

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Институт оптики и оптических технологий

Кафедра наносистем и оплотехники

КУРС ЛЕКЦИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Новосибирск
СГГА

ТЕМА 1. ВВЕДЕНИЕ

Физическая оптика — раздел оптики, изучающий оптические явления, выходящие за рамки приближения геометрической оптики. К таким явлениям относятся дифракция, интерференция света, поляризационные эффекты, а также эффекты, связанные с распространением электромагнитных волн в нелинейных и анизотропных средах.

Физической оптикой в узком смысле также иногда называют приближённое описание процесса распространения оптических волн, основанное на применении теории возмущений к геометрическому приближению. В квантовой механике аналогом такого приближения является Борновское приближение.

Физическая оптика

Первые представления о том, что такое свет, относятся к древности. Подавляющее большинство древних мыслителей рассматривало свет как некие лучи, соединяющие светящееся тело и человеческий глаз. При этом одни из них полагали, что лучи исходят из глаз человека, они как бы ощупывают рассматриваемый предмет. Однако позже, к началу XVII века, такое представление о природе света теряет свое значение.

Наслаждаясь видом безоблачного неба, мы вряд ли склонны рассуждать о том, что небесная синева - это одно из проявлений рассеяния света. Оказывается, синие лучи, падающие на Землю от Солнца, рассеиваются молекулами воздуха примерно в 6 раз сильнее красных, поэтому небо выглядит голубым, а солнце тем краснее, чем оно ближе к горизонту. Подобным образом объяснил голубой цвет неба в 1871 году знаменитый английский математик и физик Джон Уильям Страт (по отцу - лорд Рэлей). С тех пор рассеяние света на отдельных атомах или молекулах и вообще на маленьких частицах - с размерами, намного меньшими длины световой волны, называют рэлеевским рассеянием.

Другая точка зрения заключалась в том, что лучи испускаются светящимся телом и, достигая человеческого глаза, несут на себе отпечаток светящегося предмета. Такой точки зрения придерживались атомисты Демокрит, Эпикур, Лукреций. Позже, в XVII веке, эта точка зрения оформилась в корпускулярную теорию света, согласно которой свет является потоком неких частиц, испускаемых светящимся телом.

Третья точка зрения на природу света была высказана Аристотелем. Он рассматривал свет как распространяющееся в пространстве действие или движение. В дальнейшем его взгляды на природу света положили начало волновой теории света. Необходимо отметить, что огромную роль в развитии оптики сыграло определение скорости света. Впервые скорость света была определена датским астрономом Олафом Ремером (1644—1710) в 70-х годах XVII века. Проведя наблюдения над затмением спутников Юпитера и

измерив время их затмения, он смог из полученных данных подсчитать скорость распространения света. По его подсчетам, скорость света получилась равной 300870 км/с.

В XVII веке происходит окончательное формирование двух противоположных теорий света: корпускулярной и волновой.

С точки зрения корпускулярной теории хорошо объяснялось прямолинейное распространение света и закон отражения света. Кроме того, закон преломления также не противоречил этой теории. Не было противоречий и с общими представлениями о строении вещества. Но, несмотря на преобладание взглядов о корпускулярной природе света, начинают развиваться и представления о его волновой природе.

Родоначальником волновой теории света является Декарт. Согласно его взглядам, свет - это нечто вроде давления, передающегося через тонкую среду от светящегося тела во все стороны. Если тело нагрето и светится, то это значит, что его частицы находятся в движении и оказывают давление на частицы той среды, которая заполняет все пространство (эфир). Давление распространяется во все стороны и, доходя до глаза, вызывает в нем ощущение света. Однако необходимо отметить то, что взгляды Декарта носили чисто умозрительный характер.

Первое открытие, свидетельствующее о волновой природе света, было сделано итальянским ученым Франческо Гримальди (1618—1663), который заметил, что если на пути узкого пучка световых лучей поставить предмет, то на экране, поставленном сзади, не получается резкой тени. Края тени размыты, кроме того, вдоль тени появляются цветные полосы. Открытое им явление ученый назвал дифракцией. Гримальди объяснял это явление тем, что свет — это флюид (тонкая неощутимая жидкость) и при встрече с препятствием возникают волны этого флюида.

Дифракцией света называется явление огибания световыми волнами малых препятствий, встречающихся на пути их распространения. Например, при прохождении света через малое круглое отверстие на экране вокруг центрального светлого пятна наблюдаются чередующиеся темные и светлые кольца. Чем меньше размеры экрана или отверстия, тем сильнее дифракция света.

Вторым важным открытием, относящимся к физической оптике, было открытие интерференции света. Важная роль в исследовании интерференции принадлежит английскому физическому Роберту Гуку (1635-1703). Гук считал, что свет - это колебательные движения, распространяющиеся в эфире. Он даже высказывал предположение, что эти колебания являются поперечными. При изучении цвета мыльных пленок и тонких пластинок из слюды он обнаружил, что эти цвета зависят от толщины мыльной пленки или слюдяной пластинки. Явление интерференции света в тонких пленках Гук объяснял тем, что от верхней и нижней поверхности тонкой (например, мыльной) пленки происходит отражение световых волн, которые, попадая в глаз, производят ощущение различных цветов.

Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой пленки, частично проходят в нее. На второй границе пленки вновь происходит частичное отражение волн. Световые волны, отраженные двумя поверхностями тонкой пленки, распространяются в одном направлении, но проходят разные пути. При разности хода Δl , кратной целому числу длин волн λ :

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный максимум. При разности Δl , кратной нечетному числу полуволен:

$$\Delta l = (2k+1) \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный минимум. Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная пленка кажется окрашенной. При изменении толщины пленки или угла падения световых волн разность хода изменяется и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны.

Дифракция света используется в так называемой дифракционной решетке, представляющей собой прозрачную пластинку с нанесенной на нее системой параллельных непрозрачных полос, расположенных на одинаковых расстояниях d друг от друга.

При падении на решетку монохроматической волны с плоским волновым фронтом в результате дифракции из каждой щели свет будет распространяться не только в первоначальном направлении, но и по всем другим направлениям.

Если за решеткой поставить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости параллельные лучи от всех щелей соберутся в одну полосу. Параллельные лучи, идущие от краев двух соседних щелей, имеют разность хода:

$$\Delta l = d \sin \varphi,$$

где d — расстояние между соответствующими краями соседних щелей, называемое **периодом решетки**, φ — угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решетки. При равенстве разности хода Δl целому числу длин волн:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где λ - длина волны падающего света, наблюдается интерференционный максимум света. Линза не вносит разности хода. Таким образом, условие интерференционного максимума для каждой длины световой волны выполняется при своем значении угла дифракции φ . В результате при прохождении через дифракционную решетку пучок белого света разлагается в спектр.

Третье важное открытие, относящееся к волновой оптике, было сделано в 1669 году датским ученым Бартолином. Он открыл явление двойного лучепреломления в кристалле исландского шпата. Бартолин обнаружил, что если смотреть на какой-либо предмет через кристалл исландского шпата, то видно не одно, а два изображения, смещенные друг относительно друга. Это явление затем исследовал Гюйгенс и попытался дать ему объяснение с точки зрения волновой теории света.

Гюйгенс полагал, что все мировое пространство заполнено тонкой неощутимой средой - эфиром, который состоит из очень маленьких упругих шариков. Эфир заполняет также пространство между атомами, образующими обычные тела. По его мнению, распространение света - это процесс передачи движения от шарика к шарика. Для того чтобы показать способность волновой теории объяснить прямолинейное распространение света, Гюйгенс выдвигает свой, уже известный нам, принцип. Основываясь на этом принципе, он дал объяснения закону прямолинейного распространения света, законам отражения и преломления. Но, как известно, принцип Гюйгенса не мог объяснить явления дифракции и интерференции. Кроме того, теория Гюйгенса была теорией бесцветного света.

Первым, кто смог разобраться в явлении разложения белого света призмой в спектр, был Исаак Ньютон. В 60-е годы XVII века он открыл явление дисперсии света и простых цветов. Изучая явление разложения белого света в спектр, Ньютон пришел к заключению, что белый свет является сложным светом. Он представляет собой сумму простых цветных лучей. Для того чтобы подтвердить вывод о том, что белый свет состоит из простых цветных лучей и разлагается на них при прохождении через призму, Ньютон провел следующий опыт.

В экране, на котором наблюдался спектр, делалось также малое отверстие. Через отверстие пропускали уже не белый свет, а монохроматический пучок света, т.е. свет, имеющий определенную окраску. На пути этого пучка Ньютон ставил новую призму, а за ней новый экран. Этот пучок света отклонялся призмой как одно целое, под определенным углом. При этом свет не изменял своей окраски. Поворачивая первую призму, Ньютон пропускал через отверстие экрана цветные лучи различных участков спектра. Во всех случаях они не разлагались второй призмой, а лишь отклонялись на определенный угол, разный для лучей различного цвета.

После этого Ньютон пришел к заключению, что белый свет разлагается на цветные лучи, которые являются простыми и призмой не разлагаются. Для каждого цвета показатель преломления имеет свое определенное значение. Открытие дисперсии подтверждало, по мнению Ньютона, корпускулярную теорию света.

Дисперсией света называется явление зависимости скорости света от длины волны или частоты. При прохождении через призму белого света на экране, установленном за призмой, наблюдается радужная полоса, состоящая из семи монохроматических составляющих и их полутонов. Эта полоса называется дисперсионным спектром. Этот спектр условно делится на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Смена цвета происходит непрерывно, причем смесь всех семи цветов дает белый цвет. Если из полного спектра исключить один из цветов, то комбинация оставшихся цветов дает цвета, которые называются дополнительными.

Объясняется разложение белого света тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны и показатель преломления света зависит от его длины волны. Наибольшее значение он имеет для света с самой короткой длиной волны - фиолетового света. Наименьшим показателем преломления обладает самый длинноволновый свет - красный. Абсолютный показатель преломления света определяется отношением скорости света C в вакууме к скорости света V в среде:

$$n = \frac{C}{V}.$$

Исследования показали, что в вакууме скорость света одинакова для света с любой длиной волны. Таким образом, разложение света в стеклянной призме обусловлено зависимостью скорости распространения света в среде от длины световой волны.

Для того чтобы запомнить чередование цветов в спектре, обычно предлагают запомнить следующую фразу: «Каждый Охотник Желает Знать Где Скрывается Фазан», где заглавные буквы каждого слова являются первыми буквами в названии соответствующего цвета — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Корпускулярная теория, как уже указывалось, не в состоянии была объяснить явление интерференции и дифракции света. Тогда Ньютон сам занялся исследованием интерференции. Он взял линзу, положил ее на стеклянную пластинку и пронаблюдал темные и светлые кольца, которые видны при освещении линзы и пластинки монохроматическим светом. Это были так называемые кольца Ньютона.

В конце XVIII века английский ученый Томас Юнг (1773—1829) пришел к выводу, что кольца Ньютона можно объяснить с точки зрения волновой теории света, опираясь на принцип интерференции. Именно он впервые и ввел

название «интерференция» (от латинских слов «inter» — «взаимно» и «ferio» — «ударяю»).

По мнению Юнга, кольца Ньютона в отраженном свете возникают в результате интерференции двух лучей света, отраженных от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, образованной линзой и стеклянной пластинкой. От толщины этой прослойки будет зависеть разность хода между указанными лучами. В частности, они могут усиливать или гасить друг друга. В первом случае мы видим светлое кольцо, во втором - темное. Если свет, освещающий установку, белый, то будут наблюдаться цветные кольца. По расположению колец для разных цветов можно подсчитать длину волны соответствующих цветных лучей. Юнг проделал этот расчет и определил длину волны для разных участков спектра.

Существенное влияние на развитие волновой теории оказал французский инженер Огюстен Френель (1788—1827). Он дал объяснение прямолинейному распространению света, показав, что лучи, поляризованные перпендикулярно друг к другу, не интерферируются. В опытах по дифракции света он установил, что дифракционные полосы появляются вследствие интерференции лучей. Принцип интерференции позволил Френелю законы отражения и преломления объяснить взаимным погашением световых колебаний во всех направлениях, за исключением тех, которые удовлетворяют закону отражения. Ему удалось экспериментально доказать, что световые лучи могут воздействовать друг на друга, ослабляться и даже почти полностью погашаться в случаях согласных колебаний, что и позволило ему дать объяснение явлению дифракции. Основное внимание Френель уделял опытам по дифракции света, для которой разработал специальную теорию. Эта теория основывалась на усовершенствованном принципе Гюйгенса, который мы уже рассматривали выше как принцип Гюйгенса - Френеля. Используя этот принцип, Френель исследовал разные случаи дифракции и рассчитал расположение полос для этих случаев.

В XVII веке большое внимание уделялось исследованию явления двойного лучепреломления. Датский физик Бартолин наблюдал, что когда на кристалл исландского шпата падает луч света, то он при преломлении раздваивается. Если смотреть на точечный источник света через этот кристалл, то можно увидеть не один, а два таких источника. Это явление зависит от ориентации кристалла относительно луча. В кристалле есть направление, по которому раздваивание луча не происходит. Это направление называется **оптической осью кристалла**.

Исследуя явление двойного лучепреломления в начале XIX века, французский инженер Малюс обнаружил, что если смотреть через кристалл исландского шпата на изображение солнца в стекле, то при одних положениях этого кристалла видно два солнца, а при определенном положении стекла и кристалла одно из изображений пропадает, даже если световые лучи направлены не вдоль оптической оси. Так было открыто явление поляризации света.

Интенсивность светового пучка, проходящего через некоторые прозрачные кристаллы, зависит от взаимной ориентации двух кристаллов. При одинаковой ориентации кристаллов свет проходит через второй кристалл без ослабления. Если же второй кристалл повернут на 90° от первоначального положения, то свет через него не проходит. При прохождении через первый кристалл происходит поляризация света, т.е. кристалл пропускает только такие волны, в которых колебания вектора E напряженности электрического поля совершаются в одной плоскости. Эта плоскость называется **плоскостью поляризации**. Если плоскость, в которой пропускаются колебания вторым кристаллом, совпадает с плоскостью поляризации, поляризованный свет проходит через второй кристалл без ослабления. При повороте кристалла на 90° поляризованный свет не проходит через кристалл.

Анализируя явления поляризации и двойного лучепреломления, Юнг и Френель сделали вывод о поперечности световых волн. С помощью этой гипотезы Френель исследовал указанные явления и разработал теорию прохождения поперечных волн через двоякопреломляющее тело. Новые исследования интерференции и дифракции света, в частности изобретение дифракционной решетки, все больше и больше подтверждали волновую теорию света. К 40-м годам XIX века эта теория стала общепризнанной.

Одним из наиболее трудных для волновой теории света был вопрос о том, что же колеблется при распространении световых волн, в какой среде они распространяются.

На вопрос о природе света и механизме его распространения давала ответ гипотеза Максвелла. На основании совпадения экспериментально измеренного значения скорости света в вакууме со значением скорости распространения электромагнитных волн Максвелл высказал предположение, что свет - это электромагнитные волны. Его гипотеза подтверждается многими экспериментальными фактами. Представлениям электромагнитной теории света полностью соответствуют экспериментально открытые законы отражения и преломления света, явления интерференции, дифракции и поляризация света.

Однако электромагнитная теория света не в состоянии объяснить законы фотоэффекта, явления взаимодействия света с веществом, в которых проявляются корпускулярные свойства света.

Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом называется явление испускания электронов веществом под действием света, открытое в 1887 году Генрихом Герцем. Фотоэффект подчиняется ряду закономерностей:

- энергия освобожденных электронов, называемых фотоэлектронами, абсолютно не зависит от интенсивности света;
- повышение интенсивности приводит к увеличению числа фотоэлектронов, но не их скорости;
- число фотоэлектронов пропорционально интенсивности света;
- скорость электронов зависит только от частоты падающего света: с увеличением частоты энергия фотоэлектронов возрастает линейно.

Все тела, кроме теплового излучения, в результате различных внешних воздействий дают избыточное излучение, которое не определяется температурой тела. **Люминесценцией** называют все виды свечений, возбуждаемых за счет любого внешнего источника энергии. Длительность люминесценции после прекращения внешнего воздействия значительно превышает период световых колебаний, что позволяет отличать ее от отражения и рассеяния света и пр.

Люминесценция обусловлена колебаниями небольшого количества атомов или молекул вещества, которые под действием источника энергии переходят в возбужденное состояние. Излучение возникает в результате переходов атомов или молекул из этих состояний в невозбужденное или менее возбужденное состояние, в результате чего высвобождается определенная энергия. Кратковременная люминесценция называется флюоресценцией.

Благодаря развитию волновой оптики человек открыл явление голографии. Физическая идея голографии состоит в том, что при наложении двух световых пучков, при определенных условиях, может возникать интерференционная картина, то есть в пространстве возникают максимумы и минимумы интенсивности света. Для того чтобы эта интерференционная картина была устойчивой какое-то время и ее можно было записать, эти два пучка должны обладать определенными свойствами - они должны быть взаимно когерентными (т.е. у них должна быть одна и та же длина волны) и, кроме этого, за время регистрации должна быть одна фаза колебаний, то есть колебания светового поля должны быть синхронными. Практически это достигается тем, что два пучка образуются делением пучка одного источника излучения, излучающего строго одну длину волны (лазер со специальными параметрами излучения). Так как длина волны света достаточно мала, то расстояние между интерференционными максимумами и минимумами тоже мало - порядка 1 мкм, поэтому для регистрации применяются специальные мелкозернистые фотоэмульсии.

Термин «голография» (Holography) образован сочетанием слов «полный, весь» и «рисовать, записывать», так что несколько свободный перевод термина может звучать как «наиболее полная запись образа объекта». В наиболее общем виде идея голографии может быть сформулирована так - если каким-то способом точно зафиксировать структуру светового поля, исходящего от объекта, записать ее на какой-либо носитель, а затем восстановить это поле с достаточной точностью, то наблюдатель не сможет различить, наблюдает ли он сам объект или же его имитацию. В более узком смысле термин «голография» обозначает технологию (точнее, пакет технологий, объединенных общей идеей) такой «полной» записи волнового поля.

Лазерный луч расщепляется на два пучка, расширяется оптикой, чтобы осветить весь объект целиком. Один пучок, называемый «объектным», направляется на объект, освещая его так, чтобы отраженное от него излучение попадало на фотопластинку. Вторым пучком, который называют «опорным», направляется прямо на фотопластинку. Эти два пучка будут интерферировать

на поверхности фотопластинки, и при рассмотрении под микроскопом поверхность пластинки будет покрыта множеством интерференционных линий, колец. Это и есть запись структуры волнового поля, отраженного объектом.

Полученная голограмма носит название пропускающей голограммы. Если теперь эту голограмму осветить пучком лазерного света (на просвет, отсюда и название - пропускающая), то можно будет увидеть восстановленное изображение, расположенное точно в том месте, где ранее, при съемке, находился объект. Происходит это в результате того, что лазерный свет, проходя через фотопластинку с записанной ранее структурой светового поля, приобретает все свойства светового потока, который ранее, при записи, отражался объектом.

ТЕМА 2. ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Физическая оптика в виде техники обычно применяется в цифровой форме на компьютере, а также может объяснять: Дифракцию, Дисперсию, Интерференцию, Эффекты поляризации, Абберацию, Поляризацию, Электромагнитную волну, природу преломления X-лучей, а также природу других сложных эффектов.

Дисперсия света (разложение света) — это явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины волны света (частотная дисперсия), а также, от координаты (пространственная дисперсия), или, что то же самое, зависимость фазовой скорости света в веществе от длины волны (или частоты). Экспериментально открыта Ньютоном около 1672 года, хотя теоретически достаточно хорошо объяснена значительно позднее.

Один из самых наглядных примеров дисперсии — разложение белого света при прохождении его через призму (опыт Ньютона). Сущностью явления дисперсии является неодинаковая скорость распространения лучей света с различной длиной волны в прозрачном веществе — оптической среде (тогда как в вакууме скорость света всегда одинакова, независимо от длины волны и следовательно цвета). Обычно чем больше частота волны, тем больше показатель преломления среды и меньше ее скорость света в ней: у красного цвета максимальная скорость в среде и минимальная степень преломления, у фиолетового цвета минимальная скорость света в среде и максимальная степень преломления.

Однако в некоторых веществах (например в парах иода) наблюдается эффект аномальной дисперсии, при котором синие лучи преломляются меньше, чем красные, а другие лучи поглощаются веществом и от наблюдения ускользают. Говоря строже, аномальная дисперсия широко распространена, например, она наблюдается практически у всех газов на частотах вблизи линий поглощения, однако у паров иода она достаточно удобна для наблюдения в оптическом диапазоне, где они очень сильно поглощают свет.

Дисперсия света позволила впервые вполне убедительно показать составную природу белого света.

Белый свет разлагается на спектр и в результате прохождения через дифракционную решётку или отражения от нее (это не связано с явлением дисперсии, а объясняется природой дифракции). Дифракционный и призматический спектры несколько отличаются: призматический спектр сжат в красной части и растянут в фиолетовой и располагается в порядке убывания длины волны: от красного к фиолетовому; нормальный (дифракционный) спектр — равномерный во всех областях и располагается в порядке возрастания длин волн: от фиолетового к красному.

По аналогии с дисперсией света, так же дисперсией называются и сходные явления зависимости распространения волн любой другой природы от длины волны (или частоты). По этой причине, например, термин закон дисперсии, применяемый как название количественного соотношения,

связывающего частоту и волновое число, применяется не только к электромагнитной волне, но к любому волновому процессу.

Дисперсией объясняется факт появления радуги после дождя (точнее тот факт, что радуга разноцветная, а не белая).

Дисперсия является причиной хроматической аберрации — одного из тщательно устраняемых недостатков (аббераций) оптических систем, в том числе фотографических и видео-объективов.

Коши пришел к формуле, выражающей зависимость показателя преломления от длины волны:

$$n = a + b/L^2 + c/L^4 + \dots,$$

где:

L — длина волны в вакууме;

a, b, c, \dots — постоянные, значения которых для каждого вещества должны быть определены в опыте. В большинстве случаев можно ограничиться двумя первыми членами формулы Коши.

Дисперсия света в искусстве



Из-за дисперсии можно наблюдать разные цвета света.

Радуга, чьи цвета обусловлены дисперсией, — один из ключевых образов культуры и искусства.

Благодаря дисперсии света, можно наблюдать цветную «игру света» на гранях бриллианта и других драгоценных камней.

СКОРОСТЬ СВЕТА

В геометрической оптике исследуется только направление световых лучей. Вопрос о том, как протекает процесс распространения света во времени, выходит за рамки геометрической оптики. Более глубоко свойства света и его взаимодействие с веществом рассматриваются, в физической (волновой) оптике. Мы начнем эту главу с рассказа о том, как была измерена скорость света.

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Делались многочисленные попытки определить скорость

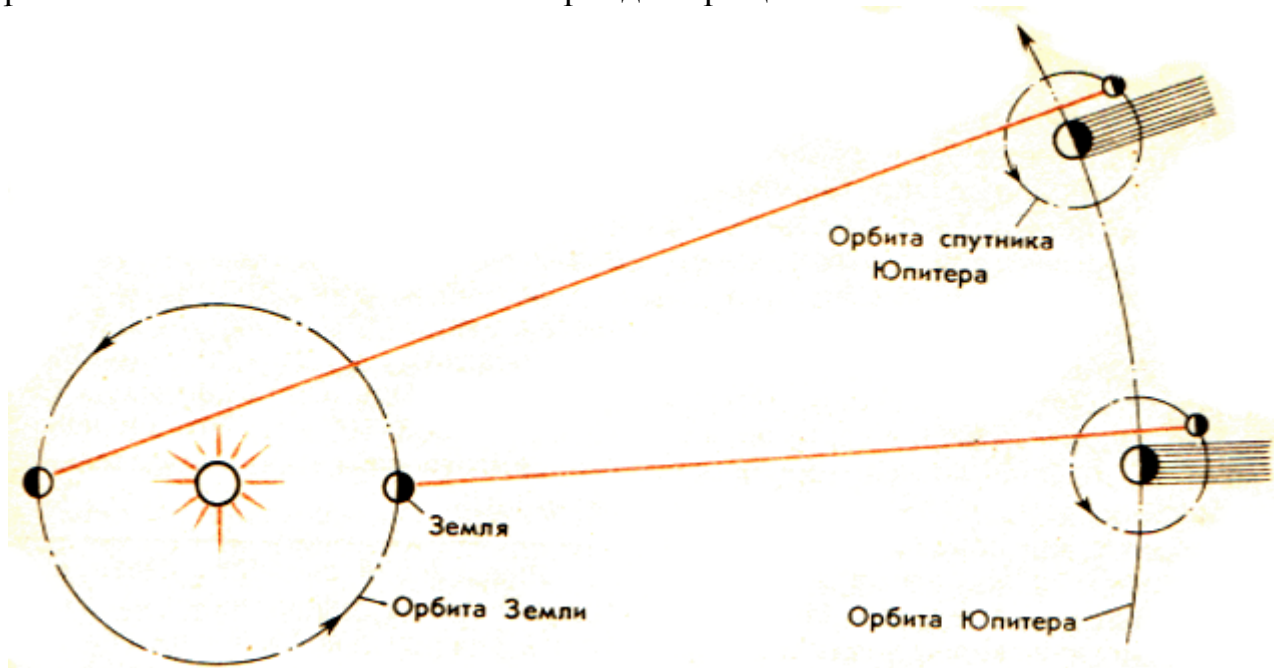
света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результатов. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была в конце концов измерена.

Астрономический метод измерения скорости света

Скорость света впервые удалось измерить датскому ученому О. Рёмеру в 1676 г. Рёмер был астрономом, и его успех объясняется именно тем, что проходимые светом расстояния, которые он использовал для измерений, были очень велики. Это расстояния между планетами Солнечной системы.

Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера — самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер в отличие от Земли имеет четырнадцать спутников. Ближайший его спутник — Ио — стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, а затем погружался в ее тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, через равные промежутки времени посылавшие свои сигналы на Землю.

Вначале измерения производились в то время, когда Земля при своем движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 1). Такие же измерения, проведенные несколько месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать на основании знания периода обращения Ио.



Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время, наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит от того, что свет употребляет 22 мин на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная запаздывание появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость, разделив это расстояние на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 300.000 км/с. Поэтому-то крайне трудно уловить время распространения света между двумя удаленными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

ТЕМА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА

Впервые скорость света лабораторным методом удалось измерить французскому физику И. Физо в 1849 г.

В опыте Физо свет от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку 1 (рис.2). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала 2, находившегося на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чем же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым.

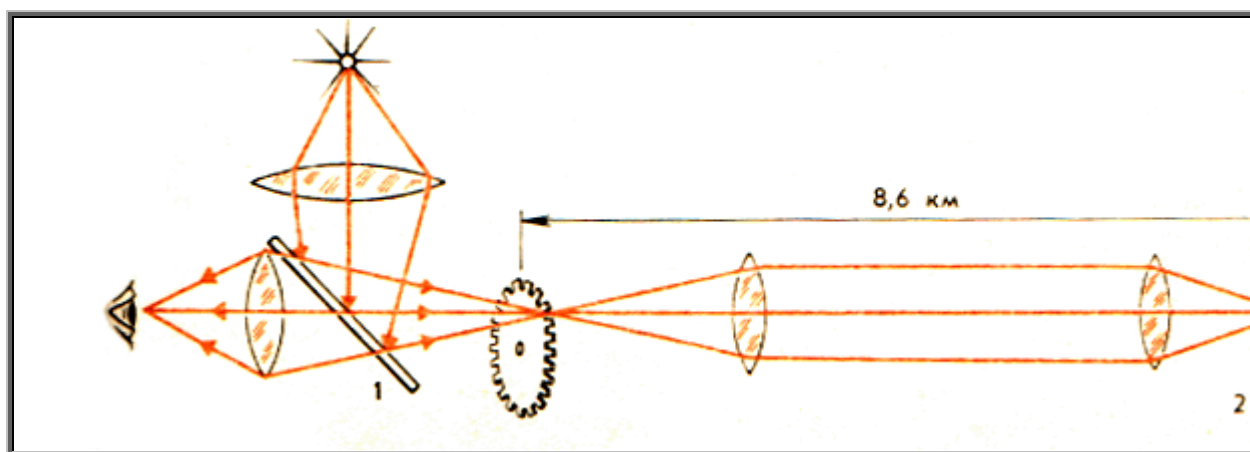


Рис. 2

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время распространения света до зеркала и обратно колесо успело повернуться настолько, что на место прежней прорези встала уже новая прорезь. Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо расстояние равнялось 8,6 км и для скорости света было получено значение 313.000 км/с.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости света с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных веществах. Скорость света в воде была измерена в 1856 г. Она оказалась в $\frac{4}{3}$ раза меньше, чем в вакууме. Во всех других веществах она также меньше, чем в вакууме.

Но современным данным, скорость света в вакууме равна 299.792.458 м/с с точностью $\pm 1,2$ м/с. Приблизительно скорость света можно считать равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Это значение скорости света нужно обязательно запомнить.

ТЕМА 4. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Законы отражения и преломления света можно вывести из одного общего принципа, описывающего поведение волн. Этот принцип впервые был выдвинут современником Ньютона Христианом Гюйгенсом.

Гюйгенс Христиан (1629-1695) — голландский физик и математик, создатель первой волновой теории света. Основы этой теории Гюйгенс изложил в «Трактате о свете» (1690). Гюйгенс впервые использовал маятник для достижения регулярного хода часов и вывел формулу для периода колебаний математического и физического маятников. Математические работы Гюйгенса касались исследования конических сечений, циклоиды и других кривых. Ему принадлежит одна из первых работ по теории вероятности. С помощью усовершенствованной им астрономической трубы Гюйгенс открыл спутник Сатурна Титан.



Принцип Гюйгенса

Согласно принципу Гюйгенса **каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн**. Для того чтобы, зная положение волновой поверхности в момент времени t , найти ее положение в следующий момент времени $t+\Delta t$, нужно каждую точку волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис.3). Этот принцип в равной мере пригоден для описания распространения волн любой природы: механических, световых и т. д. Гюйгенс сформулировал его первоначально именно для световых волн.

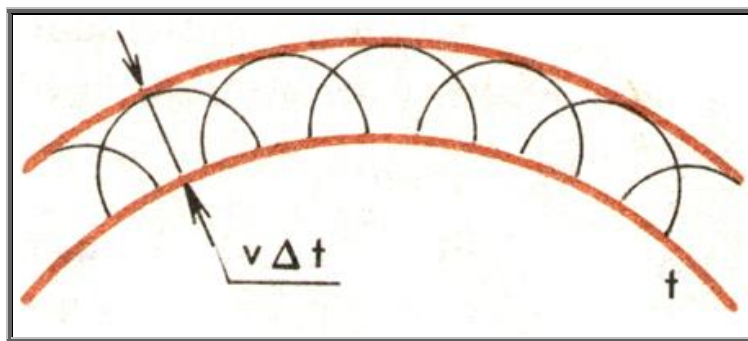


Рис. 3

Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.

Закон отражения

С помощью принципа Гюйгенса можно вывести закон, которому подчиняются волны при отражении от границы раздела сред.

Рассмотрим отражение плоской волны. Волна называется **плоской**, если поверхности равной фазы (волновые поверхности) представляют собой плоскости. На рисунке 4 MN - отражающая поверхность, прямые A_1A и B_1B — два луча падающей плоской волны (они параллельны друг другу). Плоскость AC — волновая поверхность этой волны.

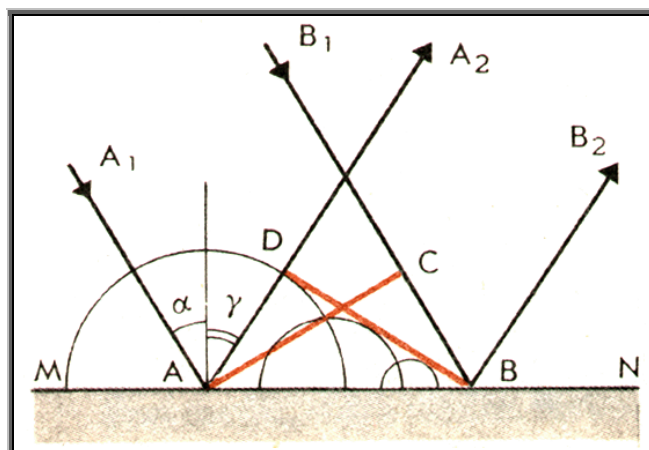


Рис. 4

Угол α между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности и точке падения называют **углом падения**.

Волновую поверхность отраженной волны можно получить, если провести огибающую вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела сред. Различные участки волновой поверхности AC достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке A начнется раньше, чем в точке B , на время

$$\Delta t = \frac{CB}{v}$$

где v — скорость волны).

В момент, когда волна достигнет точки B и в этой точке начнется возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A уже будет представлять собой полусферу радиусом $r=AD=v\Delta t=CB$. Радиусы вторичных волн от источников, расположенных между точками A и B , меняются так, как показано на рисунке 4. Огибающей вторичных волн является плоскость DH , касательная к сферическим поверхностям. Она представляет собой волновую поверхность отраженной волны. Отраженные лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны волновой поверхности DH . Угол β между перпендикуляром к отражающей поверхности и отраженным лучом называют **углом отражения**.

Так как $AD=CB$ и треугольники ADB и ACB прямоугольные, то $\angle DBA = \angle CAB$. Но $\beta = \angle CAB$ и $\alpha = \angle DBA$ как углы с перпендикулярными сторонами. Следовательно, **угол отражения равен углу падения**.

Кроме того, как вытекает из построения Гюйгенса, **падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.** Эти два утверждения представляют собой **закон отражения света.**

Если обратить направление распространения световых лучей, то отраженный луч станет падающим, а падающий — отраженным. Обратимость хода световых лучей — их важное свойство.

Сформулирован общий принцип распространения волн любой природы принцип Гюйгенса. Этот принцип позволяет с помощью простых геометрических построений находить волновую поверхность в любой момент времени по известной волновой поверхности в предшествующий момент. Из принципа Гюйгенса выведен закон отражения волн.

Закон преломления света

Напомним, в чем состоит явление преломления света. Выведем закон преломления с помощью принципа Гюйгенса.

Наблюдение преломления света

На границе двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, т.е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, также меняя при этом, как правило, направление распространения. Это явление называется **преломлением света.**

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого не прозрачного стакана монету или другой небольшой предмет. Подвинем стакан так, чтобы центр монеты, край стакана и глаз находились на одной прямой. Не меняя положения головы, будем наливать в стакан воду. По мере повышения уровня воды дно стакана с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь будет видна полностью. Установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если посмотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону (рис. 5).

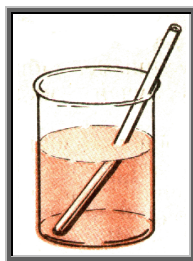


Рис. 5

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред — преломлением света.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча AB (рис. 6), преломленного DB и перпендикуляра CE к поверхности

раздела сред, восстановленного в точке падения. Угол α называется **углом падения**, а угол β — **углом преломления**.

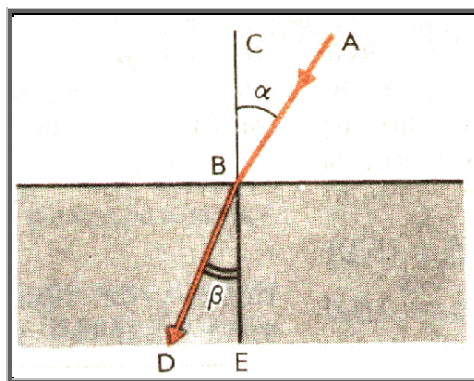


Рис. 6

Падающий, отраженный и преломленный лучи нетрудно наблюдать, сделав узкий световой пучок видимым. Ход такого пучка в воздухе можно проследить, если пустить в воздух немного дыма или же поставить экран под небольшим углом к лучу. Преломленный пучок также виден в подкрашенной флюоресцеином воде аквариума (рис. 7).

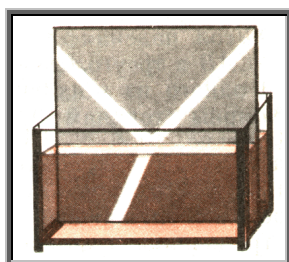


Рис. 7

Вывод закона преломления света

Закон преломления света был установлен опытным путем в XVII веке. Мы его выведем с помощью принципа Гюйгенса.

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в скоростях распространения света в той и другой среде. Обозначим скорость волны в первой среде через v_1 , а во второй — через v_2 .

Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, из воздуха в воду) падает плоская световая волна (рис. 8).

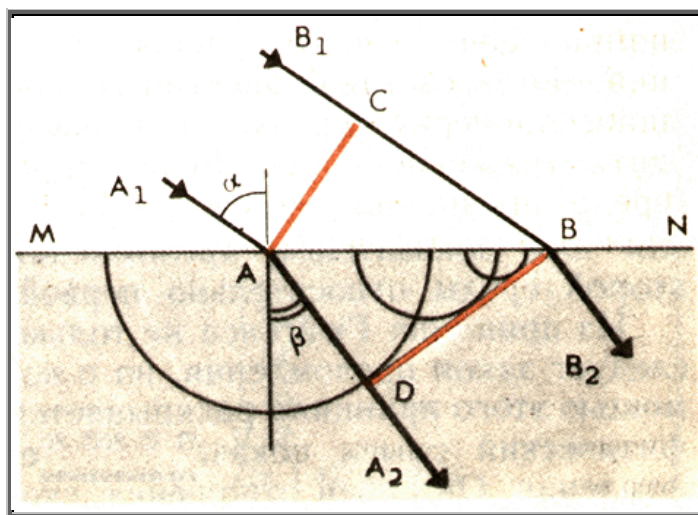


Рис. 8

Волновая поверхность AC перпендикулярна лучам A_1A и B_1B . Поверхности MN сначала достигнет луч A_1A . Луч B_1B достигнет поверхности спустя время

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}$$

Поэтому в момент, когда вторичная волна в точке B только начнет возбуждаться, волна от точки A уже имеет вид полусферы радиусом $AD = v_2 \Delta t$.

Волновую поверхность преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем вторичным волнам во второй среде, центры которых лежат на границе раздела сред. В данном случае это плоскость BD . Она является огибающей вторичных волн.

Угол падения α луча равен углу CAB в треугольнике ABC (стороны одного из этих углов перпендикулярны сторонам другого). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha \quad (1.2)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta \quad (1.3)$$

Разделив почленно (1.2) на (1.3), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \quad (1.4)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения

Из построения (рис.8) видно, что **падающий луч, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.** Данное утверждение совместно с уравнением (1.4), согласно

которому *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред*, представляет собой закон преломления света.

Убедиться в справедливости закона преломления можно экспериментально, измеряя углы падения и преломления и вычисляя отношение их синусов при различных углах падения. Это отношение остается неизменным.

Показатель преломления

Постоянная величина, входящая в закон преломления света, называется **относительным показателем преломления** или показателем преломления второй среды относительно первой.

Из принципа Гюйгенса не только следует закон преломления, но с помощью этого принципа раскрывается физический смысл показателя преломления. Он равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.5)$$

Если угол преломления β меньше угла падения α , то согласно (1.4) скорость света во второй среде меньше, чем в первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называют *абсолютным показателем преломления этой среды*. Он равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду.

Пользуясь формулой (1.5), можно выразить относительный показатель преломления через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред.

Действительно, так как

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

где c — скорость света в вакууме, то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.6)$$

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть *оптически менее плотной средой*.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физического состояния среды, т. е. от температуры *вещества его плотности, наличия* в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от *характеристик самого света*. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого - меньше, чем для фиолетового.

Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение n и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от указанных факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух - твердое тело или воздух - жидкость, а не через границу вакуум - среда. Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтого света равен приблизительно $n_1 \approx 1,000292$. Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2 \quad (1.7)$$

Значения показателей преломления для некоторых веществ относительно воздуха приведены в таблице (данные относятся к желтому свету).

Вещество	Показатель преломления относительно воздуха
Вода (при 20°C)	1,33
Кедровое масло (при 20°C)	1,52
Сероуглерод (при 20°C)	1,63
Лед	1,31
Каменная соль	1,54
Кварц	1,54
Рубин	1,76
Алмаз	2,42
Различные сорта стекла	От 1,47 до 2,04

Ход лучей в треугольной призме

Закон преломления света позволяет рассчитать ход лучей в различных оптических устройствах, например в треугольной призме, изготовленной из стекла или других прозрачных материалов.

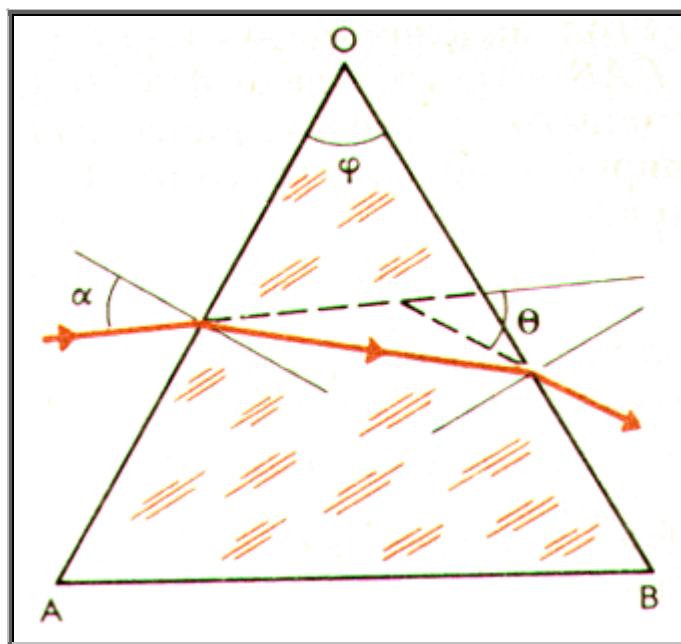


Рис. 9

На рисунке 9 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной ее боковым ребрам. Луч в призме отклоняется к основанию, преломляясь на гранях OA и OB . Угол φ между этими гранями называют преломляющим углом призмы. Угол θ отклонения луча зависит от преломляющего угла призмы φ , показателя преломления n материала призмы и угла падения α . Он может быть вычислен с помощью закона преломления (1.4).

Закон преломления нужно запомнить. Каково его значение? Формула (1.4) описывает бесчисленное множество случаев преломления. Она избавляет нас от необходимости делать в каждом отдельном случае опыт и запоминать или заносить в таблицы для каждого отдельного случая угол падения и соответствующий ему угол преломления луча.

Полное отражение

Закон преломления света позволяет объяснить интересное и практически важное явление – полное отражение света.

При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную, например из воздуха в стекло или воду, $n_1 < n_2$; и согласно закону преломления (1.4) показатель преломления $n > 1$, поэтому $\theta > \alpha$ (рис. 10, а): преломленный луч приближается к перпендикуляру к границе раздела сред.

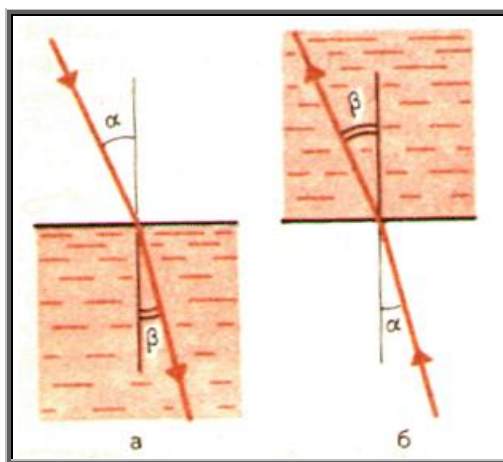


Рис. 10

Если направить луч света в обратном направлении – из оптически более плотной среды в оптически менее плотную вдоль бывшего преломленного луча (рис. 10, б), то закон преломления запишется так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n} \quad (1.8)$$

Преломленный луч по выходе из оптически более плотной среды пойдет по линии бывшего падающего луча, поэтому $\beta < \alpha$, т. е. преломленный луч отклоняется от перпендикуляра. По мере увеличения угла α угол преломления β растет, оставаясь всё время больше угла α . Наконец, при некотором угле падения значение угла преломления приблизится к 90° и преломленный луч пойдет почти по границе раздела сред (рис. 11). Наибольшему возможному углу преломления $\beta = 90^\circ$ соответствует угол падения α_0 .

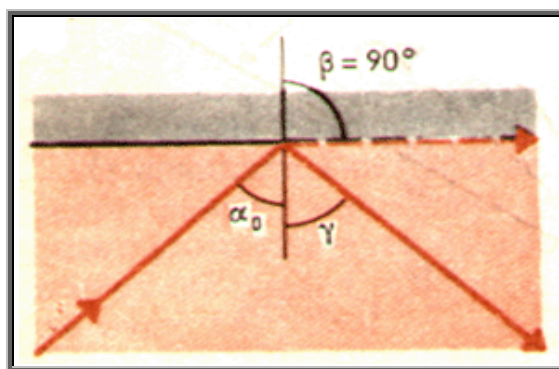


Рис. 11

Попробуем сообразить, что произойдет при $\alpha > \alpha_0$. При падении света на границу двух сред световой луч, как об этом уже упоминалось, частично преломляется, а частично отражается от нее. При $\alpha > \alpha_0$ преломление света невозможно. Значит, луч должен полностью отразиться. Это явление и называется **полным отражением света**.

Для наблюдения полного отражения можно использовать стеклянный полуцилиндр с матовой задней поверхностью. Полуцилиндр закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности полуцилиндра совпадала с центром диска (рис. 12). Узкий пучок света от осветителя направляют снизу на боковую поверхность полуцилиндра перпендикулярно его поверхности. На этой поверхности луч не преломляется. На плоской поверхности луч частично преломляется и частично отражается. Отражение происходит в соответствии с законом отражения, а преломление – в соответствии с законом преломления (1.4).

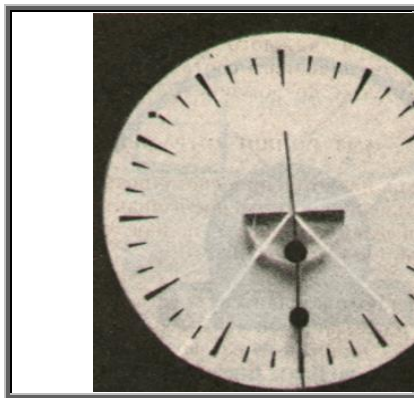


Рис. 12

Если увеличивать угол падения, то можно заметить, что яркость (и следовательно, энергия) отраженного пучка растет, в то время как яркость (энергия) преломленного пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломленного пучка, когда угол преломления приближается к 90° . Наконец, когда угол падения становится таким, что преломленный пучок идет вдоль границы раздела (см.рис. 11), доля отраженной энергии составляет почти 100%. Повернем осветитель, сделав угол падения θ большим θ_0 . Мы увидим, что преломленный пучок исчез и весь свет отражается от границы раздела, т. е. происходит полное отражение света.

На рисунке 13 изображен пучок лучей от источника, помещенного в воде недалеко от ее поверхности. Большая интенсивность света показана большей толщиной линии, изображающей соответствующий луч.

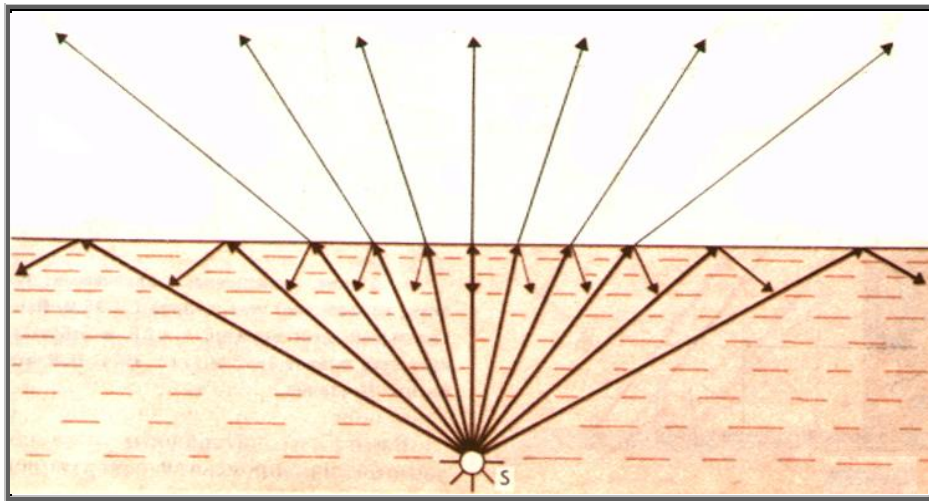


Рис. 13

Угол падения α_0 , соответствующий углу преломления 90° , называют **предельным углом полного отражения**. При $\sin \alpha = 1$ формула (1.8) принимает вид

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} \quad (1.9)$$

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения α_0 . Для воды ($n=1,33$) он оказывается равным $48^\circ 35'$, для стекла ($n=1,5$) он принимает значение $41^\circ 51'$, а для алмаза ($n=2,42$) этот угол составляет $24^\circ 40'$. Во всех случаях второй средой является воздух.

Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Нальем в стакан воду поднимем его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды при рассматривании ее снизу сквозь стенку кажется блестящей, словно посеребренной вследствие полного отражения света.

Полное отражение используют в так называемой **волоконной оптике** для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон – световодов. Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления. За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути (рис. 14).

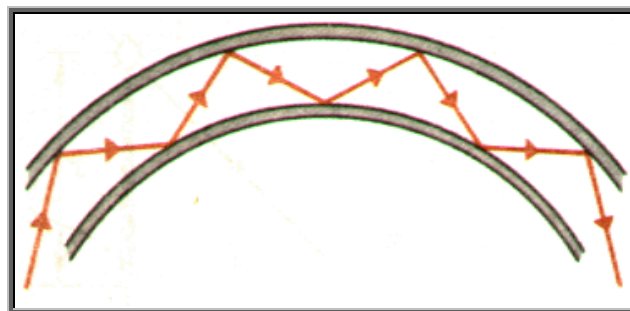


Рис. 14

Волокна набираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передается какой-нибудь элемент изображения (рис. 15). Жгуты из волокон используются, например, в медицине для исследования внутренних органов.

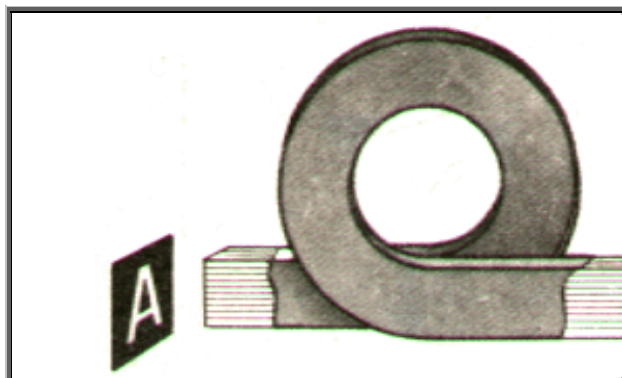


Рис. 15

По мере улучшения технологии изготовления длинных пучков волокон – световодов все шире начинает применяться связь (в том числе и телевизионная) с помощью световых лучей.

Полное отражение света показывает, какие богатые возможности для объяснения явлений распространения света заключены в законе преломления. Вначале полное отражение представляло собой лишь любопытное явление. Сейчас оно постепенно приводит к революции в способах передачи информации.

Дисперсия света

Показатель преломления не зависит от угла падения светового пучка, но он зависит от его цвета. Это было открыто Ньютоном.

Ньютон Исаак (1643-1727), английский ученый, заложивший основы классической физики. Сформулировал основные законы классической механики, в том числе открыл закон всемирного тяготения, дал их математическое обоснование, для чего разработал (независимо от Г. Лейбница) дифференциальное и интегральное исчисления. Заложил основы небесной механики, построил зеркальный телескоп. Открыл и исследовал многие оптические явления и сделал попытку объяснить их с единой точки зрения. Работы Ньютона намного опередили общий научный уровень того времени и были малопонятны современникам. Был директором Монетного двора, наладил монетное дело в Англии. Известный алхимик, занимался хронологией древних царств. Ряд теологических трудов посвятил толкованию библейских пророчеств (большая часть



не опубликована).



Занимаясь усовершенствованием телескопов. Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и истекающие отсюда особенности цветов, каких до того никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Радужную окраску изображения, даваемого линзой, наблюдали, конечно, и до него. Было замечено также, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедший через призму, окрашивается по краям.

Основной опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Стилизованное изображение опыта Ньютона показано на рисунке 16. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов. Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полосу Ньютон назвал спектром.

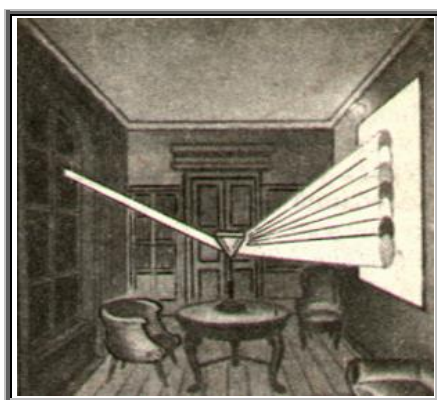


Рис. 16

закрыв отверстие красным стеклом. Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом, наблюдал синее пятно и т. д. Отсюда следовало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части (см. рис. I).

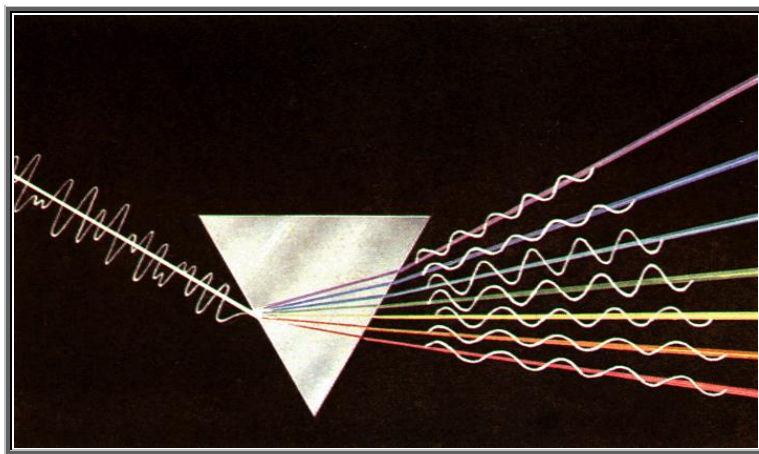


Рис. I. Схема разложения белого света с помощью призмы. Различным цветам соответствуют волны различной длины. Никакой определенной длины волны белому свету не соответствует

Белый свет имеет сложную структуру. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет (см. рис. II). Выделив же какую-либо часть спектра, например зеленую, и заставив свет пройти еще через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

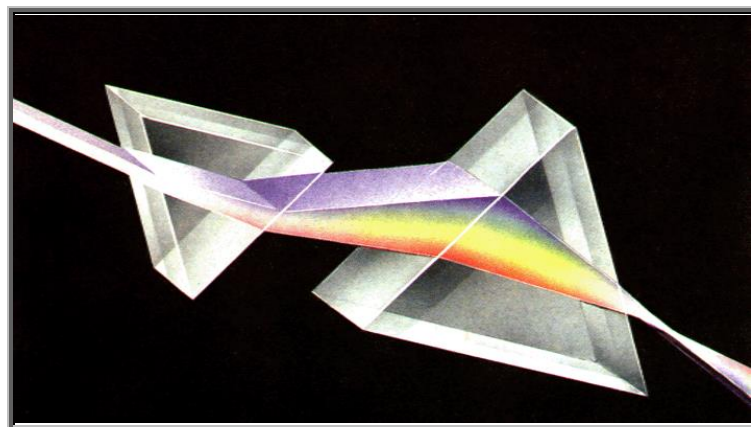


Рис. II. Разложение и синтез белого света с помощью призм

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате по «Оптике» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других – красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал дисперсией.

Показатель преломления зависит от скорости света v в веществе. Абсолютный показатель преломления

$$n = \frac{c}{v}$$

Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета больше, так как скорость фиолетового света наименьшая. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если было бы не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Ремер, казался бы красным в момент его выхода из тени. Но этого не наблюдается.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физических характеристик световой волны: частоты колебаний или длины волны. Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришел Ньютон. **Дисперсией** называется зависимость показателя преломления света от частоты колебаний (или длины волны).

Зная, что белый свет имеет сложную структуру, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом света нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зеленые, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее лишь красные лучи, то она будет казаться почти черной.

Явление дисперсии, открытое Ньютоном, - первый шаг к пониманию природы цвета. Глубина понимания дисперсии пришла после того, как была выяснена зависимость цвета от частоты (или длины) световой волны.

Интерференция механических волн

Мы рассмотрели методы измерения скорости света и доказательства того, что в среде свет распространяется медленнее, чем в вакууме. Это подтверждает справедливость волнового принципа Гюйгенса, с успехом примененного для объяснения отражения и преломления света.

Однако необходимы более веские доказательства того, что свет при распространении ведет себя как волна. Любому волновому движению присущи явления интерференции и дифракции. Для того, чтобы быть уверенным в том, что свет имеет волновую природу, необходимо найти экспериментальные доказательства интерференции и дифракции света.

Интерференция – достаточно сложное явление. Чтобы лучше понять его суть, мы сначала остановимся на интерференции механических волн.

СЛОЖЕНИЕ ВОЛН

Очень часто в среде одновременно распространяется несколько различных волн. Например, когда в комнате беседуют несколько человек, то звуковые волны накладываются друг на друга. Что при этом происходит?

Проще всего проследить за наложением механических волн, наблюдая волны на поверхности воды. Если мы бросим в воду два камня, создав этим две кольцевые волны, то нетрудно заметить, что каждая волна проходит сквозь другую и ведет себя в дальнейшем так, как будто бы другой волны совсем не существовало. Точно так же любое число звуковых волн может одновременно распространяться в воздухе, ничуть не мешая друг другу. Множество музыкальных инструментов в оркестре или голосов в хоре создают звуковые волны, одновременно сваливаемые нашим ухом. Причем ухо в состоянии отличить один звук от другого.

Теперь посмотрим более внимательно, что происходит в местах, где волны накладываются друг на друга. Наблюдая волны на поверхности воды от двух брошенных в воду камней, можно заметить, что некоторые участки поверхности не возмущены, в других же местах возмущение усилилось. Если две волны встречаются в одном месте гребнями, то в этом месте возмущение поверхности воды усиливается.

Если же, напротив, гребень одной волны встречается с впадиной другой, то поверхность воды не будет возмущена.

Вообще же в каждой точке среды колебания, вызванные двумя волнами, просто складываются. Результирующее смещение любой частицы среды представляет собой алгебраическую (т. е. с учетом их знаков) сумму смещений, которые происходили бы при распространении одной из волн в отсутствие другой.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Сложение в пространстве волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называется **интерференцией**.

Выясним, при каких условиях имеет место интерференция волн. Для этого рассмотрим более подробно сложение волн, образуемых на поверхности воды.

Можно одновременно возбудить две круговые волны в ванне с помощью двух шариков, укрепленных на стержне, который совершает гармонические колебания (рис. 17).

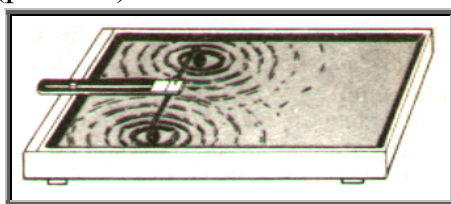


Рис. 17

В любой точке M на поверхности воды (рис. 18) будут складываться колебания, вызванные двумя волнами (от источников O_1 и O_2). Амплитуды

колебаний, вызванных в точке M обеими волнами, будут, вообще говоря, отличаться, так как волны проходят различные пути d_1 и d_2 . Но если рассмотреть расстояние l между источниками много меньше этих путей ($l \ll d_1$ и $l \ll d_2$, то обе амплитуды можно считать практически одинаковыми.

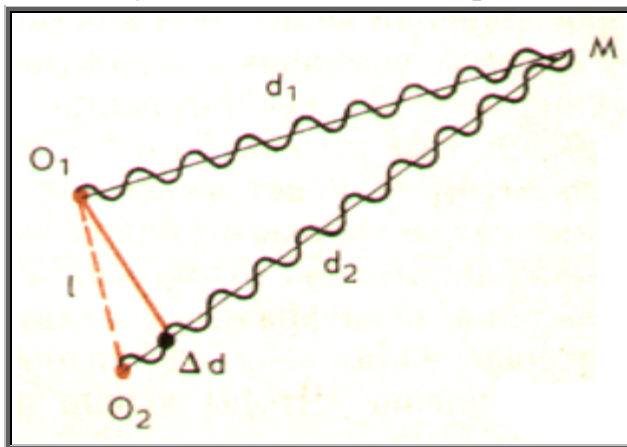


Рис. 18

Результат сложения волн, приходящих в точку M , зависит от разности фаз между ними. Пройдя различные расстояния d_1 и d_2 , волны имеют разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$. Если разность хода равна длине волны λ , то вторая волна запаздывает по сравнению с первой ровно на один период (как раз за период волна проходит путь, равный длине волны). Следовательно, в этом случае гребни (как и впадины) обеих волн совпадают.

Условие максимумов

На рисунке 19 изображена зависимость от времени смещений x_1 и x_2 , вызванных двумя волнами при $\Delta d = \lambda$. Разность фаз колебаний равна нулю (или, что то же самое, 2π , так как период синуса равен 2π). В результате сложения этих колебаний возникает результирующее колебание с удвоенной амплитудой. Колебания результирующего смещения x на рисунке показаны цветом (пунктир). То же самое будет происходить, если на отрезке M укладывается не одна, а любое целое число длин волн.

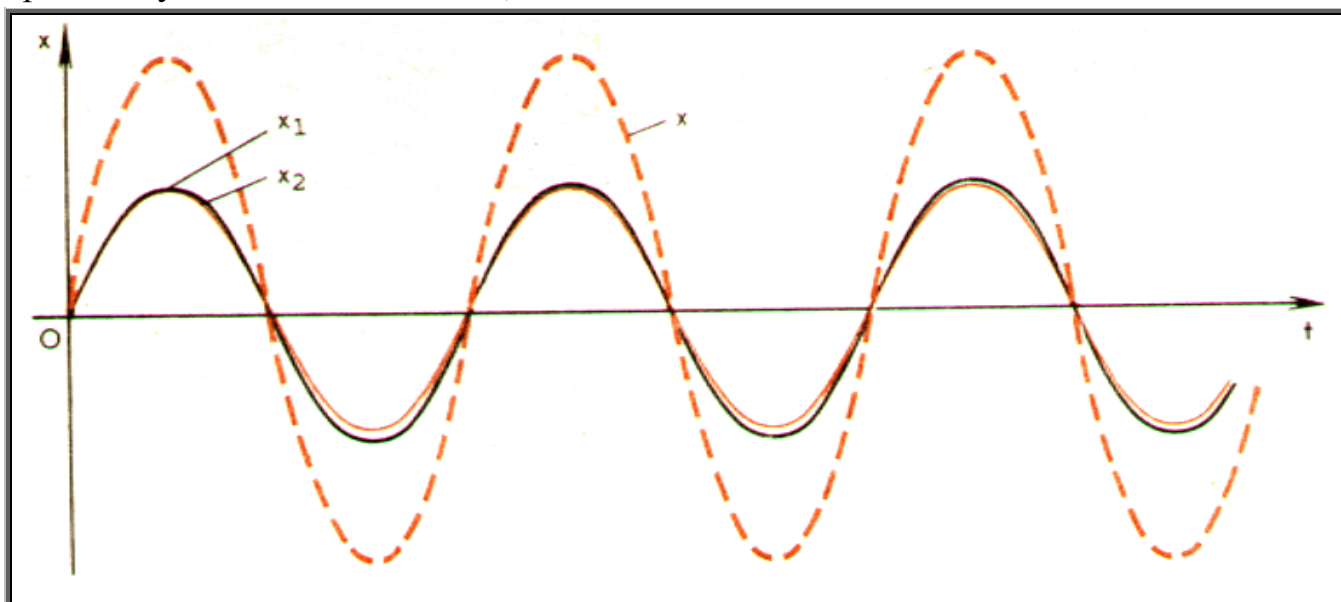


Рис. 19

Амплитуда колебаний среды в данной точке максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн (это справедливо лишь при условии, что фазы колебаний обоих источников совпадают):

$$\Delta d = k\lambda, \quad (1.10)$$

где $k=0, 1, 2, \dots$.

Условие минимумов

Пусть теперь на отрезке Δd укладывается половина длины волны. Очевидно, что при этом вторая волна отстает от первой на половину периода. Разность фаз оказывается равной π , т.е. колебания будут происходить в противофазе. В результате сложения этих колебаний амплитуда результирующего колебания равна нулю, т.е. в рассматриваемой точке колебания нет (рис. 20). То же самое произойдет, если на отрезке укладывается любое нечетное число полуволен.

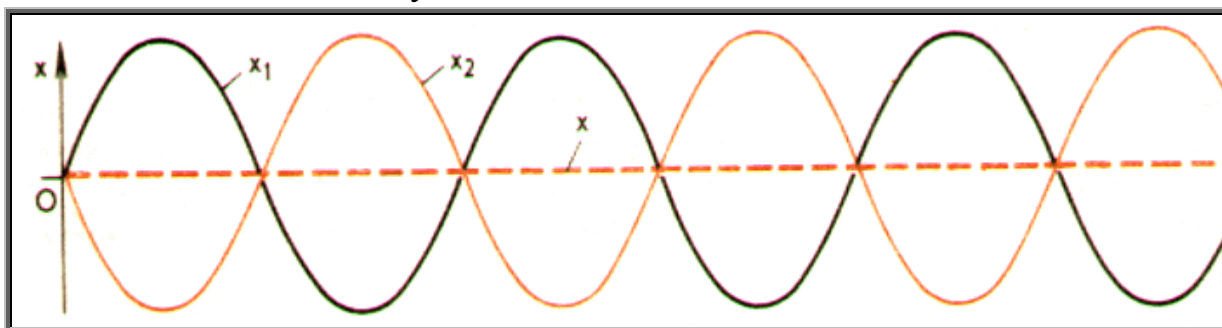


Рис. 20

Амплитуда колебаний среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу полуволен:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (1.11)$$

Если разность хода $d_2 - d_1$ принимает промежуточное значение между λ и $\frac{\lambda}{2}$, то и амплитуда результирующего колебания принимает некоторое промежуточное значение между удвоенной амплитудой и нулем. Но наиболее важно то, что амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени. На поверхности воды возникает определенное, неизменное во времени распределение амплитуд колебаний, которое называют интерференционной картиной. На рисунке 21 показан рисунок с фотографии интерференционной картины двух круговых волн от двух источников (черные кружки). Белые участки в средней части фотографии соответствуют максимумам колебаний, а темные — минимумам.

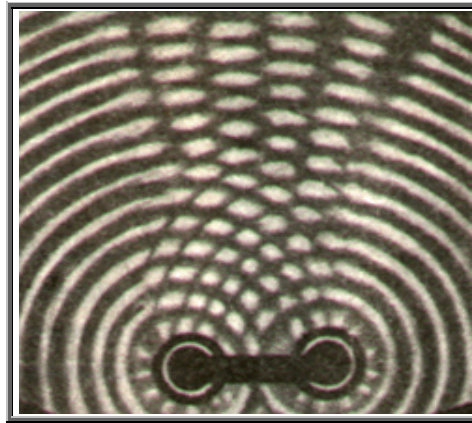


Рис. 21

КОГЕРЕНТНЫЕ ВОЛНЫ

Для образования устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы источники волн имели одинаковую частоту, и разность фаз их колебаний была постоянной.

Источники, удовлетворяющие этим условиям, называются *когерентными*. Когерентными называют и созданные ими волны. Только при сложении когерентных волн образуется устойчивая интерференционная картина.

Если же разность фаз колебаний источников не остается постоянной, то в любой точке среды разность фаз колебаний, возбуждаемых двумя волнами, будет меняться. Поэтому амплитуда результирующих колебаний с течением времени изменяется. В результате максимумы и минимумы перемешаются в пространстве и интерференционная картина размывается.

Распределение энергии при интерференции

Волны несут энергию. Что же с этой энергией происходит при гашении волн друг другом? Может быть, она превращается в другие формы и в минимумах интерференционной картины выделяется тепло? Ничего подобного. Наличие минимума в данной точке интерференционной картины означает, что энергия сюда не поступает совсем. Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве. Она не распределяется равномерно по всем частицам среды, а концентрируется в максимумах за счет того, что в минимумы не поступает совсем.

Обнаружение интерференционной картины доказывает, что мы имеем дело с волновым процессом. Волны могут гасить друг друга, а сталкивающиеся частицы никогда не уничтожают друг друга целиком. Интерферируют только когерентные (согласованные) волны.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину

(чередование максимумов и минимумов освещенности) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение еще одной лампочки лишь увеличивает освещенность поверхности, но не создает чередования минимумов и максимумов освещенности.

Выясним, в чем причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

Томас Юнг (1773 — 1829), английский физик, один из создателей волновой оптики. К 14 годам изучил дифференциальное исчисление, многие языки, владел токарным ремеслом, мастерил различные приборы. Изучал медицину, зоологию, математику, филологию (пытался расшифровать тексты Розеттского камня), геофизику, руководил изданием "Морского календаря" и т.д. Наиболее фундаментальные труды — по физике, в частности по оптике и акустике. Выступил в защиту волновой природы света, предложил (1801) принцип суперпозиции (сложения) световых волн, объяснил с этих позиций интерференцию, дифракцию, измерил длины волн света различных цветов. Выдвинул идею поперечности световых волн (1817). Исследовал деформацию сдвига, ввел модуль упругости (модуль Юнга).



Условие когерентности световых волн

Причина состоит в том, что световые волны, излучаемые различными источниками, не согласованы друг с другом. Для получения же устойчивой интерференционной картины нужны согласованные волны. Они должны иметь одинаковые длины волн и постоянную разность фаз в любой точке пространства. Напомним, что такие согласованные волны с одинаковыми длинами волн и постоянной разностью фаз называются когерентными.

Почти точного равенства длин волн от двух источников добиться нетрудно. Для этого достаточно использовать хорошие светофильтры, пропускающие свет в очень узком интервале длин волн. Но невозможно осуществить постоянство разности фаз от двух независимых источников. Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными «обрывками» (цугами) синусоидальных волн, имеющими длину около метра. И такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотически меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты друг относительно друга по фазе. Волны от различных источников света **некогерентны** из-за того, что разность фаз волн не остается постоянной (исключение составляют квантовые источники света — лазеры, созданные в 1960 г.). Никакой устойчивой картины с определенным

распределением максимумов и минимумов освещенности в пространстве не наблюдается.

Интерференция в тонких пленках

Тем не менее интерференцию света удастся наблюдать. Курьез состоит в том, что ее наблюдали очень давно, но только не отдавали себе в этом отчета.

Вы тоже много раз видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов тонкой пленки керосина или нефти на поверхности воды. «Мыльный пузырь, витая в воздухе... зажигается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы» (Марк Твен). Именно интерференция света делает мыльный пузырь столь достойным восхищения.

Английский ученый Томас Юнг первым пришел к гениальной мысли о возможности объяснения цветов тонких пленок сложением волн 1 и 2 (рис. 22), одна из которых (1) отражается от наружной поверхности пленки, а вторая (2) — от внутренней. При этом происходит *интерференция световых волн — сложение двух волн, вследствие которого наблюдается устойчивая во времени картина усиления или ослабления результирующих световых колебаний в различных точках пространства*. Результат интерференции (усиление или ослабление результирующих колебаний) зависит от угла падения света на пленку, ее толщины и длины волны. Усиление света произойдет в том случае, если преломленная волна 2 отстанет от отраженной волны 1 на целое число длин волн. Если же вторая волна отстанет от первой на половину длины волны или на нечетное число полуволн, то произойдет ослабление света.

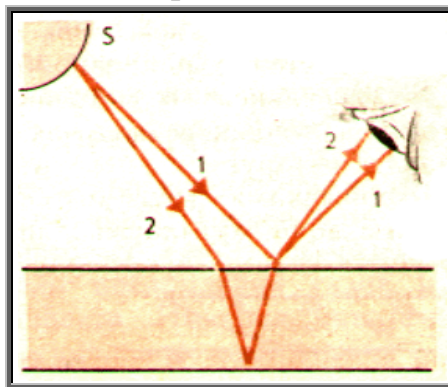


Рис. 22

Когерентность волн, отраженных от наружной и внутренней поверхностей пленки, обеспечивается тем, что они являются частями одного и того же светового пучка. Цуг волн от каждого излучающего атома разделяется пленкой на два, а затем эти части сводятся вместе и интерферируют.

Юнг также понял, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн). Световым пучкам различного цвета соответствуют волны различной длины. Для взаимного усиления волн, отличающихся друг от друга длиной (углы падения предполагаются одинаковыми), требуется различная толщина пленки. Следовательно, если

пленка имеет неодинаковую толщину, то при освещении ее белым светом должны появиться различные цвета.

Кольца Ньютона

Простая интерференционная картина возникает в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плоско-выпуклой линзой, сферическая поверхность которой имеет большой радиус кривизны. Эта интерференционная картина имеет вид концентрических колец, получивших название **колец Ньютона**.

Возьмите плоско-выпуклую линзу с малой кривизной сферической поверхности и положите ее на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая плоскую поверхность линзы (лучше через лупу), вы обнаружите в месте соприкосновения линзы и пластины темное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец. Расстояния между соседними кольцами быстро убывают с увеличением их радиуса (рис. III, 1). Это и есть кольца Ньютона. Ньютон наблюдал и исследовал их не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (мономатическим) пучком. Оказалось, что радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному; красные кольца имеют максимальный радиус (рис. III, 2 и 3). Все это вы можете проверить с помощью самостоятельных наблюдений.

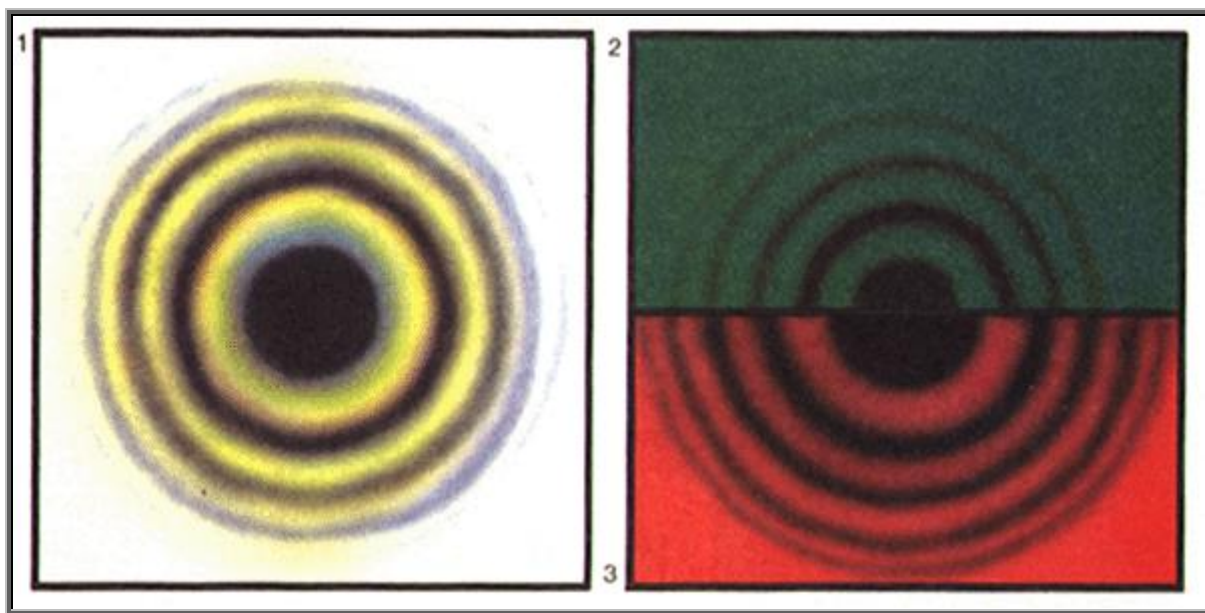


Рис. III. Кольца Ньютона в отраженном свете: 1 - в белом; 2 - в зеленом; 3 - в красном

Удовлетворительно объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог. Удалось это Юнгу. Проследим за ходом его рассуждений. В их основе лежит предположение о том, что свет – это волны. Рассмотрим случай, когда волна определенной длины падает почти перпендикулярно на плоско-выпуклую линзу (рис. 23). Волна 1 появляется в результате отражения от выпуклой поверхности линзы на границе стекло-воздух, а волна 2 — в результате отражения от пластины на границе воздух-стекло. Эти волны

когерентны: они имеют одинаковую длину и постоянную разность фаз, которая возникает из-за того, что волна 2 проходит больший путь, чем волна 1. Если вторая волна отстает от первой на целое число длин волн, то, складываясь, волны усиливают друг друга. Вызываемые ими колебания происходят в одной фазе.

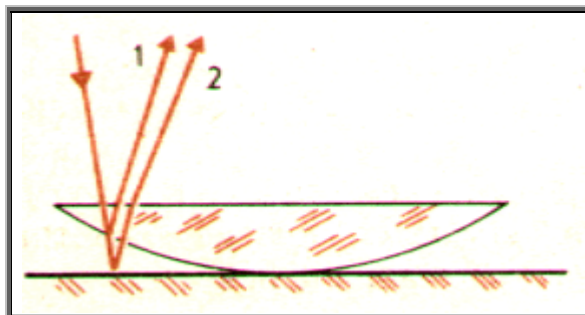


Рис. 23.

Напротив, если вторая волна отстает от первой на нечетное число полуволн, то колебания, вызванные ими, будут происходить в противоположных фазах и волны гасят друг друга.

Если известен радиус кривизны R поверхности линзы, то можно вычислить, на каких расстояниях от точки соприкосновения линзы со стеклянной пластиной разности хода таковы, что волны определенной длины λ , гасят друг друга. Эти расстояния и являются радиусами темных колец Ньютона. Ведь линии постоянной толщины воздушной прослойки представляют собой окружности. Измерив радиусы колец, можно вычислить длины волн.

Длина световой волны

Для красного света измерения дают $\lambda_{кр} = 8 \cdot 10^{-7}$ м, а для фиолетового - $\lambda_{ф} = 4 \cdot 10^{-7}$ м. Длины волн, соответствующие другим цветам спектра, принимают промежуточные значения. Для любого цвета длина световой волны очень мала. Представьте себе среднюю морскую волну длиной в несколько метров, которая увеличилась настолько, что заняла весь Атлантический океан от берегов Америки до Европы. Длина световой волны в том же увеличении лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

Явление интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны. Подобно тому, как высота звука определяется его частотой, цвет света определяется частотой колебаний или длиной волны.

Вне нас в природе нет никаких красок, есть лишь волны разной длины. Глаз – сложный физический прибор, способный обнаруживать различие в цвете, которому соответствует весьма незначительная (около 10^{-6} см) разница в длине световых волн. Интересно, что большинство животных неспособны различать цвета. Они всегда видят черно-белую картину. Не различают цвета также дальтоники — люди, страдающие цветовой слепотой.

При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно обнаружить так. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления n воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшатся.

Почему это происходит? Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-нибудь среду скорость света уменьшается в n раз. Так как $v = \lambda n$, то при этом должна уменьшиться в n раз либо частота, либо длина волны. Но радиусы колец зависят от длины волны. Следовательно, когда свет входит в среду, изменяется в n раз именно длина волны, а не частота.

Интерференция электромагнитных волн

На опытах с генератором СВЧ можно наблюдать интерференцию электромагнитных (радио) волн.

Генератор и приемник располагают друг против друга (рис. 24). Затем подводят снизу металлическую пластину в горизонтальном положении. Постепенно поднимая пластину, обнаруживают поочередное ослабление и усиление звука.

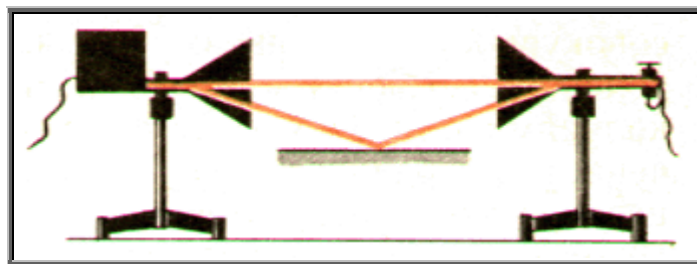


Рис.24.

Явление объясняется следующим образом. Часть волны из рупора генератора непосредственно попадает в приемный рупор. Другая же ее часть отражается от металлической пластины. Меняя расположение пластины, мы изменяем разность хода прямой и отраженной волн. Вследствие этого волны либо усиливают, либо ослабляют друг друга в зависимости от того, равна ли разность хода целому числу длин волн или нечетному числу полуволн.

Наблюдение интерференции света доказывает, что свет при распространении обнаруживает волновые свойства. Интерференционные опыты позволяют измерить длину световой волны: она очень мала – от 4×10^{-7} до 8×10^{-7} м.

ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Часто волна встречает на своем пути небольшие (по сравнению с ее длиной) препятствия. Соотношение между длиной волны и размером препятствий определяет в основном поведение волны.

Волны способны огибать края препятствий. Когда размеры препятствий малы, волны, огибая края препятствий, смыкаются за ними. Так, морские волны

свободно огибают выступающий из воды камень, если его размеры меньше длины волны или сравнимы с ней. За камнем волны распространяются так, как если бы его не было совсем (маленькие камни на рис. 26). Точно так же волна от брошенного в пруд камня огибает торчащий из воды прутик. Только за препятствием большого по сравнению с длиной волны размера (большой камень на рис. 26) образуется «тень»: волны за него не проникают.



Рис. 26

Способностью огибать препятствия обладают и звуковые волны. Вы можете слышать сигнал машины за углом дома, когда самой машины не видно. В лесу деревья заслоняют ваших товарищей. Чтобы их не потерять, вы начинаете кричать. Звуковые волны в отличие от света свободно огибают стволы деревьев и доносят ваш голос до товарищей.

Отклонение от прямолинейного распространения волн, огибание волнами препятствий, называется **дифракцией**. Дифракция присуща любому волновому процессу в той же мере, как и интерференция. При дифракции происходит искривление волновых поверхностей у краев препятствий.

Дифракция волн проявляется особенно отчетливо в случаях, когда размеры препятствий меньше длины волны или сравнимы с ней.

Явление дифракции волн на поверхности воды можно наблюдать, если поставить на пути волн экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны (рис. 27). Хорошо будет видно, что за экраном распространяется круговая волна, как если бы в отверстии экрана располагалось колеблющееся тело — источник волн. Согласно принципу Гюйгенса так и должно быть. Вторичные источники в узкой щели располагаются столь близко друг к другу, что их можно рассматривать как один точечный источник.

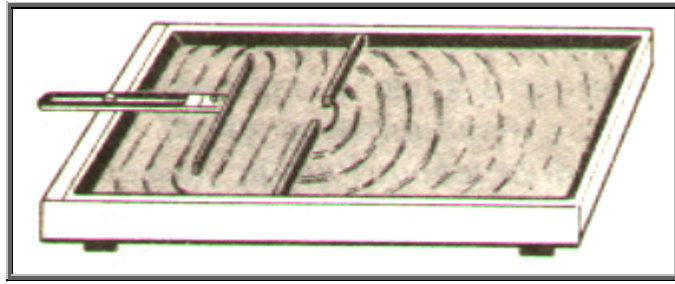


Рис. 27

Если размеры щели велики по сравнению с длиной волны, то картина распространения волн за экраном совершенно иная (рис. 28). Волна проходит сквозь щель, почти не меняя своей формы. Только по краям можно заметить небольшие искривления волновой поверхности, благодаря которым волна частично проникает и в пространство за экраном.

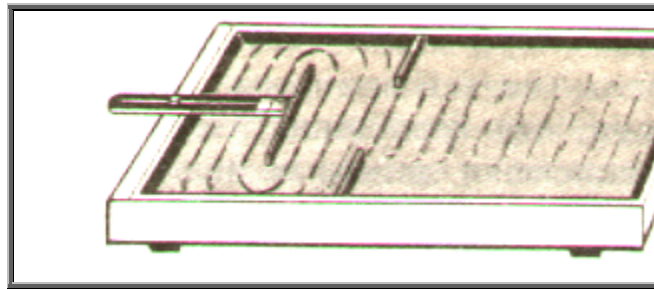


Рис. 28

Принцип Гюйгенса позволяет понять, почему происходит дифракция. Вторичные волны, испускаемые участками среды, проникают за края препятствия, расположенного на пути распространения волны.

ТЕМА 5. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция — огибание волнами краев препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко. Дело в том, что волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны очень мала.

Френель Огюстен (1788—1827)— французский физик. Френель заложил основы волновой оптики. Дополнив принцип Гюйгенса идеей интерференции вторичных волн, он построил количественную теорию дифракции. На основе этого принципа Френель объяснил законы геометрической оптики, в частности прямолинейный характер распространения света в однородной среде. Им создан приближенный метод расчета дифракционной картины, основанный на разделении волновой поверхности на зоны.

Поперечность световых волн впервые была доказана Френелем.



Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света. Светлое пятно против отверстия будет большего размера, чем это следует ожидать при прямолинейном распространении света.

Опыт Юнга

В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 29). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия B и C на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим в свою очередь через малое отверстие A в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия A возбуждала в отверстиях B и C когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий B и C выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаруживал, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.

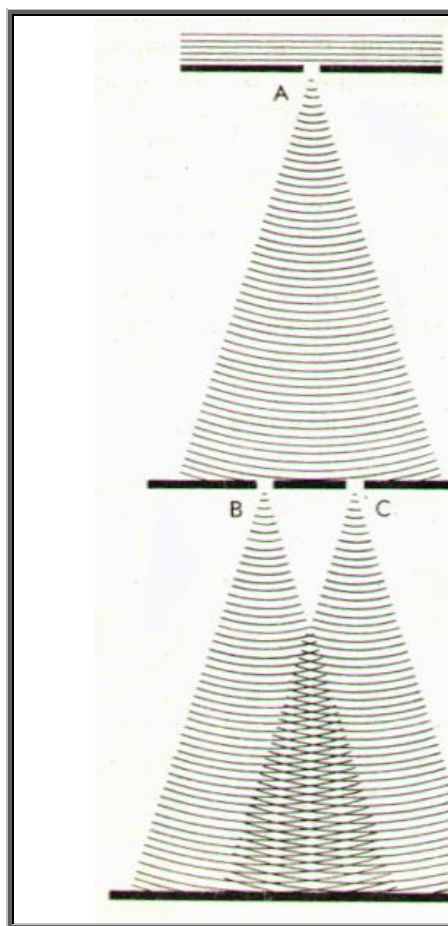


Рис. 29

Теория Френеля

Исследование дифракции получило свое завершение в работах *О. Френеля*. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и построил количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля ***волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции*** (принцип Гюйгенса — Френеля).

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света замкнутой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

Такого рода расчеты позволили понять, каким образом свет от точечного источника, испускающего сферические волны, достигает произвольной точки пространства *B* (рис. 30). Если рассмотреть вторичные

источники на сферической волновой поверхности радиусом R , то результат интерференции вторичных волн от этих источников в точке B оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте посылали свет в точку B . Вторичные волны, испущенные источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому все происходит так, как если бы свет распространялся лишь вдоль прямой SB , т. е. прямолинейно.

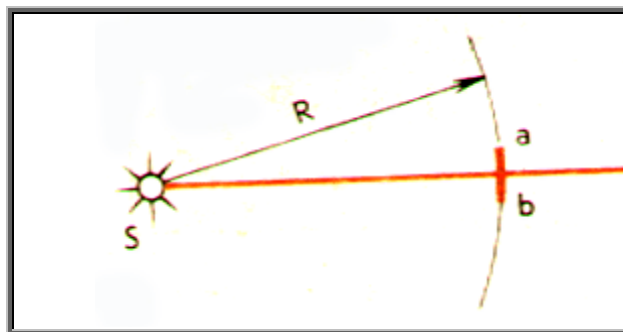


Рис. 30

Одновременно Френель рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях.

Любопытный случай произошел на заседании Французской академии наук в 1818 г. Один из ученых, присутствовавших на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу. При определенных размерах отверстия и определенных расстояниях от отверстия до источника света и экрана в центре светлого пятна должно находиться темное пятнышко. За маленьким непрозрачным диском, наоборот, должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление ученых, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле.

Дифракционные картины от различных препятствий

Из-за того, что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчетливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо же располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размером в несколько сантиметров и даже метров.

На рисунке 31 показано, как выглядят на фотографиях дифракционные картины от различных препятствий: а) от тонкой проволоочки; б) от круглого отверстия; в) от круглого экрана.

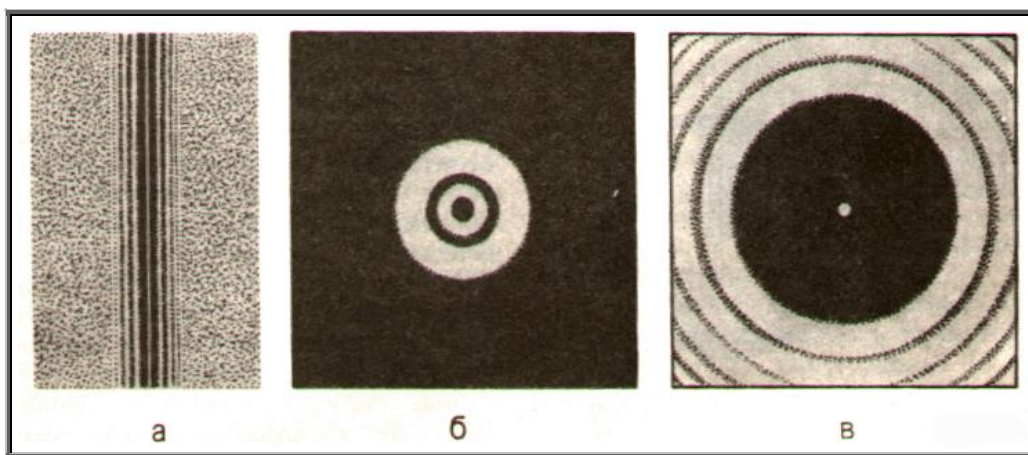


Рис. 31

Вместо тени от проволоочки видна группа светлых и темных полос; в центре дифракционной картины от отверстия появляется темное пятно, окруженное светлыми и темными кольцами (изменяя диаметр отверстия, можно в центре дифракционной картины получить и светлое пятно, окруженное темными и светлыми кольцами); в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными концентрическими кольцами.

Границы применимости геометрической оптики

Все физические теории отражают происходящие в природе процессы приближенно. Для любой теории могут быть указаны определенные границы ее применимости. Можно ли применять в конкретном случае данную теорию или нет, зависит не только от той точности, которую обеспечивает эта теория, но и от того, какая точность требуется при решении той или иной практической задачи. Границы теории можно установить лишь после того, как построена более общая теория, охватывающая те же явления.

Все эти общие положения относятся и к геометрической оптике. Эта теория является приближенной. Она неспособна объяснить явления интерференции и дифракции света.

Более общей и более точной теорией является волновая оптика. *Закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света много больше длины световой волны.* Но совершенно точно они не выполняются никогда.

Действие оптических приборов описывается законами геометрической оптики. Согласно этим законам мы можем различать с помощью микроскопа сколь угодно малые детали объекта; с помощью телескопа можно установить существование двух звезд при любых, как угодно малых угловых расстояниях между ними. Однако в действительности это не так, и лишь волновая теория света позволяет разобраться в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

Разрешающая способность микроскопа и телескопа

Волновая природа света налагает предел на возможность различения деталей предмета или очень мелких предметов при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчетливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения получаются «размытыми». Никакое увеличение не поможет различать детали предмета, если их «размытые» изображения сливаются. Это происходит, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны.

Дифракция налагает также предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и темных колец. Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга и глаз не в состоянии различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние между светящимися точками, при которых их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива.

Этот пример показывает, что дифракция происходит всегда, на любых препятствиях. И при очень тонких наблюдениях ею нельзя пренебречь и для препятствий, по размеру значительно больших длины волны.

Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики. Огибание светом препятствий налагает предел на разрешающую способность важнейших оптических инструментов – телескопа и микроскопа.

Дифракционная решетка

На явлении дифракции основано устройство замечательного оптического прибора – дифракционной решетки.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками (рис. 32) Хорошую решетку изготавливают с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянной пластине параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов превышает 100000. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решетки, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Наилучшими качествами обладают так называемые отражательные решетки. Они представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованной металлической пластине.

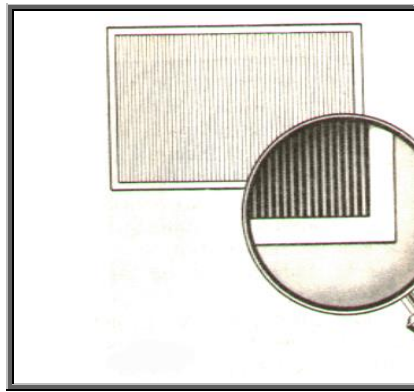


Рис. 32

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих полос) равна a , а ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) b , то величина $d=a+b$ называется **периодом решетки**. Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решетки. Пусть на решетку (рис. 33) падает плоская монохроматическая волна длиной λ .

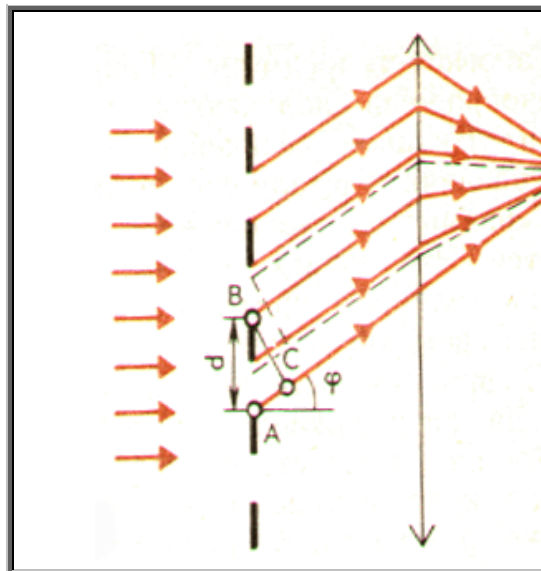


Рис. 33

Вторичные источники в щелях создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим для этого волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ . Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC можно найти длину катета AC :

$$AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$$

Максимумы будут наблюдаться под углом φ , определяемым условием

$$d \sin \varphi = k \lambda \quad (1.13)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$.

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия (1.13) усиливаются не только волны, идущие от нижних (по рисунку) краев щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели, находящаяся от первой точки на расстоянии d . Поэтому разность хода испущенных этими точками вторичных волн равна $k\lambda$, и эти волны взаимно усиливаются.

За решеткой помещают собирающую линзу и за ней экран на фокусном расстоянии от линзы. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление. Углы θ , удовлетворяющие условию (1.13), определяют положение максимумов на экране.

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k = 0$) зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр (рис. IV, 1 спектры второго и третьего порядков перекрываются). Чем больше λ , тем дальше располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны, от центрального максимума (рис. IV, 2 и 3). Каждому значению k соответствует свой спектр.

Между максимумами расположены минимумы освещенности. Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены. Световая энергия, падающая на решетку, перераспределяется ею так, что большая ее часть приходится на максимумы, а в минимумы попадает незначительная часть энергии.

С помощью дифракционной решетки можно производить очень точные измерения длины волны. Если период решетки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла θ , соответствующему направлению на максимум.

Наши ресницы с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решетку. Поэтому если посмотреть, прищурившись, на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Белый свет разлагается в спектр при дифракции вокруг ресниц. Долгоиграющая пластинка с ее бороздками, проходящими близко друг от друга, подобна отражательной дифракционной решетке. Если вы посмотрите на отраженный ею свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр. Можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям k .

Картина будет очень четкой, если свет от лампочки падает на пластинку под большим углом.

Множество узких щелей на небольшом расстоянии друг от друга образует замечательный оптический прибор - дифракционную решетку. Решетка разлагает свет в спектр и позволяет очень точно измерять длины световых волн.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн – продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам. В то время световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и проникающем внутрь всех тел. Такие волны, казалось, не могли быть поперечными, так как поперечные волны могут существовать только в твердом теле. Но как могут тела двигаться в твердом эфире, не встречая сопротивления? Ведь эфир не должен препятствовать движению тел. В противном случае не выполнялся бы закон инерции.

Однако постепенно набиралось все больше и больше экспериментальных фактов, которые никак не удавалось истолковать, считая световые волны продольными.

Опыты с турмалином

Рассмотрим подробно только один из экспериментов, очень простой и исключительно эффектный. Это опыт с кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зеленой окраски).

Кристалл турмалина имеет ось симметрии и принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее граней была параллельна оси кристалла. Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 34). Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего не произошло. Но это не так. Световая волна приобрела новые свойства.

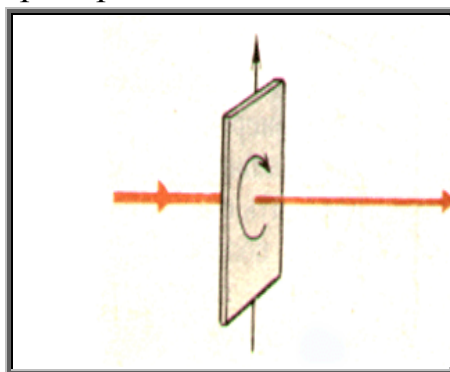


Рис. 34

Эти новые свойства обнаруживаются, если пучок заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 35, а), параллельный первому. При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 35, б), то обнаружится удивительное явление - гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность

света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 35, в). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

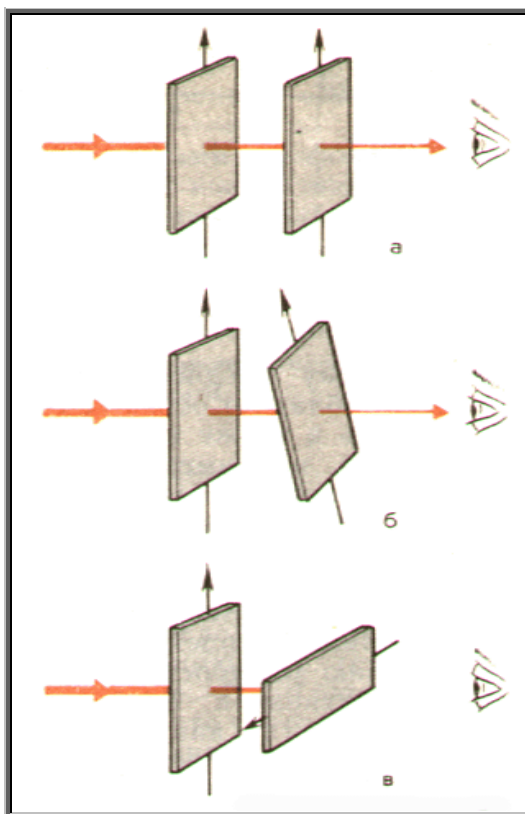


Рис. 35

Поперечность световых волн

Из описанных выше опытов следует два факта: **во-первых**, что световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность не менялась) и, **во-вторых**, что волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча получается та или иная интенсивность прошедшего света).

Продольные волны обладают полной симметрией по отношению к направлению распространения (колебания происходят вдоль этого направления, и оно является осью симметрии волны). Поэтому объяснить опыт с вращением второй пластины, считая световую волну продольной, невозможно.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения.

Первое предположение относится к самому свету. *Свет – поперечная волна. Но в падающем от обычного источника пучке волн присутствуют колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн* (рис. 36).

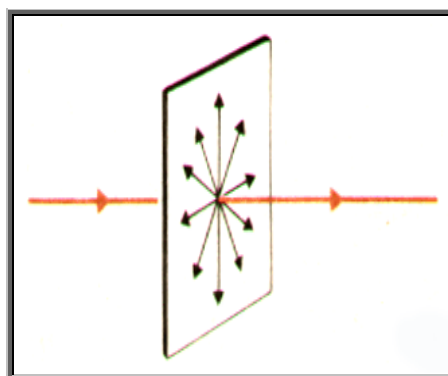


Рис. 36

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной. Волны, например, на поверхности воды такой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Световая волна с колебаниями по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения, называется естественной. Такое название оправдано, так как в обычных условиях источники света создают именно такую волну. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, так как падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

Второе предположение, которое необходимо сделать, относится к кристаллу. *Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, лежащими в одной определенной плоскости* (плоскость P на рис. 37). Такой свет называется поляризованным или, точнее, плоскополяризованным в отличие от естественного света, который может быть назван также неполяризованным. Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещенных кристаллах (угол между осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от 90° , то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

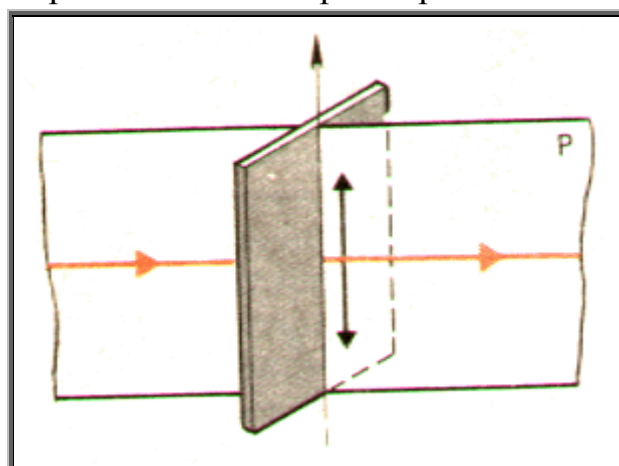


Рис. 37

Итак, кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Механическая модель опытов с турмалином

Нетрудно построить простую наглядную механическую модель рассматриваемого явления. Можно создать поперечную волну в резиновом шнуре так, чтобы колебания быстро меняли свое направление в пространстве. Это аналог естественной световой волны. Пропустим теперь шнур сквозь узкий деревянный ящик (рис. 38). Из колебаний всевозможных направлений ящик «выделяет» колебания в одной определенной плоскости. Поэтому из ящика выходит поляризованная волна.

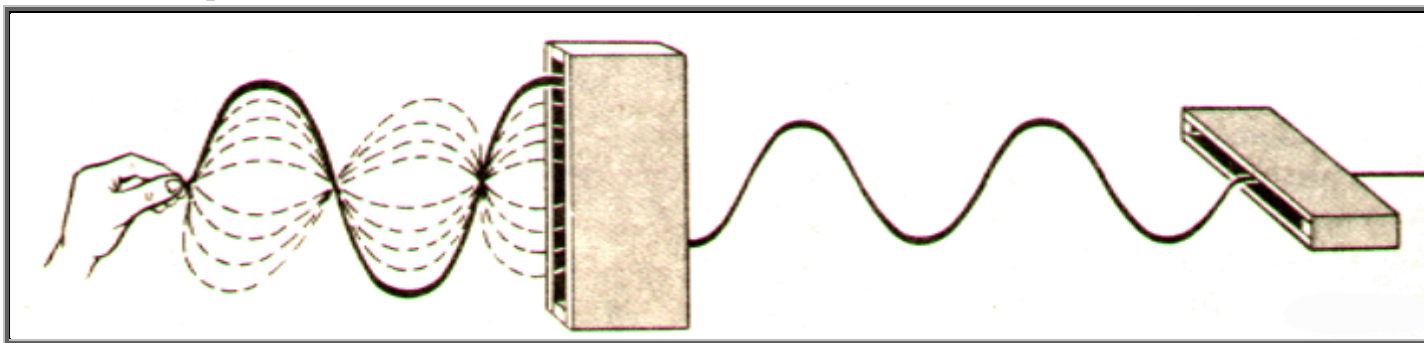


Рис. 38

Если на ее пути имеется еще точно такой же ящик, но повернутый относительно первого на 90° , то колебания сквозь него не проходят. Волна целиком гасится.

Поляроиды

Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые поляроиды. Поляроид представляет собой тонкую (0.1 мм) пленку кристаллов герпатита, нанесенную на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно проделать те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно создавать большие поверхности, поляризующие свет.

К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттенок, которым они придают белому свету.

Прямыми опытами доказано, что световая волна является поперечной. В поляризованной световой волне колебания происходят в строго

Тема 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Электромагнитная теория света берет начало с работ Максвелла. Максвелл чисто теоретически показал возможность существования электромагнитных волн, а также нашел, что скорость распространения этих волн в вакууме должна быть равна скорости света, которая к тому времени уже была известна.

Максвелл Джеймс Клерк (1831 — 1879), английский физик, создатель классической электродинамики, один из основоположников статистической физики. Создал теорию электромагнитного поля (уравнения Максвелла), описывающую электромагнитные явления в средах и в вакууме. Предсказал существование электромагнитных волн и электромагнитную природу света. Установил закон распределения молекул газа по скоростям (распределение Максвелла). Ввел статистические представления в термодинамику и впервые употребил термин "статистическая механика". Исследовал вязкость, диффузию, теплопроводность газов, цветное зрение. Основатель и первый директор (1871) Кавендишской лаборатории в Кембриджском университете (Великобритания), ставшей мировым научным центром.



В основе электромагнитной теории света лежит факт совпадения скорости света со скоростью распространения электромагнитных волн.

Кроме того, из теории Максвелла непосредственно вытекало, что электромагнитные волны являются поперечными. К тому времени поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл обоснованно считал поперечность электромагнитных волн еще одним важным доказательством справедливости электромагнитной теории света.

После того как Герц экспериментально получил электромагнитные волны и измерил их скорость, электромагнитная теория света получила первое экспериментальное подтверждение. Было доказано, что электромагнитные волны при своем распространении обнаруживают те же свойства, что и световые; отражение, преломление, интерференцию, поляризацию и др. В конце XIX века было окончательно установлено, что световые волны возбуждаются движущимися в атомах заряженными частицами.

С признанием электромагнитной теории света постепенно исчезли все затруднения, связанные с необходимостью введения гипотетической среды — эфира, который приходилось рассматривать как твердое тело. Световые волны — это не механические волны в особой всепроникающей среде — эфире, а волны электромагнитные. Электромагнитные же процессы подчиняются не законам механики, а своим собственным законам. Эти законы и были установлены в окончательной форме Максвеллом.

В электромагнитной волне векторы \vec{E} и \vec{B} перпендикулярны друг другу. В естественном свете колебания напряженности электрического поля \vec{E} и

магнитной индукции \vec{B} происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волны. Если свет поляризован, то колебания как \vec{E} , так и \vec{B} происходят не по всем направлениям, а в двух определенных плоскостях.

Возникает естественный вопрос: когда шла речь о направлении колебаний в световой волне, то, собственно говоря, колебания какого вектора – \vec{E} или \vec{B} – имелись в виду? Специально поставленные опыты доказали, что на сетчатку глаза или фотоэмульсию действует именно электрическое поле световой волны.

В связи с этим за направление колебаний в световой волне принято направление вектора напряженности \vec{E} электрического поля.

Открытие электромагнитной теории света – одно из немногих открытий, сделанных «на кончике пера», т. е. Теоретически. Но уверенность в справедливости электромагнитной теории стала всеобщей после ее экспериментального подтверждения.

Физическая оптика

Первые представления о том, что такое свет, относятся к древности. Подавляющее большинство древних мыслителей рассматривало свет как некие лучи, соединяющие светящееся тело и человеческий глаз. При этом одни из них полагали, что лучи исходят из глаз человека, они как бы ошупывают рассматриваемый предмет. Однако позже, к началу XVII века, такое представление о природе света теряет свое значение.

Наслаждаясь видом безоблачного неба, мы вряд ли склонны рассуждать о том, что небесная синева - это одно из проявлений рассеяния света. Оказывается, синие лучи, падающие на Землю от Солнца, рассеиваются молекулами воздуха примерно в 6 раз сильнее красных, поэтому небо выглядит голубым, а солнце тем краснее, чем оно ближе к горизонту. Подобным образом объяснил голубой цвет неба в 1871 году знаменитый английский математик и физик Джон Уильям Страт (по отцу - лорд Рэлей). С тех пор рассеяние света на отдельных атомах или молекулах и вообще на маленьких частицах - с размерами, намного меньшими длины световой волны, называют рэлеевским рассеянием.

Другая точка зрения заключалась в том, что лучи испускаются светящимся телом и, достигая человеческого глаза, несут на себе отпечаток светящегося предмета. Такой точки зрения придерживались атомисты Демокрит, Эпикур, Лукреций. Позже, в XVII веке, эта точка зрения оформилась в корпускулярную теорию света, согласно которой свет является потоком неких частиц, испускаемых светящимся телом.

Третья точка зрения на природу света была высказана Аристотелем. Он рассматривал свет как распространяющееся в пространстве действие или движение. В дальнейшем его взгляды на природу света положили начало волновой теории света. Необходимо отметить, что огромную роль в развитии оптики сыграло определение скорости света. Впервые скорость света была определена датским астрономом Олафом Ремером (1644—1710) в 70-х годах XVII века. Проведя наблюдения над затмением спутников Юпитера и измерив время их затмения, он смог из полученных данных подсчитать скорость распространения света. По его подсчетам, скорость света получилась равной 300870 км/с.

В XVII веке происходит окончательное формирование двух противоположных теорий света: корпускулярной и волновой.

С точки зрения корпускулярной теории хорошо объяснялось прямолинейное распространение света и закон отражения света. Кроме того, закон преломления также не противоречил этой теории. Не было противоречий и с общими представлениями о строении вещества. Но, несмотря на преобладание взглядов о корпускулярной природе света, начинают развиваться и представления о его волновой природе.

Родоначальником волновой теории света является Декарт. Согласно его взглядам, свет - это нечто вроде давления, передающегося через тонкую

среду от светящегося тела во все стороны. Если тело нагрето и светится, то это значит, что его частицы находятся в движении и оказывают давление на частицы той среды, которая заполняет все пространство (эфир). Давление распространяется во все стороны и, доходя до глаза, вызывает в нем ощущение света. Однако необходимо отметить то, что взгляды Декарта носили чисто умозрительный характер.

Первое открытие, свидетельствующее о волновой природе света, было сделано итальянским ученым Франческо Гримальди (1618—1663), который заметил, что если на пути узкого пучка световых лучей поставить предмет, то на экране, поставленном сзади, не получается резкой тени. Края тени размыты, кроме того, вдоль тени появляются цветные полосы. Открытое им явление ученый назвал дифракцией. Гримальди объяснял это явление тем, что свет — это флюид (тонкая неощутимая жидкость) и при встрече с препятствием возникают волны этого флюида.

Дифракцией света называется явление огибания световыми волнами малых препятствий, встречающихся на пути их распространения. Например, при прохождении света через малое круглое отверстие на экране вокруг центрального светлого пятна наблюдаются чередующиеся темные и светлые кольца. Чем меньше размеры экрана или отверстия, тем сильнее дифракция света.

Вторым важным открытием, относящимся к физической оптике, было открытие интерференции света. Важная роль в исследовании интерференции принадлежит английскому физику Роберту Гуку (1635-1703). Гук считал, что свет - это колебательные движения, распространяющиеся в эфире. Он даже высказывал предположение, что эти колебания являются поперечными. При изучении цвета мыльных пленок и тонких пластинок из слюды он обнаружил, что эти цвета зависят от толщины мыльной пленки или слюдяной пластинки. Явление интерференции света в тонких пленках Гук объяснял тем, что от верхней и нижней поверхности тонкой (например, мыльной) пленки происходит отражение световых волн, которые, попадая в глаз, производят ощущение различных цветов.

Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой пленки, частично проходят в нее. На второй границе пленки вновь происходит частичное отражение волн. Световые волны, отраженные двумя поверхностями тонкой пленки, распространяются в одном направлении, но проходят разные пути. При разности хода Δl , кратной целому числу длин волн λ :

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный максимум. При разности Δl , кратной нечетному числу полуволн:

$$\Delta l = (2k+1) \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный минимум. Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная

пленка кажется окрашенной. При изменении толщины пленки или угла падения световых волн разность хода изменяется и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны.

Дифракция света используется в так называемой дифракционной решетке, представляющей собой прозрачную пластинку с нанесенной на нее системой параллельных непрозрачных полос, расположенных на одинаковых расстояниях d друг от друга.

При падении на решетку монохроматической волны с плоским волновым фронтом в результате дифракции из каждой щели свет будет распространяться не только в первоначальном направлении, но и по всем другим направлениям.

Если за решеткой поставить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости параллельные лучи от всех щелей соберутся в одну полоску. Параллельные лучи, идущие от краев двух соседних щелей, имеют разность хода:

$$\Delta l = d \sin \varphi,$$

где d — расстояние между соответствующими краями соседних щелей, называемое **периодом решетки**, φ — угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решетки. При равенстве разности хода Δl целому числу длин волн:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где λ — длина волны падающего света, наблюдается интерференционный максимум света. Линза не вносит разности хода. Таким образом, условие интерференционного максимума для каждой длины световой волны выполняется при своем значении угла дифракции φ . В результате при прохождении через дифракционную решетку пучок белого света разлагается в спектр.

Третье важное открытие, относящееся к волновой оптике, было сделано в 1669 году датским ученым Бартолином. Он открыл явление двойного лучепреломления в кристалле исландского шпата. Бартолин обнаружил, что если смотреть на какой-либо предмет через кристалл исландского шпата, то видно не одно, а два изображения, смещенные друг относительно друга. Это явление затем исследовал Гюйгенс и попытался дать ему объяснение с точки зрения волновой теории света.

Гюйгенс полагал, что все мировое пространство заполнено тонкой неощутимой средой — эфиром, который состоит из очень маленьких упругих шариков. Эфир заполняет также пространство между атомами, образующими обычные тела. По его мнению, распространение света — это процесс передачи движения от шарика к шарика. Для того чтобы показать способность волновой теории объяснить прямолинейное распространение света, Гюйгенс выдвигает свой, уже известный нам, принцип. Основываясь на этом принципе, он дал объяснения закону прямолинейного распространения света, законам отражения и преломления. Но, как известно, принцип Гюйгенса не мог объяснить явления дифракции и интерференции. Кроме того, теория Гюйгенса была теорией бесцветного света.

Первым, кто смог разобраться в явлении разложения белого света призмой в спектр, был Исаак Ньютон. В 60-е годы XVII века он открыл явление дисперсии света и простых цветов. Изучая явление разложения белого света в спектр, Ньютон пришел к заключению, что белый свет является сложным светом. Он представляет собой сумму простых цветных лучей. Для того чтобы подтвердить вывод о том, что белый свет состоит из простых цветных лучей и разлагается на них при прохождении через призму, Ньютон провел следующий опыт.

В экране, на котором наблюдался спектр, делалось также малое отверстие. Через отверстие пропускали уже не белый свет, а монохроматический пучок света, т.е. свет, имеющий определенную окраску. На пути этого пучка Ньютон ставил новую призму, а за ней новый экран. Этот пучок света отклонялся призмой как одно целое, под определенным углом. При этом свет не изменял своей окраски. Поворачивая первую призму, Ньютон пропускал через отверстие экрана цветные лучи различных участков спектра. Во всех случаях они не разлагались второй призмой, а лишь отклонялись на определенный угол, разный для лучей различного цвета.

После этого Ньютон пришел к заключению, что белый свет разлагается на цветные лучи, которые являются простыми и призмой не разлагаются. Для каждого цвета показатель преломления имеет свое определенное значение. Открытие дисперсии подтверждало, по мнению Ньютона, корпускулярную теорию света.

Дисперсией света называется явление зависимости скорости света от длины волны или частоты. При

прохождении через призму белого света на экране, установленном за призмой, наблюдается радужная полоса, состоящая из семи монохроматических составляющих и их полутонов. Эта полоса называется дисперсионным спектром. Этот спектр условно делится на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Смена цвета происходит непрерывно, причем смесь всех семи цветов дает белый цвет. Если из полного спектра исключить один из цветов, то комбинация оставшихся цветов дает цвета, которые называются дополнительными.

Объясняется разложение белого света тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны и показатель преломления света зависит от его длины волны. Наибольшее значение он имеет для света с самой короткой длиной волны - фиолетового света. Наименьшим показателем преломления обладает самый длинноволновый свет - красный. Абсолютный показатель преломления света определяется отношением скорости света C в вакууме к скорости света V в среде:

$$n = \frac{C}{V}.$$

Исследования показали, что в вакууме скорость света одинакова для света с любой длиной волны. Таким образом, разложение света в стеклянной призме обусловлено зависимостью скорости распространения света в среде от длины световой волны.

Для того чтобы запомнить чередование цветов в спектре, обычно предлагают запомнить следующую фразу: «Каждый Охотник Желает Знать Где Скрывается Фазан», где заглавные буквы каждого слова являются первыми буквами в названии соответствующего цвета — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Корпускулярная теория, как уже указывалось, не в состоянии была объяснить явление интерференции и дифракции света. Тогда Ньютон сам занялся исследованием интерференции. Он взял линзу, положил ее на стеклянную пластинку и пронаблюдал темные и светлые кольца, которые видны при освещении линзы и пластинки монохроматическим светом. Это были так называемые кольца Ньютона.

В конце XVIII века английский ученый Томас Юнг (1773—1829) пришел к выводу, что кольца Ньютона можно объяснить с точки зрения волновой теории света, опираясь на принцип интерференции. Именно он впервые и ввел название «интерференция» (от латинских слов «inter» — «взаимно» и «ferio» — «ударяю»).

По мнению Юнга, кольца Ньютона в отраженном свете возникают в результате интерференции двух лучей света, отраженных от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, образованной линзой и стеклянной пластинкой. От толщины этой прослойки будет зависеть разность хода между указанными лучами. В частности, они могут усиливать или гасить друг друга. В первом случае мы видим светлое кольцо, во втором - темное. Если свет, освещающий установку, белый, то будут наблюдаться цветные кольца. По расположению колец для разных цветов можно подсчитать длину волны соответствующих цветных лучей. Юнг проделал этот расчет и определил длину волны для разных участков спектра.

Существенное влияние на развитие волновой теории оказал французский инженер Огюстен Френель (1788—1827). Он дал объяснение прямолинейному распространению света, показав, что лучи, поляризованные перпендикулярно друг к другу, не интерферируются. В опытах по дифракции света он установил, что дифракционные полосы появляются вследствие интерференции лучей. Принцип интерференции позволил Френелю законы отражения и преломления объяснить взаимным погашением световых колебаний во всех направлениях, за исключением тех, которые удовлетворяют закону отражения. Ему удалось экспериментально доказать, что световые лучи могут воздействовать друг на друга, ослабляться и даже почти полностью погашаться в случаях согласных колебаний, что и позволило ему дать объяснение явлению дифракции. Основное внимание Френель уделял опытам по дифракции света, для которой разработал специальную теорию. Эта теория основывалась на усовершенствованном принципе Гюйгенса, который мы уже рассматривали выше как принцип Гюйгенса - Френеля. Используя этот принцип, Френель исследовал разные случаи дифракции и рассчитал расположение полос для этих случаев.

В XVII веке большое внимание уделялось исследованию явления двойного лучепреломления. Датский физик Бартолин наблюдал, что когда на кристалл исландского шпата падает луч света, то он при преломлении раздваивается. Если смотреть на точечный источник света через этот кристалл, то можно увидеть не один, а два таких источника. Это явление зависит от ориентации кристалла относительно луча. В кристалле есть направление, по которому раздваивание луча не происходит. Это направление называется **оптической осью кристалла**.

Исследуя явление двойного лучепреломления в начале XIX века, французский инженер Малюс обнаружил, что если смотреть через кристалл исландского шпата на изображение солнца в стекле, то при одних положениях этого кристалла видно два солнца, а при определенном положении стекла и кристалла одно из изображений пропадает, даже если световые лучи направлены не вдоль оптической оси. Так было открыто явление поляризации света.

Интенсивность светового пучка, проходящего через некоторые прозрачные кристаллы, зависит от взаимной ориентации двух кристаллов. При одинаковой ориентации кристаллов свет проходит через второй кристалл без ослабления. Если же второй кристалл повернут на 90° от первоначального положения, то свет через него не проходит. При прохождении через первый кристалл происходит поляризация света, т.е. кристалл пропускает только такие волны, в которых колебания вектора E напряженности электрического поля совершаются в одной плоскости. Эта плоскость называется **плоскостью поляризации**. Если плоскость, в которой пропускаются колебания вторым кристаллом, совпадает с плоскостью поляризации, поляризованный свет проходит через второй кристалл без ослабления. При повороте кристалла на 90° поляризованный свет не проходит через кристалл.

Анализируя явления поляризации и двойного лучепреломления, Юнг и Френель сделали вывод о поперечности световых волн. С помощью этой гипотезы Френель исследовал указанные явления и разработал теорию прохождения поперечных волн через двоякопреломляющее тело. Новые исследования интерференции и дифракции света, в частности изобретение дифракционной решетки, все больше и больше подтверждали волновую теорию света. К 40-м годам XIX века эта теория стала общепризнанной.

Одним из наиболее трудных для волновой теории света был вопрос о том, что же колеблется при распространении световых волн, в какой среде они распространяются.

На вопрос о природе света и механизме его распространения давала ответ гипотеза Максвелла. На основании совпадения экспериментально измеренного значения скорости света в вакууме со значением скорости распространения электромагнитных волн Максвелл высказал предположение, что свет - это электромагнитные волны. Его гипотеза подтверждается многими экспериментальными фактами. Представлениям электромагнитной теории

света полностью соответствуют экспериментально открытые законы отражения и преломления света, явления интерференции, дифракции и поляризация света.

Однако электромагнитная теория света не в состоянии объяснить законы фотоэффекта, явления взаимодействия света с веществом, в которых проявляются корпускулярные свойства света.

Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом называется явление испускания электронов веществом под действием света, открытое в 1887 году Генрихом Герцем. Фотоэффект подчиняется ряду закономерностей:

- энергия

освобожденных электронов, называемых фотоэлектронами, абсолютно не зависит от интенсивности света;

- повышение интенсивности приводит к увеличению числа фотоэлектронов, но не их скорости;

- число фотоэлектронов пропорционально интенсивности света;

- скорость электронов зависит только от частоты падающего света: с увеличением частоты энергия фотоэлектронов возрастает линейно.

Все тела, кроме теплового излучения, в результате различных внешних воздействий дают избыточное излучение, которое не определяется температурой тела. **Люминесценцией** называют все виды свечений, возбуждаемых за счет любого внешнего источника энергии. Длительность люминесценции после прекращения внешнего воздействия значительно превышает период световых колебаний, что позволяет отличать ее от отражения и рассеяния света и пр.

Люминесценция обусловлена колебаниями небольшого количества атомов или молекул вещества, которые под действием источника энергии переходят в возбужденное состояние. Излучение возникает в результате переходов атомов или молекул из этих состояний в невозбужденное или менее возбужденное состояние, в результате чего высвобождается определенная энергия. Кратковременная люминесценция называется флюоресценцией.

Благодаря развитию волновой оптики человек открыл явление голографии. Физическая идея голографии состоит в том, что при наложении двух световых пучков, при определенных условиях, может возникать интерференционная картина, то есть в пространстве возникают максимумы и минимумы интенсивности света. Для того чтобы эта интерференционная картина была устойчивой какое-то время и ее можно было записать, эти два пучка должны обладать определенными свойствами - они должны быть взаимно когерентными (т.е. у них должна быть одна и та же длина волны) и, кроме этого, за время регистрации должна быть одна фаза колебаний, то есть колебания светового поля должны быть синхронными. Практически это достигается тем, что два пучка образуются делением пучка одного источника излучения, излучающего строго одну длину волны (лазер со специальными параметрами излучения). Так как длина волны света достаточно мала, то расстояние между интерференционными максимумами и минимумами тоже

мало - порядка 1 мкм, поэтому для регистрации применяются специальные мелкозернистые фотоэмульсии.

Термин «голография» (Holography) образован сочетанием слов «полный, весь» и «рисовать, записывать», так что несколько свободный перевод термина может звучать как «наиболее полная запись образа объекта». В наиболее общем виде идея голографии может быть сформулирована так - если каким-то способом точно зафиксировать структуру светового поля, исходящего от объекта, записать ее на какой-либо носитель, а затем восстановить это поле с достаточной точностью, то наблюдатель не сможет различить, наблюдает ли он сам объект или же его имитацию. В более узком смысле термин «голография» обозначает технологию (точнее, пакет технологий, объединенных общей идеей) такой «полной» записи волнового поля.

Лазерный луч расщепляется на два пучка, расширяется оптикой, чтобы осветить весь объект целиком. Один пучок, называемый «объектным», направляется на объект, освещая его так, чтобы отраженное от него излучение попадало на фотопластинку. Вторым пучком, который называют «опорным», направляется прямо на фотопластинку. Эти два пучка будут интерферировать на поверхности фотопластинки, и при рассмотрении под микроскопом поверхность пластинки будет покрыта множеством интерференционных линий, колец. Это и есть запись структуры волнового поля, отраженного объектом.

Полученная голограмма носит название пропускающей голограммы. Если теперь эту голограмму осветить пучком лазерного света (на просвет, отсюда и название - пропускающая), то можно будет увидеть восстановленное изображение, расположенное точно в том месте, где ранее, при съемке, находился объект. Происходит это в результате того, что лазерный свет, проходя через фотопластинку с записанной ранее структурой светового поля, приобретает все свойства светового потока, который ранее, при записи, отражался объектом.