

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ



МАУП

Е. В. Рыльцев

ФИЗИКА

Оптика

Учебное пособие
для студентов-иностранцев
подготовительного отделения

МАУП

Киев
ДП «Издательский дом «Персонал»
2008

ББК 22.34я7

Р95

Рецензенты: *В. Е. Погорелов*, д-р физ.-мат. наук, проф.

Г. О. Пучковская, д-р физ.-мат. наук

Т. И. Довгодько, ст. преподаватель

Одобрено Учёным советом Межрегиональной Академии управления персоналом (протокол № 8 от 31.10.07)

Рыльцев, Е. В.

Р95 **Физика. Оптика: Учеб. пособие для студ.-иностранцев подгот. отд-ния / Е. В. Рыльцев. — К. : ДП «Изд. дом «Персонал», 2008. — 32 с.: ил. — Библиогр.: с. 30.**

ISBN 978-966-608-868-3

В предлагаемом учебном пособии сжато и лаконично изложен учебный материал курса “Оптика” как раздела общей физики, изучающийся студентами-иностранцами на подготовительных факультетах высших учебных заведений Украины. Особое внимание автор уделяет рассмотрению волновых и корпускулярных свойств света, отражающих его дуалистическую природу. Кратко освещены такие разделы, как лучевая оптика, энергетика световых потоков, поляризация света, практическое использование оптики и теория относительности. Изложенный материал носит ознакомительный характер, однако рассчитан на подготовленного слушателя, освоившего традиционно первые разделы физики.

Текст адаптирован к соответствующей учебной программе изучения русского языка.

ББК 22.34я7

ISBN 978-966-608-868-3

© Е. В. Рыльцев, 2008

© Межрегиональная Академия
управления персоналом (МАУП), 2008

© ДП «Издательский дом «Персонал», 2008

ВВЕДЕНИЕ

Свет — это физическое явление, состоящее в возникновении и распространении переменного электромагнитного поля. В основе существования такого поля лежит электромагнитное колебание. Его частота — это частота изменения поля во времени, с которой оно (поле) распространяется (излучается) в пространстве. Таким образом, свет — это электромагнитное излучение. Но излучение определённой частоты (длины волны). Особенность его состоит в том, что оно (излучение) воспринимается органами зрения живых организмов, в частности человека. Человеческий глаз фиксирует электромагнитное излучение в диапазоне длин волн примерно $(4 \div 7) \cdot 10^{-7}$ м. Именно такое излучение исторически и получило название света, или даже видимого света. В отличие от видимого говорят и о невидимом свете: инфракрасном и ультрафиолетовом. Длина волны инфракрасного “света” больше, чем $7 \cdot 10^{-7}$ м, а ультрафиолетового меньше, чем $4 \cdot 10^{-7}$ м. В диапазоне длин волн видимого света, то есть от $4 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-7}$ м, человеческий глаз различает электромагнитное излучение по цветовым ощущениям в зависимости от длины волны излучения. Говорят о красном цвете в случае длины волны близкой к $7 \cdot 10^{-7}$ м. В сторону уменьшения длины волны излучения говорят об оранжевом, желтом, зелёном, голубом, синем и фиолетовом цветах. Ультрафиолетовый, как и инфракрасный “цвета”, глазом человека не регистрируются, однако они воспринимаются другими рецепторами человеческого организма. Так, инфракрасный “цвет” — это “тепло”, а ультрафиолетовый — это “загар”. Увеличение длины волны излучения от инфракрасного диапазона приводит к радиоизлучению, а уменьшение длины волны от ультрафиолетового излучения приводит к рентгеновскому и гамма-излучениям.

Живые организмы могут существенно отличаться друг от друга по своему “субъективному” восприятию различных частотных диапазонов электромагнитного излучения. В зависимости от длины волны электромагнитное излучение оказывает различное влияние и на микросистемы атомно-молекулярного уровня, а также на образуемые ими макросистемы неживого мира.

Электромагнитное излучение имеет двойственную природу. В нём проявляются и свойства волнового процесса, и свойства потока частиц (корпускул). Причём, какое свойство доминирует при данном излучении зависит от его длины волны или частоты соответствующего колебания. Чем больше частота колебания (меньше длина волны), тем сильнее проявляются корпускулярные особенности излучения, и наоборот, чем меньше частота колебания (больше длина волны), тем отчётливее проявляются характеристики волнового процесса. Так, гамма-излучение (большая частота или малая длина волны) несёт на себе ярко выраженные корпускулярные свойства по сравнению с излучением в радиодиапазоне (малые частоты или длинные волны).

С электромагнитным излучением, а значит, и со светом связан перенос энергии. В вакууме такой процесс происходит со скоростью 300000 км/сек. Это и есть скорость света.

Раздел физики, который рассматривает природу света и законы его распространения, называется **оптикой**. Он состоит из двух основных частей, в которых световые явления рассматриваются как с позиций волновых процессов (волновая оптика), так и с точки зрения корпускулярных представлений (квантовая теория света). Некоторые общие для этих двух главных разделов оптики вопросы рассматриваются в разделе “Геометрическая (лучевая) оптика”.



I. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ (ЛУЧЕВАЯ) ОПТИКА

Основным понятием в этом разделе является понятие о световом луче. Луч света — это направление распространения светового излучения. Графически луч света изображается стрелкой, начало которой помещается на источнике света, а открытый её конец остриём указывает направление движения световой волны (или световой частицы). Понятие о световом луче основано на принципе прямолинейности распространения света в однородной (изотропной) среде. Это настолько фундаментальный принцип для жизни человека, что даже понятие о прямой линии (геометрия, физика, техника и т. д.) исходит из понятия о луче света.

Геометрическую, или лучевую, оптику тогда можно определить как раздел оптики, в котором изучаются законы распространения световой энергии в прозрачных (пропускающих свет) средах на основе представлений о световом луче. Эти законы справедливы при условии, если длина световой волны (размер световой частицы) намного меньше размеров препятствий, расположенных на пути распространения света и находящихся не очень далеко от места наблюдения (детектирования) светового луча.

I.1. КАК ВПЕРВЫЕ БЫЛА ИЗМЕРЕНА СКОРОСТЬ СВЕТА

Впервые это сделал в 1676 г. датский астроном Рёмер. Его успех объяснялся тем, что он использовал очень большие, космические расстояния, а именно расстояния между планетами Солнечной системы (рис. 1).

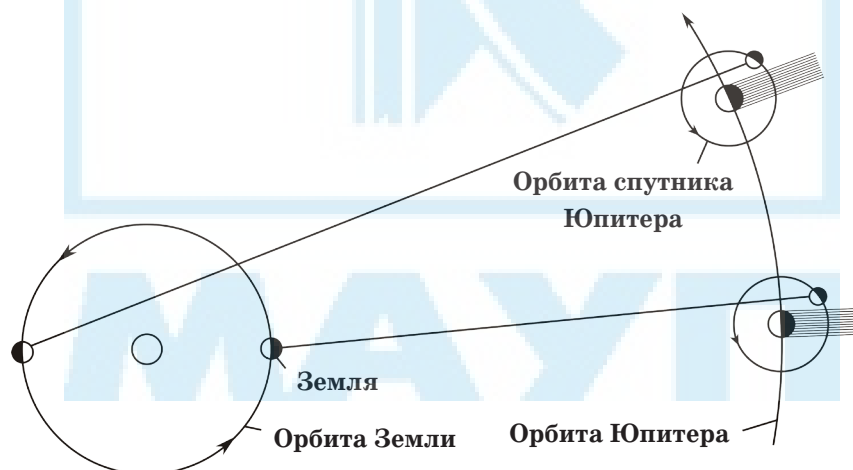


Рис. 1. Иллюстрация к способу измерения скорости света Рёмером. (Объяснение в тексте.)

Рёмер наблюдал затмение спутника Юпитера в двух различных взаимных положениях Земли и Юпитера на их планетарных орбитах. Одно из положений Земли и Юпитера было таким, когда расстояние между ними минимально. Другое положение — это такое, когда Земля находится в противоположной относи-

тельно Солнца точке своей орбиты. Так как Юпитер движется по своей орбите медленнее Земли, он очень мало изменяет своё положение на своей орбите за полуоборот Земли вокруг Солнца. Таким образом, Рёмер мог наблюдать затмение спутника Юпитера на расстояниях, отличающихся друг от друга практически на диаметр земной орбиты, т. е. примерно на $3 \cdot 10^8$ км. Оказалось, что наблюдавшиеся события — затмения спутника Юпитера — отличались по времени друг от друга примерно на 22 минуты. То есть, свет проходил расстояние $3 \cdot 10^8$ км за время, приблизительно равное 22 мин. Отсюда Рёмер вычислил скорость света как отношение расстояния ко времени и получил цифру, близкую к 230000 км/с. Дальнейшие уточнения позволили считать скорость света равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Такая огромная величина скорости света объясняет, почему были неудачными все эксперименты, посвящённые измерению скорости света при сравнительно небольших “земных” расстояниях. В этом случае наблюдатель попросту не успевал измерить время прохождения светом этих расстояний.

1.2. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Когда свет падает на какое-нибудь тело, то одна часть его отражается от поверхности тела, а другая часть может проникать внутрь тела (преломляться) и распространяться в нём дальше. При этом направление движения света изменяется. Кроме того в обоих этих процессах — отражения и преломления — энергия светового потока уменьшается в результате взаимодействия света с веществом и преобразования световой энергии, например, в тепловую.

Относительная величина энергии отражённого и преломлённого света зависит от: особенностей вещества, из которого состоит тело; частотного состава падающего света; угла падения светового луча на поверхность тела и состояния поверхности тела. От особенностей вещества тела зависит также поглощение световой энергии телом на определённых частотах.

Таким образом, при падении света на тело (при взаимодействии света с телом) наблюдаются явления отражения, преломления и поглощения света телом.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Явление отражения света от идеально плоской поверхности показано на рис. 2. Здесь MN — граница раздела двух сред (двух тел). На рисунке показан её след от перпендикулярного сечения “границы” плоскостью рисунка. В одной из сред луч света L_1 “падает” в точку O на границе раздела и отражается в виде луча L_2 . PO — перпендикуляр, восстановленный в точке O к границе MN. Углы α и γ — это углы падения и отражения световых лучей соответственно.

Законы отражения света:

1. Отражённый луч света лежит в той же плоскости, в которой лежит падающий луч и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения луча.
2. Угол отражения света равен углу его падения.
3. Падающий и отражённый лучи взаимнообратимы.

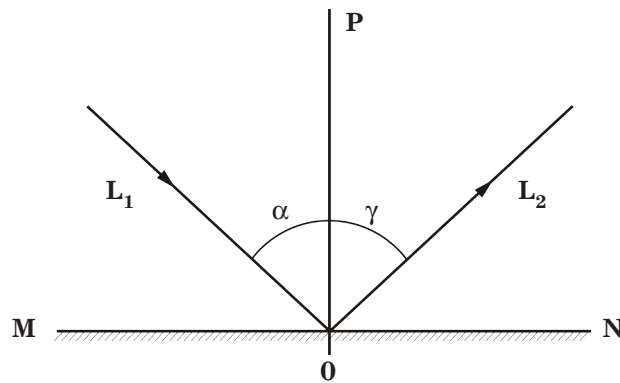


Рис. 2. Зеркальное отражение света от плоской поверхности. (Объяснение в тексте.)

Все окружающие нас тела, которые не излучают свет, мы видим в свете отражённом от их поверхностей. Отражение может быть диффузным или зеркальным. Диффузное отражение порождается шероховатой поверхностью. Шероховатая поверхность — это поверхность, которая имеет неровности бóльшие по размерам, чем длина волны падающего света. При диффузном отражении лучи света распространяются в разных направлениях. Тогда мы видим предмет со всех сторон, например лист бумаги.

Зеркальное отражение наблюдается в том случае, если неровности на поверхности тела меньше по размерам длины волны падающего света. Например, хорошо отполированные плоские поверхности твёрдых материалов (стекло, металл и др.). От таких поверхностей свет отражается только в одном направлении. Именно в этом случае мы имеем плоское зеркало. Плоское зеркало — это приспособление, которое используется для получения мнимого изображения предметов. На рис. 3 показано, как возникает такое изображение.

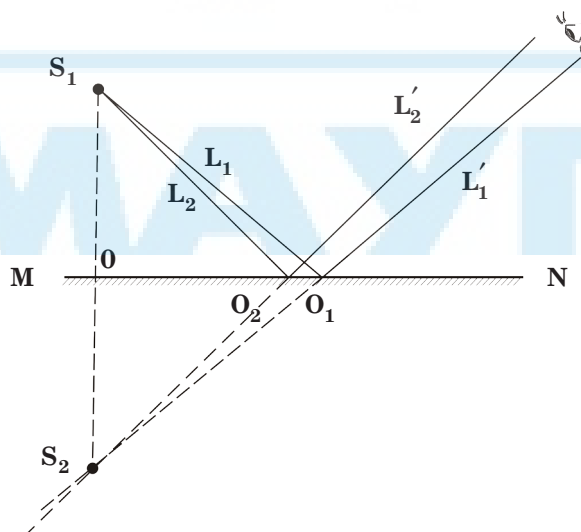


Рис. 3. Построение мнимого изображения в плоском зеркале. (Объяснение в тексте.)

На этом рисунке MN — плоское зеркало (вернее, след от его перпендикулярного сечения плоскостью рисунка), S_1 — источник света. Из всех лучей, выходящих из S_1 , выберем два — L_1 и L_2 . Они отражаются в точках O_1 и O_2 от зеркала и в виде отражённых лучей L'_1 и L'_2 попадают в детектор (глаз). То же происходит и с другими лучами в световом пучке, ограниченном лучами L_1 (L'_1) и L_2 (L'_2). Глаз фиксирует точку S_1 в положении S_2 на пересечении “продолжения” лучей L'_1 и L'_2 . Изображение S_2 мнимое: наблюдателю лишь кажется, что источник света находится в этом месте (S_2). Точки S_1 и S_2 симметричны относительно зеркальной поверхности MN . Зная, как строится изображение светящейся точки в плоском зеркале, можно построить мнимое изображение любого предмета как множества точек.

Плоскость — это частный случай отражающей поверхности. В практике широко используются сферические отражающие поверхности: выпуклые и вогнутые сферические зеркала.

Сферическое зеркало — это тщательно отполированная поверхность шарового сегмента (стекло, металл). Центр шаровой поверхности C (рис. 4) называется оптическим центром зеркала, вершина шарового сегмента O — полюсом зеркала. Всякая прямая, проходящая через поверхность шарового сегмента и точку C , называется оптической осью зеркала, а прямая OC — главной оптической осью зеркала. Угол α , образованный двумя радиусами, лежащими в одной плоскости с главной оптической осью и проведёнными к краям зеркала, называется угловым отверстием зеркала, или апертурой. Лучи, идущие по главной оптической оси, называются центральными, или осевыми, лучами.

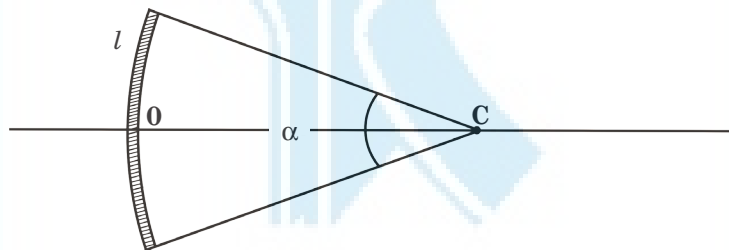


Рис. 4. Схематическое изображение сферического зеркала l . (Здесь как и на других рисунках представлено сечение зеркала плоскостью рисунка по главной оптической оси. (Объяснение в тексте.)

Если на сферическое вогнутое зеркало (отражающая поверхность — внутренняя сторона шарового сегмента) пустить пучок лучей параллельно главной оптической оси, то они, отразившись от поверхности зеркала, соберутся в небольшой области пространства (точка F), лежащей на оси примерно на середине радиуса $R = OC$ сферической поверхности (рис. 5). Точка F называется фокусом зеркала, а расстояние $OF = F = R/2$ называется фокусным расстоянием зеркала. Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через фокус зеркала, называется фокальной плоскостью. Как следует из рис. 5, в фокусе F концентрируется (собирается) световая энергия. Поэтому вогнутые сферические зеркала называются собирающими.

Если поместить источник света в фокусе зеркала, то, в соответствии с третьим законом отражения, получим параллельный пучок световых лучей (параллель-

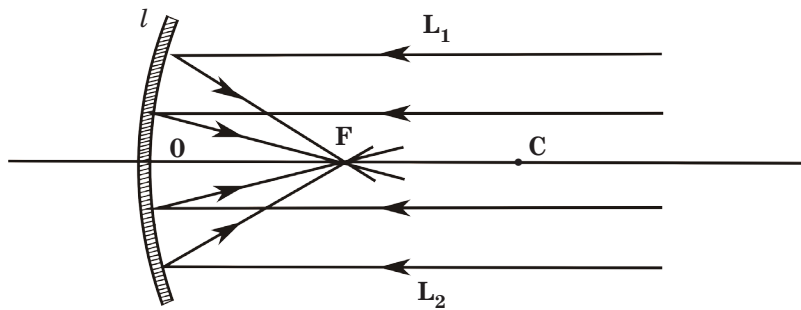


Рис. 5. Отражение от сферического вогнутого зеркала l пучка лучей $L_1 \div L_2$, параллельных главной оптической оси OC зеркала. (Объяснение в тексте.)

ный пучок света). Это обстоятельство используется при конструировании осветительных приборов (прожекторов, фар и др.), дающих нерассеивающийся пучок света на дальние расстояния.

Способы построения изображения предмета и ход лучей при использовании вогнутого сферического зеркала видны на рис. 6.

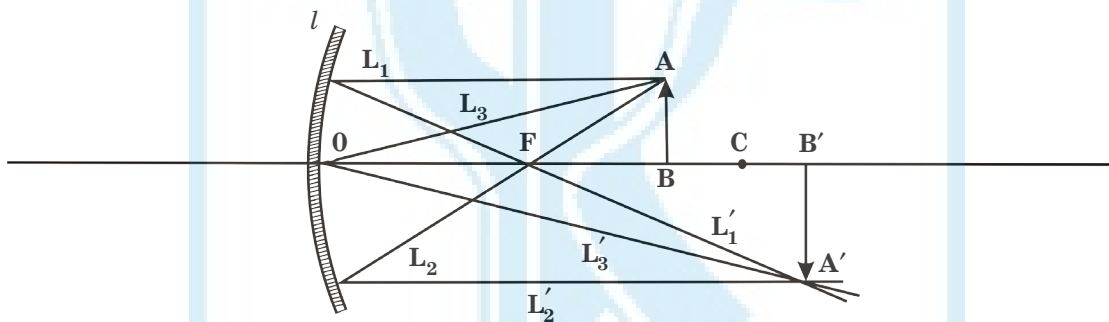


Рис. 6. Построение изображения $A'B'$ предмета AB от сферического вогнутого зеркала l .

Из точки A на зеркало падают лучи: L_1 параллельно главной оптической оси OC зеркала и, отражаясь, (L_1') проходит через фокус F зеркала; L_2 — проходит через фокус F зеркала и отражается (L_2') параллельно главной оптической оси OC зеркала; L_3 — проходит к полюсу O зеркала и, отразившись, (L_3') проходит в точку A' изображения ($\angle AOB = \angle BOA'$). Точка A' — место пересечения лучей, вышедших из A . Для однозначного нахождения точки A' достаточно только двух лучей, например, L_1 и L_2 , L_1 и L_3 или L_3 и L_2 . OF — фокусное расстояние (F) зеркала; C — оптический центр зеркала.

Здесь точка A стрелки AB даёт изображение в точке A' на пересечении лучей L_1' и L_2' . Изображение точки B размещается на оптической оси в точке B' . Изображение действительное (т. е. его можно спроектировать на экран), увеличенное, обратное (т. е. перевернутое относительно положения стрелки AB). Это случай размещения предмета между центром C зеркала и его фокусом F . Изменяя положение предмета вдоль главной оптической оси, можно получать различные по характеристикам изображения: действительные, мнимые, увеличенные, уменьшенные, прямые и обратные.

Выпуклое сферическое (рассеивающее) зеркало (отражающая поверхность — внешняя сторона шарового сегмента) (рис. 7) при отражении всегда даёт расходящийся (рассеивающийся) пучок света (отражённые лучи $L'_1 \div L'_3$). Оно имеет мнимый фокус и всегда даёт мнимое уменьшенное прямое изображение. Такие зеркала используются, в частности, в автомобилях как боковые зеркала “заднего” наблюдения. Способы построения изображения от такого зеркала показаны на рис. 7. Изображение A' точки A предмета AB получается в точке пересечения “продолжения” отражённых лучей L'_1, L'_2, L'_3 . Изображение B' точки B находится на главной оптической оси.

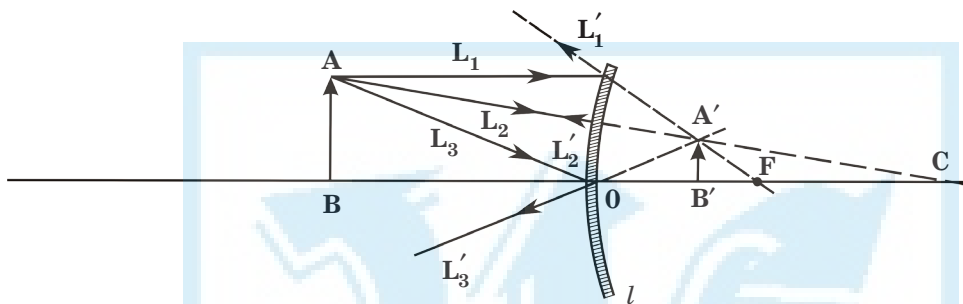


Рис. 7. Построение изображения $A'B'$ предмета AB в сферическом выпуклом зеркале l .

Из точки A на зеркало падают лучи: L_1 — параллельно главной оптической оси OC , и отражается (L'_1) от поверхности зеркала так, что “продолжение отражённого луча” пересекает оптическую ось в точке мнимого фокуса F зеркала; L_2 — нормально поверхности зеркала так, что “продолжение” отражённого луча (L'_2) пересекает оптическую ось в оптическом центре C зеркала; L_3 — проходит к полюсу зеркала и отражается (L'_3) так, что $\angle AOB$ его падения равен углу его отражения в точке O . “Продолжение” луча L'_3 пересекается с “продолжениями” лучей L'_1 и L'_2 в точке A' . Для однозначного нахождения точки A' достаточно двух лучей L_1 и L_2 или L_1 и L_3 , или L_2 и L_3 .

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

На рис. 8 показан ход лучей в двух прозрачных средах при падении света на границу их раздела. При этом прозрачной средой является такая среда, которая не поглощает (или отражает) всё падающее на неё излучение, и свет в определённой мере через неё проходит.

На рис. 8 L и L' — соответственно падающий и отражённый лучи находятся в первой среде. Часть световой энергии переходит из первой во вторую среду (преломляется) и распространяется в направлении луча L'' . PO — перпендикуляр к границе MN раздела сред в точке O падения луча L . Луч L'' называется преломлённым лучом. Угол β называется углом преломления.

На основании опытных данных установлены следующие **законы преломления света**:

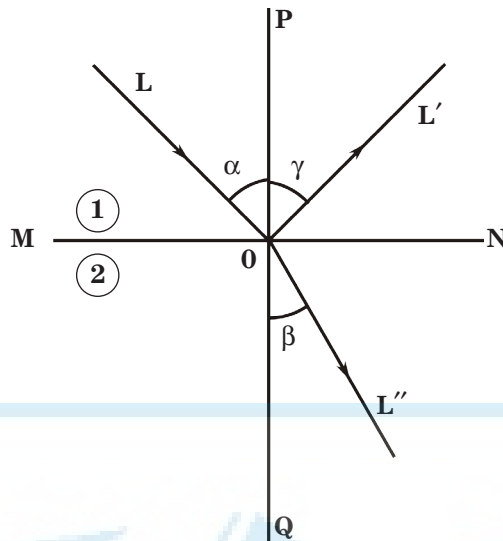


Рис. 8. Иллюстрация к законам отражения (см. также рис. 2.) и преломления света: 1 — “первая” среда оптически менее плотная, чем “вторая” — 2. (Объяснение в тексте.)

1. Преломлённый луч лежит в той же плоскости, в которой лежат падающий луч и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения луча.

2. При всех изменениях углов падения и преломления отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данных двух сред есть величина постоянная. Она называется показателем преломления (n) света, второй среды относительно первой.

3. Луч падающий и луч преломлённый взаимнообратимы.

Математически второй закон преломления записывается так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

При $n > 1$ ($\angle \alpha > \angle \beta$) вторая среда называется оптически более плотной, чем первая. Если первая среда вакуум, то показатель преломления второй среды называется абсолютным. Практически показатель преломления определяется относительно воздуха. Чтобы получить абсолютный показатель, его нужно умножить на 1,0003 — показатель преломления воздуха относительно вакуума.

Величина n зависит от частоты падающего света. Чем больше частота, тем больше показатель преломления. Вещество, которое имеет больший показатель преломления, называется оптически более плотным. При переходе в оптически более плотную среду синие лучи больше отклоняются ($\angle \beta$ уменьшается) от первоначального направления падающих лучей света, чем красные. Такое явление называется дисперсией света.

Показатель преломления является молекулярной характеристикой вещества. Его значения табулированы и помещены в справочниках. Для красного света, например, показатели преломления воды, кварца, хлористого натрия и алмаза относительно воздуха составляют 1,33; 1,46; 1,54 и 2,40 соответственно. Очевид-

но, что в приведенном выше перечне веществ алмаз является наиболее оптически плотным веществом.

Понятие показателя преломления имеет глубокий физический смысл. А именно, абсолютный показатель преломления указывает, во сколько раз скорость света в вакууме (c) больше скорости света (v) в данном веществе, т. е. $n = c/v$. Этот вывод следует из волновой теории света.

Если увеличивать угол β как угол падения света из второй среды (более оптически плотной) в первую (рис. 8), то в соответствии с третьим законом преломления наступит такой момент, когда угол α станет равным 90° , и преломлённый луч пойдёт по границе раздела сред. При дальнейшем увеличении угла β весь световой поток отразится от границы MN раздела сред и останется во второй среде. Такое явление называется полным внутренним отражением. Наименьший угол падения, при котором наступает полное внутреннее отражение, называется предельным углом полного внутреннего отражения.

Таким образом, полное внутреннее отражение наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную. Это явление широко используется при конструировании различных оптических приборов: биноклей, перископов, световодов и др.

Явление преломления света лежит в основе действия широко известного оптического приспособления — линзы — главного элемента оптических систем с “преломляющей” оптикой. Хрусталик глаза — один из важных элементов в органе зрения животных — также исполняет роль линзы.

Линзы — это прозрачные для света тела, ограниченные с двух сторон поверхностями определённой формы. В ряде случаев одна из них может быть плоской. Своё предназначение линза выполняет, когда через неё пропускают свет. В соответствии с формой их трёхмерных поверхностей линзы бывают сферические, цилиндрические и др. Здесь рассматриваются (рис. 9) только сферические линзы.

Они могут быть двояковыпуклые (1) и плосковыпуклые (2), вогнутовыпуклые (3), двояковогнутые (4), плосковогнутые (5) и выпукловогнутые (6).

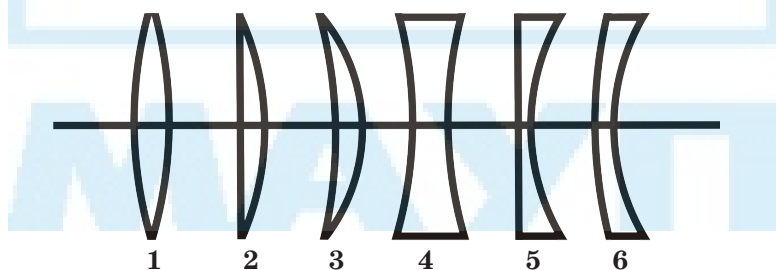


Рис. 9. Различные типы линз. (Здесь, как и на других рисунках, изображены сечения линз плоскостью рисунка вдоль главных оптических осей; объяснение в тексте.)

В соответствии с этой классификацией ход световых лучей в линзе можно прогнозировать на основании правила прохождения лучей через трёхгранную призму из прозрачного материала, например из стекла. Такая призма представлена на рис. 10 в виде её сечения — ABC плоскостью рисунка перпендикулярно боковым рёбрам призмы. Луч L_1 падает из воздушной среды на грань AB призмы

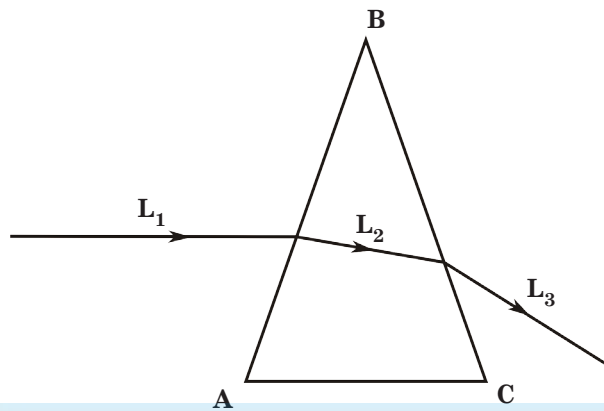


Рис. 10. Прохождение светового луча L_1 (L_2 , L_3) через трёхгранную призму ABC. (Объяснение в тексте.)

параллельно её грани (основанию) AC. Преломляясь в материале призмы, он в виде луча L_2 отклоняется к основанию призмы. Выйдя из неё через грань BC в виде луча L_3 , он ещё более отклоняется к основанию AC. Такой ход лучей легко доказать, пользуясь законами преломления, описанными выше, и принимая, что внешняя среда оптически менее плотная, чем вещество призмы.

Как видно, свет, проходя через трёхгранную призму, отклоняется к её основанию.

Представим двояковыпуклую линзу (рис. 9.1) приближённо как две трёхгранные призмы, соединённые своими основаниями. Такая линза будет собирать прошедший через неё свет к своей “средине”, т. е. к линии, проходящей вдоль оснований двух соединённых призм. Если же свет пройдёт через, например, двояковогнутую линзу, в которой “призмы” соединены своими вершинами (рис. 9.4), то он будет отклоняться к краям этой линзы, т. е. рассеиваться. Таким образом, линзы можно разделить на два вида:

- собирающие линзы — это выпуклые линзы; толщина материала в их середине больше, чем по краям;
- рассеивающие линзы — это вогнутые линзы; толщина материала в их середине меньше, чем по краям.

Ход лучей в линзах можно рассмотреть на примерах “тонких” двояковыпуклой и двояковогнутой линз (рис. 11). “Тонкими” называются линзы, толщина которых значительно меньше радиусов кривизны их поверхностей. Толщиной линзы называется расстояние между центрами сферических поверхностей линзы. Точка на середине этого “расстояния” называется оптическим центром линзы. Прямая линия, проходящая через центры сферических преломляющих поверхностей линзы, называется главной оптической осью линзы. Все другие прямые, проходящие через оптический центр линзы, называются её побочными оптическими осями.

Если на двояковыпуклую линзу направить пучок световых лучей, параллельных главной оптической оси (рис. 11, а), то все они, пройдя через линзу, соберутся в одной точке F — фокусе линзы. На экране в этом месте наблюдается яркая

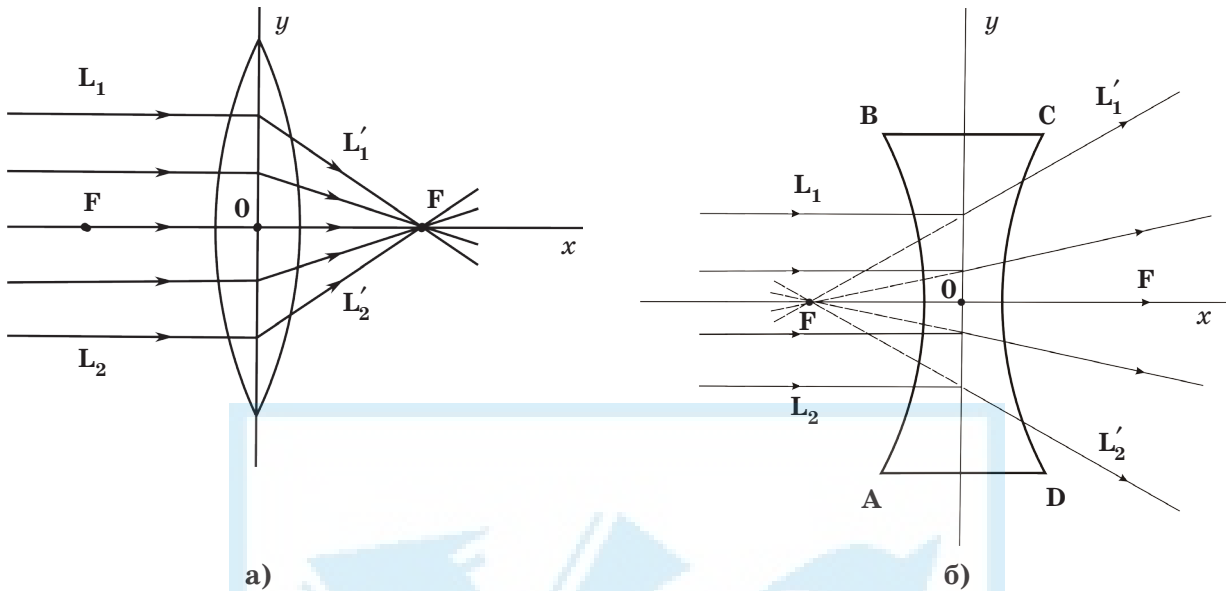


Рис. 11. Ход световых лучей в “тонких” линзах: *а*) — двояковыпуклой и *б*) — двояковогнутой (ABCD): *О* — оптические центры линз; *F* — фокусы линз; *ОХ* — главные оптические оси линз; *OF = F* — фокусные расстояния линз; *ОУ* — след плоскости, секущей линзы перпендикулярно оси *ОХ* через точку *О*; *L_{1;2}* — граничные падающие на линзы лучи, параллельные оси *ОХ*; *L_{1;2}'* — те же лучи, прошедшие через линзы.

точка — действительный фокус. Расстояние между оптическим центром линзы и её фокусом называется фокусным расстоянием *F* линзы. Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через фокус линзы, называется фокальной плоскостью линзы. На ней фокусируются параллельные пучки света, идущие также и вдоль побочных оптических осей. Если параллельный пучок световых лучей попадает на двояковогнутую линзу (рис. 11, б), то он выходит из неё расходящимся пучком. Продолжения этих расходящихся лучей в сторону, обратную их распространению, пересекаются в фокусе *F* вогнутой линзы. В отличие от действительного фокуса выпуклой линзы этот фокус мнимый. Величина $D=1/F$ называется оптической силой линзы. При $F=1$ м сила линзы равняется одной диоптрии. Теория даёт формулу, связывающую величину *D* с параметрами линзы:

$$\frac{1}{F} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где *n* — показатель преломления материала линзы; *R₁* и *R₂* — радиусы кривизны сферических поверхностей линзы. Если поверхности “выпуклые”, то *R* положительны, если “вогнутые” — отрицательны.

Принципы формирования изображения выпуклой линзой следуют из рис. 12. А именно, действительное изображение *A'* конца стрелки *A* получим на пересечении центрального луча *C* (идушего вдоль побочной оптической оси), проходя-

щего без преломления через оптический центр O линзы, и луча L' . Последний возникает как результат преломления в линзе луча L , падающего на линзу параллельно главной оптической оси. Луч L' проходит, таким образом, через фокус F линзы и пересекается с лучом C в точке A' — действительном изображении конца A стрелки AB . Все иные лучи, выходящие из точки A , также пересекутся в точке A' изображения. Остальные точки изображения $A'B'$ стрелки AB можно получить тем же способом, что и в случае изображения A' её конца A .

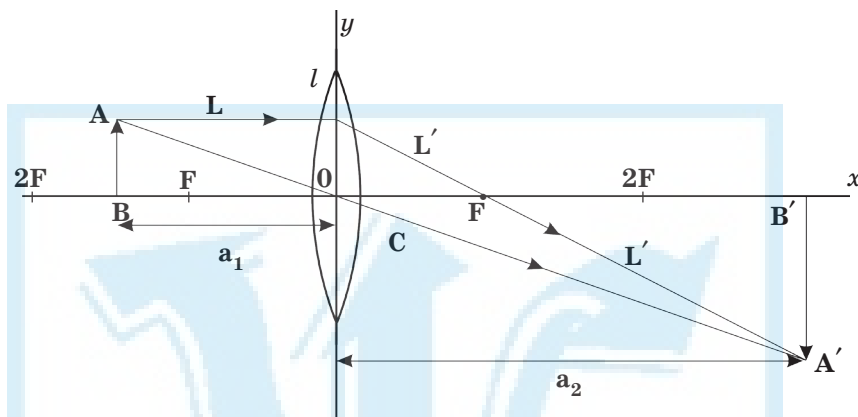


Рис. 12. Формирование двояковыпуклой линзой l действительного увеличенного обратного изображения $A'B'$ предмета AB , находящегося на главной оптической оси OX линзы: a_1 и a_2 — расстояния предмета и его изображения соответственно от оптического центра O линзы; $2F > a_1 > F$; $a_2 > 2F$; L (L') и C — лучи, исходящие из точки A предмета AB ; F — фокус линзы; фокусное расстояние линзы $OF = F$; $2F$ — двойное фокусное расстояние линзы; OY — след плоскости, секущей линзу перпендикулярно оси OX через точку O .

В результате получим действительное (можно спроектировать на экран) обратное изображение. Оно увеличенное, если предмет (стрелка) находится на расстоянии $2F > a_1 > F$ или уменьшенное при $a_1 > 2F$. Соотношение между a_1 , a_2 и F определяется формулой линзы:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{F}.$$

В практике выпуклая линза используется для наблюдения увеличенного изображения малых предметов. Тогда предмет помещается от линзы на расстоянии меньшем фокусного расстояния, т. е. $a_1 < F$. Это показано на рис. 13, из которого следует, что изображение конца стрелки A наблюдается как мнимое на пересечении “обратного” хода лучей L'_1 и L'_2 . Так же проявляются изображения и остальных точек предмета A . В результате, наблюдается мнимое увеличенное прямое изображение A' . В этом случае линза называется лупой. Эффект лупы лежит в основе конструкции микроскопа.

Отношение размера изображения A' (рис. 13) к размеру наблюдаемого предмета A называется увеличением лупы (микроскопа).

При конструировании оптических приборов (микроскопов, зрительных труб, осветительной и проекционной аппаратуры) широко используются также и вогнутые линзы, дающие при любом положении (относительно линзы) предмета только его мнимые изображения.

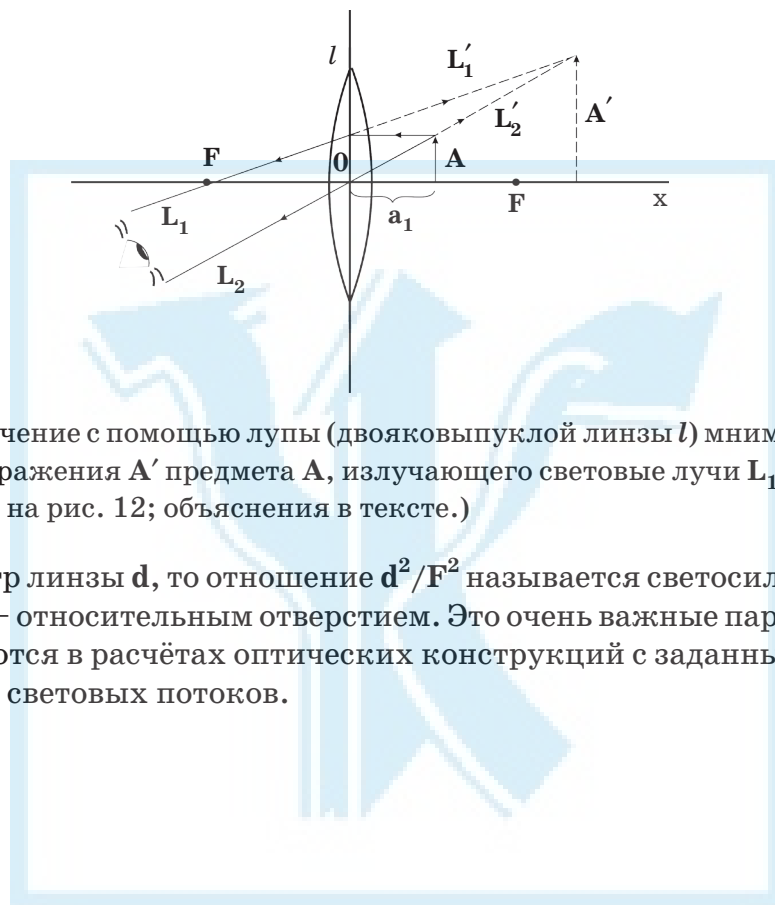


Рис. 13. Получение с помощью лупы (двояковыпуклой линзы l) мнимого увеличенного прямого изображения A' предмета A , излучающего световые лучи L_1 и L_2 . (Обозначения те же, что и на рис. 12; объяснения в тексте.)

Если диаметр линзы d , то отношение d^2/F^2 называется светосилой линзы, а отношение d/F — относительным отверстием. Это очень важные параметры линзы. Они используются в расчётах оптических конструкций с заданными параметрами энергии световых потоков.

МАУП

II. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОВОГО ПОТОКА

Энергия света объективно оценивается фотометрическими методами. Если на какую-либо площадку в течение времени t падает свет, энергия которого равна E , то величина $\Phi = E/t$ называется световым потоком. Вся же энергия, излучаемая источником света за единицу времени по всем направлениям, называется полным световым потоком (Φ_0) источника. Световой поток выражает собой величину мощности светового излучения.

На практике в инженерных расчётах очень важным оказывается понятие точечного источника света. Точечным источником света называется источник, излучающий свет по всем направлениям равномерно и размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие. В реальности всегда имеют дело с протяжёнными источниками света. Их можно рассматривать как совокупность светящихся точек. И чем меньше размеры светящегося тела в сравнении с расстоянием, на котором оно наблюдается, тем с большей достоверностью можно принять его за светящуюся точку (точечный источник света).

Силой (интенсивностью) света I источника называется величина, измеряемая отношением светового потока Φ к величине телесного угла ω , в котором этот поток распространяется, т. е. $I = \Phi/\omega$.

Важной светотехнической величиной, имеющей большое значение в инженерных расчётах, является освещённость Ω . Эта величина определяется отношением светового потока Φ , падающего на какую-либо поверхность, к величине площади S этой поверхности: $\Omega = \Phi/S$.

Хотя основной светотехнической величиной является световой поток, на практике в качестве основной единицы принята сила света. По международным стандартам в качестве единицы силы света введена свеча. Свеча — это часть силы света эталонной лампы накаливания особой конструкции, который распространяется в строго определённом направлении. Световой поток измеряется в люменах (ЛМ). Люмен — это световой поток, излучаемый точечным источником света в 1 свечу внутри телесного угла в 1 стеррадиан. Тогда за единицу освещённости принимается 1 люкс (ЛК) — освещённость, создаваемая равномерно распределённым световым потоком в 1 ЛМ на поверхности в 1 м^2 , нормальной к световому потоку.

Освещённость определяется двумя законами.

1. Освещённость поверхности световыми лучами, падающими на неё перпендикулярно, прямо пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния от него до освещаемой поверхности.

2. Освещённость поверхности пропорциональна косинусу угла падения лучей света на эту поверхность.

III. ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА

Обычный в человеческом восприятии волновой процесс имеет ряд привычных, легко наблюдаемых особенностей. Например, сравнительно небольшая скала в море не является препятствием для штормовых волн, и значит, за ней нельзя спрятаться во время шторма. Это потому, что волны огибают препятствие, сравнимое по своим размерам с их длиной (волны дифрагируют), и, таким образом, скала не даёт “тени”. Подобным образом ведут себя звуковые и радиоволны.

Сравнительно легко также наблюдать, как волновые процессы усиливают или гасят друг друга (интерferируют). Если встречаются однофазные волны близких частот, то их амплитуды, направленные в одну сторону, складываясь, усиливают “суммарное” колебание. Возникает так называемый резонанс (и “мост, по которому шагают в ногу солдаты, разрушается”!). Если же встречаются волны взаимно близкие только по частотам, но находящиеся в противофазе одна к другой, то их противоположно направленные амплитуды взаимно вычитаются, и колебание “гасится”. Примером таких эффектов может быть явление “биения”. Оно хорошо известно в акустике и радиотехнике и состоит в том, что интенсивность звукового или радиосигнала от двух или нескольких источников то усиливается со временем, то ослабевает в зависимости от условий интерференции звуковых или радиоволн.

Эффекты, указывающие на волновую природу света, наблюдаются и в оптических явлениях. Однако при этом возникают большие технические сложности, вызванные тем, что длина световых волн очень мала $\approx 10^{-7}$ м.

Основой представлений о волновой природе света, как и о волновой природе ряда других процессов, является принцип, сформулированный голландским и французским физиками Гюйгенсом и Френелем.

III.1. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА — ФРЕНЕЛЯ

На расстояниях от источника света, значительно превышающих размеры самого источника, распространяющееся световое излучение имеет форму сферы с центром на источнике излучения. Поверхность этой сферы называется световым или волновым фронтом. Физические причины распространения волнового фронта, сопровождающегося увеличением радиуса сферической световой поверхности, сформулированы в принципе Гюйгенса — Френеля (Г—Ф) и состоят в следующем: каждая точка среды, до которой дошло волновое возмущение, сама становится источником световых волн. Тогда, для того чтобы, зная положение волновой поверхности S_0 (рис. 14) в момент времени t , найти её положение в момент времени $t+\Delta t$, нужно каждую точку \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , \mathbf{d} волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам α , β , γ , δ , представляет собой волновую поверхность S_1 в следующий момент времени. Этот принцип объясняет процесс распространения волн любой природы. Причём, согласно принципу Г—Ф, вторичные волны распространяют-

ся только “вперёд”, т. е. от источника волнового процесса. Их распространение во всех других направлениях не происходит, так как в этих направлениях они гасят друг друга в результате интерференции. И лишь в направлении “вперёд” они, по той же причине, усиливают друг друга.

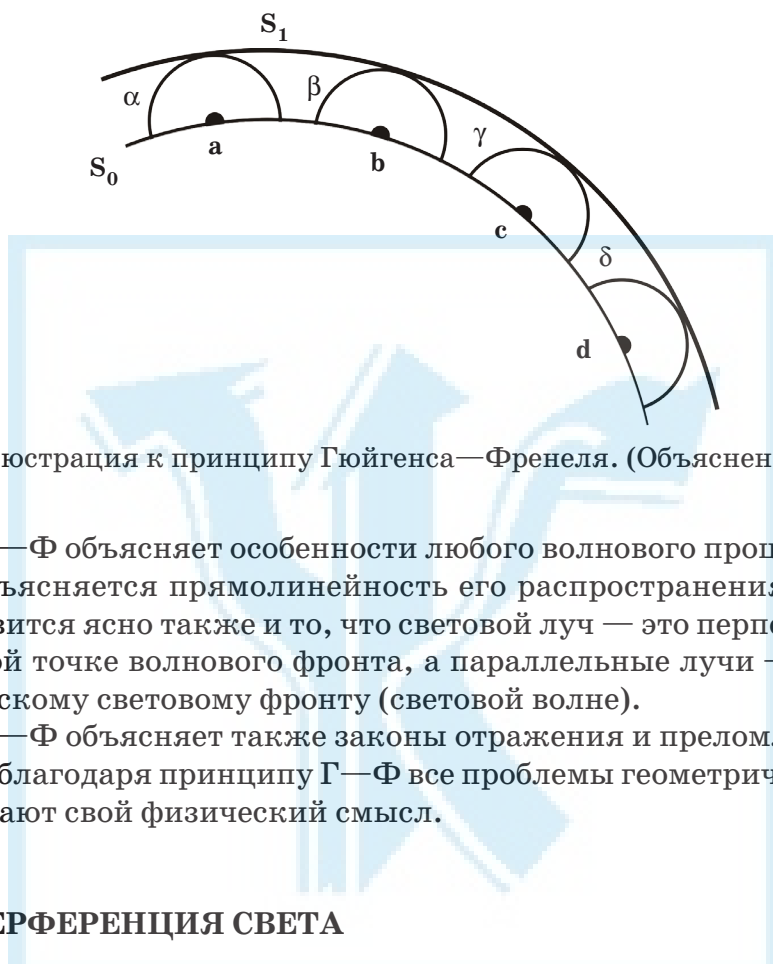


Рис. 14. Иллюстрация к принципу Гюйгенса—Френеля. (Объяснение в тексте.)

Принцип Г—Ф объясняет особенности любого волнового процесса. Для света, например, объясняется прямолинейность его распространения (в однородной среде). Становится ясно также и то, что световой луч — это перпендикуляр (нормаль) к данной точке волнового фронта, а параллельные лучи — это перпендикуляры к плоскому световому фронту (световой волне).

Принцип Г—Ф объясняет также законы отражения и преломления света. Таким образом, благодаря принципу Г—Ф все проблемы геометрической (лучевой) оптики получают свой физический смысл.

III.2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Собственно интерференционная картина — это чередование в пространстве, где встречаются как минимум два волновых потока, мест интенсивного колебания элементов среды, в которой распространяются волны, с местами, где эти элементы пребывают в относительном покое. Если свет является волновым процессом, то его интерференционная картина должна выглядеть как чередование тёмных и светлых пятен на экране, куда попадают минимум два световых пучка, обладающих особыми свойствами. Как и для любого волнового процесса, эти свойства определяются следующим соображением: устойчивая интерференционная картина фиксируется, если в место её наблюдения приходят, по крайней мере, две волны одинаковой частоты с постоянной во времени разностью фаз колебаний. Источники таких волн называются когерентными (согласованными, взаимосвязанными). Особые сложности, связанные с их созданием, возникают при постановке именно оптических экспериментов, посвящённых наблюдению интерференции света.

Действительно, реальные источники света — это, как правило, энергетически возбуждённые макроскопические тела. Они состоят из огромного числа ($\sim 10^{23}$)

несогласованно колеблющихся элементарных излучателей (атомов, молекул) с хаотичным распределением фаз колебаний. Ясно, что от таких источников в место наблюдения приходят волны с хаотичным набором разностей фаз. Тогда, даже если частоты этих колебаний (длины волн) одинаковы (монохроматическое излучение), интерференционная картина от них полностью теряет чёткость (размываются границы тёмных и светлых пятен), и наблюдать её невозможно.

В опытах, которые проводятся для наблюдения интерференции света, когерентные источники создаются с использованием одного точечного источника достаточной интенсивности и одного или двух его мнимых изображений. Принципиальные схемы таких опытов представлены на рис. 15. Здесь S_0 — действительный точечный источник света; S_1 и S_2 — его мнимые изображения; a_i ($i = 1; 2; 3$) — отражающие [рис. 15 (1+3)] или преломляющие [рис. 15 (3; 4)] поверхности; L_1 и L_2 — интерферирующие лучи; P — место наблюдения (экран) интерференционной картины.

На рис. 15 (3; 4) дополнительными объектами, способствующими наблюдению интерференции света, являются тонкий слой ($d \rightarrow 0$) прозрачного вещества [рис. 15 (3)] и тонкая ($d \rightarrow 0$) преломляющая бипризма [рис. 15 (4)] (изображены следы перпендикулярного сечения “объектов” плоскостью рисунка).

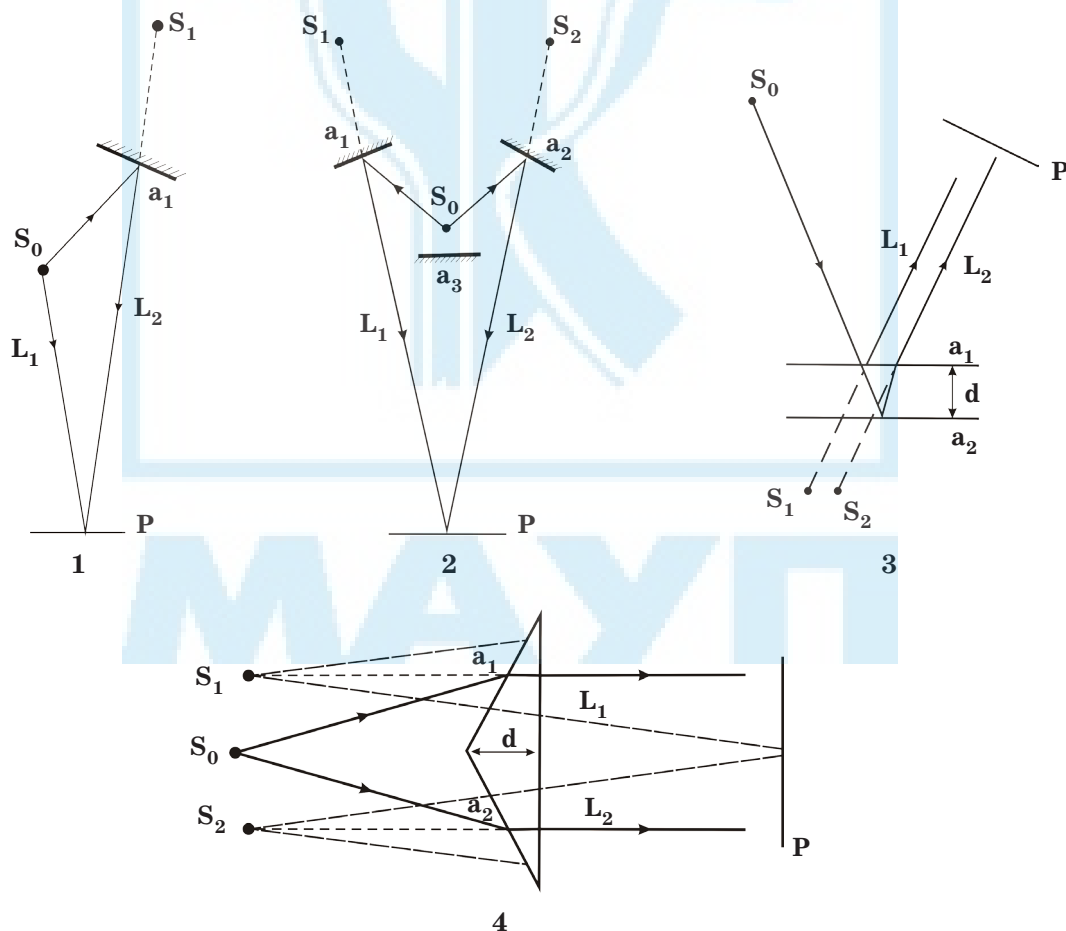


Рис. 15. Схема опытов наблюдения интерференции света. (Объяснение в тексте.)

Когерентность волн, полученных от этих источников, обеспечивается тем, что они являются частями одной и той же волны, исходящей из одного и того же источника. Такая волна искусственно разделяется, а образовавшиеся её части достигают точки наблюдения (экраны Р, рис. 15), распространяясь разными путями. Разница длин этих путей называется разностью хода. Если разность хода будет равна целому числу длин волн (чётному числу полуволн), то в точку наблюдения будут приходить группы когерентных световых волн с одной и той же фазой колебаний. В этом случае амплитуды колебаний в точке наблюдения будут направлены в одну сторону. Тогда результирующая амплитуда будет как минимум вдвое больше амплитуд каждой из интерферирующих волн, и в точке наблюдения окажется яркое пятно. Если же в точку наблюдения приходят волны, соответствующие противофазным колебаниям, то в этой точке будет тёмное пятно. Действительно, противофазные колебания имеют амплитуды, направленные во взаимно противоположные стороны. Тогда при взаимодействии световых волн векторная сумма их амплитуд будет равна нулю. Разница хода в таком случае равняется нечётному числу полуволн или полуцелому числу волн.

Наблюдающиеся тёмные пятна на экране в интерференционной картине света кажутся парадоксом. Действительно: свет + свет = темнота! Может показаться, что нарушается даже закон сохранения энергии. На самом деле парадокса нет. Появление тёмных пятен на экране — это результат волновой природы света, а “утрата” энергии в тёмных пятнах компенсируется увеличением энергии колебаний в светлых пятнах.

Если на экране Р (рис. 15) переходить в каком-либо направлении от одной точки к другой, то очевидно, что будут поочерёдно встречаться точки, куда приходят когерентные волны с разностью хода в чётное число полуволн, и точки, где встречаются когерентные волны с разностью хода, равной нечётному числу полуволн. Это и является причиной того, что интерференционная картина на экране от когерентных световых пучков представляет собой набор чередующихся светлых и тёмных пятен. Форма пятен определяется формой источника света. В случае щели — это чередующиеся продолговатые светлые и тёмные полосы, параллельные краю щели; в случае круглого отверстия — это замкнутые светлые и тёмные полосы-круги, опоясывающие друг друга.

III.3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракция световых пучков есть ещё одним свидетельством в пользу представлений о волновой природе света. Наблюдать дифракцию в оптике достаточно сложно. Это связано с теми же трудностями, что и при наблюдении интерференции света. А именно световую дифракционную картину можно наблюдать лишь от точечного источника света. То есть расстояние от места наблюдения (экрана) дифракционной картины до источника света должно намного превышать размеры источника. Действительно, в любом волновом процессе волны, дифрагируя, отклоняются на заметные углы от своего прямолинейного распространения только при условии, что они достаточно длинные. В случае же световых волн такое

отклонение можно заметить лишь на больших расстояниях от преграды, а значит и от источника света. Это ведёт к пониженной освещённости в месте наблюдения и необходимости использовать детектор света повышенной чувствительности. Можно упростить опыт и попытаться наблюдать дифракцию не на больших расстояниях от источника, но всё же от очень маленького источника и на преграде, сравнимой по размерам с длиной волны света. Предпочтительным в этом случае является красный цвет. Однако и в этом случае из-за малых размеров источника света освещённость экрана будет относительно низкой, а, значит, наблюдение дифракционной картины будет осложнено.

На рис. 16 изображена схема опыта наблюдения дифракции света и полученные результаты.

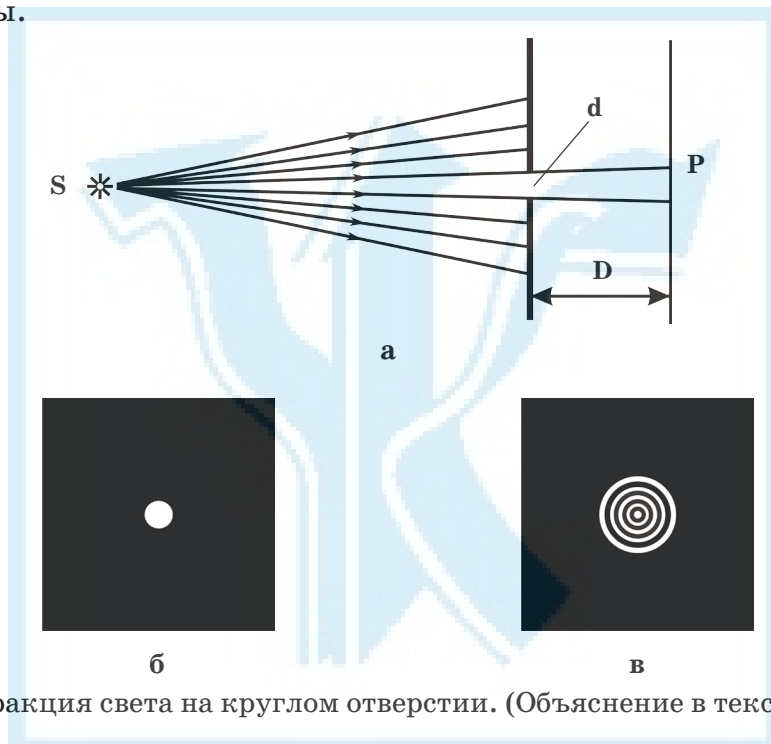


Рис. 16. Дифракция света на круглом отверстии. (Объяснение в тексте.)

Так, свет, идущий от небольшого яркого источника S через отверстие диаметром d (рис. 16, а), должен, по правилам геометрической оптики, дать на экране P , отстоящем от отверстия, на расстоянии D , резко очерченный светлый кружок на тёмном фоне (рис. 16, б). Такая картина и наблюдается при обычных условиях опыта, а именно при небольших D . Если же значение D превосходит в несколько тысяч раз диаметр d , то возникает иная картина. Она состоит в том, что наблюдавшийся при малых D светлый кружок превращается в результате интерференции световых волн в совокупность светлых и тёмных концентрических колец (рис. 16, в), постепенно переходящих друг в друга и исчезающих по мере увеличения их радиуса. Диаметр этой картины существенно превышает диаметр “геометрически правильного” светового кружка, наблюдавшегося при малых D . Это уже говорит о том, что распространение света не подчиняется “геометрически правильной” прямолинейности. Очевидно, что световые лучи огибают края препятствия (края отверстия) и отклоняются от прямолинейного хода на заметные

углы. Именно в этом и проявляется волновая природа света. При фиксированном значении d отклонение тем больше, чем больше длина световой волны, т. е. чем более она приближается по своим размерам к размерам отверстия d .

Причины огибания световой волной преграды с очевидностью следуют из принципа Г—Ф. Согласно этому принципу вторичные волны, испускаемые участками среды, проникают за края препятствия, расположенного на пути распространения волны.

III.4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Опыты с интерференцией и дифракцией света однозначно говорят о его волновой природе. Исследования показали, что, хотя свет и распространяется фронтом определённой геометрической конфигурации (плоскость, сфера и др.), световые волны являются поперечными, а не продольными, как можно было бы ожидать. Световая волна представляет собой распространяющееся переменное электромагнитное поле, в котором имеются одновременно два взаимоперпендикулярных направления колебаний: направления колебаний напряжённостей электрического (\mathbf{E}) и магнитного (\mathbf{B}) полей (рис. 17). Плоскость, в которой находится колеблющийся вектор \mathbf{B} , называется плоскостью поляризации световой волны. Если в пучке света плоскости поляризации всех световых волн взаимопараллельны, то такой пучок света называется поляризованным.

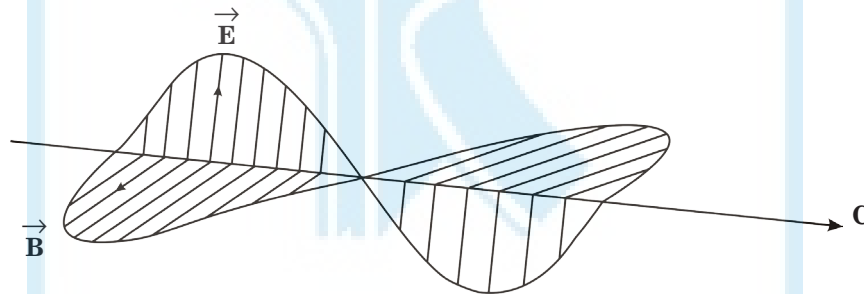


Рис. 17. Структура световой (электромагнитной) волны, распространяющейся в направлении C . (Объяснение в тексте.)

Свет от фиксированного в пространстве элементарного излучателя (атома, молекулы) всегда поляризован, т. е. плоскость его поляризации фиксирована в пространстве и времени. Естественный же свет, излучаемый хаотично расположенными и хаотично ориентированными в пространстве элементарными излучателями, всегда деполаризован, т. е., плоскости поляризации различных световых волн в естественном световом пучке ориентированы в пространстве хаотично. Однако имеются способы выделить из неполяризованного светового пучка волны с преимущественной ориентацией их плоскостей поляризации. Приспособления, позволяющие это сделать, называются поляризаторами. Как правило, это кристаллы или другие молекулярные образования, обладающие существенной анизотропией. При взаимодействии с ними (отражение, пропускание) неполяризованный пучок света становится поляризованным.

IV. ВЫДЕЛЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ СВЕТА. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Как правило, монохроматизация светового излучения осуществляется путём разложения полихроматических световых пучков по частотам. При этом используются явления дифракции, дисперсии, поглощения и интерференции света. Монохроматические световые пучки можно получить также с помощью специально создаваемых устройств (квантовых генераторов — лазеров), излучающих монохроматические световые потоки (здесь эти устройства не рассматриваются).

Дифракция света лежит в основе действия такого монохроматизирующего приспособления, как дифракционная решётка **D** (рис. 18).

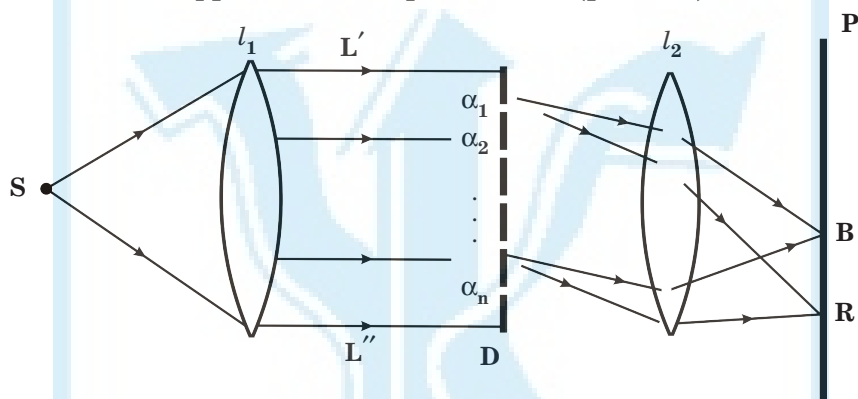


Рис. 18. Иллюстрация к разделению по частотам полихроматического пучка света с помощью дифракционной решётки **D**. (Объяснение в тексте.)

D — это тонкая полированная пластинка из непрозрачного материала. Если на ней есть большое число очень малых взаимопараллельных щелей — это пропускающая **D**. Если на ней много параллельных штрихов — это отражающая **D**. В зависимости от диапазона используемых длин волн (частот) светового излучения таких щелей (штрихов) наносится от 10 до 2000 единиц на 1 мм. На рис. 18 показано действие пропускающей **D**. А именно полихроматический расходящийся пучок света от источника **S**, находящегося на фокусном расстоянии от линзы l_1 на её главной оптической оси, падает на эту линзу. Из неё он параллельным пучком, ограниченным крайними лучами L' и L'' , попадает на **D**. После прохождения им **D** (её щелей $\alpha_1; \alpha_2 \div \alpha_n$) наибольшее отклонение от первоначального направления распространения света испытывают в результате дифракции лучи красного (**R**) диапазона длин волн по сравнению с синим (**B**). Попадая на линзу l_2 , они фокусируются в её фокальной плоскости на экране **P**. Как следует из рис. 18, точки **R** и **B** находятся на некотором расстоянии друг от друга, т. е. пучки света разных частот (длин волн) пространственно разделяются.

Подобная картина — выделение световых потоков определённых частот (цвета) наблюдается и в случае прохождения света через трёхгранную призму, выполненную из прозрачного материала (рис. 19).

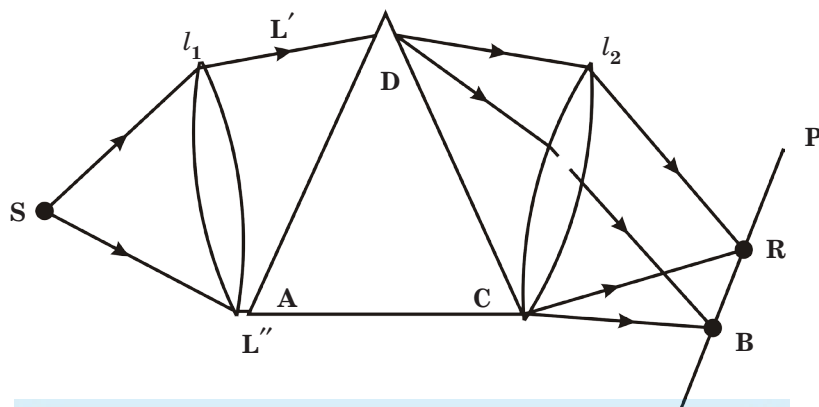


Рис. 19. Разложение полихроматического пучка света по частотам трёхгранной призмой ADC . (Объяснение в тексте.)

Здесь расходящийся полихроматический пучок света от источника света S , находящегося в фокусе линзы l_1 на её главной оптической оси, пройдя через эту линзу, попадает параллельным пучком $L' + L''$ на призму ADC (её грань AD). Преломляясь в призме (рис. 10; 19), он выходит из неё параллельными пучками света разной частоты (цвета). Эти пучки фокусируются линзой l_2 в её фокальной плоскости на экране P в пространственно разделённых точках. В соответствии с законами дисперсии наибольшее отклонение от первоначального направления распространения света испытывают лучи синего диапазона длин волн (точка B) по сравнению с красным (точка R). В этом состоит отличие дисперсионного способа разделения полихроматических световых потоков по частотам (цветам) от дифракционного. Оба способа дают высокую степень монохроматизации света, т. е. диапазон частот (длин волн) излучения в точках R и B (рис. 18 и 19) очень мал. Однако энергия (интенсивность) пучков света при этом также мала.

Большей интенсивности монохроматические световые потоки можно получить, используя такие монохроматизирующие приспособления, как светофильтры. В основе их действия лежат явления поглощения (пропускания) или интерференции света. Поглощающие (пропускающие) светофильтры дают световой поток, состоящий из световых потоков тех частот, которые не были поглощены веществом светофильтра и прошли через него с бóльшими или меньшими энергетическими потерями. Большой монохроматичности в этом случае добиться практически невозможно. Достаточно высокую монохроматизацию света, которая достигается в ходе интерференционных процессов, можно получить с использованием интерференционных светофильтров. Однако монохроматизации в этом случае удаётся достичь не на всех желаемых частотах. Это определяется сложностями подбора вещества фильтра и сложностями технологии его изготовления. Так что практический способ выбора метода монохроматизации света следует проводить с учётом их достоинств и недостатков применительно к особенностям поставленных задач.

Монохроматизация полихроматических пучков света может происходить и на основе явлений отражения/поглощения света. При этом от поверхности филь-

тра-отражателя отражаются лучи света тех длин волн (частот), которые не были поглощены веществом отражателя в процессе его взаимодействия со светом в момент отражения последнего. В этом случае предмет-отражатель видится окрашенным в цвета отражённых им лучей света. Монохроматизация световых пучков с помощью отражательных фильтров менее популярна по сравнению со способами, описанными выше.

Приведенный материал позволяет сделать заключение о причинах цветности наблюдаемых объектов. А именно цвет отражающих предметов определяется частотным интервалом отражённого светового потока. Прозрачные же тела окрашиваются цветом прошедших через них лучей.

Монохроматизация естественных, полихроматических световых потоков имеет большое практическое значение и лежит в основе метода спектрофотометрического анализа — наиболее информативного и универсального из существующих.

Как известно, различные вещества (их атомы, молекулы) способны излучать или поглощать свет на различных частотах. Интенсивность излучённого или поглощённого веществом света будет зависеть не только от способности атомно-молекулярных частиц вещества к излучению/поглощению света, но и от количества этих частиц. Тогда, измеряя интенсивность монохроматических пучков света, взаимодействующего с веществом (излучаемого/поглощаемого на определённых частотах), можно судить о свойствах вещества и его составе. Именно в этом и заключаются основы оптического атомно-молекулярного спектрального (или спектрофотометрического) анализа.

Монохроматизация света (как и любого другого электромагнитного излучения) является важной стадией в повышении эффективности передачи информации. Частотные интервалы при этом являются информационными каналами. Чем уже частотный интервал, тем меньше погрешностей в информационном потоке.

Представления о волновых свойствах света (интерференция, дифракция, дисперсия) использовались также при создании и совершенствовании такого современного высокоэффективного способа передачи информации, как голография (здесь не рассматривается).

V. КОРПУСКУЛЯРНАЯ (КВАНТОВАЯ) ПРИРОДА СВЕТА

Свидетельства в пользу корпускулярной (квантовой) природе света базируются на результатах исследования фотоэлектронной эмиссии (фотоэффекта). Это явление состоит в том, что свет, падая на поверхность металла, “выбивает” из него электроны. О металле как объекте исследования здесь говорится исключительно в связи с особенностями состояния его электронов, что обеспечивает определённую доступность наблюдения фотоэффекта.

Как показали опыты (электрометрия, электропроводность), количество имитированных металлом под действием света (“выбитых” светом) электронов (фотоэлектронов) тем больше, чем больше интенсивность падающего на поверхность металла света. Однако для каждого металла характерно наименьшее значение частоты света ν_{\min} , когда фотоэлектроны ещё появляются. При частотах $\nu < \nu_{\min}$ их уже нет, и фотоэффект отсутствует. Это означает, что для каждого металла характерна своя энергия выхода (“работа выхода”) электрона из его кристаллической структуры. Такому значению энергии соответствует наименьшая порция энергии света частоты ν_{\min} , равная $E = h\nu_{\min}$. Здесь $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с называется постоянной Планка (Планк — немецкий учёный). Таким образом, свет частоты ν передаёт электрону энергию величиной $h\nu$, независимо от интенсивности падающего светового пучка. Фотоэлектроны появляются лишь при $E \geq h\nu_{\min}$. При сильном свете большее количество электронов получает такую энергию, при слабом — число их меньше. Но эти порции световой энергии остаются всегда равными $h\nu$. То есть возникает представление о минимальной энергии, переносимой светом, — “атоме” световой энергии. Такие “атомы” называются световыми квантами, квантами света или фотонами. Значит, можно говорить о том, что свет имеет дискретную (атомистическую, или квантовую) структуру. То есть свет — это корпускулярный поток волновой природы. Или свет — это распространяющиеся электромагнитные волны корпускулярной природы. Именно так выглядит представление о дуализме природы света.

Из формулы, выражающей энергию кванта, следует, что наибольшей энергией обладают γ -фотоны, а наименьшей — радиокванты. Характерно то, что масса фотонов $m_{\phi} \neq 0$ лишь для движущихся фотонов. Масса “покоя” фотона равна нулю. Поскольку скорость света c в вакууме не зависит от частоты, то масса фотона тем больше, чем больше его частота. А это значит, что “синие” фотоны более массивны, чем “красные”. Поэтому высокочастотное излучение в большей степени, чем низкочастотное, носит характер корпускулярного потока.

Подтверждением дискретности (корпускулярности) природы света является то, что свет оказывает механическое давление на освещаемую им поверхность. Если световой поток нормирован, то оказывается, что “синие” лучи, как поток более “тяжёлых” фотонов, создают большее давление, чем “красные”. Уже

сам факт светового давления говорит о корпускулярности светового потока. Действительно, “давление” передаётся частицами, момент движения которых $mv \neq 0$. Для фотонов — это $mc \neq 0$. Тогда, если бы фотон был только волновым образованием, то свет не мог бы оказывать механическое давление, поскольку волна массы не имеет (её масса равна нулю).

Наглядным результатом светового давления являются “хвосты” комет. Они появляются (в обозримом нами ближайшем пространстве), когда космический объект — комета приближается к Солнцу. Под давлением интенсивного солнечного излучения (“солнечного ветра”) мельчайшие частицы вещества кометы отбрасываются от Солнца в космическое пространство и наблюдаются в диффузно отражённом свете. Такова природа “хвостов” комет.

VI. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Исследования процессов распространения света и его взаимодействия с веществом привели к заключению: скорость света c не зависит от состояния движения источника света и наблюдателя; в вакууме скорость света всегда постоянна и является наибольшей из всех скоростей, возможных в природе. Это главные положения теории относительности. Её автором является немецкий ученый А. Эйнштейн. В 1905 г. он предложил математический аппарат, уточняющий количественные соотношения классической механики Ньютона — Галилея. В соответствии с законами новой, релятивистской механики линейные размеры пространства, масса тел, энергия и время зависят от скорости v движения объекта относительно наблюдателя. Основные соотношения релятивистской механики следующие:

1. Для линейных размеров тел в направлении их движения $l = l_0[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}$.
2. Для массы тела $m = m_0[1 - (v^2/c^2)]^{-1/2}$.
3. Для течения времени $t = t_0[1 \pm (v/c)][1 - (v^2/c^2)]^{-1/2}$.
4. Для энергии тела $E = mc^2$.

Здесь “нулевые” параметры — это параметры для неподвижной системы координат. Как видно, $l \rightarrow 0$, $m \rightarrow \infty$, а время замедляет свой ход при $v \rightarrow c$. В дорелятивистской, Ньютоновской механике все эти параметры не зависели от скорости движения тела.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ

1. Что такое свет?
2. Что такое луч света?
3. Что такое точечный источник света?
4. Каковы законы отражения света?
5. Что такое угол падения светового луча?
6. Что такое угол отражения светового луча?
7. Чему равна скорость света?
8. Как измерял скорость света Рёмер?
9. Что такое фокус сферического зеркала?
10. Что такое главная оптическая ось сферического зеркала?
11. Как понимать двойственную природу света?
12. Какие цвета соответствуют каким длинам волн?
13. Как называются электромагнитные излучения, невидимые глазом, и каким интервалам длин волн они соответствуют?
14. Построить изображения предметов от выпуклого и вогнутого сферических зеркал.
15. Как разделяется пучок света, упавший на плоскую поверхность прозрачного тела?
16. Что такое освещённость поверхности?
17. Какими единицами в системе СИ измеряется световой поток и сила света?
18. Что утверждают законы преломления света?
19. Что такое зеркальное и диффузное отражения?
20. Что такое предельный угол полного внутреннего отражения?
21. Что такое полное внутреннее отражение?
22. Что такое линза?
23. Какие параметры связывает формула линзы?
24. Какие бывают линзы?
25. Какие линзы называют собирающими? Почему?
26. Какие линзы называют рассеивающими? Почему?
27. Что такое фокус линзы?
28. Что такое лупа?
29. Что такое тонкая линза?
30. Что такое изображения действительное и мнимое?
31. Построить изображение предмета, даваемое выпуклой линзой.
32. Построить изображение предмета, даваемое вогнутой линзой.
33. Сформулируйте законы освещённости.
34. Что такое светосила линзы?
35. Что такое относительное отверстие линзы?
36. О чём говорит принцип Гюйгенса — Френеля?
37. Что такое когерентные лучи света?

38. Как реализовать когерентные лучи света?
39. Какие требования к когерентным световым лучам, дающим светлые и тёмные пятна на экране?
40. Что такое интерференция волн?
41. Что такое дифракция волн?
42. Каковы условия наблюдения дифракции света?
43. Каковы доказательства поперечности световой волны?
44. Что такое поляризованный свет?
45. Что такое плоскость поляризации световой волны?
46. Какова пространственная структура световой волны?
47. Какие имеются способы монохроматизации естественного света?
48. Монохроматизация с помощью трёхгранной призмы.
49. Монохроматизация с помощью дифракционной решётки.
50. На каких принципах осуществляется спектральный анализ?
51. Что такое фотоэффект?
52. На чём основывается представление о корпускулярной природе света?
53. Как сформулировать представление о дуалистической природе света?
54. В чём состоят основные принципы теории относительности?
55. Прокомментируйте основные формулы релятивистской механики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970. — 855 с.
2. Кабардин О. Ф. Физика. — М.: Просвещение, 1996. — 367 с.
3. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1957. — 759 с.
4. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: Учеб. для 11 класса средней школы. — М.: Просвещение, 1991. — С. 91–130.
5. Чечулин А. А. Волновые процессы. Оптика. Элементы атомной и ядерной физики. — М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. — 396 с.
6. Элементарный учебник физики / Под ред. Г. С. Ландсберга. — М.: Наука, 1986. — Т. 3. — 656 с.

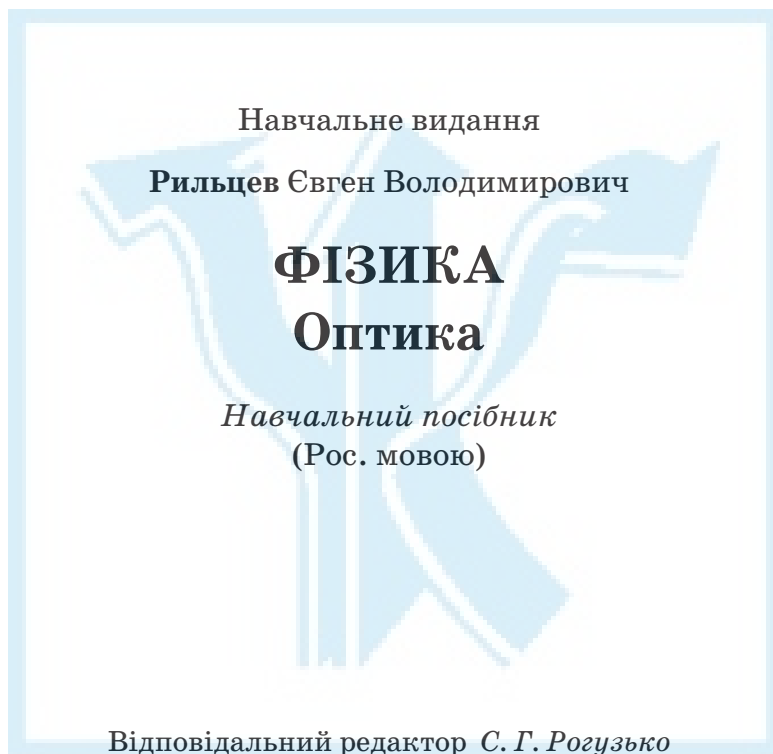
СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение</i>	3
I. Геометрическая (лучевая) оптика	5
I. 1. Как впервые была измерена скорость света	5
I. 2. Законы отражения и преломления света	6
Отражение света	6
Преломление света	10
II. Энергетические характеристики светового потока	17
III. Волновая природа света	18
III.1. Принцип Гюйгенса — Френеля	18
III.2. Интерференция света	19
III.3. Дифракция света	21
III.4. Поляризация света	23
IV. Выделение монохроматических пучков света. Спектральный анализ	24
V. Корпускулярная (квантовая) природа света	27
VI. Основные понятия теории относительности	28
<i>Вопросы для повторения</i>	29
<i>Список использованной литературы</i>	30

МАУП

У пропонованому навчальному посібнику стисло і лаконічно викладено навчальний матеріал з курсу “Оптика” як розділу загальної фізики, що вивчають студенти-іноземці на підготовчих факультетах вищих навчальних закладів України. Особливу увагу автор приділив розгляду хвильових і корпускулярних властивостей світла, що відображають його дуалістичну природу. Коротко висвітлено такі розділи, як променева оптика, енергетика світлових потоків, поляризація світла, практичне використання оптики і теорія відносності. Викладений матеріал має ознайомчий характер, проте розрахований на підготовленого слухача, який опанував традиційно перші розділи фізики.

Текст адаптовано до відповідної навчальної програми вивчення російської мови.



Відповідальний редактор *С. Г. Рогузько*

Коректор *Т. М. Федосенко*

Комп'ютерне верстання *Г. І. Губанова*

Оформлення обкладинки *С. В. Фадєєв*

Підп. до друку 18.04.08. Формат 60×84/8. Папір офсетний.

Друк ротатійний трафаретний.

Ум. друк. арк. 3,72. Обл.-вид. арк. 2,25. Наклад 550 пр.

Міжрегіональна Академія управління персоналом (МАУП)
03039 Київ-39, вул. Фрометівська, 2, МАУП

ДП «Видавничий дім «Персонал»
03039 Київ-39, просп. Червонозоряний, 119, літ. ХХ

*Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 8 від 23.02.2000*