объектива фотоаппарата имело диаметр 2 см значительно больший, чем размер источника света ~7мм, поэтому на фотографиях №№ 5 – 8 самого источника и проводов, которые к нему подходят, не видно.

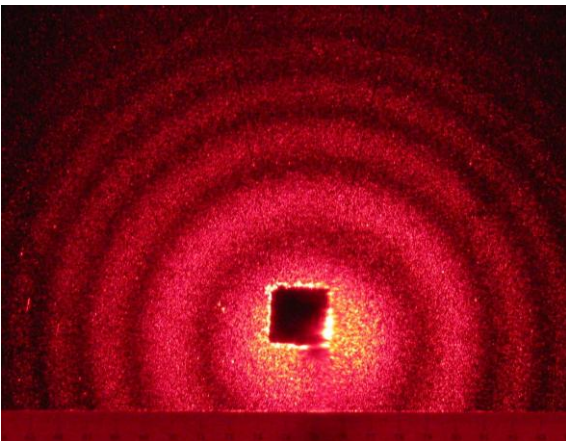


Фото № 5

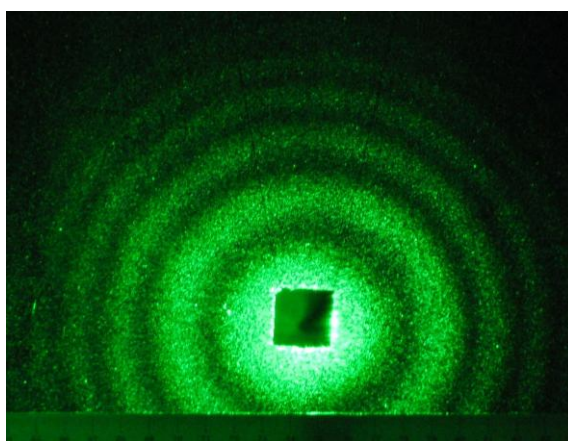


Фото № 6

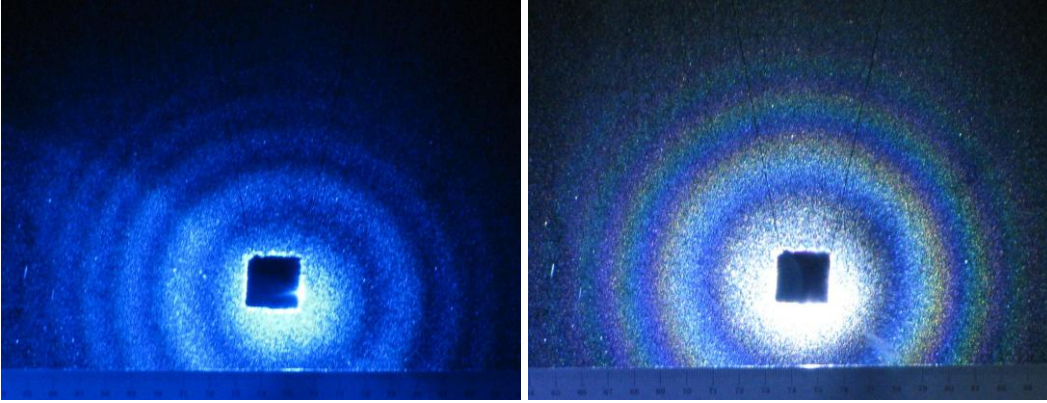


Фото № 7

Фото № 8

Для разных цветов освещения удобно сравнивать диаметры темных полос. Для второго по счету от центра картины темного кольца красного цвета диаметр равен примерно $12,7 \pm 0,2$ см, для зеленого цвета: $11,6 \pm 0,2$ см, для синего цвета: $10,7 \pm 0,2$ см. При рассматривании фотографии № 5 (освещение белым цветом) кажется, что второе темное кольцо имеет диаметр $12,1 \pm 0,2$ см, то есть глаз «выбирает» условие минимума, как «пропадание» самого яркого (по зрительному ощущению) зелено-желтого цвета.

При одинаковых величинах L_1 и $L_2 = 444$ см и $H = 2,5$ см были получены фотографии:

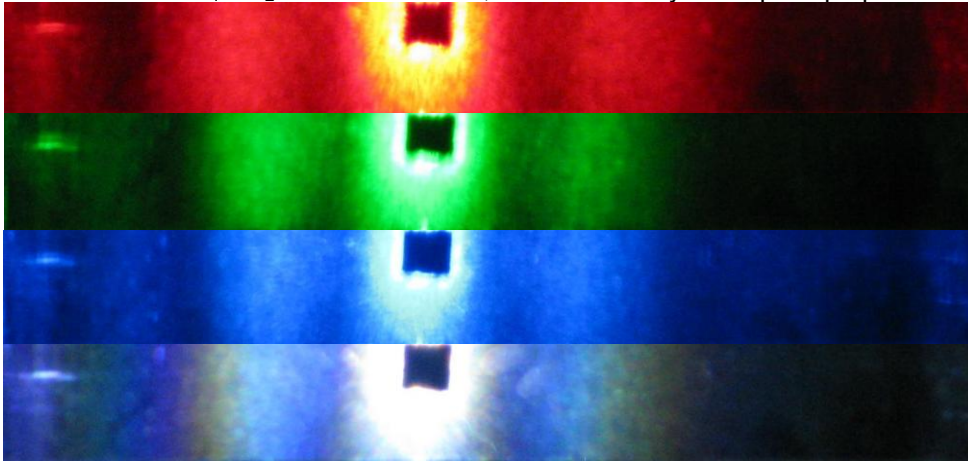


Фото № 9 – 12

При одинаковых величинах L_1 и $L_2 = 444$ см и $H = 10$ см были получены фотографии:

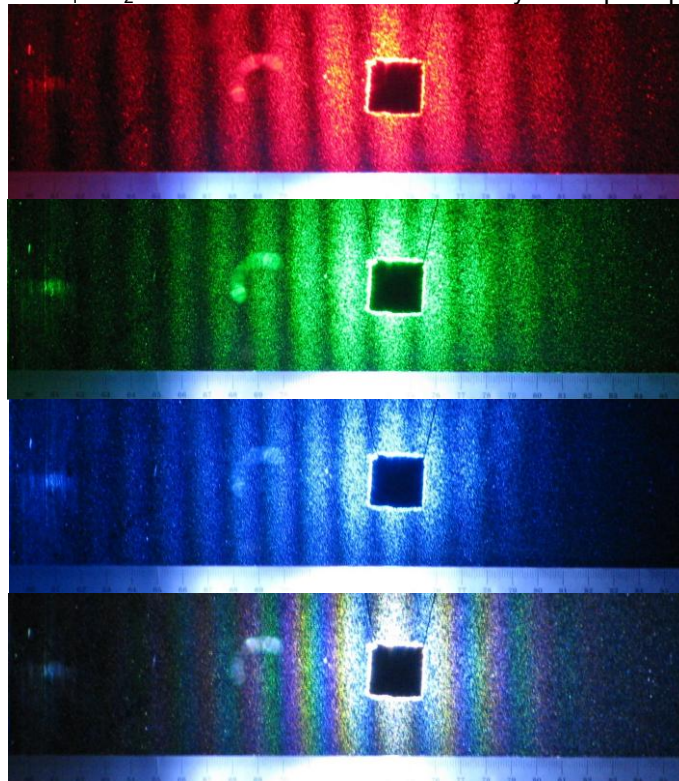


Фото № 13 – 16

Хорошо заметно, что при $L_1 = L_2$ наблюдаются параллельные друг другу прямые светлые и темные полосы. Экспериментально установлено, что чем больше величина H при фиксированных L_1 , L_2 и h (см. рисунок 1), тем меньше расстояние между соседними темными полосами или кольцами, и чем больше L_1 и L_2 при фиксированных величинах H и h , тем больше расстояние между соседними темными полосами. Также установлено, что при фиксированных величинах H , L_1 и L_2 для более толстых стекол h расстояния между соседними темными полосами в наблюдаемой картине меньше, чем для более тонких стекол (в этом случае эксперимент проводился не с оконными запотевшими стеклами, а со специально подобранными запыленными стеклами, имевшими разные толщины d от 2мм до 15мм).

То есть и ширина полос, и расстояние между соседними полосами зависят от величин $H \times h / L_1$ и Hh / L_2 , и они тем больше, чем меньше эти величины.

Для того чтобы иметь представление о размерах и форме капелек и льдинок на поверхности оконных стекол приведены фотографии:

№ 17 – фрагмент полоски бумаги со штрихами, прилепленной к стеклу, и туманное пятно из мелких капелек над полоской. Ширина каждого черного штриха равна 1 мм, и ширина зазора между штрихами такая же. Капельки или кристаллики льда на этой фотографии настолько малы, что по отдельности они неразличимы, и на стекле видно только туманное пятно.

№18 – увеличенная фотография участка стекла, покрытого капельками. Хорошо видно, что линейные размеры капелек примерно «одного порядка» и что капельки различаются по форме.

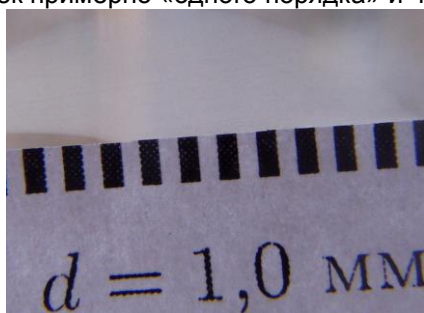


Фото №17

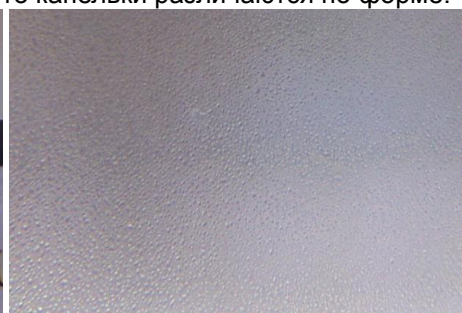


Фото №18

Элементарная теория явления

В описываемом явлении главные роли играют дифракция (рассеяние) света на каждой пылинке (капельке или льдинке = препятствии = частице), находящемся на ближней к наблюдателю поверхности стекла, а также отражение рассеянного и не рассеянного света от дальней поверхности стекла. Два близких направления света, рассеянного частицей соответствуют лучам, которые попадают в глаз наблюдателя или в объектив фотоаппарата.

Когерентный пучок света, рассеянного одной частичкой в разных направлениях, расширяется по мере прохождения через стекло. Путь в стекле проходит от запыленной (покрытой капельками воды или кристалликами льда) поверхности (первой поверхности) до зеркальной поверхности (второй поверхности) и обратно. Общая длина этого пути равна примерно удвоенной толщине стекла $2h$.

Частицы, рассеивающие свет, имеют разные характерные размеры D , значительно большие длин волн видимого света λ . Расстояния G между соседними частицами еще больше $G > D > \lambda$. Углы рассеяния по отношению к исходному направлению пучка света для каждого препятствия (рассеивающей свет частицы) располагаются в основном в диапазоне от нуля до величины порядка $\lambda / (nD)$ в стекле или λ / D в воздухе. Здесь n – это показатель преломления света для длины волны λ . В частности, в воздухе направление на первый дифракционный минимум рассеяния для круглого препятствия диаметром D составляет с исходным направлением пучка света угол $\varphi \approx 1,22 \times \lambda / D$. В направлениях взгляда наблюдателя близких к направлению на «геометрическое» изображение источника света даже самые крупные частицы дают вклад в общую яркость наблюдаемой картины. Чем больше отличаются отмеченные направления, тем меньше должны быть частицы, которые рассеивают свет в соответствующем направлении, и тем менее яркой становится наблюдаемая картина с чередованием светлых и темных полос или колец.

Если принять размеры самых мелких рассеивающих свет частиц (пылинок, капелек воды или льдинок) по порядку величины равными 0,01 мм, то при толщине стекла h равной 5 мм для зеленого цвета $\lambda = 0,5$ мкм получится $\varphi \approx 4^\circ$, а размер пятна порядка 0,75 мм. С расстояния 4 м наблюдателю под таким углом (4°) видна область стекла (зеркала) с дифракционной картиной размером около 30 см. Эти величины, то есть размеры цветных пятнышек < 1 мм и поперечный размер наблюдаемой картины явления ~ 30 см, соответствует изображениям, которые видно на фотографиях №№ 5 – 16. Для более крупных по размерам частиц углы рассеяния света меньше, и в центре наблюдаемой картины (вблизи расположения геометрического изображения источника света) рассеянный свет более ярк, чем на периферии. Это справедливо для всех наблюдаемых картин (фото №№ 5–16).

В каждое место на сетчатке глаза наблюдателя рассеянный свет попадает сразу от большого количества частиц – «центров рассеяния» – капелек, льдинок или пылинок. Диаметр пятна на

поверхности стекла, которое глаз может разрешить, как отдельную точку, равен примерно $\beta \times L_1$, где β – предельное угловое разрешение глаза человека, равное примерно 10^{-4} . На таком пятне располагается около $N = (\beta \times L_1 / G)^2$ рассеивающих свет элементов. Если, например, $L_1 = 3$ м и $G = 10^{-4}$ м, то $N \sim 10$. При еще меньших расстояниях между соседними частицами и большем расстоянии L_1 это число вырастает во много раз. Это обстоятельство способствует тому, что наблюдателю «видны» не отдельные светящиеся пятнышки, а широкие светлые полосы или кольца. В отличие от глаза объектив фотоаппарата с так называемым «зумом» имеет значительно лучшее угловое разрешение и формирует на чувствительной матрице достаточно маленькие светлые пятнышки, которые хорошо заметны на фотографиях.

Интерферируют когерентные пучки света, попадающие в глаз наблюдателя или в объектив фотоаппарата разными путями, отличающиеся последовательностью событий:

1-й пучок: прохождение ближней к наблюдателю поверхности стекла без рассеяния => зеркальное отражение от дальней поверхности стекла => прохождение через ближнюю поверхность стекла с дифракционным рассеянием на частице «А» в направлении глаза наблюдателя.

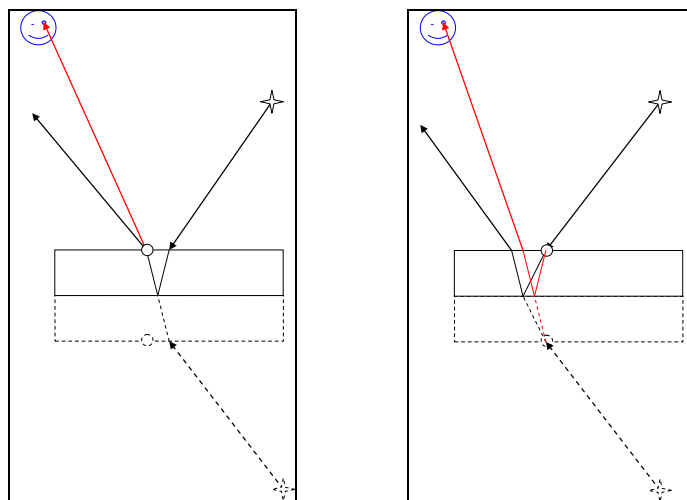
2-й пучок: прохождение ближней к наблюдателю поверхности стекла с дифракционным рассеянием пучка на частице «А» в соответствующем направлении => зеркальное отражение от дальней поверхности стекла => прохождение света через ближнюю поверхность => попадание света в глаз наблюдателя.

Интенсивности этих пучков света почти совпадают, так как почти совпадают углы рассеяния света на одной и той же частице. И поскольку в таких пучках получаются практически одинаковые длины «оптических путей», то они остаются когерентными для всех длин волн видимого света, хотя толщина плоскопараллельных прозрачных пластин может значительно превышать длины световых волн.

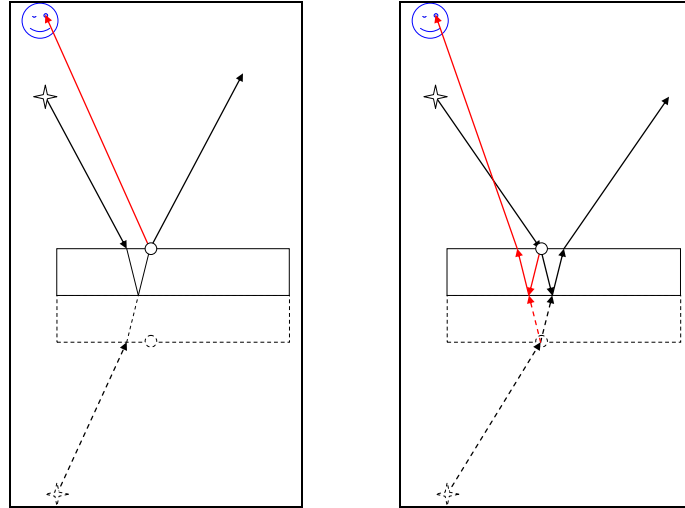
Обратимся к рисунку 1. На нём справа от пластинки изображены координатные оси x, y, z , которые определяют координаты точек на ближней к наблюдателю поверхности стекла. Начала отсчета осей совпадают с точкой пересечения ближней поверхности стекла с линией, проходящей через источник света и его изображения. Ось x лежит в плоскости рисунка, и содержит точку $[H, 0, 0]$ пересечения плоскости с линией, проходящей через глаз наблюдателя и его изображения. Ось y перпендикулярна плоскости рисунка 1. Координаты глаза наблюдателя в этой системе отсчета $[H, 0, -L_1]$, а координаты источника света, соответственно, $[0, 0, -L_2]$.

Если наблюдатель смотрит на участок стекла, не формирующий «геометрическое» изображение источника света, то есть не на точку с координатами: $[HL_2 / (L_1 + L_2), 0, 0]$, то соответствующие этому участку «геометрические» лучи проходят мимо его глаза. В глаз попадают лучи, рассеянные препятствиями, расположенными на рассматриваемом участке стекла. Они составляют с отраженным «геометрическим» лучом угол, который однозначно определяется взаимным расположением объектов: глаза наблюдателя, источника света и участка стекла, на который наблюдатель смотрит.

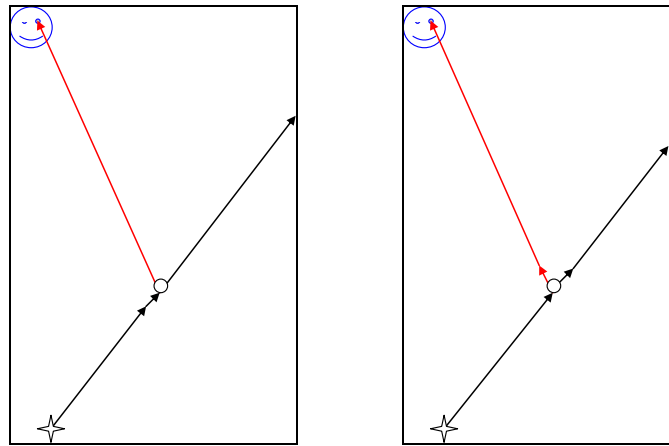
Если наблюдатель смотрит на точку поверхности стекла с координатами $(x, y, 0)$, то в его глаз попадают световые лучи, рассеянные многими частицами, расположенными в окрестности этой точки. Изобразим на рисунках ход пучков №1 и №2 для частицы «А» в проекциях на разные плоскости: (y, z) , (x, z) , (x, y) . Черными сплошными линиями изображены реальные пучки света, геометрически преломляющиеся и отражающиеся. Красными сплошными линиями изображены реальные рассеянные пучки света, попадающие в глаз наблюдателя. Маленький кружок символизирует рассеивающую свет частицу «А». Пунктирные линии соответствуют изображениям предметов и пучков света в «зеркале» = дальней от наблюдателя плоскости стеклянной пластины.



Проекция на плоскость (x, z) для пучка №1 (слева) и пучка №2 (справа).



Проекция на плоскость (y, z) для пучка №1 (слева) и пучка №2 (справа).



Проекция на плоскость (x, y) для пучка №1 (слева) и пучка №2 (справа).
Короткие стрелочки на плоскости (x, y) показывают путь света в стекле.

Учитывая, что толщина стекла h значительно меньше как расстояний L_1 и L_2 , так и координат x и y , найдем углы рассеяния и поворота пучков света для разных плоскостей.

Угол α рассеяния (модуль его величины) в плоскости (x, z) равен примерно:

$$\alpha = \left| \frac{H-x}{L_1} - x \left(\frac{1}{L_2} \right) \right| = \left| \frac{H}{L_1} - x \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \right| \ll 1$$

Угол β рассеяния в плоскости (y, z) равен примерно:

$$\beta = y \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \ll 1$$

Угол поворота γ луча (не рассеяния) в плоскости (x, y) равен примерно:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{x} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{H-x} \right)$$

Угол φ в воздухе, который составляют луч, отраженный рассматриваемым участком «геометрически», и луч, рассеянный в направлении глаза наблюдателя частицей, расположенной на рассматриваемом участке, равен примерно:

$$\varphi = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \sqrt{\left[\frac{H}{L_1} - x \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \right]^2 + y^2 \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right)^2}$$

Этому углу рассеяния света в воздухе соответствует угол рассеяния света в стекле – он в n раз меньше. Здесь n – это показатель преломления стекла.

Так как величина H , а также координаты x и y малы в сравнении величинами L_1 и L_2 , то

оптическая «разность хода» ΔL для попадающих в глаз наблюдателя пучков света №1 и №2, проходящих через центр частицы, равна примерно:

$$\Delta L = \frac{h}{n} \left[\frac{(H-x)^2 + y^2}{L_1^2} - \frac{x^2 + y^2}{L_2^2} \right]$$

Условие максимума яркости света, попадающего в глаз наблюдателя от соответствующего места на поверхности стекла таково:

$$\Delta L = \frac{h}{n} \left[\frac{(H-x)^2 + y^2}{L_1^2} - \frac{x^2 + y^2}{L_2^2} \right] = k\lambda; \quad \text{где } k = \text{целое число } 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Как видно, в полученное условие не входит величина D – размер частиц, рассеивающих свет.

Частные случаи:

Заметим, что при равенстве величин L_1 и L_2 , то есть при условии $L_1 = L_2 = L$ угол рассеяния φ равен:

$$\varphi_{L_1=L_2=L} = \frac{2}{L} \sqrt{\left(\frac{H}{2} - x\right)^2 + y^2}$$

В этом случае разница оптических путей не зависит от y и равна:

$$\Delta L = \frac{2Hh}{nL^2} \left(\frac{H}{2} - x\right)$$

При таком взаимном расположении источника света и глаза наблюдателя ему видны светлые и темные полосы перпендикулярные линии «источник света – глаз наблюдателя». Заметим, что при $x=H/2$ разность длин путей равна нулю. Это означает, что геометрическое изображение источника находится в середине светлой линии. Следует также обратить внимание на то, что формула для ΔL напоминает формулу для разности оптических путей при интерференции световых пучков на клине.

Подставив реальные величины $n \sim 1,5$; $L \sim 3$ м; $H, x \sim 0,1$ м; $h \approx 5 \times 10^{-3}$ м, можно получить, что:

$$\varphi_{L_1=L_2=L} = \frac{2}{L} \sqrt{\left(\frac{H}{2} - x\right)^2 + y^2} \approx 10^{-1}$$

$$\Delta L = \frac{2Hh}{nL^2} \left(\frac{H}{2} - x\right) \approx 3 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Полученная величина ΔL в несколько (4÷8) раз больше длин волн видимого света, а угол рассеяния во много раз меньше единицы и имеет порядок величины 10^{-1} . Фотографии №№ 9 – 16 соответствуют этой ситуации. На фотографиях №№ 9, 13 для красного светодиода и №№ 11, 15 для синего светодиода заметно, что период S картины распределения светлых и темных линий в направлении источник света – глаз наблюдателя связан с соответствующей длиной волны λ и расстоянием H соотношением:

$$S = \text{const} \times \lambda n / H.$$

Если же $H = 0$, то есть глаз наблюдателя и источник света находятся на одной прямой линии перпендикулярной пластине на разных расстояниях от пластины, то угол φ в этом случае равен:

$$\varphi_{H=0} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right) \sqrt{x^2 + y^2}$$

В этом случае разница оптических путей равна:

$$\Delta L = \frac{h(x^2 + y^2)}{n} \left[\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2} \right]$$

В этом варианте взаимного расположения глаза и источника света наблюдатель видит светлые и темные концентрические кольца. Заметим, что при $x=y=0$ разница длин путей равна нулю, то есть в центре картины находится светлое пятно, и в его середине расположено геометрическое изображение источника. Обратим внимание на то, что формула для ΔL напоминает формулу для разности оптических путей при интерференции световых пучков для «колец Ньютона».

Подставив реальные величины, имевшие место в экспериментах: $n \sim 1,5$; $L_1 \sim 3,5$ м; $L_2 \sim 3$ м; $x \sim y \sim 0,1$ м; $h \approx 4 \times 10^{-3}$ м, получим:

$$\varphi_{H=0} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \sqrt{x^2 + y^2} \cdot 10^{-1}$$

$$\Delta L = \frac{h(x^2 + y^2)}{n} \left[\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2} \right] \approx 1,6 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Полученная величина ΔL тоже в несколько (2÷4) раз больше длин волн видимого света, и угол рассеяния так же мал, как и в другом частном случае ($L_1 = L_2 = L$).

Условие максимумов для этого частного случая:

$$\Delta L = \frac{h(x^2 + y^2)}{n} \left[\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2} \right] = k\lambda; \quad \text{где} \quad k = \text{целое число } 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Фотографии №№ 4 – 8 соответствуют этой ситуации. На фотографиях №5 для красного светодиода и № 7 для синего светодиода заметно, что расстояния R от центра картины до максимума, соответствующего целому числу k , связаны с соответствующей длиной волны λ соотношением:
 $R^2/(k\lambda) = \text{const.}$

Выводы:

1. Получены экспериментальные фотографии, фиксирующие явление интерференции пучков света, рассеянных мелкими препятствиями, расположенными на поверхности плоского стекла или зеркала.
2. Дано теоретическое объяснение наблюдаемого явления.
3. Показано, что направления на максимумы и минимумы наблюдаемой картины зависят от длины волны света и не зависят от размеров частиц, рассеивающих свет.
4. Получены формулы для направлений, в которых наблюдаются максимумы яркости, и показано, что эти направления определяются не только длиной волны света, но и взаимным расположением стекла, источника света и глаза наблюдателя.
4. Отмечено, что вклады в яркость наблюдаемой картины рассеянного света, создают частицы разных размеров, и диапазон направлений, в котором соответствующий вклад заметен, определяется размером частиц.

С.Д. Варламов

четверг, 8 апреля 2010 г.

Литература

1. Charles A. Sawicki, "Easy and Inexpensive Demonstration of Light Interference", The Physics Teacher, vol. 39, p.16-19, 2001;(sunlight falling on a dusty mirror produced interference fringes)
2. Ding-wei Huang and Co, "Eyeglasses in the Classroom", The Physics Teacher, vol. 48, p.12-13, 2010
3. N. James Bridge, " A novel effect of scattered-light interference in misted mirrors", Physics Education. vol. 40(4), p.359-364,2005
4. Н.Ж. Schlichting Physik in unserer Zeit, vol. 35, p. 86, 2004
5. Поль Р.В., Оптика и атомная физика, Изд. Наука, М. 1966 (стр. 135-137).