

## Полосы равной толщины и полосы равного наклона

Доцент Митин И.В.  
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

При описании явления интерференции света в литературе появляются такие термины, как «полосы равной толщины» и «полосы равного наклона». Казалось бы, обычные слова, понятные даже тем, кто не изучал физику. Давайте посмотрим глазами обыкновенного человека на рис.1 и попытаемся угадать, где какие полосы. Думаю, что примерно так же смотрят и студенты, только начинающие изучать интерференцию.

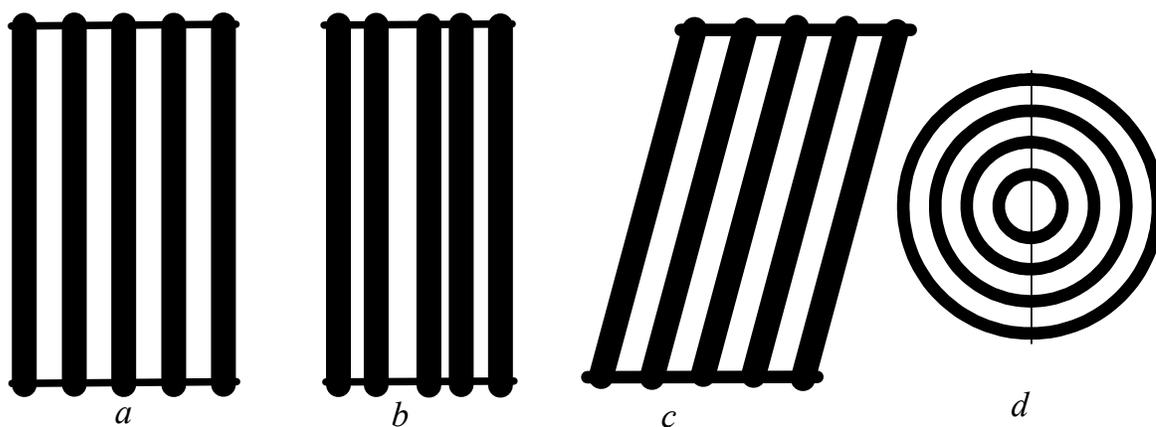


Рис.1 Полосы «равной толщины» и «равного наклона»

Рисунок 1a. Ровные аккуратные полосы – очевидно, что это полосы равной толщины. Или равной ширины – это же одно и то же, ведь так?

Рисунок 1b. Теперь темные полосы равной толщины, а светлые-то неееет!

Рисунок 1c. Полосы наклонились, значит, они равного наклона? Но ведь и толщина у них одна и та же, значит, они и равной толщины?

Рисунок 1d. А теперь – колечки, они явно равной толщины. А какой наклон может быть у колечек? Да никакого!

Разложили по полочкам, и что? Поверили, что так и надо рассуждать? Надеюсь, что нет, и правильно сделали!

А теперь посмотрим на фотографии реальных интерференционных картин. На рис.2 и 3 показаны системы интерференционных колец, по структуре очень похожих друг на друга. Но! Одна из картин – это полосы равной толщины, а вторая – полосы равного наклона!

Надо разбираться, согласны?

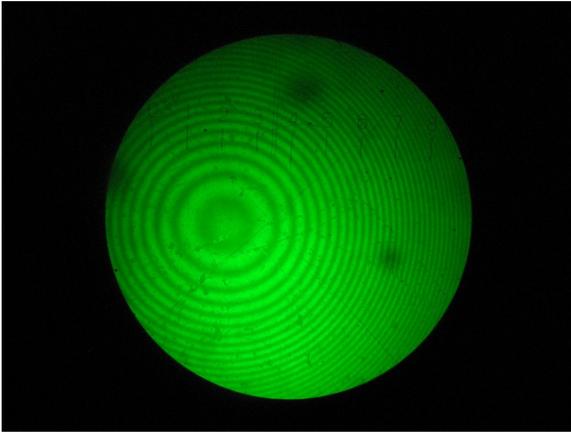


Рис. 2. Полосы равной толщины

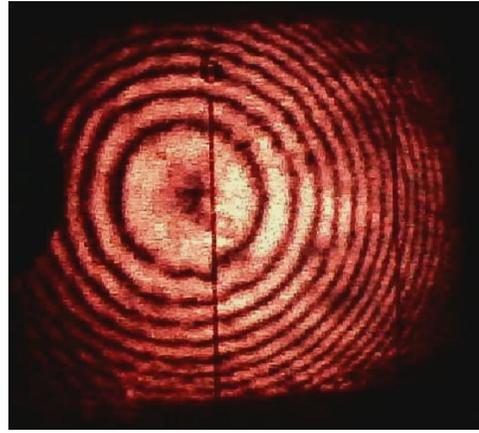


Рис. 3. Полосы равного наклона

Прежде всего, скажем, что речь идет об ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ полосах. Поэтому сначала краткое напоминание основных положений теории.

Интерференция света – это явление пространственного перераспределения энергии при наложении двух волн (световых пучков), при этом, как правило, возникает система светлых и темных полос. Интерференция имеет место и для других волн: звуковых, волн на поверхности жидкости и т.п. Но для электромагнитных (световых) волн важно, чтобы обе интерферирующие волны исходили из единого источника света. Иными словами, первоначально волна исходит из одного источника, затем каким-либо образом разделяется на две, а потом эти волны направляются на экран, на котором наблюдается интерференционная картина.

Если зафиксировать точку источника и точку наблюдения, то свет проходит от одной к другой двумя разными путями. Если рассчитать разность хода, то в зависимости от характеристик излучения можно оценить интенсивность в точке наблюдения.

#### *Отступление 1.*

В литературе описанную выше схему интерференции часто называют двухлучевой. На мой взгляд, такое название некорректно. Луч – это абстрактное понятие из геометрической оптики, это линия (бесконечно тонкая), по которой распространяется свет. Например, при построении изображения в линзе принято показывать ход лучей, точка их пересечения и дает положение изображения.

В реальной жизни лучей не существует, аналогом лучей являются очень узкие пучки света. Интерференция же возникает при наложении двух волн, или двух пучков света, как правило, довольно широких. Для нахождения разности хода в какой-либо точке экрана опять же прибегают к построению лучей. И создается впечатление, что именно лучи и интерферируют. Но на экран падают две ВОЛНЫ, они и формируют интерференционную картину. Поэтому подобную интерференцию следует называть **двухволновой**. И

важнейшим является вопрос, каким образом формируются эти две волны из одной, вышедшей из источника света. На рисунках интерференционных схем опять же показывают ход лучей, но это делается для наглядности, как пример. Потому что – а как еще показать волны?

Существуют два способа разделения волны: метод деления волнового фронта и метод деления амплитуды.

В первом случае два участка волнового фронта проходят через разные оптические схемы, а затем вновь соединяются. Классическими примерами являются схема Юнга, а также билинза, бипризма, бизеркало.

Во втором случае волна падает на границу раздела двух сред, в результате формируются преломленная и отраженная волны, каждая со своей амплитудой. Но они идут в разных направлениях, поэтому нужна вторая граница раздела, на которой преломленная волна вновь разделится на две. Таким образом, для формирования интерференционной картины требуется тонкая пленка, имеющая две поверхности, и интерферируют, как правило, волны, отраженные от этих поверхностей.

#### *Отступление 2.*

В общем случае при наличии пленки (или пластинки) от двух границ происходят многократные отражения, формируется значительное число волн, как отраженных, так и прошедших. Но большая часть таких волн будет иметь пренебрежимо малую интенсивность.

Попробуем сделать оценки на примере стеклянной пластинки (показатель преломления  $n=1,5$ ). При нормальном падении от такой пластинки отражается 4%, а проходит 96%. Эти 96% падают на вторую границу, от которой вновь отражаются 4% (но уже от 96%), а проходят (и формируют первую прошедшую волну) 96% от 96%. Продолжая рассуждения, получим, что интенсивности первых двух отраженных волн будут примерно одинаковыми (4% и  $0,96 \cdot 0,96 \cdot 4\% \approx 3,7\%$ ), а интенсивность первой прошедшей волны будет существенно больше, чем второй прошедшей ( $0,96 \cdot 96\% \approx 92\%$  и  $0,04 \cdot 0,04 \cdot 0,96 \cdot 96\% \approx 0,15\%$ ). При таком соотношении интенсивностей интерференционная картина в прошедшем свете будет практически неразличимой.

О полосах равной толщины и равного наклона говорят, когда интерференционная картина образуется методом деления амплитуды. Поэтому в дальнейшем будем говорить только об этом методе.

Практически во всех учебниках приводится вывод формулы для расчета разности хода в плоскопараллельной пластинке (ППП). Узкий пучок света (в данном случае можно сказать, луч) падает под некоторым углом на первую поверхность ППП и испытывает отражение и преломление (рис.4.). Преломленный пучок, в свою очередь, отражается и преломляется на второй поверхности, и т.д. В результате, как в отраженном, так и в прошедшем свете формируется множество параллельных пучков. Как отмечалось выше,

реально интерференция будет наблюдаться в отраженном свете в результате наложения волн, отраженных от двух поверхностей ППП.

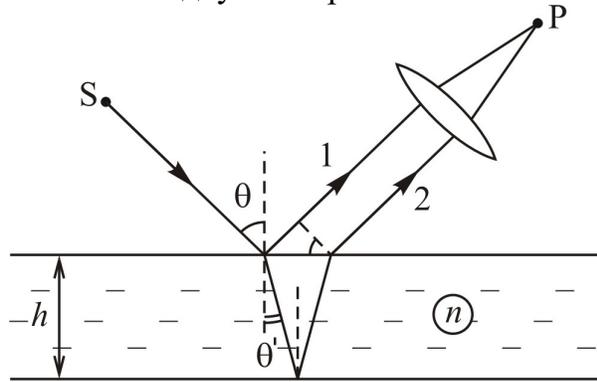


Рис. 4. К расчету разности хода в ППП

Пусть пластинка сделана из прозрачного материала с показателем преломления  $n$  и имеет толщину  $h$ , угол падения луча, вышедшего из т. S, равен  $\theta$ . Отраженные лучи с помощью собирающей линзы приходят в одну точку P фокальной плоскости.

Для оптической разности хода  $\Delta s$  лучей 1 и 2 можно получить формулу (вывод легко найти в любом учебнике):

$$\Delta s = 2hn \cos \theta' + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где  $\theta'$  - угол преломления,  $\lambda$  - длина волны излучения.

Дадим небольшое пояснение. Появление в формуле слагаемого  $\frac{\lambda}{2}$  связано с тем, что при отражении от оптически более плотной среды возникает дополнительная разность фаз, равная  $\pi$  (следует из граничных условий). Но с точки зрения интерференции такая добавка приведет только к тому, что темные полосы станут светлыми и наоборот. Поэтому в дальнейшем не будем учитывать это слагаемое и писать

$$\Delta s = 2hn \cos \theta'. \quad (2)$$

### Отступление 3.

Формулу (1) очень легко запомнить. В случае нормального падения (при  $\theta=0$ ) оптическая разность хода, очевидно, равна  $2hn$ . Далее, должна быть тригонометрическая функция (синус, косинус, тангенс и т.п.), которая при  $\theta=0$  должна быть равна единице, а это косинус. Осталось только запомнить, что берется косинус угла преломления  $\theta'$ , а не падения.

Вглядимся внимательно в (2). Разность хода зависит от трех величин:  $n$ ,  $h$  и  $\theta'$ . Показатель преломления  $n$  для выбранного материала пластинки есть константа. А вот **толщину** пластинки и угол падения (преломления) можно варьировать. А если вспомнить, что угол падения часто жаргонно называют углом **наклона**, то вот и появились **два** термина (толщина и наклон), которым мы стремимся найти объяснение.

Но: к терминам вернемся чуть позже. А пока заметим, что по формуле (2) находится разность хода между ЛУЧАМИ, а мы говорили, что интерferируют ВОЛНЫ. Поэтому сначала поговорим про различные схемы формирования интерференционной картины в отраженном свете с помощью тонкой пленки.

**Схема 1** (рис. 5А). Точечный монохроматический источник находится в фокусе первой собирающей линзы, экран установлен в фокальной плоскости второй собирающей линзы. Что будет наблюдаться на экране?

Первая линза формирует плоскую волну, падающую на ППП. После отражения от обеих поверхностей на вторую линзу падают две плоские волны, идущие в одном и том же направлении. Они соберутся (и проинтерференруют!) в ОДНОЙ точке фокальной плоскости. Будет не картина, а интерференционная точка (на самом деле, конечно, небольшое пятнышко), интенсивность которой зависит от разности хода, вычисляемой по (2).

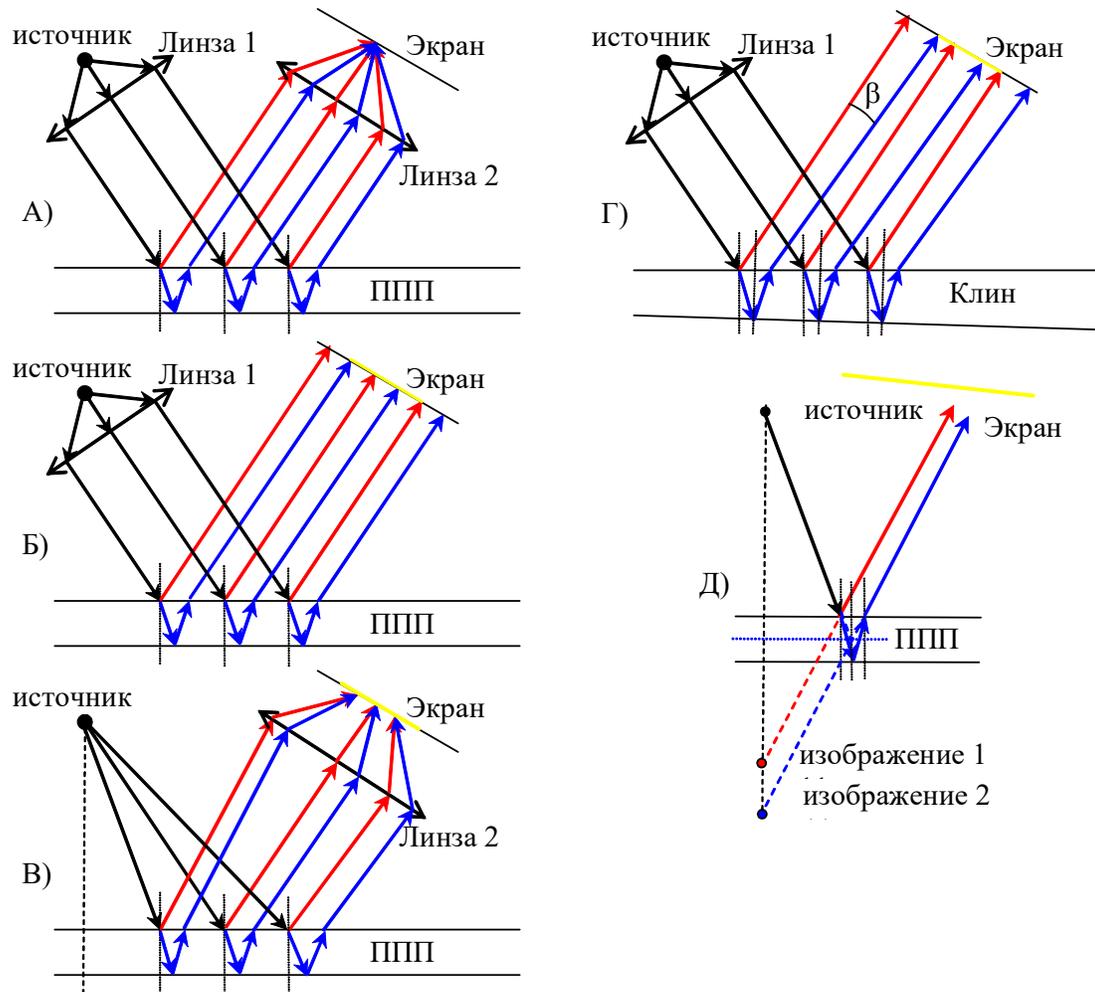


Рис. 5. Схемы интерференции в ППП и клине

**Схема 2** (рис. 5Б). Убираем вторую собирающую линзу, остальные элементы остаются на своих местах. Что будет наблюдаться на экране?

На экран будут падать две плоские волны, идущие в одном направлении. Точнее, если собирающая линза, как обычно, круглая, то два параллельных пучка круглого сечения, чуть смещенные (из-за преломления) друг от друга. В области перекрытия пучков разность хода будет одной и той же, поэтому засветка будет равномерной, интенсивность опять же зависит от разности хода, вычисляемой по (2).

**Схема 3** (рис. 5В). Возвращаем вторую собирающую линзу, но убираем первую, остальные элементы остаются на своих местах. Что будет наблюдаться на экране?

Теперь на ППП падает сферическая волна, т.е. расходящийся пучок света (углы падения  $\theta$  различные). Если разбить его на очень узкие пучки, то каждый из них разделится на два, которые затем соберутся (и проинтерферируют!) в фокальной плоскости второй линзы. Так как разность хода зависит от угла падения (а он изменяется!), то на экране возникнет интерференционная картина. Так как схема симметрична относительно поворота вокруг проведенной через источник нормали к поверхности ППП, то полосы будут иметь форму дуг concentрических окружностей.

**Схема 4** (рис. 5Г). Установлена только первая собирающая линза, но вместо ППП используется клиновидная пластина (угол между поверхностями клина мал). Что будет наблюдаться на экране?

На экран будут по-прежнему падать две отраженные плоские волны, но уже чуть в разных направлениях, при этом угол их расхождения  $\beta$  мал. На экране возникнет интерференционная картина в виде системы параллельных полос, причем расстояние  $\Delta x$  между полосами не зависит от перемещения экрана и равно  $\Delta x = \frac{\lambda}{\beta}$ .

**Схема 5** (рис. 5Д). Точечный монохроматический источник находится на некотором расстоянии от ППП. Будет ли наблюдаться интерференционная картина в отраженном свете?

В данном случае воспользуемся методикой построения изображений. Понятно, что два изображения будут находиться на нормали к поверхности, они и станут источниками отраженных волн. Они будут перекрываться во всех точках над первой поверхностью ППП. Это означает, что где бы в области интерференции ни стоял экран, на нем ВСЕГДА будет наблюдаться интерференционная картина. Опять же вследствие симметрии это будет система колец.

Во всех разобранных случаях использовался точечный монохроматический источник света. И в отраженном свете всегда формируется интерференционная картина, того или иного размера в зависимости от применяемой схемы. И наблюдаться она может при различных положениях экрана.

НО! Точечный источник света – это идеализация. Точнее, с появлением лазеров, можно считать, точечный источник стало практически легко реализовать: достаточно направить пучок от лазера на собирающую линзу. И наблюдать интерференцию в экспериментах стало достаточно просто. Приведу самый простой, на мой взгляд, пример.

**Пример.** Направим лазерный пучок на линзу от очков. На экране (листочке бумаги), размещенном рядом с лазером, в отраженном свете появятся два пятнышка, примерно одинакового размера. Это отражения лазерного пучка от поверхностей линзы. Чуть смещая линзу, можно добиться совмещения этих пятнышек. И – о чудо! Появляется интерференционная картина в виде системы концентрических колец. Как просто!

*Пара замечаний.* Линза должна без просветления на поверхностях, иначе отражения практически не будет. И оптическая сила линзы должна быть небольшой (не более 2 диоптрий, неважно плюс или минус), иначе пятнышки будут существенно разными по размеру. А размер интерференционной картины определяется минимальным пятнышком.

А как же обстояло дело до изобретения лазеров? Конечно, можно сфокусировать пучок света от какой-нибудь лампы и направить его на небольшую диафрагму, получив тем самым «точечный» источник. Но его мощность будет чрезвычайно малой, и получить интерференцию будет очень тяжело.

Поэтому необходимо разобраться, как же получить интерференционную картину (ИК) от монохроматического ПРОТЯЖЕННОГО источника. Ведь у такого источника все его точки излучают независимо друг от друга. Следовательно, волны, пришедшие от различных точек источника, не будут интерферировать. Поэтому алгоритм действий должен быть таким: найти ИК от каждой точки источника (как это делалось на рис. 5), а затем надо СЛОЖИТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ всех ИК.

Вернемся к рис. 5 и заменим точечный источник на протяженный. Такой источник невозможно поместить в фокус (или в фокальную плоскость, ведь источник, вообще говоря, не плоский) собирающей линзы. Следовательно, схемы А), Б) и Г) отпадают. В схеме Д) каждая точка протяженного источника даст интерференционную картину в виде системы концентрических колец с центром на нормали к поверхности, проведенной из данной точки. Следовательно, центры ИК для каждой точки источника будут в разных местах, и в результате на экране будет смесь ИК, в результате, скорее всего, получим практически равномерную засветку.

А теперь в схеме 5В) заменим точечный источник на протяженный (рис. 6). Выберем произвольную точку А, излучающую во всех направлениях. Нарисуем произвольный луч (узкий пучок), падающий на ППП под углом  $\theta$ . Получившиеся после разделения два пучка проинтерферируют в точке А' фокальной плоскости, разность хода определяется по формуле (2).

А теперь возьмем другую (независимо излучающую) точку В. Она также излучает во всех направлениях, в том числе и под углом  $\theta$ . Нетрудно заметить, что и в этом случае интерференция будет в той же точке А', и разность хода будет такой же, как и для точки А. Подобное построение можно выполнить для ЛЮБОЙ точки протяженного источника. И для ЛЮБОГО угла падения  $\theta$ .

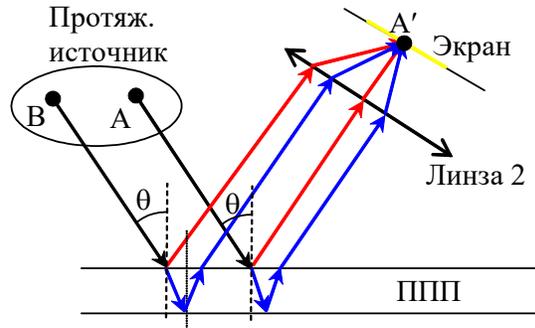


Рис. 6. Формирование полос равного наклона в случае протяженного источника

Следовательно, ИК, полученная для какой-либо одной точки источника, в точности повторится и для любой другой точки источника. В результате на экране в фокальной плоскости линзы будет наблюдаться четкая и достаточно интенсивная ИК.

А теперь подумаем, как назвать такую картину. Напомним еще раз формулу для разности хода

$$\Delta s = 2hn \cos \theta'. \quad (2)$$

На экране наблюдается система колец (или дуг окружности), каждая полоса (неважно, темная или светлая) соответствует вполне конкретной разности хода. А она в соответствии с (2) зависит ТОЛЬКО от угла падения, или от угла НАКЛОНА. Поэтому и называют такие полосы **полосами равного наклона**. Не потому, что они одинаково наклонены, а потому, что каждая из таких полос соответствует определенному углу НАКЛОНА падающих лучей.

Но наблюдаться такая картина будет ТОЛЬКО в фокальной плоскости линзы. В этом случае говорят, что ИК **локализована в бесконечности** (линза переводит бесконечность в фокальную плоскость). Вспомним, что для точечного источника ИК можно было наблюдать при самых разных положениях экрана (рис. 5Д). О такой ИК говорят, что она **не локализована**.

Полосы равного наклона можно наблюдать не только на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы, но и непосредственно глазом. Только глаз надо настроить (или, по научному, аккомодировать) на бесконечность. Или использовать зрительную трубу, наведенную на бесконечность.

Заметим, что в такой схеме наблюдения интерференции нет никаких ограничений на размер источника – он может быть произвольным.

А теперь вспомним, что в жизни мы довольно часто наблюдаем ИК без всякой зрительной трубы и без всяких настроек глаза на бесконечность. Мы

просто смотрим на поверхность мокрого асфальта, на котором видим цветные разводы от разлива топлива. Или смотрим на мыльные пузыри, которые так любят пускать маленькие дети. Наверное, не все знают, что в этих случаях также возникает ИК в отраженном свете. А отражаются волны, как и в ранее разобранных случаях, от двух поверхностей тонкой пленки. Но теперь это уже не плоскопараллельная пластинка, а просто пленка переменной толщины. А полосы – это уже полосы равной толщины.

Начинаем разбираться.

В данном случае чрезвычайно важно, что наблюдение ведется непосредственно глазами. Поэтому кратко вспомним, что глаз – это та же самая собирающая линза. Только фокусное расстояние глазной линзы (хрусталика) мы можем легко изменять, причем, практически не задумываясь, просто переводя взгляд с одного предмета на другой. При этом на сетчатке глаза, как на экране, появляется четкое изображение предмета (конечно, при нормальном зрении).

Итак, пусть наш глаз смотрит на точку В, расположенную на поверхности тонкой пленки (рис. 7а). В соответствии с законами геометрической оптики, все лучи из В, пройдя хрусталик, соберутся в одной точке С на сетчатке. При этом оптический путь всех лучей будет абсолютно одинаковым, такое свойство линзы называется таутохронизмом. Следовательно, от точки В до точки С никакой разности хода не возникает.

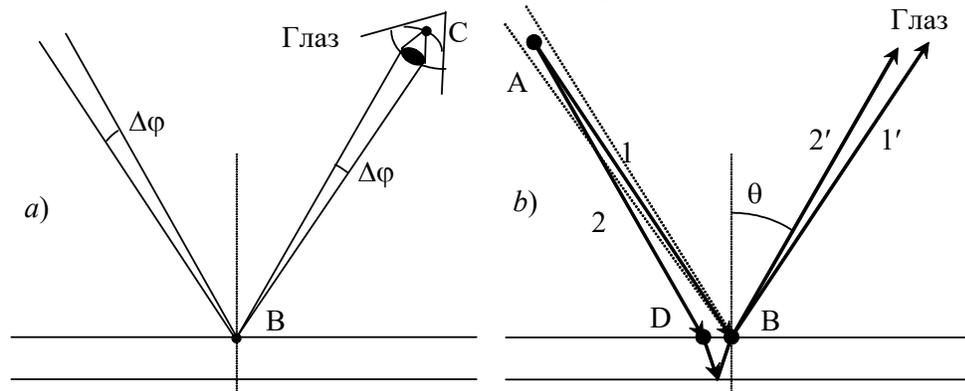


Рис. 7. Интерференция, наблюдаемая на поверхности пленки (полосы равной толщины).

Но мы же видим ИК на поверхности пленки, значит, разность хода возникает ДО точки В. В нее падают лучи со всех возможных направлений, т.е. источник света имеет практически неограниченные размеры. Но важно, чтобы при отражении от первой поверхности они попали в глаз и прошли через зрачок на сетчатку. Если диаметр зрачка обозначить  $d$ , а расстояние от В до глаза  $L$ , то угловой размер «источника», способного давать ИК, равен  $\Delta\varphi = \frac{d}{L}$ . Если  $d \approx 5\text{мм}$ , а  $L \approx 5\text{м}$ , то  $\Delta\varphi \approx 0,001$  – довольно малая величина.

Таким образом, глаз «выбирает» из окружающего пространства лишь небольшой сектор для последующей возможной интерференции.

Возьмем некоторую произвольную точку А в пределах этого угла (рис. 7b), тогда луч 1 после отражения в точке В придет в глаз путем 1'. А луч

2 придет из А в В после преломления в точке D и отражения от второй поверхности пленки. И попадет в глаз путем 2'. Но угол между 1' и 2' должен быть не больше  $\Delta\varphi$ . И такое же ограничение будет и на угол между лучами 1 и 2. Из рис. 7b нетрудно заметить, что с ростом толщины пленки будет расти и угол между лучами 1 и 2.

Еще раз напомним формулу для разности хода

$$\Delta s = 2hn \cos \theta'. \quad (2)$$

Угол  $\theta$ , под которым мы смотрим на пленку, может изменяться в малом диапазоне (и угол  $\theta'$  тоже), поэтому основной вклад в изменение разности хода вносит толщина пленки  $h$ . Нефтяная пленка имеет в разных точках разную толщину. Поэтому наблюдаемые глазом на поверхности пленки интерференционные полосы и называют **полосами равной толщины**. Еще раз подчеркнем, что каждая из полос соответствует вполне определенной толщине пленки, а не полосы имеют одну и ту же толщину (вспомним «заблуждения» в начале статьи). А наблюдаются (**локализованы**) эти полосы **на поверхности пленки!**

А какую форму будут иметь полосы равной толщины? У нефтяной пленки толщина может меняться произвольно, поэтому и картина будет состоять, как правило, из абстрактных по форме пятен различной окраски. Но толщина может изменяться и закономерно. Если взять клин с малым углом между поверхностями и осветить его монохроматическим светом, то на его **поверхности** будут наблюдаться четкие интерференционные полосы, параллельные ребру клина. Это и будут полосы **равной толщины** (клина!).

Еще один пример: кольца Ньютона (классический объект, кто не знает, всегда найдет в учебниках). Для них тонкой пленкой является воздушный промежуток между сферической поверхностью линзы и плоской поверхностью, на которой лежит линза. Полосы **равной толщины** будут иметь форму концентрических окружностей (рис. 2), радиусы которых изменяются по определенному закону. А наблюдаться они будут на сферической **поверхности** линзы.

А теперь поговорим об ограничениях на толщину пленки при наблюдении, к примеру, радужных пятен на поверхности лужи. При дневном освещении длины волн падающего излучения охватывают весь видимый глазом диапазон, от 400 до 700 нанометров, т.е. источник света немонохроматический. И в зависимости от толщины пленки условие максимума

$$\Delta s = 2hn \cos \theta' + \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (m - \text{целое число}) \quad (3)$$

может быть выполнено для нескольких длин волн (обратите внимание: здесь следует вспомнить о добавке в  $\frac{\lambda}{2}$ ).

Если оптическая разность хода (2) будет порядка длины волны, то условие максимума будет выполнено только для одной длины волны (например,  $\lambda_0$ ), и цвет пленки будет довольно насыщенным. Но не такой, как

в случае монохроматического источника с длиной волны  $\lambda_0$ . Потому что интерференция наблюдается на всех длинах волн излучения, просто интенсивность на  $\lambda_0$  будет максимально возможной, а на длинах волн, ближайших к  $\lambda_0$  – почти максимальной. Это приведет к появлению оттенков.

С ростом толщины (и разности хода) максимуму будут соответствовать уже 2-3-4 длины волны из видимого диапазона, и окраска будет становиться все более бледной, практически неотличимой от белого света. Поэтому можно утверждать, что насыщенная интерференционная окраска пленки наблюдается при толщинах порядка длины волны видимого диапазона, т.е. около 1 микрометра.

Отметим также, что цветовая окраска будет меняться с изменением угла наблюдения  $\theta$ . Это можно заметить, если смотреть на нефтяные интерференционные разводы под разными углами.

Если же освещать лужу в узком спектральном диапазоне, то возможная толщина пленки увеличится. Но не забудем о другом факторе. С увеличением толщины пленки и угол между отраженными интерферирующими лучами будет также расти (рис 7b). А они должны попасть в глаз, у которого малый угловой размер! Поэтому наблюдение лучше вести нормально к пленке, т.е. при  $\theta \approx 0$ .

**В заключении попробуем сформулировать, что же такое полосы равной толщины и полосы равного наклона. Начало определения должно быть одинаковым: это интерференционные полосы, наблюдаемые при отражении исходной волны от двух поверхностей тонкой пленки. Полосы равной толщины наблюдаются (локализованы) на поверхности пленки, и каждая из них соответствует одной и той же толщине пленки. Полосы равного наклона наблюдаются (локализованы) на бесконечности, и каждая из них соответствует одному и тому же углу наклона падающих на пленку лучей.**

PS. Термины «полосы равной толщины» и «полосы равного наклона» появились очень давно, еще в «долазерную» эпоху, и позволяли объяснять появление ИК с протяженными источниками. С изобретением лазеров получение ИК стало довольно простым делом, вспомним пример с линзой от очков. Эти картины наблюдаются обычно при самых разных положениях экрана, т.е. **не локализованы**. Но по привычке их по-прежнему часто называют полосами равного наклона или равной толщины. По мнению автора, это не совсем корректно. Но – это можно обсуждать.

PPS. Пара симпатичных фотографий (рис. 8), полученных с использованием жидкого мыла и микрообъектива. Теперь Вы, как специалисты, точно знаете, что это полосы ... (какие?). Кстати, на втором фото в нижней части толщина пленки монотонно растет, и видите, как изменяется окраска?

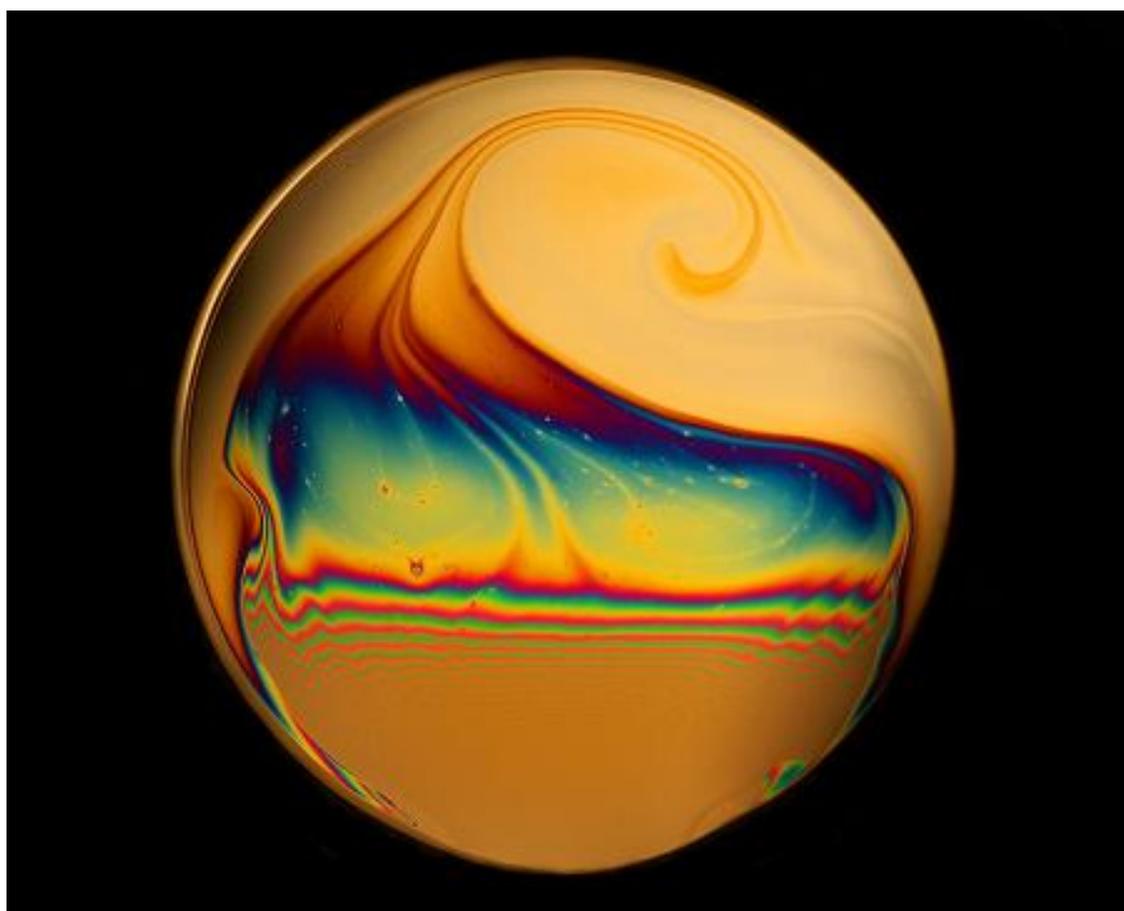


Рис. 8. Интерференционные картины