

ОПТИКА



Законы преломления света

Обман зрения



Ученье свет, а не ученье-тьма

ЭТУ НАДПИСЬ
ВИДЯТ ТОЛЬКО : Студент,
ЗРЯЧИЕ ЛЮДИ



Не влюбляйся, не пей вина
И на лбу у себя высеки,
Жизнь тебе для того дана,
Чтобы ты посвятил её
физике!



ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Законы геометрической оптики	4
Физигадка №4	5
Явление полного внутреннего отражения	7
Мозголомка № 3	9
Линзы	10
Аберрации линз	12
Зеркала и их основные характеристики	13
Схема решения задач по геометрической оптике	15
Страничка моды	16
Глаз. Дефекты зрения	17

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Модель плоской монохроматической электромагнитной волны в вакууме	19
Поляризация света	20
Способы получения линейно поляризованного света	23
Искусственная оптическая анизотропия.	26
Иллюзии на асфальте	27
Интерференция света	28
Оптическая длина пути L и оптическая разность хода волн Δ	29
Условие максимума и минимума при интерференции света	30
Причина интерференции световых волн	31
Оптические иллюзии	32
Интерференция света в тонких плёнках	33
Кольца Ньютона	33
Проблема когерентности световых волн	35
Способы получения когерентного света от естественных источников	36
Применение интерференции	38
Миражи	40

Дифракция света

Принцип Гюйгенса-Френеля	48
Метод зон Френеля	50
Дифракция Френеля	51
Дифракция Фраунгофера	54
Дифракционная решетка	55
Красота скульптуры	59

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

Рассеяние электромагнитных волн	61
Поглощение электромагнитных волн	62
Давление света	62
Дисперсия света	63
Эффект Доплера	66
Излучение Вавилова-Черенкова	66
Эффект Комптона	67
Дифракция рентгеновского излучения на пространственной дифракционной решётке	67
Мозголомка № 4 «Туристы 2»	69
Страничка красоты	70
Схема решения задач по волновой оптике	71

КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Тепловое излучение

Основные характеристики теплового излучения	73
Модель абсолютно чёрного тела	74
Кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела при различных температурах	74
Законы теплового излучения	75

Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта	78
Вольт-амперные характеристики фотоэлемента	78
Анализ вольт - амперных характеристик	79
Законы внешнего фотоэффекта	79
Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта	80
Схема решения задач по фотоэффекту	81
Схема решения задач по корпускулярно-волновым свойствам света	82
Страничка будущего биолога	83
Как запоминать стихотворения с помощью образов	84
Страничка психолога	85
Витамины	86
Как запомнить жесты регулировщика	87



тригонометрического ряда, если ядро $K(x, s)$ разлагается в равномерно сходящийся в прямоугольнике $a \leq x, s \leq b$ степенной или тригонометрический ряд, или приближать его алгебраическими или тригонометрическими интерполяционными многочленами.

Бэтмен предложил определять вырожденное ядро $K_n(x, s)$, аппроксимирующее ядро $K(x, s)$, с помощью равенства

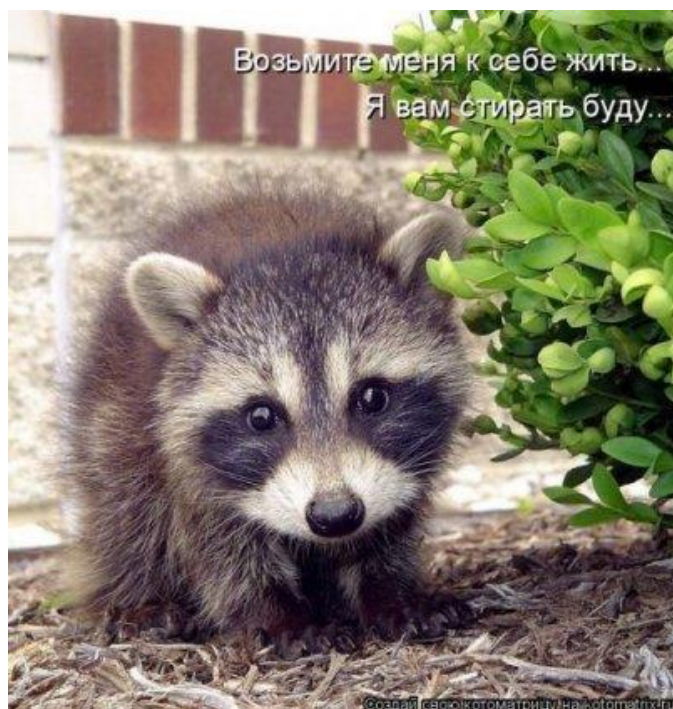
$$\begin{vmatrix} K_n(x, s) & K(x, s_1) & K(x, s_2) & \dots & K(x, s_n) \\ K(x_1, s) & K(x_1, s_1) & K(x_1, s_2) & \dots & K(x_1, s_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(x_n, s) & K(x_n, s_1) & K(x_n, s_2) & \dots & K(x_n, s_n) \end{vmatrix} = 0, \quad (27)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n; s_1, s_2, \dots, s_n$ — некоторые точки отрезка $[a, b]$. Представляя элементы первого столбца в виде

$$K_n(x, s) + 0; \quad 0 + K(x_1, s); \quad 0 + K(x_2, s); \quad \dots; \quad 0 + K(x_n, s)$$

и разлагая определитель (27) на сумму двух определителей, после несложных преобразований получим явный вид ядра:

$$K_n(x, s) = - \frac{\begin{vmatrix} 0 & K(x, s_1) & K(x, s_2) & \dots & K(x, s_n) \\ K(x_1, s) & K(x_1, s_1) & K(x_1, s_2) & \dots & K(x_1, s_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(x_n, s) & K(x_n, s_1) & K(x_n, s_2) & \dots & K(x_n, s_n) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K(x_1, s_1) & K(x_1, s_2) & \dots & K(x_1, s_n) \\ K(x_2, s_1) & K(x_2, s_2) & \dots & K(x_2, s_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(x_n, s_1) & K(x_n, s_2) & \dots & K(x_n, s_n) \end{vmatrix}}, \quad (28)$$



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Оптикой называется раздел физики, изучающий световые явления (то есть явления излучения, распространения в пространстве и взаимодействие света с веществом).

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором явления распространения света в пространстве рассматриваются на основе представления о световом луче.

Световым лучом называется направление в пространстве, вдоль которого происходит перенос энергии световой волны.

Задолго до выяснения природы света были на опыте установлены следующие основные законы геометрической оптики:

1. Закон прямолинейного распространения света.
2. Законы отражения света.
3. Законы преломления света.
4. Закон независимости световых пучков.

Законы геометрической оптики

Закон прямолинейного распространения света

Свет в оптически однородной изотропной среде распространяется прямолинейно с постоянной скоростью:

$$v = \lambda \nu.$$

где λ - длина волны в данном веществе, м; ν - частота волны, Гц.



Прямолинейное распространение света

При переходе световой волны из одного вещества в другое, частота световой волны остаётся неизменной, а длина волны изменяется по закону

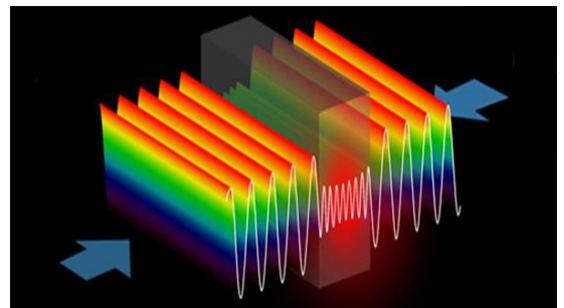
$$n_{21} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ - относительный показатель преломления

двух сред,

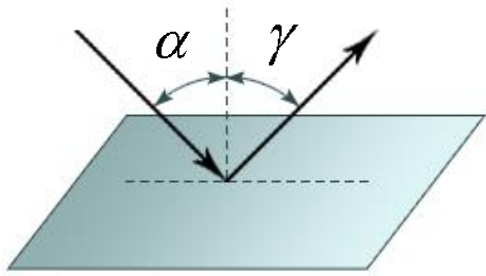
λ_1 - длина световой волны в первой среде, λ_2 - длина световой волны во второй среде.

При переходе электромагнитной волны через границу раздела двух сред частота волны ν не изменяется (она определяется частотой колебаний источника волн), а длина волны λ изменяется (чем больше оптическая плотность среды (то есть больше абсолютный показатель преломления вещества n , тем меньше длина волны λ и, соответственно, меньше фазовая скорость распространения механической волны v).



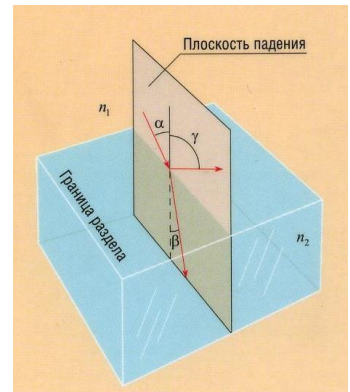
Законы отражения света

- Луч падающий, луч отражённый и перпендикуляр, восстановленный в точку падения света к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости.

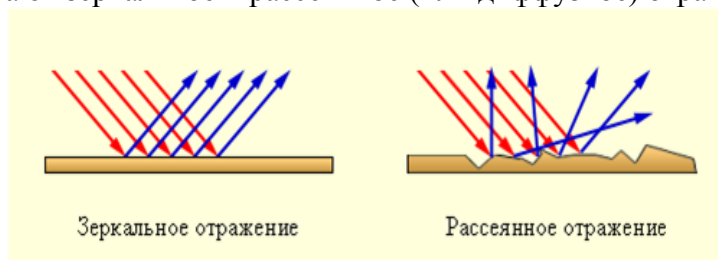


- угол падения альфа α равен углу отражения гамма γ :

$$\alpha = \gamma$$



Различают зеркальное и рассеянное (или диффузное) отражение света.

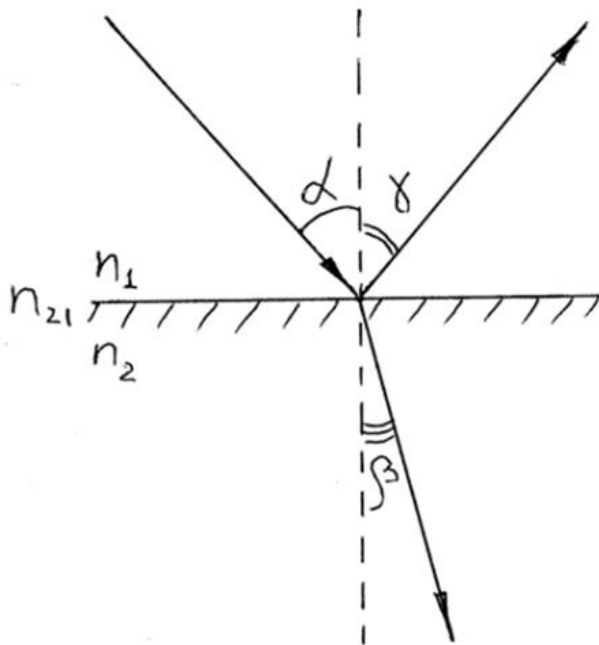


Физигадка №4



Что не так на картинке?
(ответ ищи на будущих страницах)

Законы преломления света



- луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости;

- отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для двух данных сред (**закон Снеллиуса**):

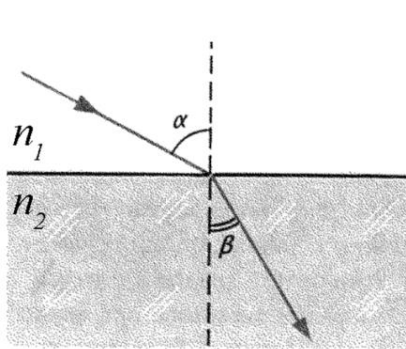
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21},$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ - относительный показатель

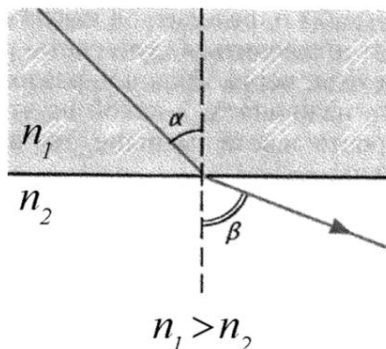
преломления двух сред,

n_1 и n_2 - абсолютные показатели преломления первой и второй среды.

При переходе света из вещества с большим показателем преломления n , в вещество с меньшим показателем преломления n (например, из воздуха ($n = 1$) в воду ($n = 1,33$) или стекло ($n = 1,5$)) угол преломления β всегда меньше угла падения α .



$$n_1 < n_2$$



$$n_1 > n_2$$



Угол падения α , угол отражения γ и угол преломления β отсчитываются от перпендикуляра, восстановленного в точке падения света.



Явление преломления света



Дядька без головы

Явление полного внутреннего отражения

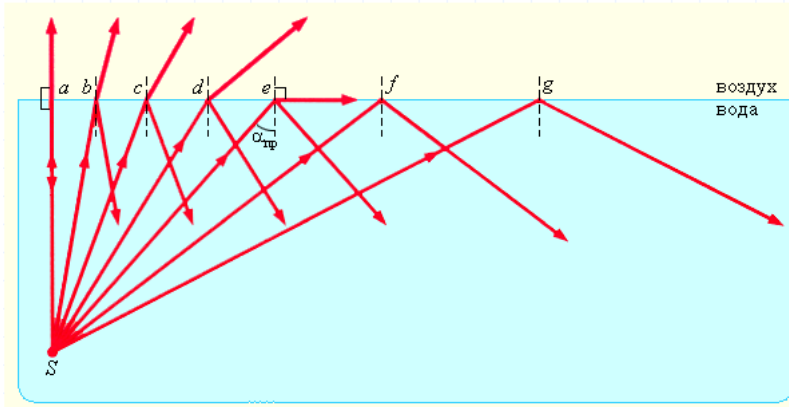
При выходе света из среды с большим показателем преломления n_2 в среду с меньшим показателем преломления n_1 (например, из стекла или воды в воздух)) существует, так называемый, **угол полного внутреннего отражения** α_{np} , при котором свет уже не выходит за границу раздела двух сред:

$$\sin \alpha_{np} = \frac{1}{n_{21}} = \frac{n_1}{n_2},$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ - относительный показатель преломления двух сред,

n_1 и n_2 - абсолютные показатели преломления первой и второй среды.

Это явление называется **явлением полного внутреннего отражения**.



Угол полного внутреннего отражения α_{np} - это минимальный угол падения света, начиная с которого возникает явление полного внутреннего отражения

Явление полного внутреннего отражения используется в призмах полного отражения.

Существуют призмы, позволяющие повернуть луч на 90° , на 180° , перевернуть изображение (см.рис.1). Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах).

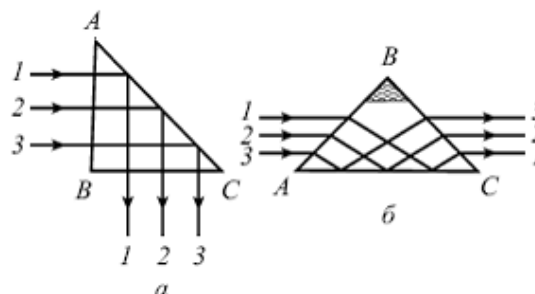


Рис. 1 Некоторые виды поворотных призм

Явление полного внутреннего отражения используется также в световодах, которые представляют собой тонкие нити (волокна) из оптически прозрачного материала. По причине полного отражения от боковой поверхности световода свет распространяется только вдоль волокна. С помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка (рис. 2). Световоды используются для передачи информации в ЭВМ, медицине (для диагностики внутренних органов) и др.

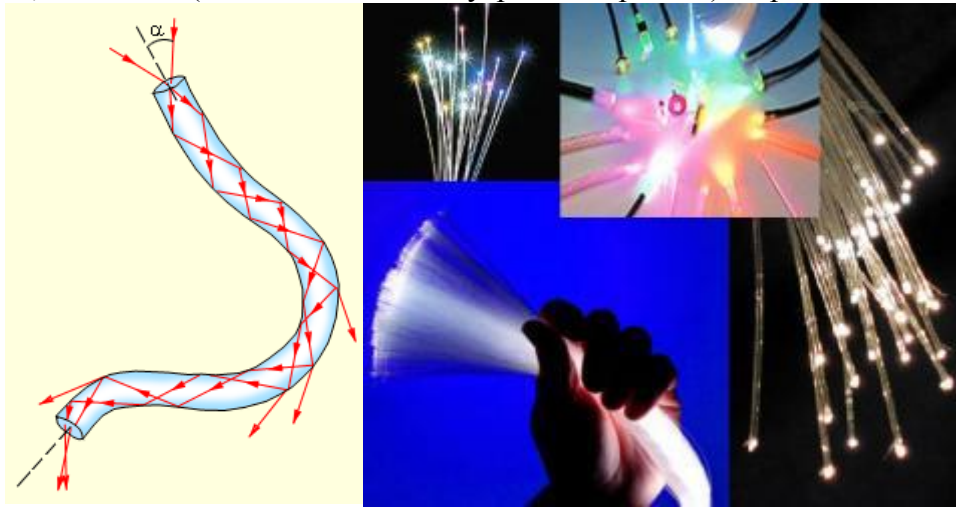


Рис. 2 Применение явления полного внутреннего отражения в световолоконной оптике

На явлении полного внутреннего отражения основывается огранка бриллиантов (рис. 3).



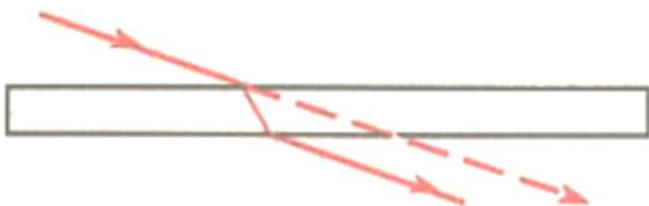
Рис. 3 Сияние бриллиантов объясняется явлением полного внутреннего отражения света



Задача по физике: “Студент Кембриджского университета лунной ночью гулял с девушкой вдоль озера и пытался вычислить угол отражения лунного света от водной поверхности. Помогите ему в этом занятии. Коэффициентом поглощения воды, а также тем, что девушка обидится и уйдет пренебречь”.



Прохождение света через плоскопараллельную прозрачную пластину



В этом случае луч света при выходе из пластины слегка смещается в сторону, оставаясь параллельным падающему на пластину лучу.

Кто сможет прочитать что написано?

Ещё один тест на Альцгеймера.

Сможете прочесть? 👉😊

1Н7ЗЛЛЗК7
370 6П060БНОС7Ь
4Д4П71РОВ47Ь6Я
К 13МЗНЗН1ЯМ

- 67ИВЗН ХОК 1НГ



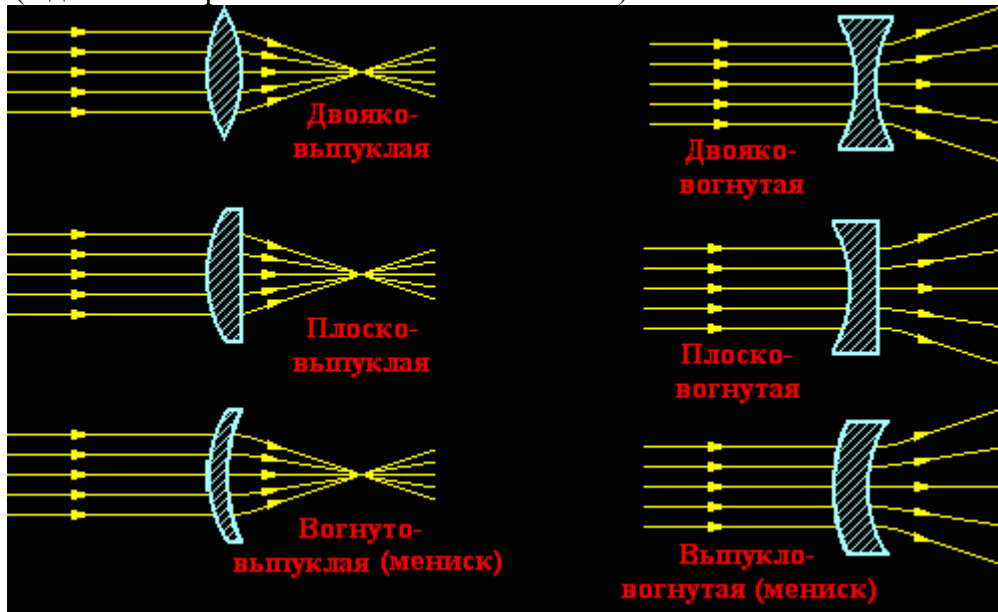
Удалось прочитать что
написано?

[Ответ найдёшь на будущих страницах](#)



Линзы

Линзой называется прозрачное твёрдое тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями (одна из поверхностей может быть плоской).



Оптическая сила линзы D

Оптической силой линзы D называется величина, обратная фокусному расстоянию линзы f :

$$D = \frac{1}{f}, [D] = \text{дптр}, \text{диоптрия.}$$

Оптическая сила собирающей линзы считается положительной, а рассеивающей линзы – отрицательной.

Формула тонкой линзы

$$\pm \frac{1}{f} = \frac{1}{a} \pm \frac{1}{b} \quad \text{или} \quad D = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_l}{n_c} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b},$$

где f - фокусное расстояние линзы, м, для собирающей линзы $f > 0$, для рассеивающей $f < 0$,

a - расстояние от объекта до линзы, м,

b - расстояние от линзы до изображения, м, для действительного изображения $b > 0$, для мнимого $b < 0$,

D - оптическая сила линзы, дптр, диоптрия

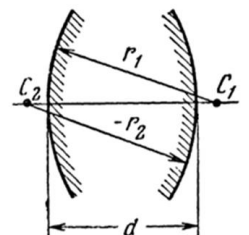
(оптическая сила D собирающей линзы считается положительной, рассеивающей – отрицательной)

R_1 и R_2 - радиусы кривизны поверхностей линзы, м.

n_l и n_c - абсолютные показатели материала линзы и окружающей среды.

Радиус кривизны поверхности считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицательным, если центр кривизны находится слева от поверхности.

(при этом направление хода светового луча при решении задач принимается слева на право)



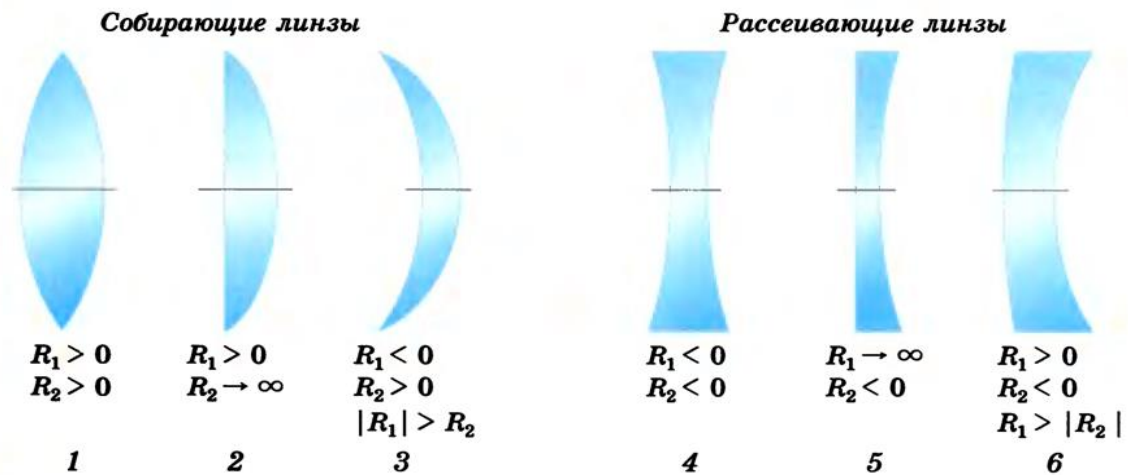
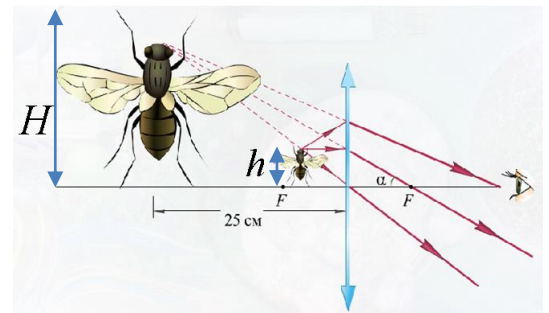


Рис. 4 Типы линз: двояковыпуклая 1; плоско-выпуклая 2; вогнуто-выпуклая 3; двояковогнутая 4; плоско-вогнутая 5; выпукло-вогнутая 6

Линейное увеличение тонкой линзы

Линейным увеличением линзы Γ называется величина, равная отношению линейного размера изображения H к линейному размеру предмета h (или отношению расстояния от линзы до изображения b , к расстоянию от объекта до линзы a)

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{b}{a}.$$



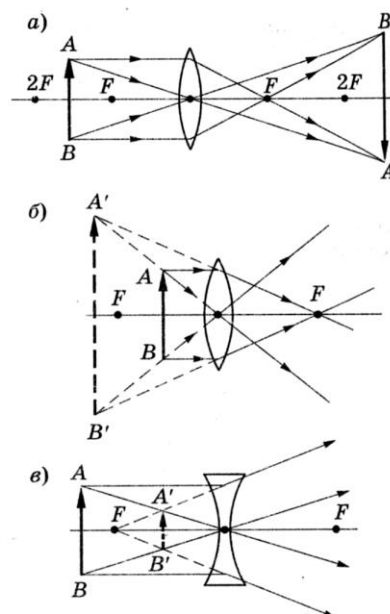
Эта формула верна, если размеры предмета меньше диаметра линзы и предмет расположен перпендикулярно главной оптической оси линзы.

Построение изображения предмета в линзах

Построение изображения предмета в линзах осуществляется с помощью следующих лучей:

- ♦ луча, проходящего через оптический центр линзы и не изменяющего своего направления;
- ♦ луча, идущего параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй фокус линзы;
- ♦ луча (или его продолжения), проходящего через первый фокус линзы; после преломления в ней он выходит из линзы параллельно ее главной оптической оси.

Пример. Построим изображения в собирающей и в рассеивающей линзах: действительное (рисунок а) и мнимое (рисунок б) изображения — в собирающей линзе, мнимое — в рассеивающей (рисунок в).



Ответ на физигадку №4

Девушка должна отражаться в зеркале симметрично

Аберрации линз

Линзы обладают рядом недостатков, не позволяющих получать высококачественные изображения. Искажения, возникающие при формировании изображения, называются **абберациями**.

Главные из них – **сферическая** и **хроматическая абберации**.

Сферическая абберация проявляется в том, что монохроматические лучи по-разному преломляются в линзе (то есть имеют разный фокус), в зависимости от их расстояния от оптической оси линзы (рис. 5).

Это приводит к тому, что центральная часть изображения оказывается наиболее резкой, а периферийные участки размытыми. Этот дефект изображения связан с тем, что форма преломляющих поверхностей линзы не обеспечивает фокусировку всех лучей светового пучка, падающего на линзу. В случае параллельного пучка лучи, близкие к оси, проходят через фокус, внешние лучи пересекаются ближе к линзе. В результате изображение предмета получается нечётким. Эффект сферической абберации можно устранить, если использовать только центральную область линзы. Для этого в оптических приборах применяют диафрагмы.

Хроматическая абберация проявляется в том, что световые лучи разных цветов, находящихся на одинаковом расстоянии от оптической оси линзы, преломляются по-разному (то есть имеют разный фокус).

Это явление возникает вследствие **дисперсии среды** (то есть зависимости показателя преломления среды от частоты световой волны). Когда преломляется белый свет, то фокусные расстояния линзы различны для света различных цветов. Наименьшее фокусное расстояние у фиолетовых лучей, наибольшее – у красных (рис. 5), поэтому изображение становится нечетким и окрашенным.

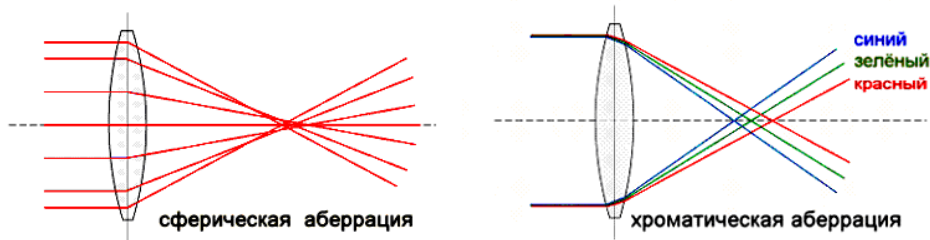


Рис. 5 сферическая и хроматическая абберации линзы

Существует также **коматическая абберация** (или кома), **дисторсия** и **астигматизм**.

Кома – это внеосевая абберация, связанная с наклоном лучей света, идущих от источника, к оптической оси телескопа (рис. 6).

При этом изображение точечного источника света имеет вид капли. Линейные размеры пятна комы пропорциональны расстоянию точечного источника от оптической оси и квадрату относительного отверстия объектива.

Дисторсия выражается в том, что масштаб изображения на различном расстоянии от центра поля различен.

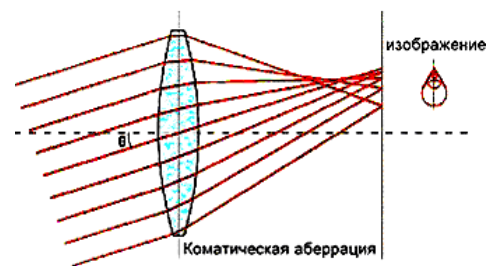


Рис. 6

Изображение точечного источника света собирается в одну точку, но эта точка не совпадает с изображением источника в идеальной оптической системе.

Из-за этого изображение квадрата будет иметь вид либо подушки (положительная дисторсия), либо вид бочки (отрицательная дисторсия) (см. рис 8).

Наконец, **астигматизм** заключается в растягивании точечного изображения в черточку. Лучи света от объекта, идущие в разных плоскостях, фокусируются не плоскости, а на

некоторой искривлённой поверхности (рис.7), что также искажает изображение. Размер астигматического изображения растёт пропорционально квадрату углового расстояния точечного источника от центра оптической оси.

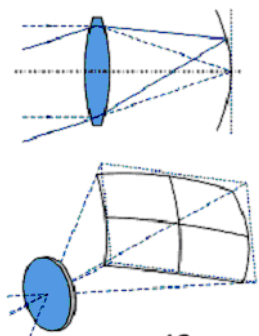


Рис. 7

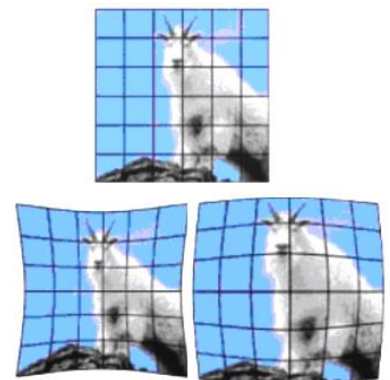
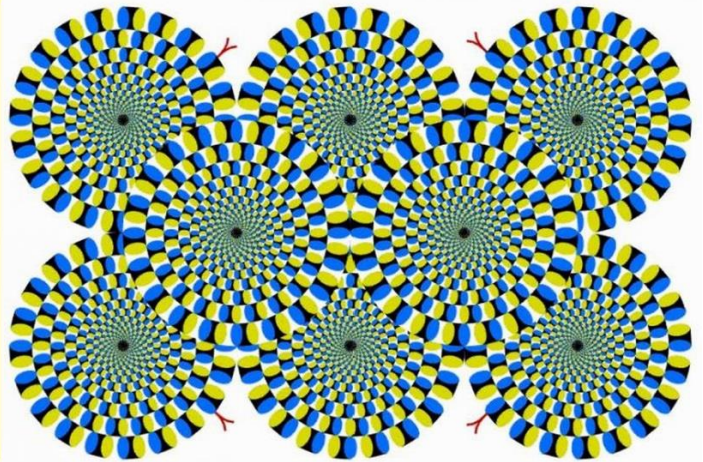
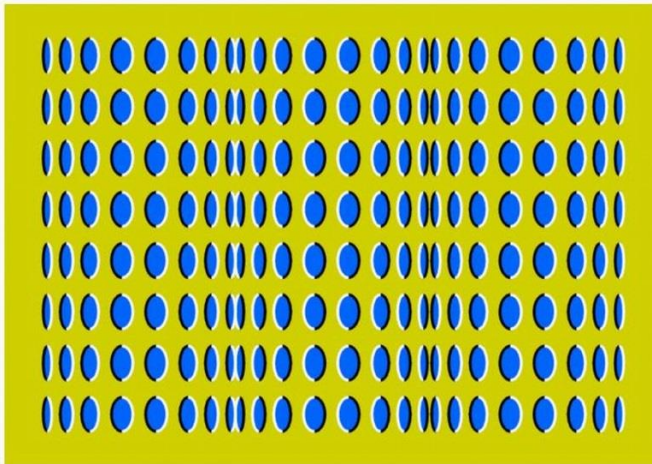
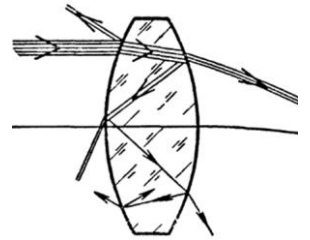


Рис. 8

Потери световой энергии в линзах

Потери световой энергии при прохождении света через линзу происходит в основном за счёт двух факторов:

- поглощения света веществом линзы,
- многократного отражения света от поверхностей линзы (см. рис)



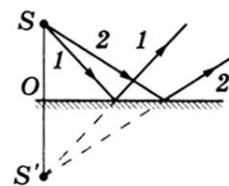
Зеркала и их основные характеристики

Плоским зеркалом называется плоская полированная поверхность, при отражении от которой параллельный пучок света остаётся параллельным

Построение изображения в плоском зеркале

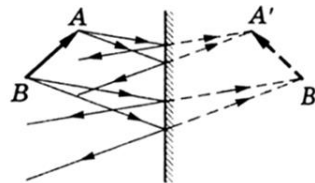
Изображение точечного источника

Два произвольных луча 1 и 2, исходящие из точки S , отражаясь от зеркала в соответствии с законом отражения, расходятся. Продолжения этих лучей пересекаются в точке S' , находящейся по другую сторону зеркала относительно S ; S' — мнимое изображение. Линия SS' перпендикулярна плоскости зеркала; $SO = SO'$.



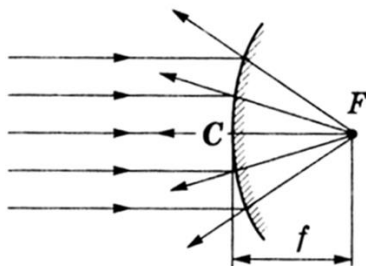
Изображение предмета

Плоское зеркало отражает свет, приходящий из точек A и B . Обе произвольные пары отраженных лучей от точек A и B продолжены за зеркало, причем отраженная пара лучей из точки A сходится в A' , из B — в точке B' . Изображение $A'B'$ — мнимое, его размеры такие же, как у предмета.



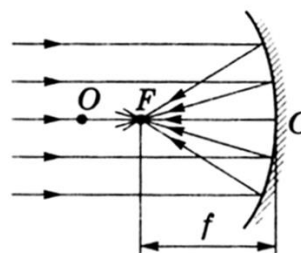
Сферическим зеркалом называется зеркало, отражающая поверхность которого представляет собой часть сферы.

Выпуклое сферическое зеркало



Отражающее покрытие нанесено на внешнюю поверхность сферы

Вогнутое сферическое зеркало



Отражающее покрытие нанесено на внутреннюю поверхность сферы

[O — оптический центр зеркала; C — полюс зеркала; F — главный фокус (фокус) зеркала; f — главное фокусное расстояние]

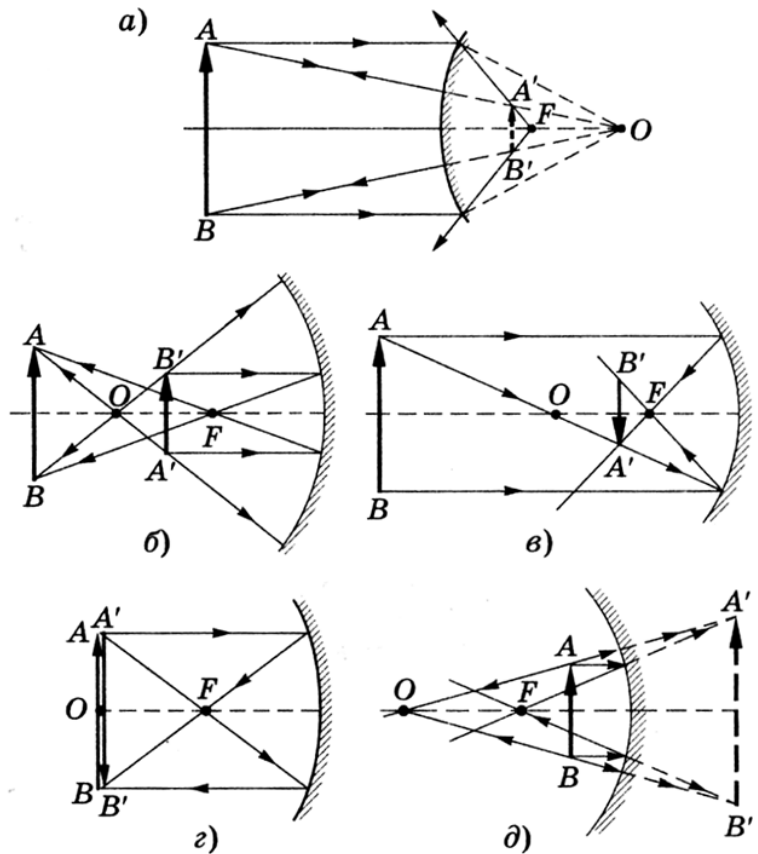
Построение изображения в сферическом зеркале

Построение изображения предмета в сферических зеркалах осуществляется с помощью следующих лучей:

1) луча, проходящего через оптический центр зеркала; отраженный луч идет назад вдоль первоначального направления;

2) луча (или его продолжения), проходящего через главный фокус сферического зеркала; отраженный луч параллелен главной оптической оси;

3) луча, идущего параллельно главной оптической оси, после отражения этот луч (или его продолжение) проходит через главный фокус сферического зеркала.



Пример. Построим изображения в выпуклом и вогнутом сферических зеркалах: всегда мнимое в выпуклом зеркале (рисунок *a*) и действительные (рисунки *б—г*) и мнимое (рисунок *д*) в вогнутых сферических зеркалах.



Какой студент не мечтает стать инженером

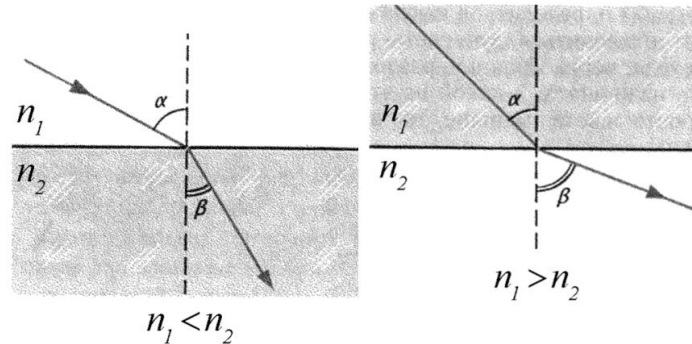


Вот что значит зеркальное отражение...

СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

1. сделать чертёж к задаче, на котором нарисовать описываемую в задаче ситуацию.

- если речь идёт об отражении или преломлении света на границе раздела двух сред, то необходимо правильно определить углы падения, отражения и преломления света, помня, что они отсчитываются от перпендикуляра, восстановленного в точке падения света. При этом следует обратить внимание на то, из какой в какую среду проходит свет (в оптически более плотную, то есть с большим показателем преломления, или оптически менее плотную среду). Если свет проходит в вещество с большим показателем преломления, то угол преломления будет меньше угла падения, если же наоборот, то угол преломления будет больше угла падения.

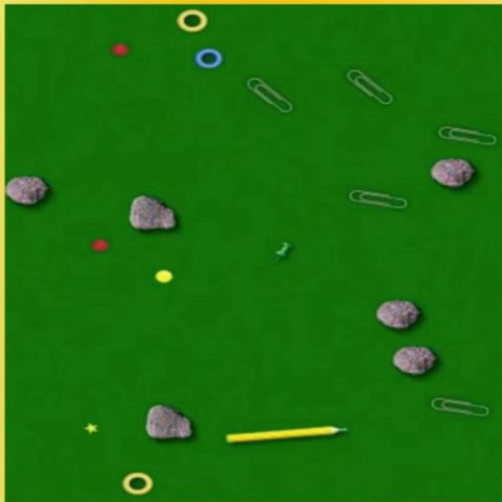


- если речь идёт о тонкой линзе, то нарисовать главную оптическую ось линзы и положение на ней линзы и предмета.

Затем аккуратно с помощью линейки построить изображение предмета и указать соответствующие углы и расстояния, как это делается в задачах по геометрии. Очень часто решение задачи состоит из правильно сделанного рисунка.

35

НАЙДИТЕ 4 РАЗЛИЧИЯ





Глаз. Дефекты зрения

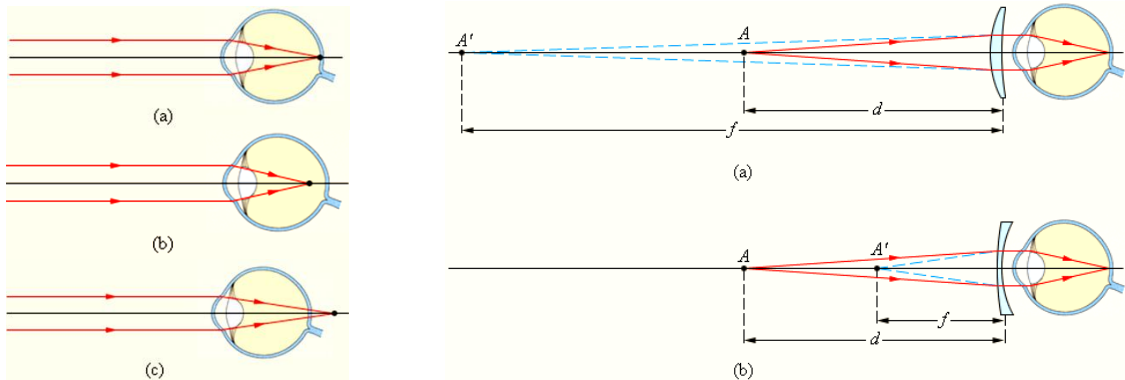
Глаз, как оптическую систему, можно отождествить с собирающей линзой, фокусное расстояние которой может изменяться за счёт аккомодации глаза, а расстояние от хрусталика до сетчатки (экрана) остаётся постоянным.

Аккомодацией глаза называется его способность благодаря изменению радиусов кривизны хрусталика совмещать изображение предмета с сетчаткой глаза при изменении расстояния от глаза до наблюдаемого предмета.

Для нормального глаза **расстоянием наилучшего зрения** называют наименьшее расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего (то есть без напряжения) можно рассматривать мелкие детали предмета.

Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения равно 25 см. Точку, удалённую от глаза на данное расстояние, называют **ближней точкой аккомодации глаза**. Дальняя точка аккомодации глаза расположена на бесконечности.

Основные дефекты зрения: ослабление зрения с возрастом, дальнозоркость, близорукость, астигматизм, дальтонизм.



Близорукий глаз либо удлинен, либо имеет меньший радиус кривизны хрусталика по сравнению с нормальным глазом.

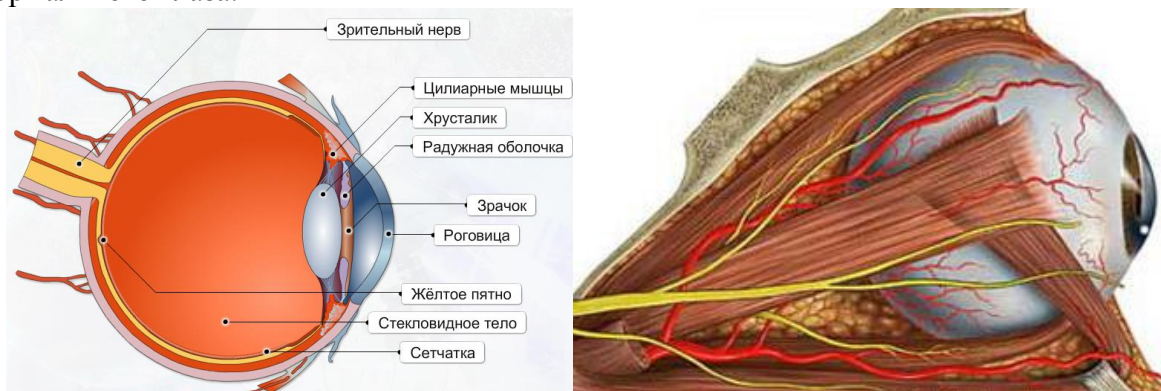
В нем параллельный пучок лучей преломляется сильнее и сходится в точке перед сетчаткой.



Для увеличения преломляющей способности дальнозоркого глаза используют очки с собирающими линзами с положительной оптической силой $D_0 > 0$. В результате пучок лучей, пройдя через хрусталик, сходится на сетчатке, как и у нормального глаза.

Для коррекции близорукости используют очки с рассеивающими линзами с отрицательной оптической силой $D_0 < 0$.

В результате уменьшенного преломления пучок лучей, пройдя через хрусталик, сходится на сетчатке, как и у нормального глаза.





Найди верблюда, сыр, ботинок и чашку



Встречаются как-то зимой два физика. Один другому и говорит:

- Ну, у тебя и нос! Целых 720 нанометров.
- Что, такой маленький?
- Нет. Такой красный

Фотометрия

Фотометрией называется раздел физической оптики, посвященный измерению электромагнитного излучения оптического диапазона.

Точечным называется источник света, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Так, например, расстояния до звезд настолько превосходят их размеры, что их можно считать точечными источниками, несмотря на их огромные размеры.

Точечный источник является такой же идеализацией, как, например, материальная точка, идеальный газ и др.

Принято считать, что точечный источник посылает лучи равномерно по всем направлениям. Все вопросы, связанные с определением световых величин, наиболее просто решаются в том случае, когда источник является точечным.

Ламбертовской поверхностью называется поверхность, излучающая свет во все стороны изотропно (то есть одинаково).

Телесный угол Ω

Для того чтобы дать понятие равномерного излучения света по всем направлениям, необходимо ввести представление о телесном угле Ω (омега), который равен отношению площади поверхности S , вырезанной на сфере конусом с вершиной в центре этой сферы, к квадрату радиуса R этой же сферы (рис.9)

$$\Omega = \frac{S}{R^2}.$$

Это отношение не зависит от радиуса, так как с ростом радиуса вырезаемая конусом поверхность увеличивается, пропорциональна квадрату радиуса.

Единицей телесного угла являетсястерадиан (ср). $[\Omega] = \text{ср}$.

В сферических координатах элементарный телесный угол $d\Omega$ можно определить по формуле:

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = 2\pi \sin \theta d\theta.$$

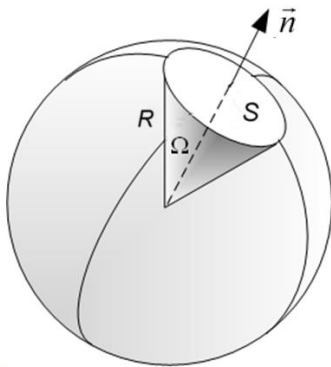


Рис. 9

Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь в 1м^2 , если радиус сферы равен 1м (см. рис. 9).

Телесный угол, охватывающий все пространство вокруг точечного источника, равен 4π ср.

Излучение считают **равномерным**, если в любые одинаковые телесные углы излучается одинаковая мощность.

Световой поток Φ

В технике широко применяются приемники, реакция которых зависит не только от энергии, приносимой светом, но и от его спектрального состава.

Реакция таких приемников на два типа излучения, имеющих одинаковую энергию, но различный спектральный состав, различна.

Таковыми селективными (избирательными) приемниками являются **фотоэлементы**, **фотопластинки** и в особенности **глаз человека**.

Характеристики световых процессов, определяемые по действию света на глаз, по зрительному ощущению света, называют световыми величинами.

Зрительное ощущение меняется количественно и качественно в зависимости от мощности лучистой энергии и ее спектрального состава.

С одной стороны, это различие качественно, то есть *излучение разных частот вызывают различные по цвету световые ощущения*. С другой стороны, *потoki различных частот вызывают ощущения различной интенсивности*.

Глаз по-разному воспринимает излучение в зависимости от его длины волны, то есть хорошо различает цвета. Наиболее чувствителен глаз к зеленым лучам ($\lambda \approx 555 \text{ нм}$). Поэтому важно знать не просто количество световой энергии, регистрируемое приборами, а величину, характеризующую действие света на глаз. Такой величиной является световой поток Φ .

Световым потоком Φ (эф) называется величина, равная энергии, которая переносится световыми волнами через определённую поверхность за единицу времени:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

Световой поток Φ характеризует мощность видимой части излучения, распространяющегося внутри данного телесного угла, оценивается по действию этого излучения на нормальный глаз.

Световой поток $d\Phi_{\text{исп}}$, излучаемый бесконечно малой площадью поверхности dS светящегося тела в единицу времени в бесконечно малый телесный угол $d\Omega$, равен:

$$d\Phi_{\text{исп}} = B \cos \theta dS d\Omega,$$

где θ - угол, отчитываемый о нормали к поверхности в направлении телесного угла,

B - коэффициент, называемый **яркостью** и характеризующий испускательную способность поверхности тела.

Сила света I

Силой света I называется величина, равная отношению светового потока $d\Phi$ к телесному углу $d\Omega$, в котором этот световой поток распространяется:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Сила света - основная световая величина, характеризующая свечение источника видимого излучения в некотором направлении.

Так как полный телесный угол равен 4π ср, то сила света точечного источника равна

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$

Единицей силы света I является **кандела (кд)**. Кандела - основная единица СИ.

Кандела - сила света, испускаемого с поверхности площадью $1/600000 \text{ м}^2$ полного излучения в перпендикулярном направлении, при температуре излучателя равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па .

Световым потоком Φ называется величина, равная произведению силы света источника I на телесный угол Ω , в который посылается это излучение:

$$\Phi = I\Omega \quad (1)$$

Единицей светового потока является **люмен (лм)**. Люмен - световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

Таблица 11.2

Сила света электрических ламп накаливания

Мощность лампы, Вт	15	25	40	60	100	150	300	500	1000
Сила света, кд	10	18	30	51	103	173	388	695	1530

Освещённость E

Освещённостью E называется величина, равная отношению светового потока $d\Phi_{пад}$, падающего на поверхность dS , к площади этой поверхности:

$$E = \frac{d\Phi_{пад}}{dS} \quad (2)$$

Единица освещённости - люкс (лк).

Люкс - освещённость, создаваемая световым потоком I лм при равномерном распределении его по площади 1 м^2 .

Законы освещённости

Как следует из опыта, освещённость поверхности зависит как от силы света источника, так и от расстояния между источником света и освещаемой поверхностью и от положения этой поверхности относительно падающих лучей света. Обычно положение поверхности S в пространстве задается положением вектора нормали $\vec{n}$ к ней (рис 10 а). Если положение поверхности в пространстве изменяется, то соответственно изменяется в пространстве ориентация вектора нормали. Если поверхность сферическая, то направление вектора нормали в любой точке совпадает с направлением радиус-вектора, проведенного в рассматриваемую точку.

Рассмотрим случай, когда в центре сферы радиуса R находится точечный источник света, сила света которого I . В этом случае все лучи падают на внутреннюю поверхность сферы перпендикулярно ей, то есть угол падения лучей равен нулю. Используя формулы (1) и (2) и учитывая, что площадь сферы $S = 4\pi R^2$ получим **первый закон освещённости**:

освещённость в каждой точке поверхности, на которую перпендикулярно ей падает свет, пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника света до освещаемой поверхности:

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (3)$$

E - освещённость в данной точке поверхности,

r - расстояние от источника до точки наблюдения

I - сила света точечного источника,

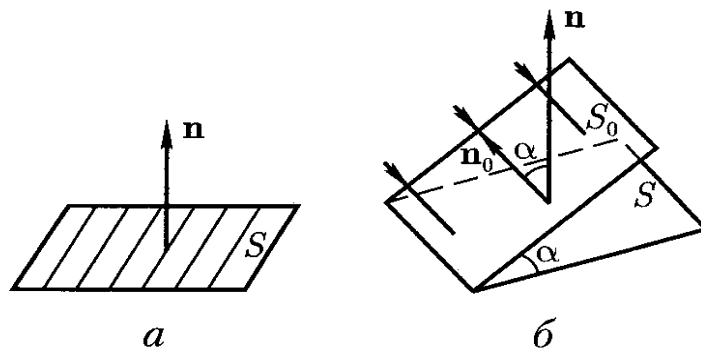


Рис. 10

Предположим, что поверхность S произвольным образом ориентирована в пространстве. Пусть вектор нормали к ней $\vec{n}$ и падающие световые лучи образуют угол α (рис.10 б).

Рассмотрим проекцию площадки площадью S на плоскость, перпендикулярную направлению распространения световых лучей. Площадь этой проекции определится по формуле

$$S_0 = S \cos \alpha,$$

где α - угол между векторами $\vec{n}$ и $\vec{n}_0$;

$\vec{n}_0$ - вектор нормали к площади S_0 .

Как следует из рис. 10 б, угол между нормальными к плоскостям α равен углу между плоскостями (углы со взаимно перпендикулярными сторонами равны).

На площадку S падает световой поток

$$\Phi = SE,$$

где E -освещенность площадки S ,

а на площадку S_0 – световой поток

$$\Phi = E_0 S_0 \text{ или } \Phi = E_0 S \cos \alpha,$$

где E_0 – освещенность площадки S_0 .

Поскольку на площадку S и на её проекцию S_0 падает один и тот же световой поток Φ , имеем

$$ES = E_0 S \cos \alpha.$$

Отсюда следует, что

$$E = E_0 \cos \alpha. \quad (4 \text{ 11.8})$$

Формула (11.8) выражает **второй закон освещённости**:

освещенность поверхности, создаваемая параллельными лучами, пропорциональна косинусу угла падения лучей.

Значение E_0 можно определить по формуле (3), так как площадка S_0 расположена перпендикулярно падающим световым лучам. Подставив (3) в (4), получим формулу, объединяющую первый и второй законы освещенности:

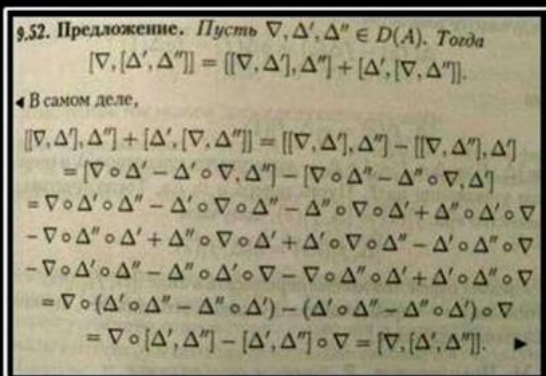
$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha \quad (5)$$

Где α - угол падения лучей относительно нормали к поверхности в точке наблюдения.

Освещенность - величина скалярная, поэтому в том случае, когда свет на поверхность падает от нескольких источников, освещенность в каждой точке поверхности равна алгебраической сумме освещенностей, создаваемых в этой точке каждым из источников в отдельности.

Освещённость поверхности в различных случаях

Освещённость	E , лк
При киносъемке в павильоне	10 000
На рабочем месте для точных работ	200
На рабочем месте для грубых работ	30
Для чтения	75 – 100
На экране кинотеатра	20 – 80
В коридоре и на лестничной клетке	15
На улице и площади	4



В самом деле



Светимость L

Протяженный источник света можно охарактеризовать светимостью L различных его участков, под которой понимается световой поток, испускаемый единицей площади наружу по всем направлениям (в пределах значений θ от 0 до $\frac{\pi}{2}$; θ - угол, образуемый данным направлением с внешней нормалью к поверхности):

$$L = \frac{d\Phi_{исп}}{dS} \quad (6)$$

($d\Phi_{исп}$ - поток, испускаемый наружу по всем направлениям элементом поверхности dS источника в пределах значений θ от 0 до $\frac{\pi}{2}$).

Светимость может возникнуть за счет отражения поверхностью падающего на нее света. Тогда под $d\Phi_{исп}$ в формуле (6) следует понимать поток, отраженный элементом поверхности dS по всем направлениям в пределах значений θ от 0 до $\frac{\pi}{2}$. Единицей светимости является люмен на квадратный метр ($лм/м^2$).

Яркость B

Светимость характеризует излучение (или отражение) света данным местом поверхности по всем направлениям. Для характеристики излучения (отражения) света в заданном направлении служит величина, называемая яркостью B .

Яркостью B излучаемой поверхности I под углом θ называется величина, равная отношению силы света I элементарной поверхности I , излучаемой в данном направлении, к площади проекции излучающей поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению (см. рис. 11):

$$B = \frac{I}{S_{\perp}} = \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \theta}.$$

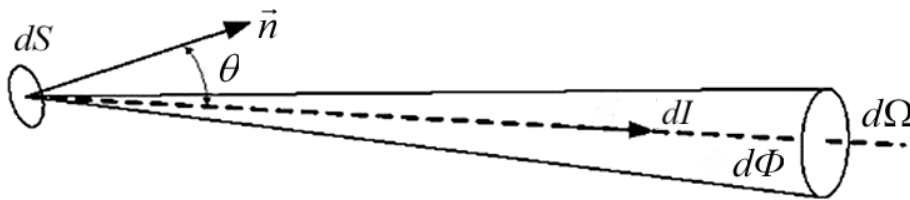


Рис. 11

Направление можно задать полярным углом θ (отсчитываемым от внешней нормали n к излучающей площадке dS) и азимутальным углом φ .

Рассмотрим элементарный телесный угол $d\Omega$, опирающийся на светящуюся площадку dS и ориентированный в направлении (θ, φ) .

Сила света площадки ΔS в данном направлении равна

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega},$$

где $d\Phi$ - световой поток, распространяющийся в пределах угла $d\Omega$.

Проекцией dS на плоскость, перпендикулярную к направлению (θ, φ) , будет $dS \cos \theta$. Следовательно, яркость равна

$$B = \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (7)$$

в общем случае яркость различна для разных направлений, то есть $B = B(\theta, \varphi)$. Как и светимость, яркость может быть использована для характеристики поверхности, отражающей падающий на неё свет.

Согласно формуле (7) поток, излучаемый площадной ΔS в пределах телесного угла $d\Omega$ по направлению, определяемому θ и φ , равен

$$d\Phi = B(\theta, \varphi) d\Omega \Delta S \cos \theta \quad (8)$$

Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям ($B = \text{const}$), называются **ламбертовскими** (подчиняющимися закону Ламберта) или **косинусными** (поток, посылаемый элементом поверхности такого источника, пропорционален $\cos \theta$).

Строго следует закону Ламберта только абсолютно черное тело.

Светимость L и яркость B ламбертовского источника связаны простым соотношением. Чтобы найти его, подставим в (8) $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ и проинтегрируем полученное выражение по φ в пределах от 0 до 2π и по θ от 0 до $\frac{\pi}{2}$, учтя, что $B = \text{const}$.

В результате мы найдем полный световой поток, испускаемый элементом поверхности ΔS ламбертовского источника наружу по всем направлениям:

$$\Delta \Phi_{\text{исп}} = B \Delta S \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi B \Delta S$$

Разделив этот поток на ΔS , получим светимость.

Таким образом, для ламбертовского источника

$$L = \pi B.$$

Единицей яркости служит *кандела на квадратный метр* ($\text{кд}/\text{м}^2$).

Яркостью $1 \text{ кд}/\text{м}^2$ обладает равномерно светящаяся плоская поверхность в направлении нормали к ней, если в этом направлении сила света одного квадратного метра поверхности равна одной канделе.

Фотометрические приборы (фотометры)

Фотометры - это приборы измерения каких-либо **фотометрических величин** (чаще всего для сравнения силы света).

При использовании фотометра осуществляют определённое пространственное ограничение потока излучения и регистрацию его приёмником излучения с заданной **спектральной** чувствительностью.

Существуют фотометры, приспособленные для непосредственного измерения освещенности. Такие фотометры называются **люксметрами**. Примером люксметра может служить фотоэкспонетр, применяемый при кино- и фотосъемках. Создание достаточной освещенности рабочего места позволяет сохранять зрение и предотвращать переутомление глаз. Несоблюдение светового режима ведет, прежде всего, к близорукости и преждевременному снижению остроты зрения. Так же отрицательно влияет и слишком сильный свет. Для разного вида работ установлены оптимальные нормы освещенности, соблюдение которых должно строго контролироваться.

Яркость объекта измеряют **яркометрами**, световой поток и световую энергию - с помощью **фотометра интегрирующего**. Приборы для измерения цвета объекта называют **колориметрами**.

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Волновой оптикой называется это раздел оптики, изучающий явления, в которых проявляются волновые свойства света (интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия света и другие, связанные с ними явления).

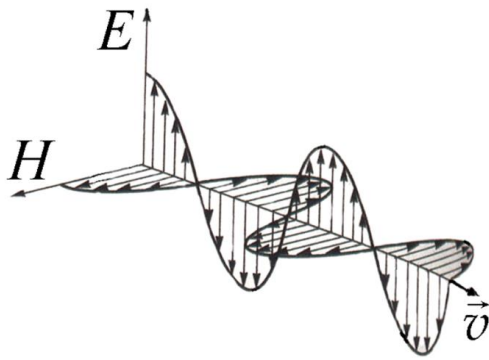
Электромагнитной волной называется процесс распространения в пространстве переменного электромагнитного поля.

Светом называются электромагнитные волны с длиной волны от 380 нм до 760 нм, воспринимаемые органами зрения человека.

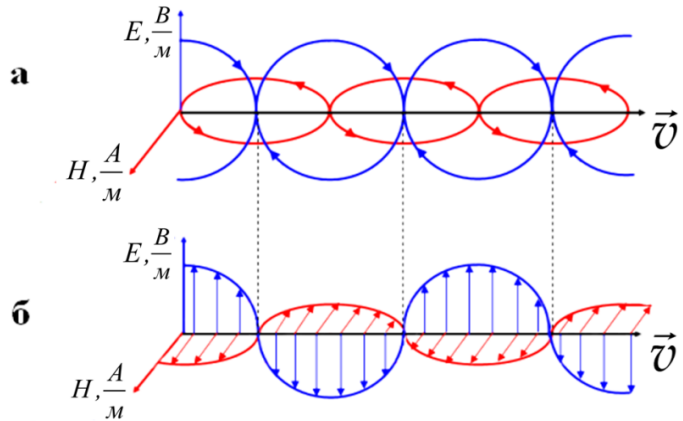
(1 нм (нанометр) = 10^{-9} м)

Модель плоской монохроматической электромагнитной волны в вакууме

Из решения уравнений Максвелла следует существование в природе электромагнитных волн, которые обладают следующими особенностями:



Распределение проекции векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ на направление распространения плоской электромагнитной волны в вакууме



а. распределение электрического и магнитного полей в плоской электромагнитной волне в вакууме согласно уравнениям Максвелла,

б. распределение проекции векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ на направление распространения плоской электромагнитной волны в вакууме

1. В случае плоской электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме, вектора напряжённости электрического поля $\vec{E}$ и напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ колеблются синфазно (то есть одновременно достигают максимальных и минимальных значений) во взаимно перпендикулярных плоскостях (то есть $\vec{E} \perp \vec{H}$) и одновременно перпендикулярно вектору скорости $\vec{v}$ распространения волны (то есть $\vec{E} \perp \vec{v}$ и $\vec{H} \perp \vec{v}$). Причём в любой момент времени выполняется условие

$$\epsilon \epsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2,$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость вещества, в котором распространяется электромагнитная волна;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ - электрическая постоянная; E - напряжённость электрического поля волны, $\frac{B}{\text{м}}$;

μ - магнитная проницаемость вещества, в котором распространяется электромагнитная волна;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_{\text{H}}}{\text{м}}$; H - напряжённость магнитного поля волны, $\frac{A}{\text{м}}$.

Поскольку $\vec{E} \perp \vec{H}$, то при рассмотрении поляризации света достаточно исследовать поведение лишь одного из них.

Наблюдения показывают, что физиологические, фотохимические, фотоэлектрические и другие свойства света обусловлены колебаниями электрического вектора $\vec{E}$ в световой волне. Поэтому вектор $\vec{E}$ называют обычно **световым вектором** и исследуют только его.

2. вектор скорости волны $\vec{v}$ сонаправлен с вектором $[\vec{E}\vec{H}]$.

Таким образом, из теории Максвелла следует, что плоская электромагнитная волна является поперечной.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Поляризацией света называется физическая характеристика оптического излучения, которая описывает поперечную анизотропию световых волн.

Иногда **поляризацией света** называют процесс получения поляризованного света из естественного или частично поляризованного.

Понятие «поляризация света» ввёл в физику английский учёный И. Ньютон в 1704 г.

Виды поляризованного света

Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний вектора $\vec{E}$ каким-либо образом упорядочены.

Различают три вида поляризованного света: **плоскополяризованный**, **эллиптически-поляризованный** и **циркулярно поляризованный** свет.

Плоскополяризованным или **линейно-поляризованным** называется свет, при распространении которого вектор $\vec{E}$ колеблется всё время в какой-либо одной плоскости.

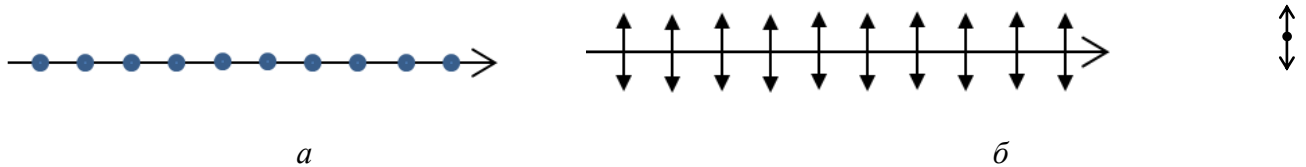
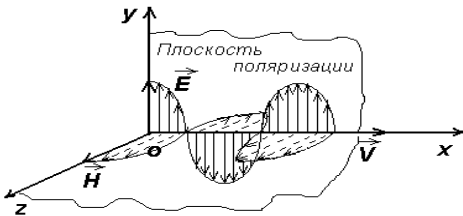


Рис. 12 Изображение **плоскополяризованного** света на чертежах

- Если вектор $\vec{E}$ плоскополяризованного света колеблется в плоскости перпендикулярной плоскости падения света, то на чертежах он изображается точками $\bullet \bullet$ (см. рис. 12 (а)).

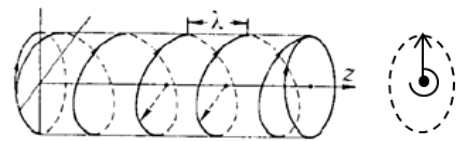
- Если вектор $\vec{E}$ плоскополяризованного света колеблется в плоскости падения света, то на чертежах он изображается черточками $\updownarrow \updownarrow$ (см. рис. 12 (б)).

Плоскостью падения света называется плоскость, проходящая через падающий луч и перпендикуляр, восстановленный в точку падения к границе раздела двух сред.

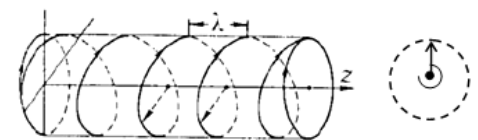


Плоскостью поляризации света называется плоскость, проходящая через направление колебаний вектора $\vec{E}$ плоскополяризованного света и направление распространения этой волны.

Эллиптически-поляризованным называется свет, при распространении которого, конец вектора $\vec{E}$ описывает эллипс.



Циркулярно поляризованным или **поляризованным по кругу** называется свет, при распространении которого, конец вектора $\vec{E}$ описывает окружность (круговую поляризацию обнаружил в 1815 г. Био).



Квант света, испускаемый атомом, представляет собой ограниченную в пространстве электромагнитную волну длиной приблизительно 3 метра (так, называемый **цуг** электромагнитного поля) и является линейно поляризованным.

В реальных источниках света одновременно излучают множество атомов, причём каждый атом излучает квант света с произвольной ориентацией вектора $\vec{E}$ и независимо друг от друга. Поэтому в результирующей световой волне направление колебаний вектора $\vec{E}$ в каждый момент времени непредсказуемо и все направления перпендикулярные распространению световой волны оказываются равновероятными.

Естественным или **неполяризованным** называется свет, при распространении которого в каждый момент времени направление колебаний вектора $\vec{E}$ непредсказуемо и все направления перпендикулярные распространению световой волны оказываются равновероятными.

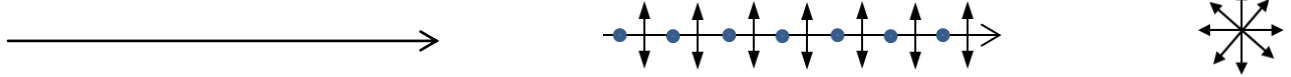


Рис. 13. Изображение **естественного** света на чертежах

Таким образом, естественный или неполяризованный свет можно рассматривать как наложение многих электромагнитных волн, распространяющихся в одном и том же направлении, но со всевозможными ориентациями плоскостей колебаний вектора $\vec{E}$. Для неполяризованного света нельзя указать плоскость преимущественного расположения вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$. Все ориентации этого вектора равновероятны.

Чаще всего имеется какое-либо преимущественное направление колебаний вектора $\vec{E}$.

Частично поляризованным называется свет, при распространении которого, вектор $\vec{E}$ колеблется в каком-либо преимущественном направлении.

В этом случае говорят, что свет является в плоскости, проходящей через это направление.

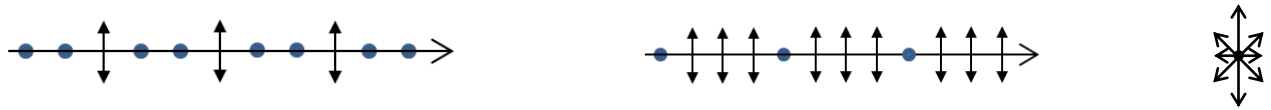


Рис. 14. Изображение **частично поляризованного** света на чертежах

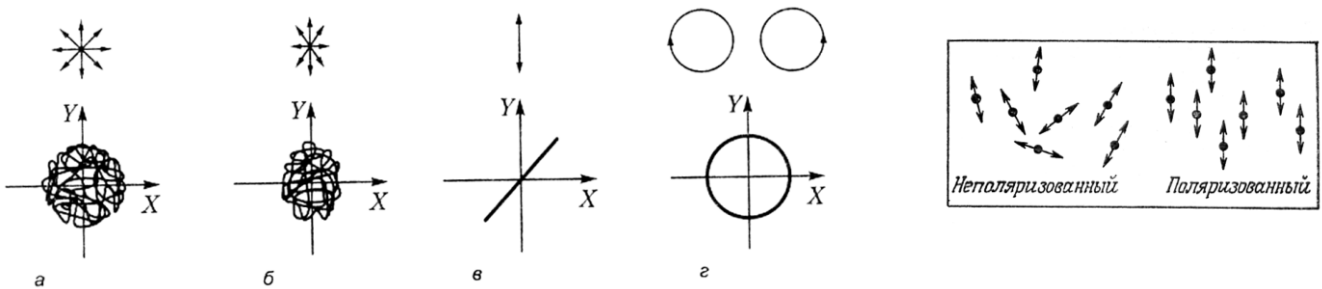


Рис. 15. Движение вектора $\vec{E}$ при распространении в пространстве естественного (а), частично поляризованного (б), плоско поляризованного (в) и циркулярно поляризованного (г) света

Идёт занятие по физике. Преподаватель спрашивает студентку-первокурсницу:

- Расскажи мне про поляризацию света.
- Я не Света, я — Наташа!

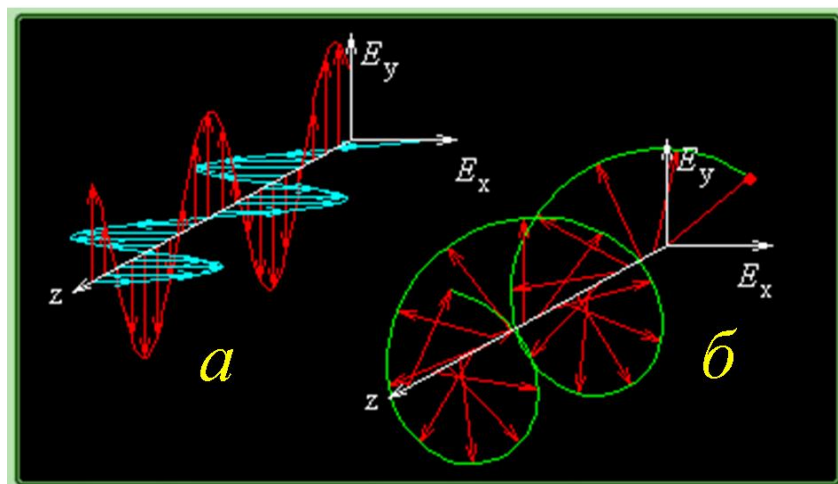
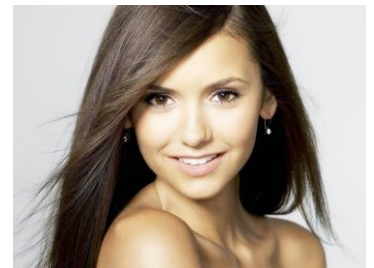


Рис. 16.

а) линейно поляризованная волна б) циркулярно поляризованная волна

Для получения и анализа поляризованного света применяют специальные приборы: **поляризаторы** и **анализаторы**.

Поляризатором называется устройство для получения поляризованного света.

Человеческий глаз не отличает естественный свет от поляризованного, поэтому для анализа поляризации света используют устройство, называемое *анализатором*.

Анализатором называется устройство для анализа вида и степени поляризации поляризованного света.

Степенью поляризации света называется скалярная величина, равная

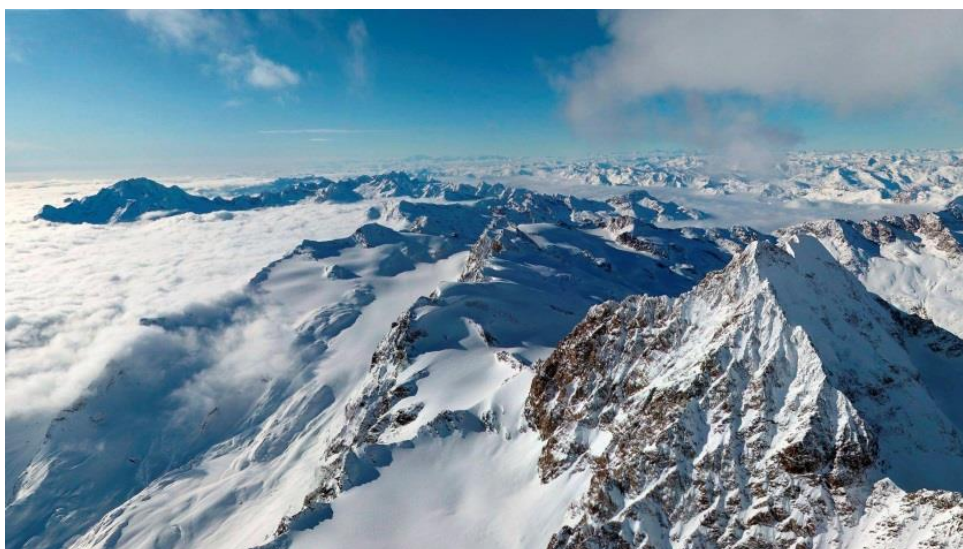
$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ соответственно максимальная и минимальная интенсивности света, пропускаемого анализатором.

- | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| - для естественного света | $I_{\max} = I_{\min}$ | и, следовательно, $P = 0$, |
| - для линейно поляризованного света | $I_{\min} = 0$ | и, следовательно, $P = 1$, |
| - для частично поляризованного света | $I_{\max} \neq I_{\min}$ | и, следовательно, $0 < P < 1$. |

Поляризатором и анализатором может служить один и тот же прибор в зависимости от того, для каких целей его используют: для получения поляризованного света или для его анализа.

Главной плоскостью поляризатора (плоскостью пропускания поляризатора) называется плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$, после прохождения через поляризатор света. (аналогичное определение для главной плоскости анализатора).



Способы получения линейно поляризованного света

Для получения полностью или частично поляризованного света обычно используют одно из трёх физических явлений:

- поляризация света при его отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков,
- явление двойного лучепреломления,
- явление линейного дихроизма.

Поляризация света при его отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков

При падении естественного света на границу двух диэлектриков (например, воздух и стекло), отражённый и преломлённый лучи оказываются частично поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях, причём, в отражённом луче вектор $\vec{E}$ совершает колебания преимущественно в плоскости перпендикулярной плоскости падения света, а в преломлённом луче, преимущественно в плоскости падения света.

Плоскостью падения света называется плоскость, проходящая через падающий луч и перпендикуляр, восстановленный в точку падения к границе раздела двух сред.

Степень поляризации P этих лучей зависит от их угла падения α на диэлектрик.

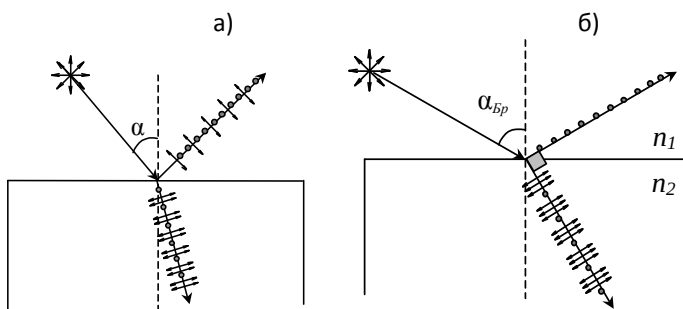


Рис. 17

Сначала степень поляризации P монотонно возрастает с увеличением угла падения α (см. случай а) на рис. 17 и достигает своего максимального значения P_{max} при угле α_{Br} , называемом **углом Брюстера** (см. случай б) на рис. 17), а затем монотонно убывает.

При падении естественного света под углом Брюстера α_{Br} отражённый луч оказывается линейно поляризованным

(то есть $P=1$), а преломлённый луч достигает своей максимальной степени поляризации (то есть P_{max}) и оказывается перпендикулярным к отражённому лучу (см. рис. 17 случай б)).

Угол Брюстера α_{Br} , при котором наблюдается линейная поляризация отражённого от границы раздела двух диэлектриков света, определяется по **закону Брюстера**:

Тангенс угла Брюстера $\operatorname{tg} \alpha_{Br}$ равен относительному показателю преломления n_{21} второй среды относительно первой:

$$\operatorname{tg} \alpha_{Br} = n_{21},$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой,

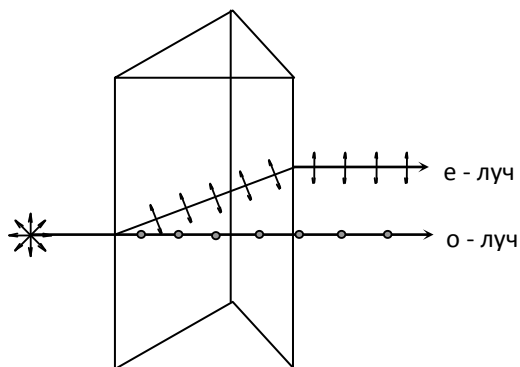
а n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй среды соответственно.



Явление двойного лучепреломления

Двойным лучепреломлением называется явление раздвоения падающего на анизотропную среду (например, на прозрачный кристалл) светового луча, обусловленное зависимостью скорости распространения света в этой среде

(т.е. показателя преломления среды n) от направления колебания вектора $\vec{E}$ в световой волне.



У кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением, существует одно (**одноосные кристаллы**) или два (**двуосные кристаллы**) направления, в которых раздвоения луча не происходит. Это направление называется **оптической осью кристалла**.

При падении неполяризованной световой волны на одноосный кристалл она расщепляется на два луча со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации.

Один из лучей имеет плоскость поляризации перпендикулярную главному сечению кристалла и подчиняется законам геометрической оптики (этот луч называют **обыкновенным** и обозначают **о – лучом**),

а другой луч имеет плоскость поляризации параллельную главному сечению кристалла и не подчиняется законам геометрической оптики (поэтому этот луч называют **необыкновенным** и обозначают **е – лучом**).

Таким образом, при выходе из кристалла оба луча оказываются линейно поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Главным сечением кристалла называется плоскость, проходящая через направление падающего светового луча и оптическую ось кристалла.

Скорость распространения **о-луча** a , следовательно, и его показатель преломления n_o не зависят от направления распространения этого луча в кристалле, (т.е. $n_o = \text{const}$), а скорость **е-луча** и, следовательно, n_e зависят от его направления распространения в кристалле (т.е. $n_e \neq \text{const}$).

При распространении света вдоль оптической оси кристалла $n_o = n_e$, поэтому явление двойного лучепреломления не наблюдается.



Остановись мгновение, ты прекрасно

Явление линейного дихроизма

Линейным дихроизмом называется явление, при котором среды, обладающие двойным лучепреломлением, неодинаково поглощают лучи с разными плоскостями поляризации.

Например, пластинка из кристалла **турмалина** толщиной всего в 1 мм пропускает свет уже только одного направления колебаний вектора $\vec{E}$ и полностью поглощает свет всех других направлений. Поэтому такие пластинки раньше использовали в качестве поляризаторов.

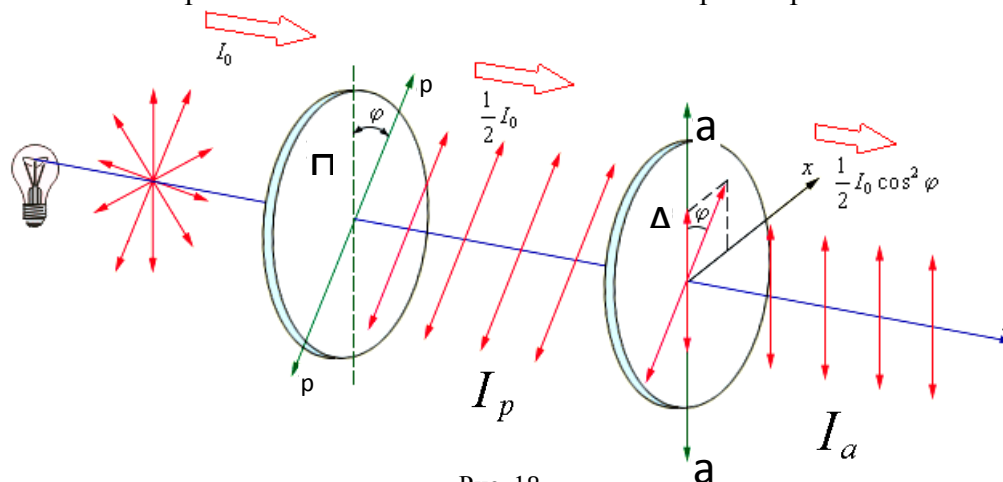


Рис. 18

На рис. 18 поляризатор Π преобразует падающий на него естественный свет интенсивностью I_0 в плоскополяризованный, интенсивность которого при прохождении через поляризатор уменьшается в два раза, то есть, $I_p = \frac{1}{2} I_0$, а затем этот свет проходит через анализатор A , который, в свою очередь ослабляет свет ещё в $\cos^2 \varphi$, где φ - это угол между главными плоскостями поляризатора $p - p$ и анализатора $a - a$.

Интенсивность света, прошедшего через анализатор I_a , можно определить по **закону Малюса**:
Интенсивность света, прошедшего через анализатор I_a , равна интенсивности линейно поляризованного света, падающего на анализатор I_p , умноженной на квадрат косинуса угла $\cos^2 \varphi$ между плоскостью поляризации падающего на анализатор света и плоскостью пропускания анализатора:

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi.$$



Искусственная оптическая анизотропия. Вращение плоскости поляризации

При одностороннем сжатии или растяжении стеклянной пластинки возникает двойное лучепреломление. При этом

$$n_o - n_e = k_1 \sigma,$$

где $\sigma = F / S$ - механическое напряжение, k_1 - постоянная, зависящая от свойств вещества.

Таким образом, оптически изотропное вещество под влиянием механической деформации становится анизотропным (*явление фотоупругости*).

Керр обнаружил, что жидкий или твердый изотропный диэлектрик, помещенный в однородное электрическое поле с напряженностью E , становится оптически анизотропным (*эффект Керра*).

При этом

$$n_o - n_e = k_2 E^2$$

где k_2 - постоянная, зависящая от свойств вещества.

Некоторые вещества (например кварц, водный раствор сахара, скипидар), называемые оптически активными, обладают способностью вращать плоскость поляризации при прохождении линейно поляризованного света. Угол поворота

$$\varphi = \alpha l,$$

где α - постоянная вращения, зависящая от свойств вещества, l - расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе.

Фарадей обнаружил вращение плоскости поляризации в постоянном магнитном поле с напряженностью H , когда свет распространяется вдоль магнитного поля.

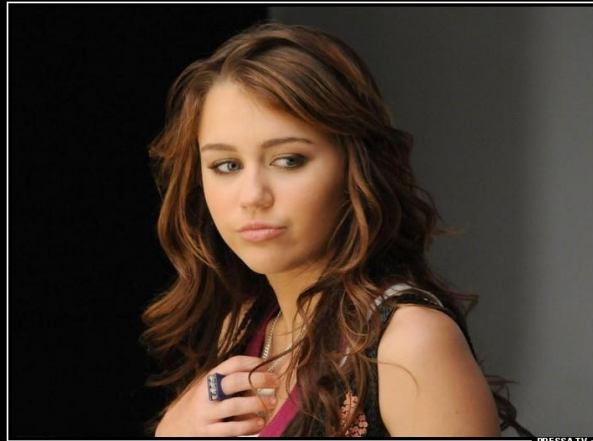
$$\varphi = V H l,$$

где V - постоянная Верде, зависящая от свойств вещества, l - длина пути света в веществе.



ЗАБЫТЬ МЕНЯ?

ЭТО Ж КАКУЮ ФОРМУ СКЛЕРОЗА НАДО ИМЕТЬ?



ЧЕГО-ТО НЕ ХВАТАЕТ

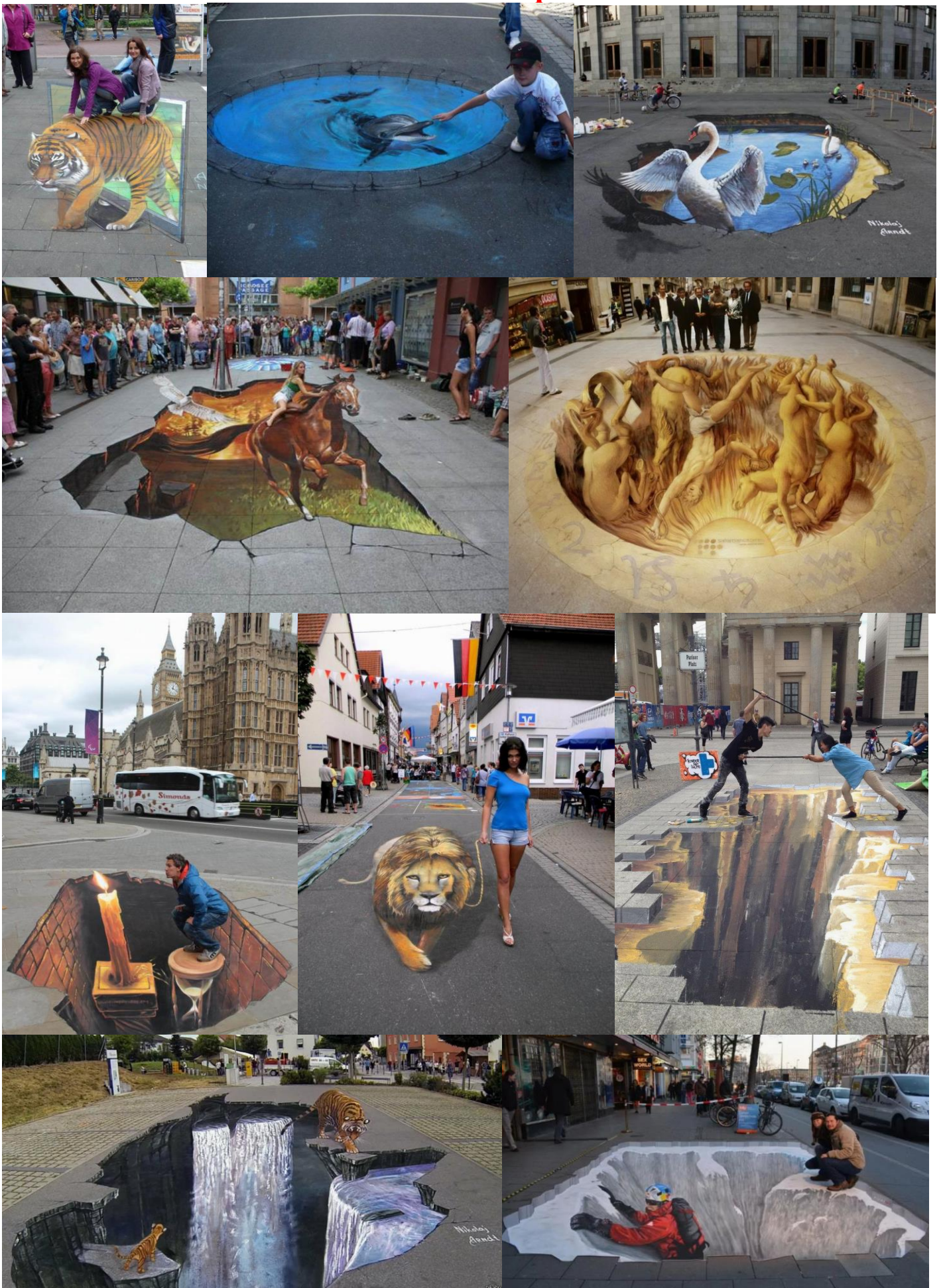
ТО ЛИ ВИТАМИНОВ, ТО ЛИ ДЕНЕГ...



На экзамене преподаватель решил просмотреть конспект студента, с удивлением обнаруживает пустые страницы и естественно спрашивает почему.

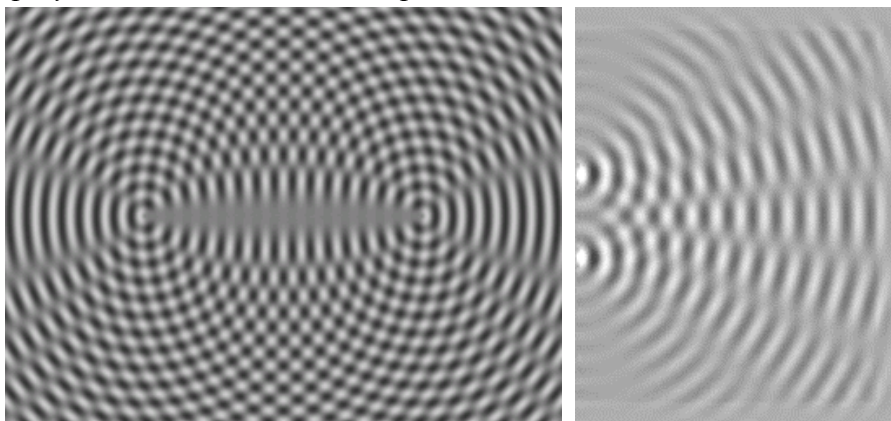
— Как же, — отвечает студент — вы же говорили записывать только умные мысли

Иллюзии на асфалте



Интерференция света

Интерференцией света называется явление перераспределения световой энергии в пространстве, то есть усиление света в одних точках пространства и ослабление света в других точках пространства, в результате наложения когерентных световых волн.



Когерентными называются волны, разность фаз между которыми не изменяется с течением времени (когерентными могут быть только волны одинаковой частоты).

Монохроматическими называются волны какой-либо одной частоты (или длины волны).

Монохроматическая волна - это строго гармоническая (синусоидальная) волна с постоянными во времени частотой, амплитудой и начальной фазой.

Амплитуда и фаза такой волны могут изменяться от одной точки пространства к другой, частота же остается постоянной во всем пространстве.

Монохроматическая волна – это модель, идеализация реальной волны: она не ограничена ни во времени, ни в пространстве, поэтому не может быть реализована в действительности. Однако эта идеализация удобна для описания и играет большую роль в учении о волнах.

Расчет интерференции двух волн

Сущность интерференции рассмотрим на примере сложения двух одномерных гармонических волн (волн вида $E = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$) одинаковой частоты и одинаковой плоскости поляризации. Накладываясь друг на друга, они возбуждают в некоторой точке пространства гармонические колебания

$$E = E_1 + E_2 = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) + E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) = E_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

амплитуду которых можно определить методом векторных диаграмм:

$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды $I \sim E_0^2$. Поэтому, наблюдаемая при наложении волн результирующая интенсивность равна

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1)$$

Из анализа уравнения (1) следует, что результат сложения колебаний зависит от разности фаз $\varphi_2 - \varphi_1$, которая в общем случае меняется при переходе от одной точки пространства к другой. При этом возможны следующие три случая:

1. Разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ меняется в данной точке пространства с течением времени произвольно

Так как частота колебаний световых волн очень большая, то глаз человека и другие приёмники светового излучения воспринимают усреднённую по времени интенсивность.

Так как среднее значение $\langle \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \rangle = 0$, то из (1) следует, что результирующая интенсивность света равна

$$I = I_1 + I_2 + 0 = I_1 + I_2,$$

то есть, результирующая интенсивность света равна сумме интенсивностей складываемых световых волн. Этот результат наблюдается нами в повседневной жизни.

2. **Разность фаз в данной точке пространства с течением времени остаётся постоянной**
 $\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$, но $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$

В этом случае из (1) следует, что результирующая интенсивность света равна

$$I = I_1 + I_2 - \text{Const} > I_1 + I_2,$$

то есть, результирующая интенсивность света оказывается больше суммы интенсивностей складываемых световых волн. *В результате происходит усиление света при наложении.*

Максимальная интенсивность $I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ будет при условии

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

когда $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$.

При $I_1 = I_2 = I_0$ следует, что интенсивность в максимумах увеличится в 4 раза ($I_{\max} = 4I_0$).

3. **Разность фаз в данной точке пространства с течением времени остаётся постоянной**
 $\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$, но $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$

В этом случае из (1) следует, что результирующая интенсивность света равна

$$I = I_1 + I_2 - \text{Const} < I_1 + I_2,$$

то есть, результирующая интенсивность света меньше суммы интенсивностей складываемых световых волн. *В результате происходит ослабление света при наложении.*

Минимальная интенсивность $I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ будет при условии

$$\varphi_2 - \varphi_1 = (2m+1)\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

когда $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$. При $I_1 = I_2 = I_0$ следует, что $I_{\min} = 0$.

Обычно мы имеем дело со случаем 1, поэтому интерференционная картинка не наблюдается. Условия 2 и 3 выполняются только в том случае, если разность фаз складываемых колебаний $\varphi_2 - \varphi_1$ в данной точке пространства с течением времени не изменяется (такие волны называются **когерентными**). Когерентными могут быть волны только одинаковой частоты $\omega_1 = \omega_2$, или частоты которых изменяются с течением времени по одинаковому закону.

Таким образом, при наложении когерентных световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности. Это явление называется **интерференцией волн**.

Оптическая длина пути L и оптическая разность хода волн Δ

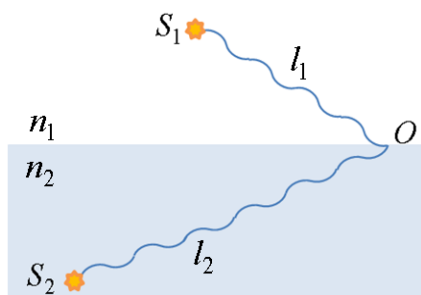


Рис. 19 Возникновение оптической разности хода лучей

Пусть две волны создаются когерентными источниками S_1 и S_2 и до точки O проходят разные **геометрические длины путей** l_1 и l_2 в средах с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 соответственно (рис. 19).

Оптической длиной пути L называется произведение геометрической длины пути l световой волны на абсолютный показатель преломления вещества n , в котором она распространяется волны $L = nl$.

Величину $\Delta = L_1 - L_2 = n_2 l_2 - n_1 l_1$ называют **оптической разностью хода** интерферирующих волн, (Δ -дэльта, метр),

где $L = nl$ - оптическая длина пути светового луча, м,

$\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, м,

n_1 и n_2 - абсолютные показатели преломления 1-ой и 2-й среды, в которых распространяются интерферирующие лучи.

l_1 и l_2 - геометрические длины путей 1-го и 2-го лучей, м.

Условие максимума и минимума при интерференции света

Если оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей равна чётному числу полуволен, то будет наблюдаться **максимум** (в этом случае волны приходят в данную точку пространства в одинаковой фазе (см. рис. 20))

$$\Delta_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, м.

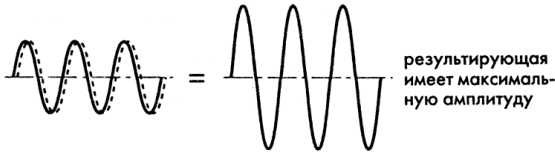
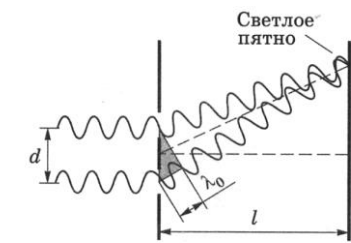


Рис. 20

Если оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей равна нечётному числу полуволен, то будет наблюдаться **минимум** (в этом случае волны приходят в данную точку пространства в противофазе (см.рис.21))

$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, м.

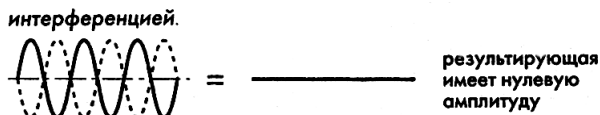
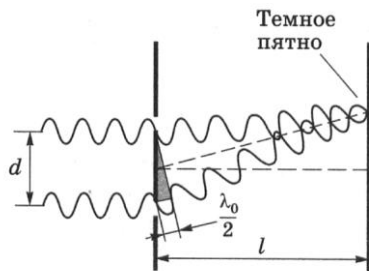
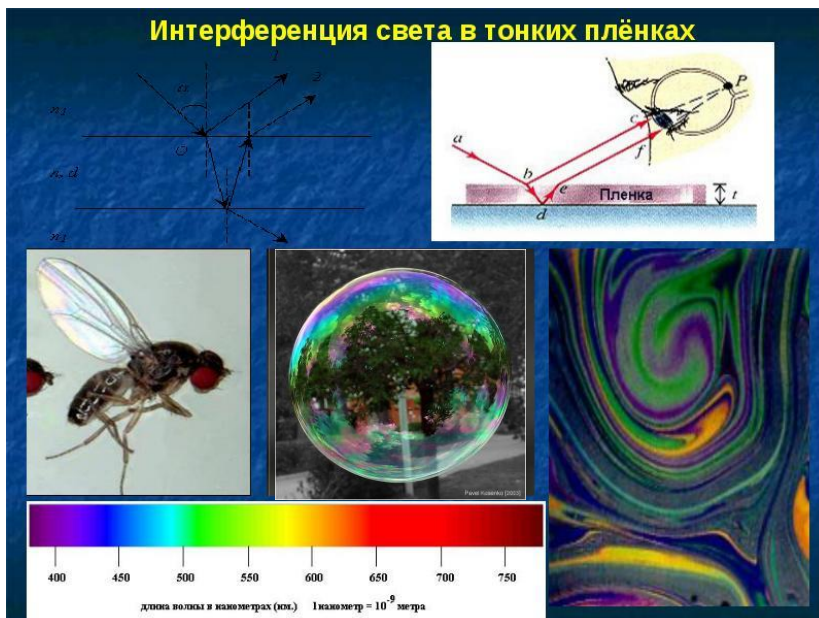


Рис. 21



Интерференция волн на поверхности воды

Когерентными называются волны, разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний которых не изменяется с течением времени (когерентными могут быть волны только одинаковой частоты)

Интерференция – одно из проявлений волновой природы света. Интенсивность света в области перекрытия световых пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность света больше, а в минимумах меньше суммы интенсивностей отдельных пучков. Наблюдаемое при этом перераспределение света называется **интерференционной картиной**.

Интерференция свойственна не только световым волнам, являющимися по своей природе электромагнитными волнами, но и волнам любой природы.

Причина интерференции световых волн

Как объяснить необычное для нас явление, когда при взаимодействии света вдруг образуются тёмные пятна? Обычно, чтобы в комнате стало ярче, мы включаем больше лампочек и никогда не наблюдаем, что где-то становится темнее. Объясняется это следующим образом.

Для возникновения интерференции необходимо, чтобы световые волны были когерентными между собой. Однако естественные источники света являются некогерентными, поэтому при обычных условиях мы интерференцию не наблюдаем. Самый простой способ получения когерентного света из естественного, состоит в разделении одной и той же световой волны на несколько волн, например, при отражении или преломлении света. Если затем заставить эти волны пройти разные оптические пути, а затем наложить их друг на друга, то может наблюдаться интерференция света. Это и происходит при возникновении колец Ньютона и в опыте Юнга.

Однако для интерференции световых волн недостаточно одного условия их когерентности. Необходимо ещё, чтобы интерферирующие волны имели одинаковую плоскость поляризации, то есть одинаковые направления колебаний вектора напряжённости электрического поля $\vec{E}$. В этом случае возможны две ситуации:

1. если в данную точку пространства волны приходят в одинаковой фазе, с одинаковой плоскостью поляризации, то направления колебаний векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ оказываются сонаправленными. В этом случае согласно принципу суперпозиции результирующее поле равно $E_{рез} = E_1 + E_2$ и будет наблюдаться усиление света в этой точке пространства (то есть условие максимума),
2. если в данную точку пространства волны приходят в противофазе, с одинаковой плоскостью поляризации, то направления колебаний векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ оказываются противоположно направленными. В этом случае согласно принципу суперпозиции результирующее поле равно $E_{рез} = E_1 - E_2$ и будет наблюдаться ослабление света в этой точке пространства (то есть условие минимума)



Я ЗАБОЛЕЛА! ДИАГНОЗ:

"ОСТРАЯ НЕДОСТАТОЧНОСТЬ СКАЗОЧНЫХ СОБЫТИЙ В МОЕЙ ЖИЗНИ"

Fishki.net



ЭТИМ ЛЕТОМ Я МАХНУ НА МОРЕ

РУКОЙ...

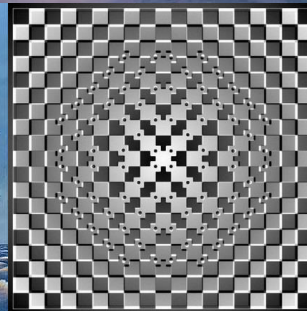
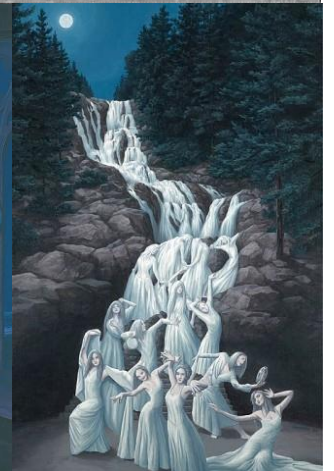
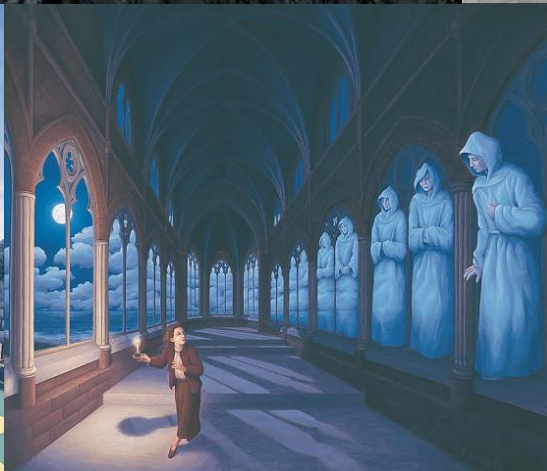
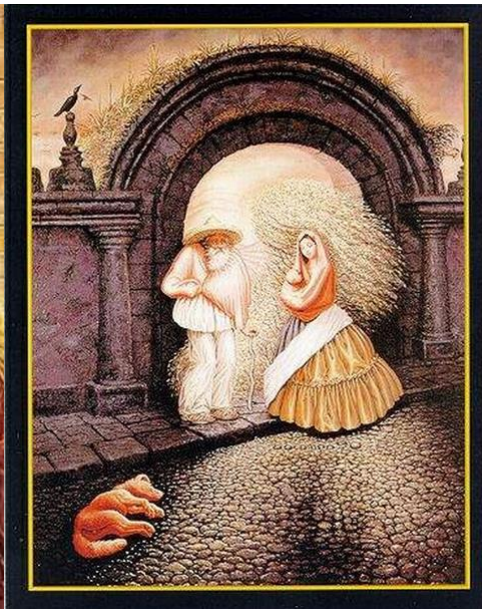
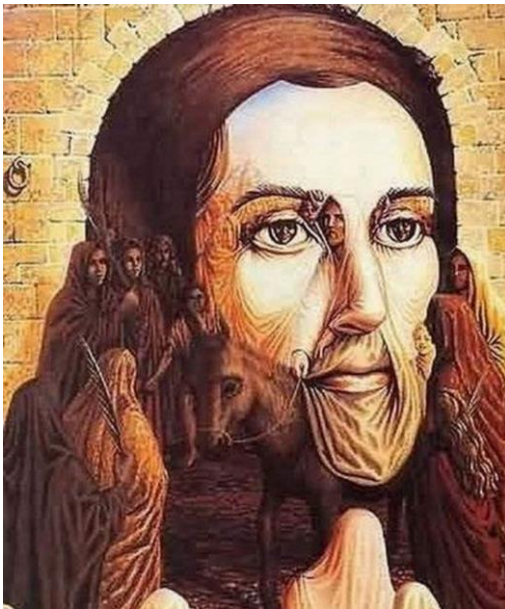
PRESSA.TV



Студент на экзамене по физике. Старенький профессор тычет пальцем в формулу и говорит:

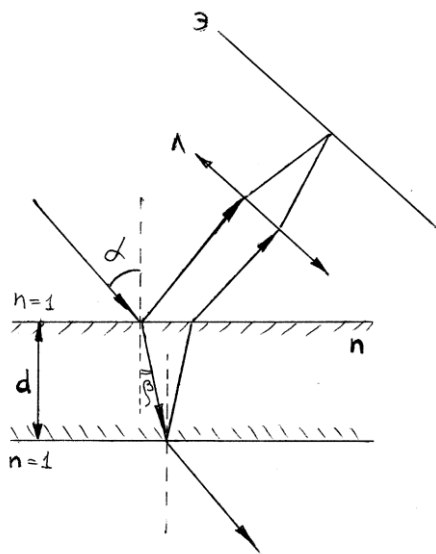
- Что это?
- Кажись буква С...
- И что она означает?
- Кажись скорость света...
- Какая С?! Какая скорость света?! Это скобка! Хотя... Ладно, иди, три...

Оптические иллюзии



Интерференция света в тонких плёнках

Тонкими называются плёнки, в которых возможно наблюдение интерференции света. (их толщина обычно не превышает нескольких десятков длин волн)



При падении света на тонкую прозрачную плёнку происходит отражение от обеих поверхностей плёнки. В результате возникают две световые волны, которые при определённых условиях могут интерферировать.

Оптическую разность хода двух волн при отражении от тонкой плоскопараллельной пластинки в отражённом свете можно определить по формуле

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = 2dn \cos \beta + \frac{\lambda}{2},$$

где

Δ - оптическая разность хода волн, м

d - толщина плёнки, м

n - показатель преломления плёнки

α - угол падения света на плёнку

β - угол преломления света в плёнке

λ - длина световой волны, падающей на плёнку, м.

Кольца Ньютона

Кольцами Ньютона называется интерференционная картинка в виде чередующихся тёмных и светлых концентрических колец, которые возникают при отражении света от двух поверхностей, одна из которых плоская, а другая имеет относительно большой радиус кривизны и соприкасается с первой (например, стеклянная пластинка соприкасается с плосковыпуклой линзой).

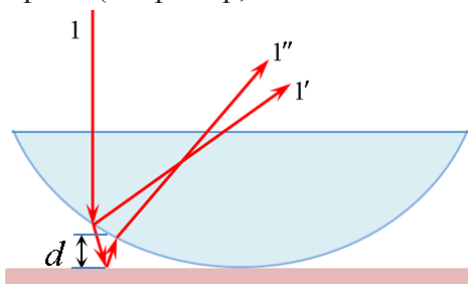


Рис.22. Оптическая схема колец Ньютона

Если на такую систему в направлении, перпендикулярном плоской поверхности линзы, падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от нижней границы линзы и верхней границы плоской поверхности пластинки, могут интерферировать между собой.

Впервые были описаны в 1675 году Исааком Ньютоном, поэтому названы в честь него. Однако объяснить природу возникновения этих колец он не смог. Впервые дать правильное объяснение этого явления смог английский учёный Томас Юнг в 1801 г.

Наблюдение формы колец Ньютона позволяет осуществлять быстрый и весьма точный контроль качества шлифовки плоских пластин и линз, а также близость поверхностей последних к сферической форме.

Кроме того, кольца Ньютона используются для экспериментального определения радиусов кривизны R сферических поверхностей, измерения длин световых волн λ и показателей преломления вещества n .

Интерференция света возникает в результате возникновения оптической разности хода Δ между интерферирующими световыми лучами $1'$ и $1''$ в тонком зазоре (обычно воздушном), разделяющем соприкасающиеся поверхности. Этот воздушный зазор играет роль тонкой плёнки переменной толщины.

Оптическая разность хода Δ интерферирующих волн изменяется при переходе от одних точек на поверхности пластинки к другим в соответствии с изменением толщины d воздушного зазора, так что одинаковые условия интерференции возникают в точках, соответствующих одинаковым значениям d . Поэтому рассматриваемая интерференционная картина называется **полосами равной толщины**.

Полосами равной толщины называют интерференционную картину, возникающую в результате наложения световых лучей, падающих на пластину переменной толщины, от мест с одинаковой толщиной.

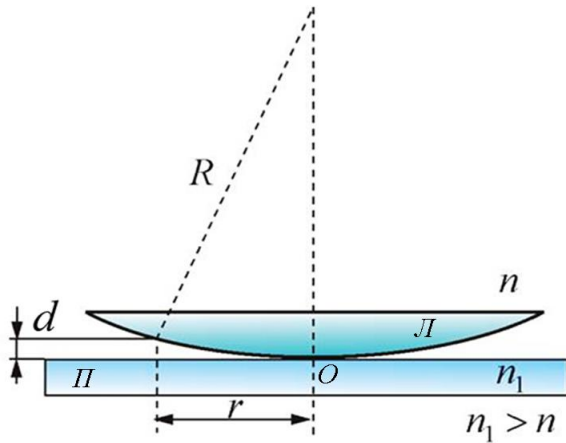


Рис.23

удаления от центрального пятна. В проходящем свете наблюдается противоположная картина: центральное пятно - светлое, следующее кольцо - темное и т. д.

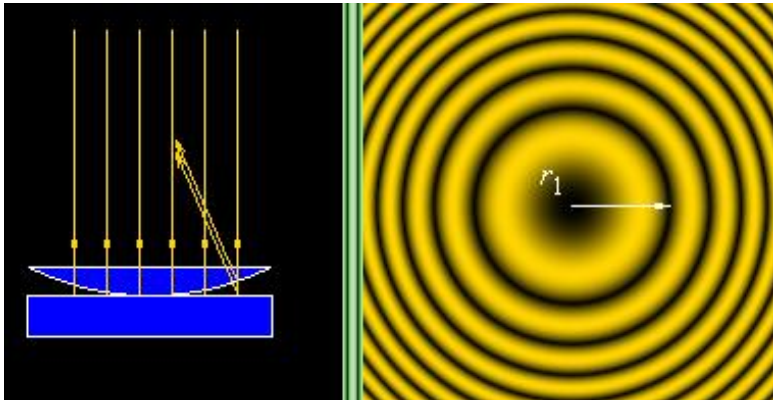
Оптическая разность хода между лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей

воздушного зазора на произвольном расстоянии r от точки O , равна $\Delta = 2nd + \frac{\lambda}{2}$,

где n – показатель преломления воздуха можно принять равным единице, а слагаемое $\frac{\lambda}{2}$ обусловлено возникновением дополнительного сдвига по фазе на π при отражении света от поверхности пластины (т.к. свет при прохождении в воздушном клине отражается от оптически более плотной среды).

Оптическая разность хода между лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора на произвольном расстоянии r от точки O можно найти так же из геометрических соображений. В случае колец Ньютона можно получить следующее уравнение:

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}.$$



Радиусы светлых колец Ньютона в отражённом свете

$$r_m^{\text{светл}} = \sqrt{(2m-1)\frac{\lambda}{2}R},$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$

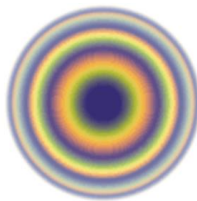
Радиусы тёмных колец Ньютона в отражённом свете

$$r_m^{\text{темн}} = \sqrt{m\lambda R},$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$,

R - радиус кривизны линзы, m ,

λ - длина световой волны, m .



1



2

3

Проблема когерентности световых волн

Теория Юнга позволила объяснить интерференционные явления, возникающие при сложении двух монохроматических волн одной и той же частоты. Реальные световые волны не являются строго монохроматическими. В силу фундаментальных физических причин излучение всегда имеет статистический характер. Атомы светового источника излучают независимо друг от друга, в случайные моменты времени, и излучение каждого атома длится очень короткое время ($\tau \leq 10^{-8} \text{ с}$). Результирующее излучение источника в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа атомов. Через время порядка τ , вся совокупность излучающих атомов обновляется. Поэтому суммарное излучение будет иметь другую амплитуду и, что особенно важно, другую фазу. Фаза волны, излучаемой реальным источником света, остается приблизительно постоянной только на интервалах времени порядка τ . Отдельные «обрывки» излучения длительности τ называются **цугами**. Цуги имеют пространственную длину, равную $c \cdot \tau$, где c – скорость света. Длина цуга видимого диапазона света имеет величину $\approx 3 \text{ м}$. Колебания в разных цугах не согласованы между собой. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с беспорядочно меняющейся фазой. Принято говорить, что колебания в разных цугах некогерентны. Интервал времени τ , в течение которого фаза колебаний остается приблизительно постоянной, называют **временем когерентности**.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний, то есть колебаний, относящихся к одному и тому же цугу. Хотя фазы каждого из этих колебаний также подвержены случайным изменениям во времени, но эти изменения одинаковы, поэтому разность фаз когерентных колебаний остается постоянной. В этом случае наблюдается устойчивая интерференционная картина и, следовательно, выполняется принцип суперпозиции полей. При сложении некогерентных колебаний разность фаз оказывается случайной функцией времени. Интерференционные полосы испытывают беспорядочные перемещения из стороны в сторону, и за время Δt их регистрации, которая в оптических экспериментах значительно больше времени когерентности ($\Delta t \gg \tau$), происходит полное усреднение. Регистрирующее устройство (глаз, фотопластинка, фотоэлемент) зафиксирует в точке наблюдения усредненное значение интенсивности, равное сумме интенсивностей $I_1 + I_2$ обоих колебаний. В этом случае выполняется закон сложения интенсивностей.

Таким образом, интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Волны, создающие в точке наблюдения когерентные колебания, также называются когерентными. Волны от двух обычных независимых источников некогерентны и не могут дать интерференции.

Однако, даже в этом случае интерференционная картина исчезает, если оптическая разность хода Δ превысит длину когерентности $c \cdot \tau$.



интерференция света на крыльях Переливницы ивовой

Способы получения когерентного света от естественных источников

Естественным источником когерентного света являются *лазеры*. Излучение лазера, по сравнению с естественным светом, обладает огромной временной и пространственной когерентностью. Временная когерентность имеет значение порядка 10^{-5} с (гелий-неоновый лазер) а пространственная когерентность наблюдается во всем поперечном сечении светового пучка.

Для получения когерентных световых волн с помощью обычных (не лазерных) источников применяют *метод разделения света* от одного источника на две или нескольких систем волн (световых пучков). В каждой из них представлено излучение одних и тех же атомов источника, так что эти волны когерентны между собой и интерферируют при наложении.

Разделение света на когерентные пучки можно осуществить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел. Если затем заставить эти волны пройти разные оптические пути, а затем наложить их друг на друга, то может наблюдаться интерференция света. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Метод Юнга

Исторически первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, явился опыт Юнга (1802 г.). В опыте Юнга свет от источника, в качестве которого служила узкая щель S , падал на экран с двумя близко расположенными щелями S_1 и S_2 (рис. 24). Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширялся в следствии дифракции, поэтому на белом экране Θ световые пучки, прошедшие через щели S_1 и S_2 , перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

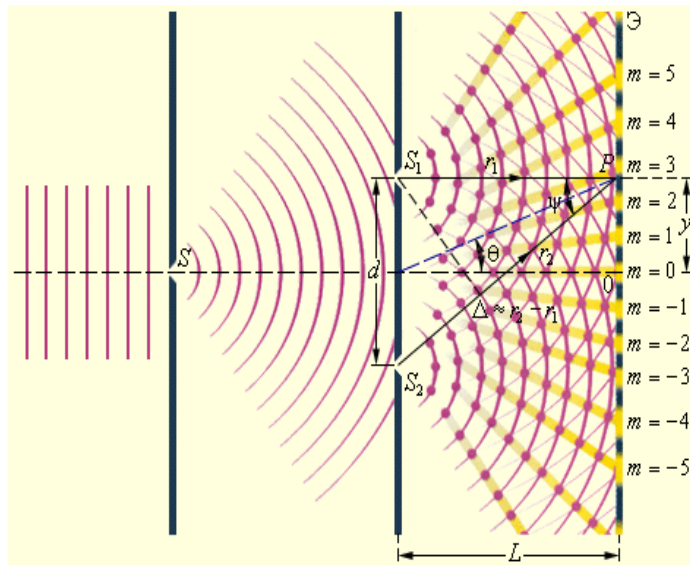


Рис. 24 Схема интерференционного опыта Юнга

Юнг был первым, кто понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников. Поэтому в его опыте щели S_1 и S_2 , которые можно рассматривать в соответствии с принципом Гюйгенса как источники вторичных волн, освещались светом одного источника S . При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками S_1 и S_2 , находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения P разные расстояния r_1 и r_2 . Следовательно, фазы колебаний, создаваемых волнами от источников S_1 и S_2 в точке P , вообще говоря, различны. Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников S_1 и S_2 распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название *принципа суперпозиции*.

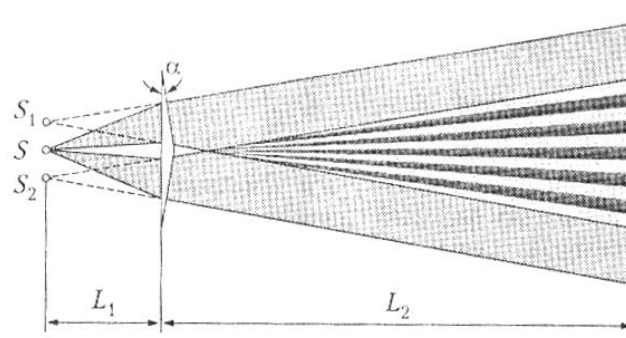
Бипризма Френеля

Рис. 25 Бипризма Френеля

Бипризма Френеля состоит из двух одинаковых с общей гранью призм с малыми преломляющими углами (рис. 25). Свет от прямолинейного источника S преломляется в обеих призмах, в результате чего образуются две когерентные цилиндрические волны, исходящих из мнимых источников S_1 и S_2 . На поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение этих волн и наблюдается интерференция.

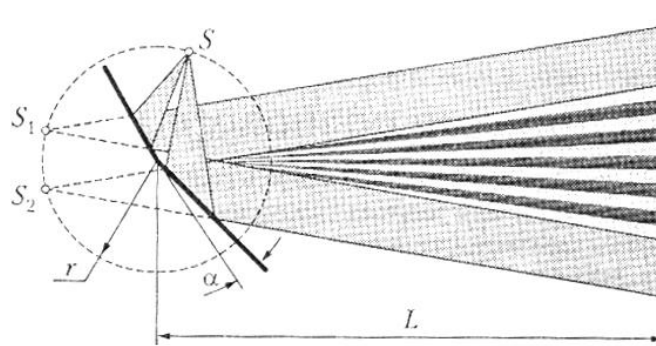
Бизеркала Френеля.

Рис. 26 Бизеркала Френеля

Бизеркала Френеля представляют собой два плоских зеркала (рис. 26), расположенных относительно друг друга под небольшим углом ($\varphi \ll 1$). На расстоянии r от линии пересечения зеркал параллельно ей находится прямолинейный источник света S . Световые пучки, отразившись от зеркал, являются мнимыми изображениями S в зеркалах. Мнимые источники S_1 и S_2 взаимно когерентны, и их световые пучки интерферируют в области взаимного перекрытия. От прямого попадания света на экран предохраняет заслонка.

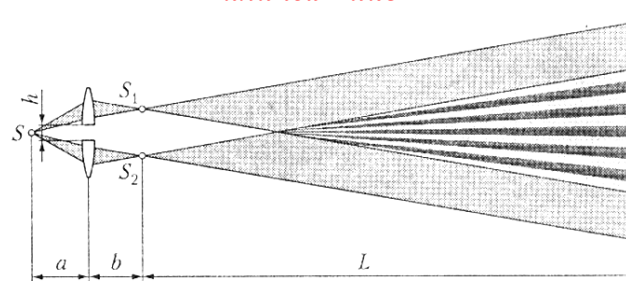
Билинза Бийе

Рис. 27 Билинза Бийе

Билинза Бийе состоит из двух одинаковых половинок, вырезанных из одной линзы (рис. 27). Свет от прямолинейного источника S преломляется в обеих половинках линзы, в результате чего образуются две когерентные волны, исходящих из мнимых источников S_1 и S_2 . На поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение этих волн и наблюдается интерференция.

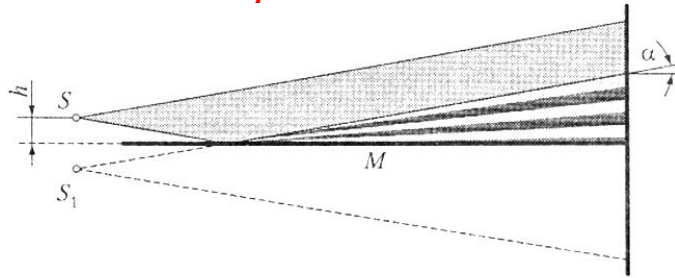


Рис. 28 Зеркало Ллойда

На очень малом расстоянии от плоского зеркала расположен точечный источник света, который создаёт в зеркале второй мнимый источник света (см. рис. 28). Оба источника оказываются когерентными. В результате отражения света от зеркала на поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение световых волн и наблюдается интерференция.

Применение интерференции

Просветление оптики. Явление интерференции применяется для улучшения качества оптических приборов и получения высокоотражающих покрытий. Прохождение света через каждую преломляющую поверхность линзы сопровождается отражением $\approx 4\%$ падающего света (при показателе преломления стекла $\approx 1,5$). Так как современные объективы состоят из большого количества линз, то число отражений в них велико, а поэтому велики и потери светового потока. Для устранения этого и других недостатков осуществляют так называемое *просветление оптики*. Для этого на свободные поверхности линз наносят тонкие пленки с показателем преломления меньшим, чем у материала линзы. При отражении света от границ раздела воздух–пленка и пленка–стекло возникает интерференция отраженных лучей. Толщину пленки d и показатели преломления стекла n_c и пленки n подбираются так, чтобы отраженные волны гасили друг друга. Для этого их амплитуды должны быть равны, а оптическая разность хода равна $(m + 1/2)\lambda_0$. Расчет показывает, что амплитуды отраженных лучей равны, если $n = \sqrt{n_c}$. Так как $n_c > n > 1$, то потеря полуволны происходит на обеих поверхностях, следовательно, условие минимума (если свет падает нормально)

$$2nd = (m + 1/2)\lambda_0.$$

Обычно принимают $m = 0$, тогда

$$nd = \lambda_0/4.$$

Так как добиться одновременного гашения для всех длин волн невозможно (показатель преломления зависит от длины волны), то это делается для цвета с $\lambda_0 \approx 0,55 \text{ мкм}$ (к нему наиболее чувствителен глаз). Поэтому объективы с просветленной оптикой имеют синевато-красный оттенок.

Интерференционные светофильтры. Многолучевую интерференцию можно осуществить в многослойной системе чередующихся пленок с разными показателями преломления (но одинаковой оптической толщиной, равной $\lambda_0/4$). При прохождении света возникает большое число отраженных интерферирующих лучей, которые при оптической толщине пленок $\lambda_0/4$ будут взаимно усиливаться, т.е. коэффициент отражения возрастает. Подобные отражатели применяются в лазерной технике, а также используются для создания интерференционных светофильтров.

Интерферометры. Явление интерференции применяется в очень точных измерительных приборах — *интерферометрах*. На рис. 12.17 изображена схема *интерферометра Майкельсона* — двухлучевого *интерферометра*, изобретённого *Альбертом Майкельсоном*. Данный прибор позволил впервые измерить *длину световой волны*. Конструктивно состоит из светоделительного зеркала, разделяющего входящий луч на два, которые в свою очередь, отражаются *зеркалом* обратно. На полупрозрачном зеркале разделённые лучи вновь направляются в одну сторону, чтобы, смешавшись на экране, образовать *интерференционную картину*. Анализируя её и изменяя длину одного плеча на известную величину, можно по изменению вида интерференционных полос измерить длину световой волны. Интерференционная картина наблюдается с помощью зрительной трубы.

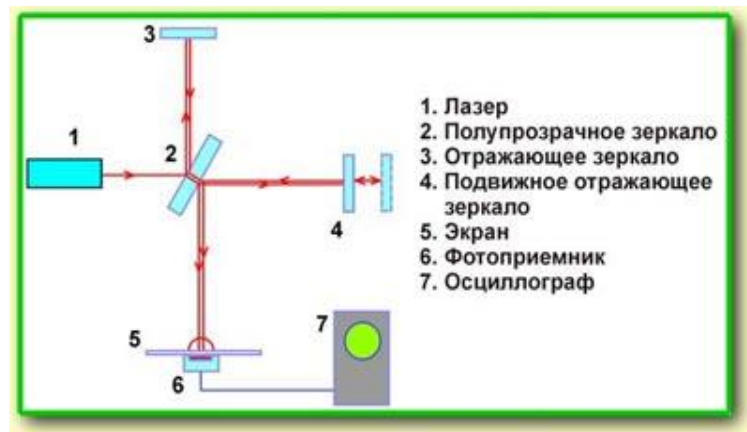


Рис. 29. Интерферометр Майкельсона

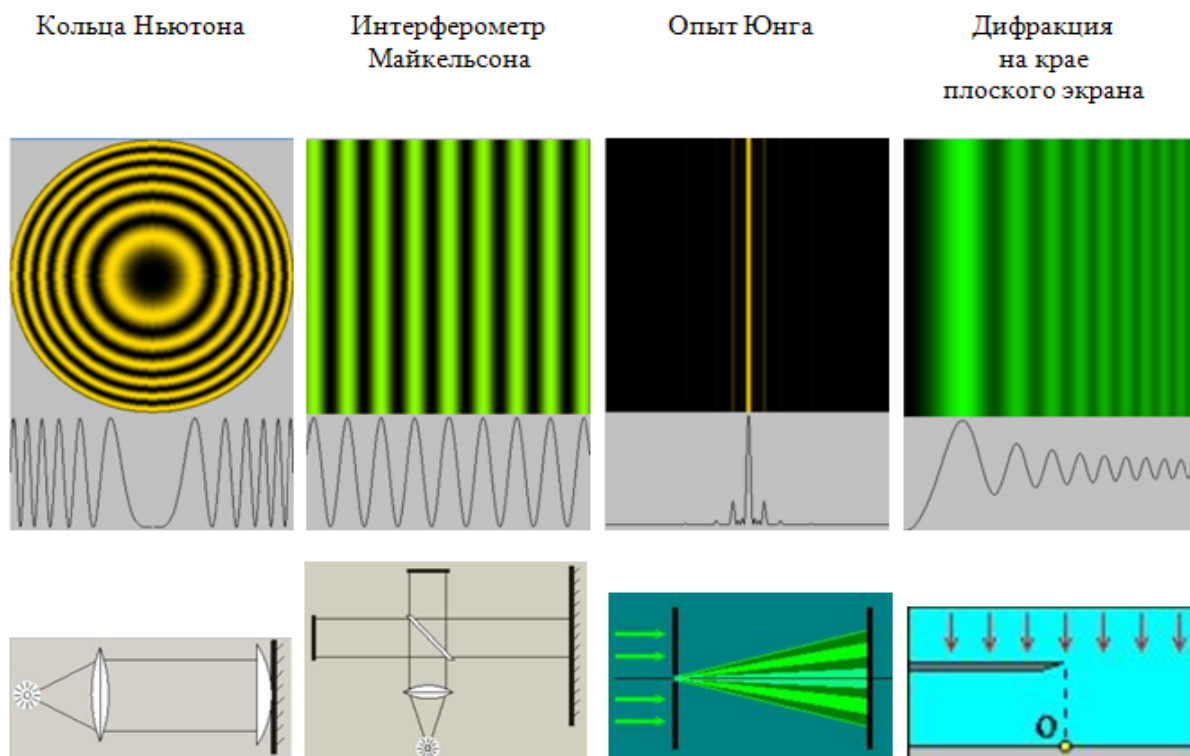
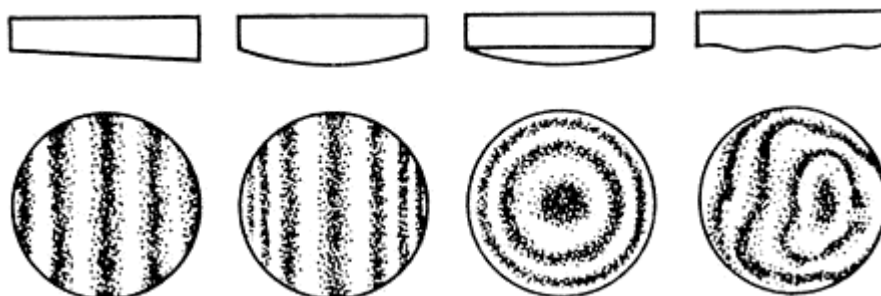


Рис. 30. Различные случаи наблюдения интерференции света



Применение интерференции света при обработке поверхности линз

Миражи



Не смотри, это мираж

Дорожная полиция перешла на новые методы работы. Чтобы радар показывал больше, они бегут навстречу автомобилю как можно быстрее.

КОГДА ЖДЕШЬ МАМУ С РОДИТЕЛЬСКОГО СОБРАНИЯ



ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракцией называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле – любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от прямолинейного.

Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшое отверстие в экранах и т.д. (см. рис. 31)

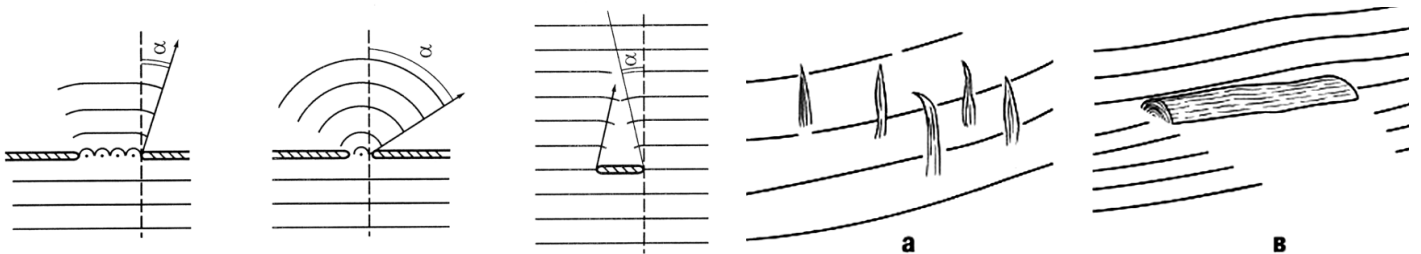
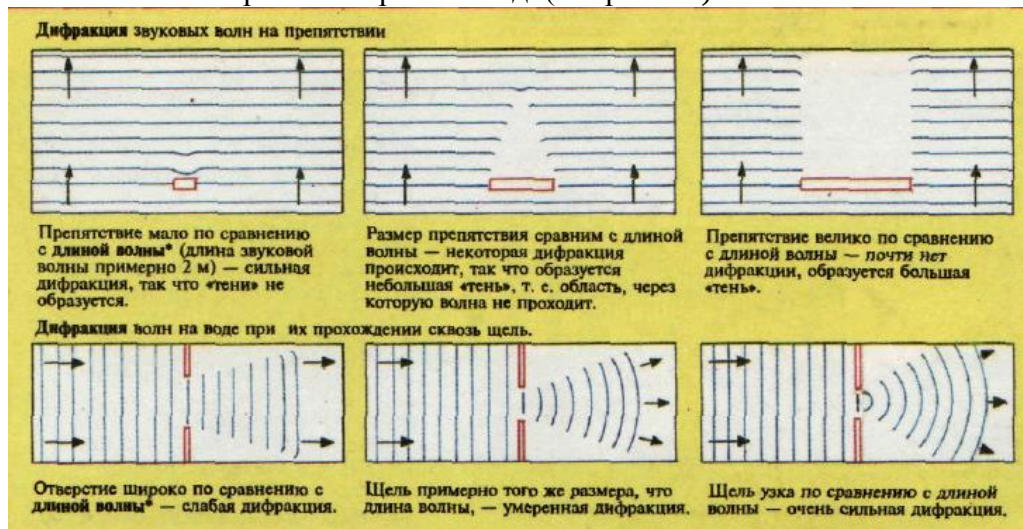


Рис. 31

Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате наложения (суперпозиции) волн. По историческим причинам отклонение от закона независимости световых пучков, возникающее в результате суперпозиции когерентных волн, принято называть интерференцией волн. Отклонение от закона прямолинейного распространения света, в свою очередь, принято называть дифракцией волн.

Как показывает опыт, свет при определённых условиях может заходить в область геометрической тени. Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое отверстие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина — система чередующихся светлых и тёмных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

По историческим причинам отклонение от закона независимости световых пучков, возникающее в результате суперпозиции когерентных волн, принято называть интерференцией волн. Отклонение от закона прямолинейного распространения света, в свою очередь, принято называть дифракцией волн.

Дифракция наблюдается всегда при встрече волнового фронта волны с препятствием и её результат зависит от соотношения между длиной волны λ и размерами препятствия d , причём:

- если $d \approx \lambda$, то дифракция наблюдается на небольших от препятствия расстояниях,
- если $d \gg \lambda$, то дифракция наблюдается на больших от препятствия расстояниях,
- если $d \ll \lambda$, то препятствие не оказывает влияние на распространение волны.

Дифракция объясняется интерференцией вторичных волн, возникающих при взаимодействии волны с веществом препятствия на границе отсечённого фронта волны и проявляется в огибании волнами препятствий и формировании интерференционной картины в области геометрической тени.

Вид дифракционной картины существенно зависит от соотношения между размерами препятствия d , длиной волны λ и расстояния от препятствия до точки наблюдения b .

Различают два вида дифракции: *дифракция Френеля* и *дифракция Фраунгофера*:

- если источник света S и точка наблюдения P расположены от препятствия настолько близко, что лучи, прошедшие через препятствие, приходят в точку наблюдения P сходящимся пучком, то говорят о *дифракции Френеля*.

- если источник света S и точка наблюдения P расположены от препятствия настолько далеко, что лучи, падающие на препятствие, и лучи, идущие в точку P , образуют практически параллельные пучки, говорят о *дифракции в параллельных лучах* или о *дифракции Фраунгофера*.

1. *Дифракция Френеля* или дифракция в сходящихся лучах, когда на препятствие падает плоская или сферическая волна, и дифракционная картина наблюдается на экране, находящемся на конечном расстоянии от него.

(в этом случае точка наблюдения находится на небольшом расстоянии от препятствия, таком, что волновой фронт, приходящий в точку наблюдения ещё сферический).

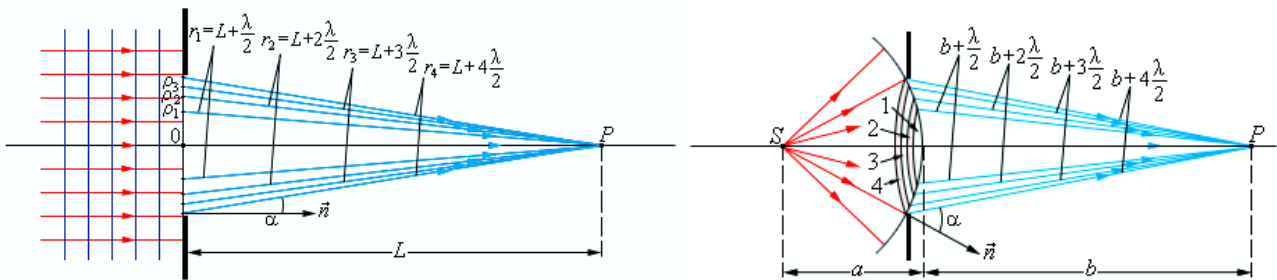


Рис. 32
Дифракция Френеля

2. *Дифракция Фраунгофера* или дифракция в параллельных лучах, когда на препятствие падает плоская волна, и дифракционная картина наблюдается на большом расстоянии от препятствия, таком, что волновой фронт, приходящий в точку наблюдения уже плоский.

Принципиально дифракция Фраунгофера не отличается от дифракции Френеля. Количественный критерий, позволяющий установить, какой вид дифракции имеет место, определяется величиной безразмерного параметра $b^2/l\lambda$, где b – характерный размер препятствия, l – расстояние между препятствием и экраном, на котором наблюдается дифракционная картина, λ – длина волны. Если

$$\frac{b^2}{l\lambda} \begin{cases} \ll 1 & \text{– дифракция Фраунгофера,} \\ \sim 1 & \text{– дифракция Френеля,} \\ \gg 1 & \text{– геометрическая оптика.} \end{cases}$$

Принцип Гюйгенса-Френеля

Дифракционные явления были известны ещё во времена И. Ньютона, но объяснить их на основе корпускулярной теории света оказалось невозможным. Первое качественное объяснение явления дифракции на основе волновых представлений было дано английским учёным Томасом Юнгом. Независимо от него французский учёный О. Френель развил количественную теорию дифракционных явлений. В основу своей теории Френель положил принцип Гюйгенса, дополнив его идеей об интерференции вторичных волн. Принцип Гюйгенса в его первоначальном виде позволял находить только положения волновых фронтов в последующие моменты времени, то есть определять направление распространения волны. По существу это был принцип геометрической оптики. Гипотезу Гюйгенса об огибающей вторичных волн Френель заменил физически ясным положением, согласно которому вторичные волны, приходя в точку наблюдения, интерферируют друг с другом.

Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате наложения волн.

Для решения задач, связанных с распространением волн при дифракции, применяют принцип Гюйгенса-Френеля:

1. Принцип Гюйгенса (1678 г)

Каждая точка среды, до которой дошла волна, становится источником вторичных сферических волн.

Огибающая этих вторичных волн в любой момент времени однозначно определяет фронт результирующей волны в этот момент.

Волновым фронтом называется геометрическое место точек, до которых дошла волна к рассматриваемому моменту времени.

Принцип Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об амплитуде, а, следовательно, и об интенсивности на фронте волны.

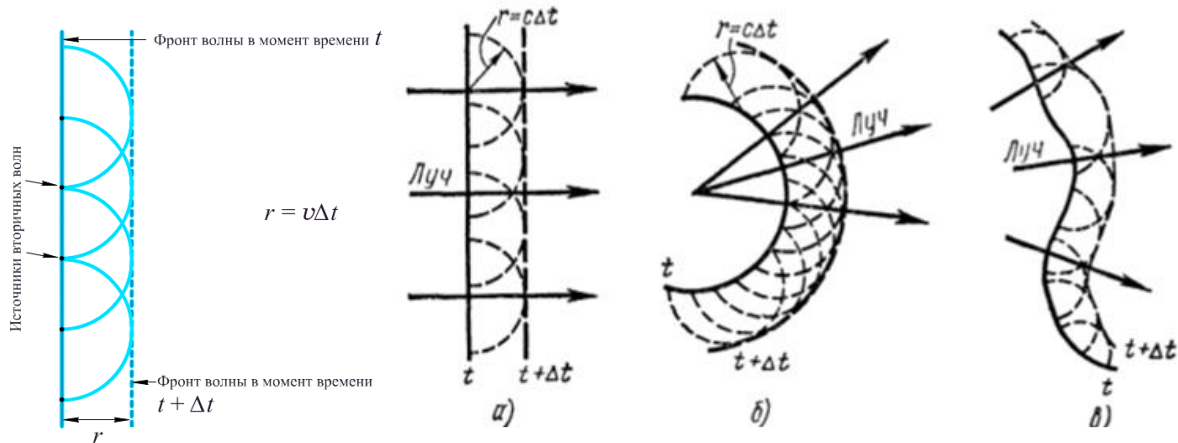


Рис. 33.

Применение принципа Гюйгенса для плоского а), сферического б) и волны произвольной формы в неоднородной среде в)

2. Принцип Френеля (1815 г)

Все вторичные источники волн, расположенные на одной и той же волновой поверхности, когерентны между собой.

Амплитуда результирующей волны в любой точке пространства является результатом интерференции волн, излучаемых вторичными источниками.

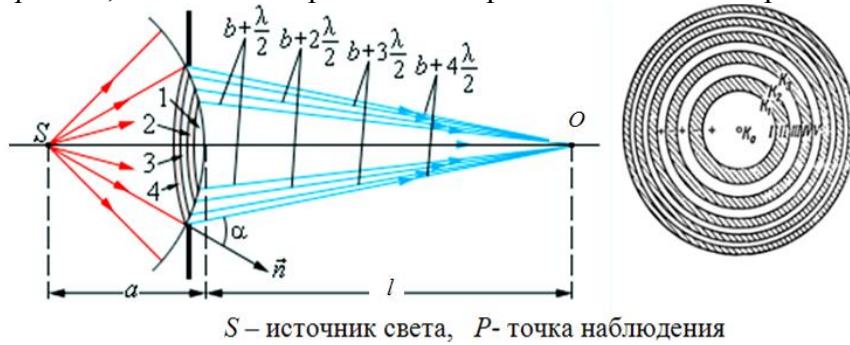
Принцип Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об амплитуде, а, следовательно, и об интенсивности на фронте волны. Из повседневного опыта известно, что в большом числе случаев лучи света не отклоняются от их прямолинейного распространения. Так, предметы, освещенные точечным источником света, дают резкую тень. Таким образом, принцип Гюйгенса нуждается в дополнении, позволяющем определять интенсивность волн.

Френель дополнил принцип Гюйгенса идеей интерференции вторичных волн. Согласно *принципу Гюйгенса-Френеля*, световая волна, возбуждаемая каким-либо источником S , может быть представлена как результат суперпозиции когерентных вторичных волн, излучаемых малыми элементами некоторой замкнутой поверхности, охватывающей источник S .



Метод зон Френеля

Учет амплитуд и фаз вторичных волн позволяет в принципе найти амплитуду результирующей волны в любой точке пространства и решить задачу о распространении света. В общем случае расчет интерференции вторичных волн довольно сложный и громоздкий. Однако ряд задач можно решить, применив чрезвычайно наглядный прием, заменяющий сложные вычисления. Метод этот получил название метода зон Френеля, в основе которого лежит принцип Гюйгенса-Френеля.



S – источник света, P – точка наблюдения

Рис. 34 Метод зон Френеля

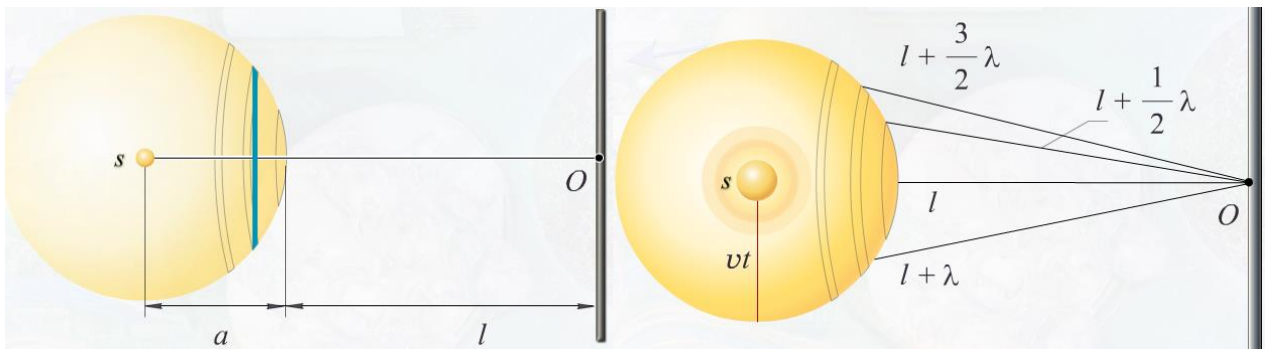
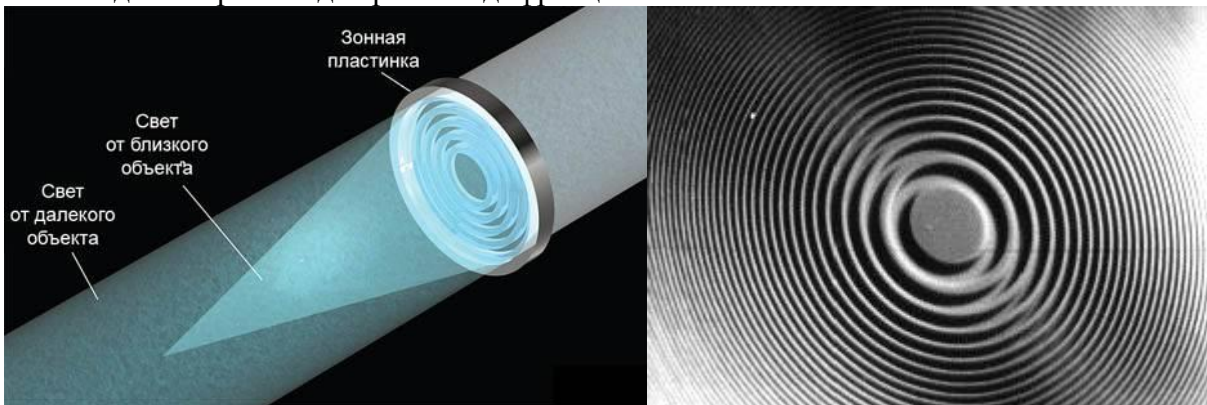


Рис. 35

Для определения амплитуды результирующей волны в точке O (см. рис. 34 и 35) разбивают сферическую поверхность на небольшие кольцевые участки (зоны Френеля) так, чтобы расстояние от краёв каждой соседней зоны Френеля до точки O отличались на пол длины световой волны $\frac{\lambda}{2}$ (см. рис. 34 и 35).

Так как разность хода волн от любых двух соседних зон равна пол длины волны $\frac{\lambda}{2}$, следовательно в точку O они будут приходить в противофазе и интерферируя между собой ослаблять друг друга. Можно показать, что если $\lambda \ll a$ и $\lambda \ll l$ (см. рис. 34), то площади всех зон Френеля оказываются одинаковыми.

Применим метод зон Френеля для расчета дифракции света.



Что такое "пи"?

Математик: Пи — это число, равное отношению длины окружности к ее диаметру.

Физик: Пи — это 3.1415927 ± 0.0000005

Инженер: Пи — это что-то около 3.

Дифракция Френеля

Дифракция Френеля наблюдается, когда на препятствие падает плоская или сферическая волна, и дифракционная картина формируется на экране, находящемся на конечном расстоянии от него (в этом случае размеры препятствия сравнимы с размерами первой зоны Френеля и вторичные волны от противоположных краёв препятствия могут приходить как в одинаковых, так и в противоположных фазах).

Дифракция Френеля на круглом отверстии

Сферическая волна, распространяющаяся из точечного источника монохроматического света S , встречает на своем пути экран с круглым отверстием, диаметр которого $d=BC$. Пусть Φ - фронт волны, который является частью поверхности сферы. Разобьем поверхность фронта на зоны Френеля (см. рис. 34) так, что волны от соседних зон приходят в точку наблюдения O в противофазе. Тогда амплитуда результирующей волны в точке O

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 \dots \pm A_i \quad (1)$$

где A_i - амплитуда волны, пришедшей от i -ой зоны Френеля. Перед A_i берется знак плюс, если i - нечетное, и минус, если i - четное.

Величина A_i зависит от площади i -той зоны и угла α_i между внешней нормалью к поверхности зоны в какой-либо точке и прямой, направленной из этой точки в точку O (см. рис.34), где в частности показан угол α).

Можно показать, что все зоны Френеля примерно равновелики по площади. Увеличение же угла α_i с ростом номера зоны приводит к уменьшению амплитуды A_i . Она уменьшается с ростом i также и вследствие увеличения расстояния от зоны до точки O . Таким образом, $A_1 > A_2 > \dots > A_m$.

При большом числе зон можно приближенно считать, что

$$A_i = \frac{A_{i-1} + A_{i+1}}{2}. \quad (2)$$

Перепишем теперь (1) в виде

$$A = \frac{1}{2} A_1 + \left(\frac{1}{2} A_1 - A_2 + \frac{1}{2} A_3 \right) + \left(\frac{1}{2} A_3 - A_4 + \frac{1}{2} A_5 \right) + \dots \pm \frac{A_m}{2} = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2} \quad (3)$$

так как согласно (2) все выражения, стоящие в скобках, равны нулю.

Можно показать, что общее число m зон Френеля, обращенное к точке O выражается формулой

$$m = \frac{d^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{L} \right)$$

где d - диаметр отверстия, R - расстояние от источника до отверстия, L – расстояние от отверстия до точки наблюдения, λ - длина волны.

Амплитуда результирующего колебания в точке O от всего волнового фронта

Так как в этом случае $A_m < A_1$, то из уравнения (3) следует, что результирующая амплитуда в точке наблюдения O равна:

$$A = \frac{1}{2} A_1,$$

То есть, результирующее действие в точке O полностью открытого фронта световой волны от точечного источника света равно половине действия первой зоны Френеля.



Найди 7 отличий

Дифракция Френеля на небольшом круглом отверстии в непрозрачном экране

При этом возможны следующие случаи:

1. Отверстие вырезает мало зон Френеля

- точка O находится по середине отверстия (рис. 36)

В этом случае согласно (3) можно написать:

$$A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}, \text{ если } m \text{ - нечётное,}$$

$$A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}, \text{ если } m \text{ - чётное.}$$

Таким образом, в точке O наблюдается либо усиление, либо ослабление света в зависимости от числа открытых зон Френеля.

- точка O смещена от центра отверстия (рис. 37 и 38)

В этом случае при перемещении точки наблюдения O вдоль прямой OP будет происходить исчезновение с одной стороны и появление с другой стороны частей разных зон Френеля и результирующая амплитуда в точке наблюдения P будет определяться по закону сохранения энергии отношением площадей открытых зон Френеля.

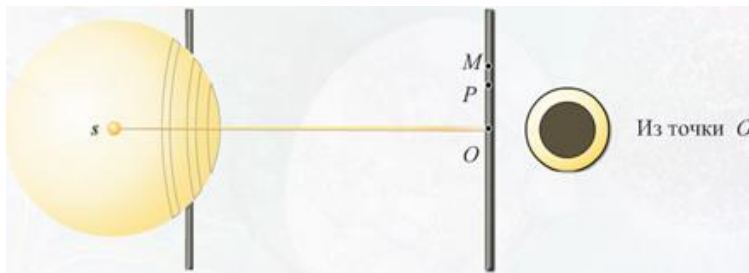


Рис. 36

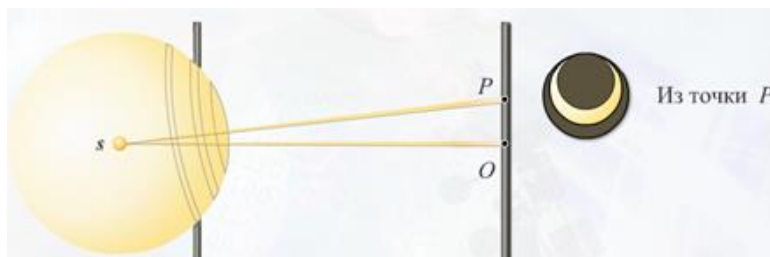


Рис. 37

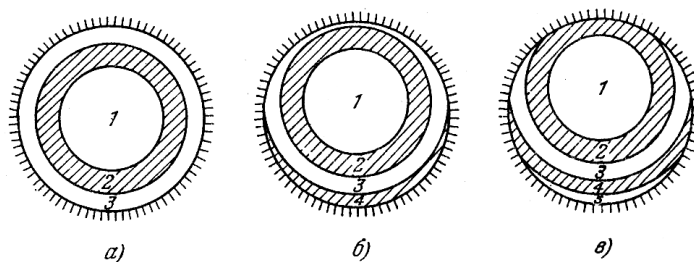
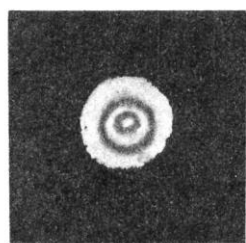
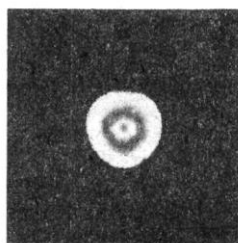


Рис. 38

Таким образом, если в точке наблюдения параллельно отверстию поместить экран, то на нём будет наблюдаться дифракционная картинка в виде чередующихся тёмных и светлых колец двух видов (рис.39):



Нечётное m



Чётное m

Рис. 39

1. в центре светлое пятно, если m нечётное

2. в центре тёмное пятно, если m чётное

2. Отверстие вырезает много зон Френеля ($m \gg 1$)

В этом случае $A_m \ll A_1$, тогда из уравнения (3) следует, что результирующая амплитуда в точке наблюдения O равна:

$$A = \frac{1}{2} A_1,$$

То есть, результирующее действие в точке O такая же, как от полностью открытого фронта световой волны, то есть в центре всегда наблюдается светлое пятно.

3. Отверстие вырезает только первую зону Френеля ($m=1$)

В этом случае

$$A = A_1,$$

То есть амплитуда колебаний в точке O вдвое больше, чем от всего открытого волнового фронта!

-если на отверстие падает сферическая волна, то радиус внешней границы m -ой зоны Френеля равен:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}$$

- если на отверстие падает плоская волна, то радиус внешней границы m -ой зоны Френеля равен:

$$r_m = \sqrt{b m \lambda},$$

где r_m - радиус внешней границы m -ой зоны Френеля, м,

a - расстояние от источника света до отверстия, м,

b - расстояние от отверстия до точки наблюдения, м,

λ - длина световой волны, м,

m - номер зоны Френеля.

Дифракция Френеля на небольшом диске (круглом непрозрачном экране)

Способ построения зон Френеля на открытой части волнового фронта Φ падающей монохроматической волны показан на рис. 40.

Пусть диск закрывает несколько зон, действие которых не будем учитывать. Нумерацию зон начнем от первой открытой зоны, расстояние до краев которой от точки M равны L и $L+1/2$. Последнюю открытую зону обозначим через m .

Проведя анализ, подобный предыдущему, и полагая, что m достаточно велико, получим для амплитуды результирующей волны, выражение $A = A_1/2$. Дифракционная картина на экране $\mathcal{E}$ имеет вид концентрических темных и светлых колец с центром в точке M , где всегда находится максимум (пятно Пуассона) см. рис.41.

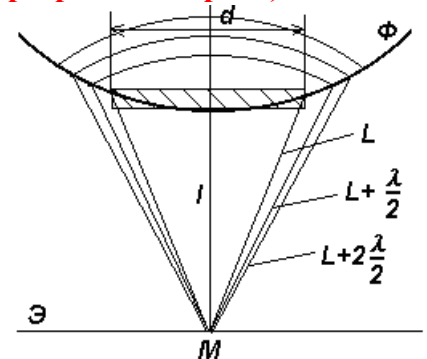


Рис. 40

Дифракция на круглом диске

Схема дифракции на круглом диске	Дифракционная картина	Кривая распределения интенсивности
На пути сферической волны от точечного источника S расположен круглый непрозрачный диск. Дифракционная картина наблюдается в точке B экрана $\mathcal{E}$, лежащей на линии, соединяющей S с центром диска. Экран параллелен диску.		

Рис. 41



Рис. 42

Если на пути световой волны в плоскости отверстия поставить зонную пластинку (см. рис. 42), которая перекрывала бы все четные зоны, то $A = A_1 + A_3 + A_5 + \dots$ и интенсивность $I = A^2$ в точке O резко возрастает. Еще большего эффекта можно достичь, не перекрывая четные зоны, а изменяя фазу их колебаний на π , тогда $A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$. Такая пластинка называется **фазовой зонной пластинкой** и её использование позволяет получить дополнительное увеличение интенсивности в 4 раза.

Опыт подтверждает эти выводы: зонная пластинка увеличивает интенсивность в точке O , действуя подобно собирающей линзе.

Дифракция Фраунгофера

Дифракция Фраунгофера наблюдается когда точка наблюдения находится на большом расстоянии от препятствия, где волновой фронт уже плоский.

(в этом случае размеры препятствия много меньше размера первой зоны Френеля и вторичные волны от противоположных участков препятствия приходят в точку наблюдения в одинаковой фазе).

Различают:

- дифракцию Фраунгофера на одной щели,
- дифракцию Фраунгофера на многих щелях.

Дифракция Фраунгофера на одной щели

Дифракция в параллельных лучах была рассмотрена Фраунгофером в 1821-1822 гг. Для получения пучка параллельных лучей света, падающих на щель или отверстие, обычно пользуются небольшим источником света, который помещается в фокусе собирающей линзы.

Пусть параллельный пучок монохроматического света падает нормально на непрозрачный экран, в котором прорезана узкая щель BC, имеющая постоянную ширину b и длину $l \gg b$

(см. рис.43, а). Оптическая разность хода Δ между крайними лучами BM и CN, идущими от щели под

углом φ к оптической оси линзы OF_0 равна

$$\Delta = CD = b \sin \varphi.$$

Разобьем щель BC на зоны Френеля, имеющие вид полос, параллельных ребру В щели. Ширина каждой зоны выбирается (согласно методу зон Френеля) так, чтобы разность хода от краев этих зон была равна $\lambda/2$. При интерференции света от каждой пары соседних зон амплитуда результирующих колебаний равна нулю, так как эти зоны вызывают колебания с одинаковыми амплитудами, но противоположными фазами.

Если число зон в щели четное, то будет наблюдаться дифракционный минимум (темная полоса).

Если число зон нечетное, то будет наблюдаться дифракционный максимум (светлая полоса).

В направлении $\varphi = 0^\circ$ наблюдается самый интенсивный центральный максимум нулевого порядка.

Распределение интенсивности на экране, полученное вследствие дифракции (дифракционный спектр) приведено на рис.43,б.

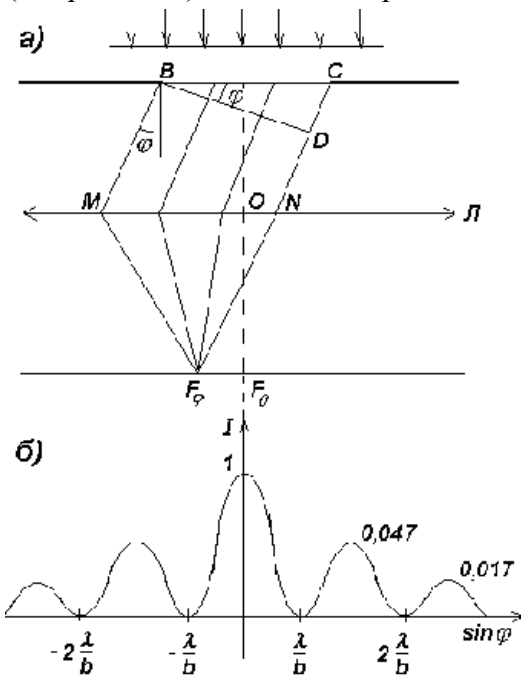


Рис. 43

Расчеты показывают, что интенсивности в центральном и последующем максимумах относятся как 1:0,045:0,016:0,008: ..., т.е. основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме.

Углы, под которыми наблюдаются максимумы всех порядков, начиная с первого, зависят от длины волны света λ . Поэтому, если щель освещать белым светом, то максимумы соответствующие разным длинам волн будут наблюдаться под разными углами и, следовательно, будут пространственно разделены на экране. Получится дифракционный спектр (рис. 44).

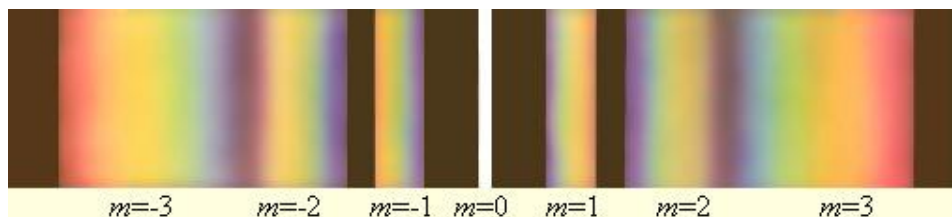
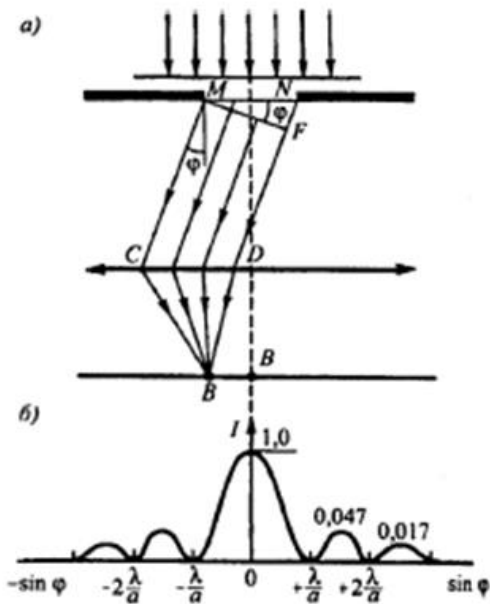


Рис. 44

Условия дифракционных максимумов и минимумов на одной щели



$$a \sin \varphi = \pm(2m+1) \frac{\lambda}{2} \quad - \text{условие максимумов,}$$

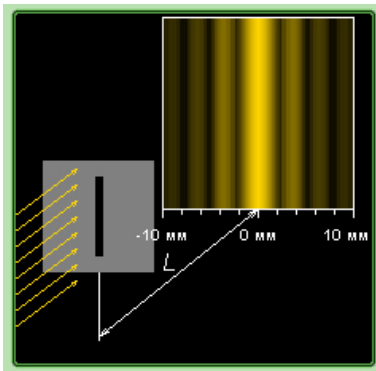
$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad - \text{условие минимумов,}$$

a – ширина щели,

$m = 1, 2, 3, \dots$ – порядок спектра.

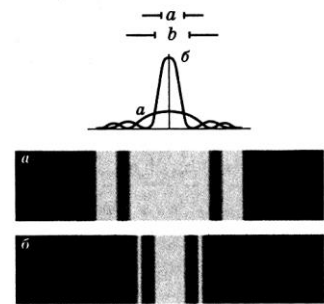
φ – угол дифракции,

λ – длина световой волны.



Влияние ширины щели на дифракционную картину

С уменьшением ширины щели центральный максимум расширяется (см. рисунок *a*), с увеличением ширины щели ($a > \lambda$) дифракционные полосы становятся уже и ярче (см. рисунок *b*).

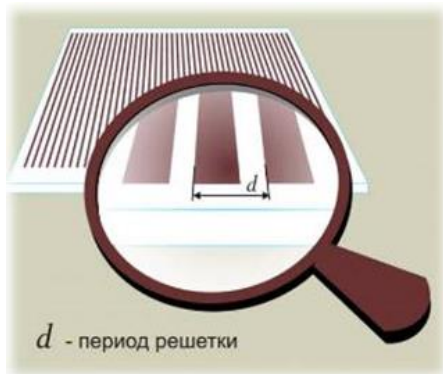


Дифракционная решетка

Дифракционной решёткой называется система параллельных равноотстоящих и близкорасположенных узких щелей, пропускающих или отражающих свет

Дифракционная решетка – важнейший спектральный прибор, предназначенный для разложения света в спектр и измерения длин световых волн.

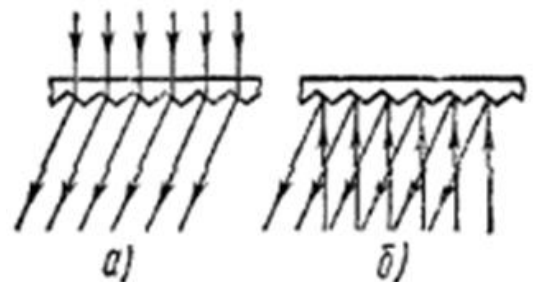
Она представляет собой плоскую стеклянную или металлическую поверхность, на которой нарезано очень много (до сотен тысяч) прямых равноотстоящих штрихов.



Дифракционные решетки бывают *отражающие* и *пропускающие* свет.

Принцип их действия одинаков. Решетку изготовляют с помощью делительной машины, наносящей периодические параллельные штрихи на стеклянную или металлическую пластину.

Хорошая дифракционная решетка содержит до 100 000 штрихов.



Рассмотрим простейшую идеализированную решетку, состоящую из N одинаковых равноотстоящих параллельных щелей, сделанных в непрозрачном экране.

Ширину щели обозначают a , а ширину непрозрачных промежутков между щелями - b .

Величину $d = a + b$ называют **периодом дифракционной решетки** или **постоянной дифракционной решетки**.

Лучшие дифракционные решетки имеют до 1200 штрихов на 1 мм.

Дифракционная картина от решетки получается в результате дифракции на каждой щели и интерференции лучей, падающих от разных щелей. Главные максимумы соответствуют таким углам φ , для которых колебания от всех N щелей складываются в фазе, то есть $A_{\text{макс}} = NA_i$,

где A_i - амплитуда колебания, посылаемого одной щелью под углом φ .

Таким образом, интенсивность света в максимуме $I_{\text{макс}} = N^2 I_i$

где $I_i \sim A_i^2$ - интенсивность света от i -ой щели.

То есть, интенсивность света в максимуме от всех щелей дифракционной решетки может превышать в сотни миллионов раз интенсивность максимума, создаваемого одной щелью (для хороших решеток N достигает нескольких десятков тысяч).

Формула дифракционной решетки при нормальном падении света на решетку

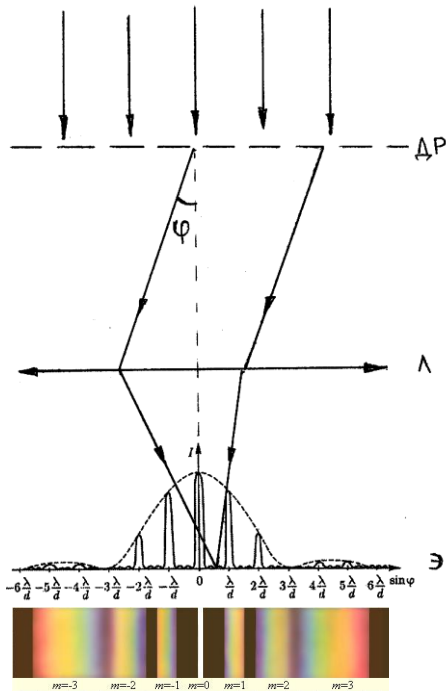


Рис. 45

$d \sin \varphi = \pm m \lambda$ - условие главных максимумов,

$a \sin \varphi = \pm k \lambda$ - условие главных минимумов,

где d - период дифракционной решетки (постоянная дифракционной решетки);

$d = \frac{1}{N_0}$, где N_0 - число штрихов на единицу длины

дифракционной решетки;

φ - угол дифракции;

λ - длина световой волны;

$m = 0, 1, 2, 3, \dots$ - порядок главного максимума;

$k = 1, 2, 3, \dots$ - порядок главного минимума.

Условие главных максимумов для дифракционной решетки имеет вид

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda$$

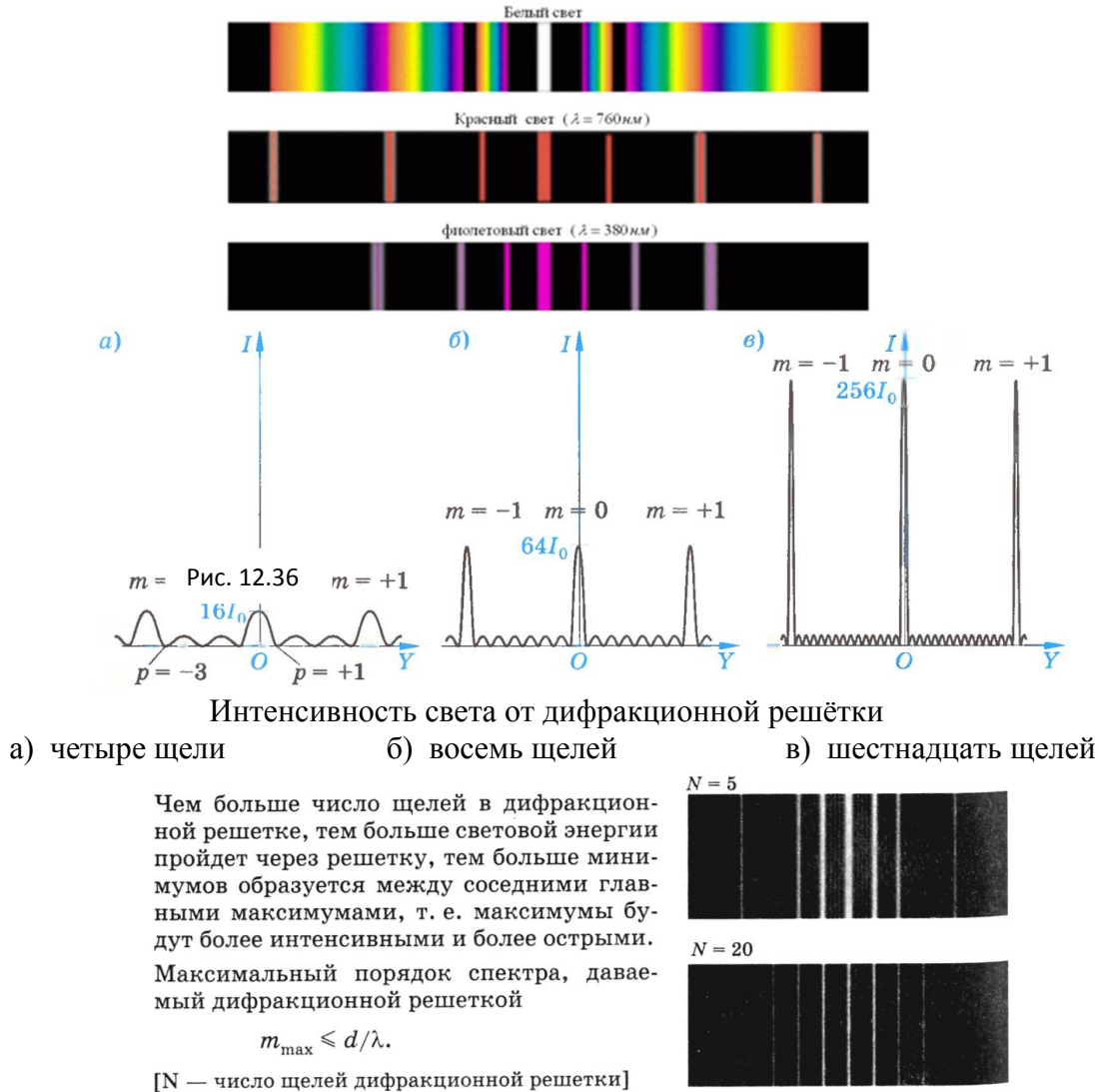
Из уравнения следует, что максимум нулевого порядка наблюдается при $\varphi = 0$, первого порядка при $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{d}$, второго порядка при $\sin \varphi = \pm 2 \frac{\lambda}{d}$ и так далее (см. рис. 45).

Главные минимумы соответствуют таким углам φ , в направлении которых ни одна из щелей не распространяет свет. Таким образом, условие главных минимумов выражает формула

$$a \sin \varphi = \pm k \lambda$$

Первый главный минимум наблюдается при $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{a}$.

Кроме главных максимумов имеется большое число слабых побочных максимумов, разделенных дополнительными минимумами. На рис. 45 они изображены между главными максимумами. Положение главных максимумов зависит от длины волны. Поэтому при нормальном падении на решётку белого света все максимумы, кроме центрального ($m = 0$), разложатся в спектр, фиолетовая область которого будет обращена к центру дифракционной картины, красная – наружу. Таким образом, дифракционная решетка представляет собой спектральный прибор.



Качество полученного спектра зависит от двух характеристик дифракционной решетки – угловой дисперсии и разрешающей способности.

Угловая дисперсия характеризует способность дифракционной решетки пространственно разделять световые пучки разных длин волн.

Мерой угловой дисперсии служит величина D :
$$D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}$$

(эта формула получена путем дифференцирования основного уравнения дифракционной решетки).

Разрешающая способность характеризует способность дифракционной решетки разделять (разрешать) между собой спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн.

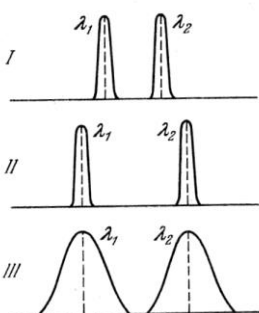
За меру разрешающей способности принимают отношение:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = kN,$$

где λ – длина исследуемой световой волны,

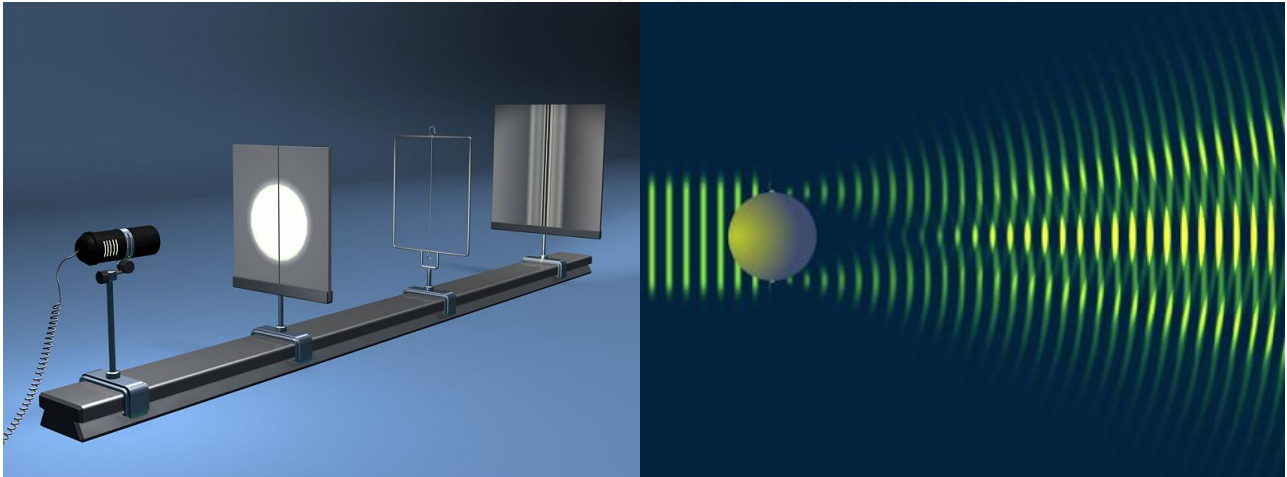
$\Delta \lambda$ – наименьшая разница в длинах волн двух соседних разрешаемых спектральных линий,

k – порядок спектра, N – общее число штрихов решетки освещаемых падающим пучком света.



Когда на решетку падает белый свет, то положения главных максимумов одного и того же порядка (кроме нулевого) для света различной длины волны λ будут разными. Каждый максимум будет состоять из системы спектрально окрашенных полос, образующих дифракционный спектр. Дифракционный максимум, соответствующий значению $n = 0$, называется **максимумом нулевого порядка**, который представляет собой яркую белую полосу.

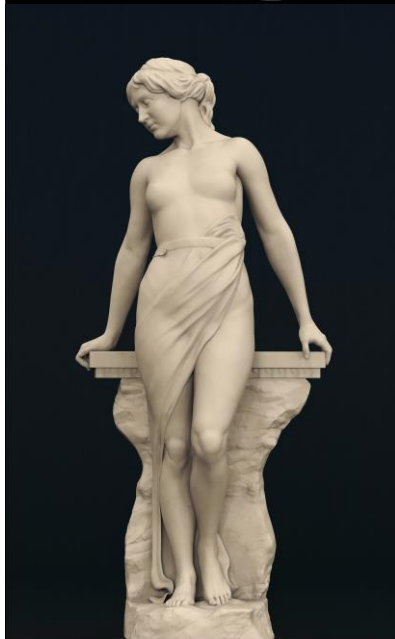
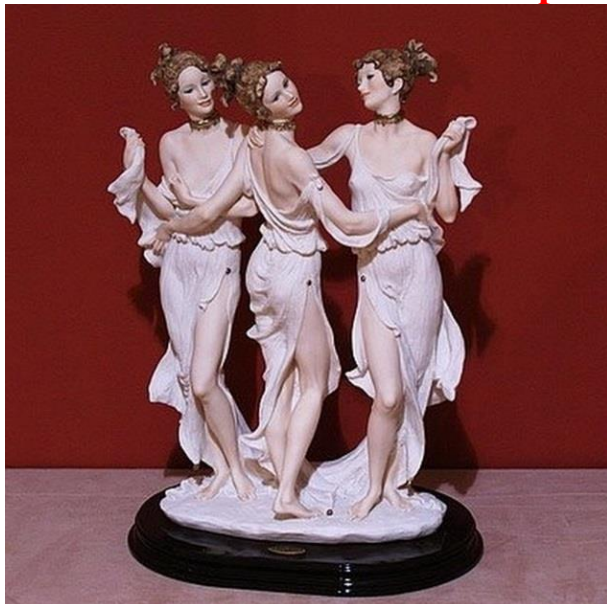
Если мы будем наблюдать дифракционную картинку от отражающей решётки, то при падении на неё белого света мы увидим яркую белую полосу, с одной стороны которой будут находиться дифракционные спектры более высоких порядков, соответствующие $n = 1, 2, 3$ и так далее, разделенных между собой темными промежутками (см. рисунок)



Дифракция Френеля

Дифракция Фраунгофера

Красота скульптуры



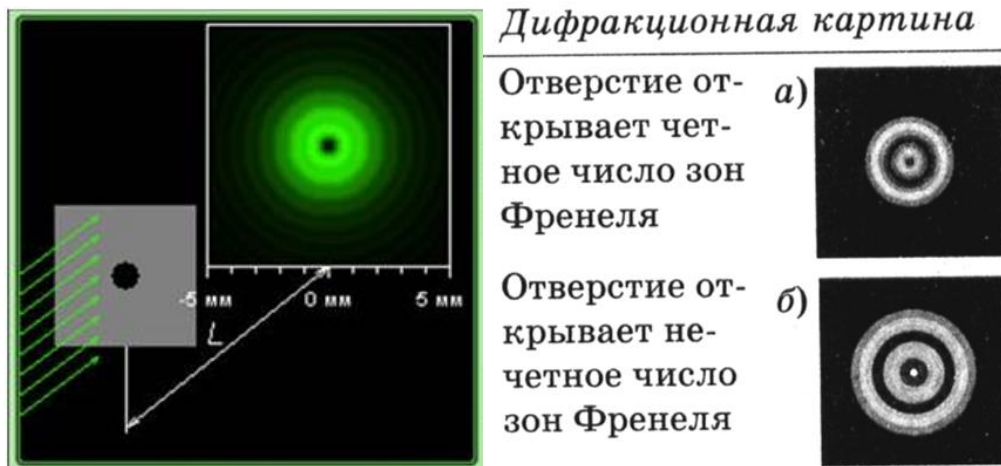
Ответ на мозгололку №3:

Интеллект - это способность адаптироваться к изменениям.
Стивен Хокинг

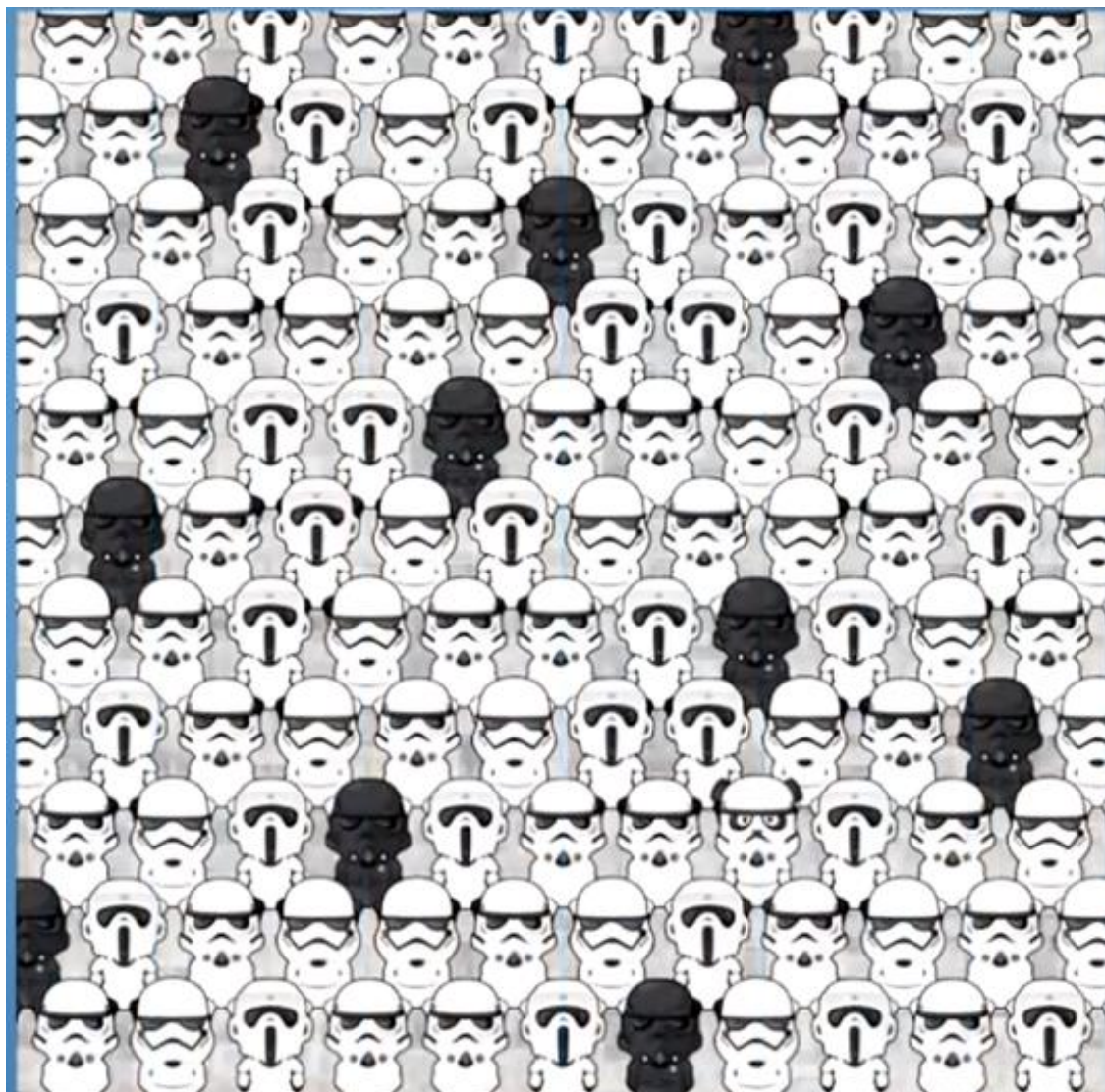
Парижская академия наук предложила явление дифракции света как тему на премию за 1818 г. Френель подал на конкурс работу, в которой все оптические явления, известные к тому времени, объяснялись на основе волновой теории.

Все члены конкурсной комиссии были сторонниками корпускулярной теории света, то есть считали, что свет - это поток частиц. Пуассон, член конкурсной комиссии, обратил внимание на абсурдный результат теории Френеля, что в центре геометрической тени всегда должно находиться светлое пятно.

Однако другой учёный - Араго - тут же поставил опыт и доказал, что пятно действительно есть. Таким образом, Френель одержал победу, которая стала победой его волновой теории света.



На рис б) в центре картинки наблюдается пятно Пуассона



Наша Панда замаскировалась. Найди её.

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

При падении света на вещество электромагнитное поле волны вызывает колебания связанных зарядов -электронов и ионов этого вещества, которые совершая колебания, сами становятся источниками вторичных электромагнитных волн той же частоты.

Так как среднее расстояние между молекулами вещества порядка 10^{-10} м много меньше длины волны падающего света, то вторичные волны, излучаемые одновременно множеством соседних атомов, интерферируют между собой. В результате этого на границе раздела двух сред возникает отраженная и преломленная волны.

Эти волны при прохождении через вещество могут испытывать рассеивание или поглощение.

Рассеяние электромагнитных волн

Рассеиванием называется процесс изменения пространственного распределения пучка световых лучей без изменения частот, составляющих его излучений.

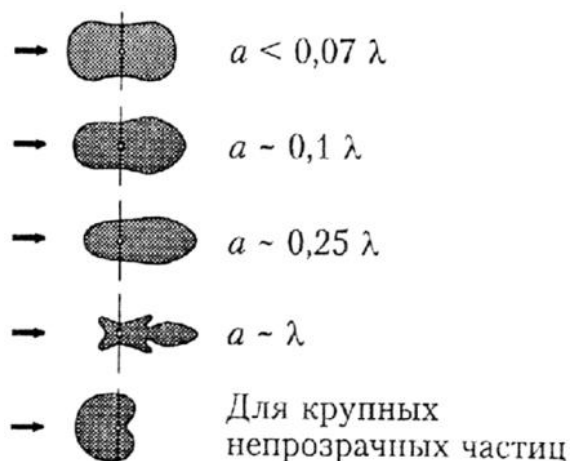


Рис. 43 Индикатрисы рассеяния на частицах разных размеров

Если размеры частичек неоднородной среды меньше длины падающей волны ($r \leq 0,1\lambda$), то рассеивание света

происходит по закону Релея: $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$,

где I – это интенсивность рассеянного света, $\frac{Вт}{м^2}$;

r – размер частичек неоднородной среды, м;

λ – длина волны падающего света, м.

Из закона Релея следует, что сильнее всего в этом случае рассеиваются более короткие волны.

Этим объясняется голубой цвет Земного неба (сильнее всего рассеиваются короткие голубые волны) и красный цвет восходящего и заходящего Солнца (сквозь толщу атмосферы лучше всего проходит длинноволновое красное излучение).



Гимнастика для ума

$$8 \times 8 \div 8 + 8 - 8$$

$$= ?$$

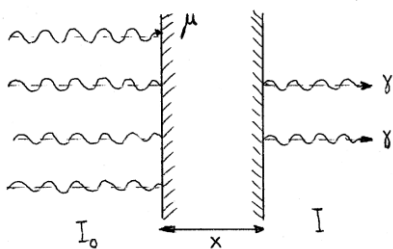
какой ответ должен получиться?

Поглощение электромагнитных волн

При прохождении света через вещество наблюдается не только рассеивание, но и поглощение света.

Поглощением света называется процесс превращения электромагнитной энергии световой волны в другие виды энергии в результате взаимодействия электромагнитного поля волны с веществом.

Поглощение света может вызывать нагревание вещества, фотохимические реакции, выгорание тканей, изменение цвета вещества и другие явления.



Интенсивность плоской монохроматической электромагнитной волны при прохождении через вещество уменьшается по **закону Бугера - Ламберта**:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

где I и I_0 – это интенсивность прошедшей через вещество и падающей на вещество электромагнитной волны, $\frac{Вт}{м^2}$;

x – толщина слоя вещества, $м$;

μ – коэффициент поглощения электромагнитной волны, $\frac{1}{м}$

Физический смысл коэффициента поглощения μ : он обратно пропорционален слою вещества, при прохождении через который интенсивность волны уменьшается в $e = 2,7$ раза.

Коэффициент поглощения μ зависит от частоты электромагнитного излучения, химической природы вещества и его состояния.

Давление света

При падении света на вещество он оказывает на него давление. Впервые давление света доказал в 1899 году русский ученый Лебедев.

Давление света, падающего перпендикулярно на поверхность можно рассчитать на формуле:

$$p = \frac{h\nu}{c} N (1 + \rho) = \frac{E}{c} (1 + \rho) = \omega (1 + \rho)$$

p – давление света, $Па$; $h\nu$ – энергия, падающего кванта, $Дж$;

N – число падающих квантов за $1 с$;

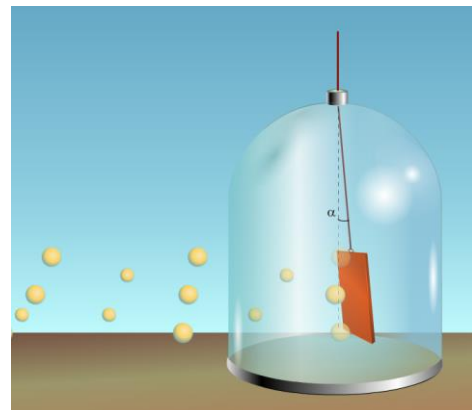
c (цэ) – скорость света в вакууме, $\frac{м}{с}$;

ρ (ро) – коэффициент отражения света, безразмерная;

E – энергетическая освещенность поверхности, $Дж$;

ω (омега) – объёмная плотность энергии излучения, $\frac{Дж}{м^3}$.

Давление света объясняется действием силы Лоренца со стороны магнитного поля световой волны на колеблющиеся под действием электрического поля волны электроны вещества.



На приемных экзаменах геофака МГУ. Экзамен по физике.

Преподаватель:

— Что такое электромагнитные волны?

Студент:

— Электромагнитные волны были изобретены Поповым в начале нашего века для создания радио и имели длину приблизительно 3 метра.

Дисперсия света

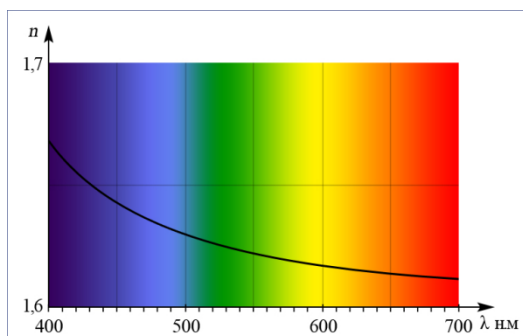
Дисперсией света называется явление зависимости фазовой скорости света в веществе от его частоты.

Среды, в которых наблюдается дисперсия, называются **диспергирующими**.

Различают **нормальную** и **аномальную** дисперсию.

Нормальная дисперсия

Опыт показывает, что у всех прозрачных веществ показатель преломления n вдали от полос поглощения света монотонно убывает с увеличением длины световой волны λ . Такое поведение дисперсии называется **нормальным**.



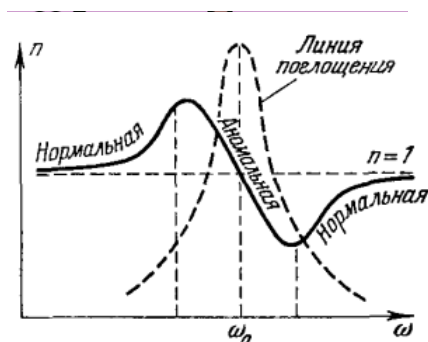
Нормальная дисперсия

Аномальная дисперсия

Все вещества имеют некоторые характерные для них полосы поглощения электромагнитных волн, которые совпадают с резонансными частотами собственных колебаний электронов в атоме или атомов в молекуле.

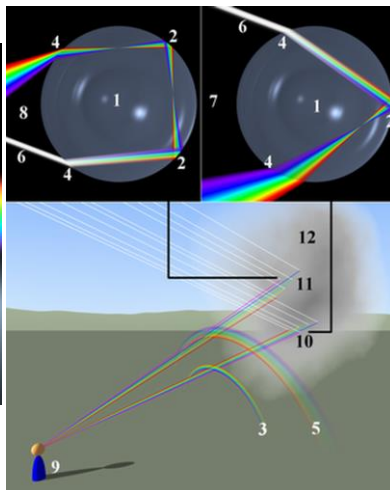
В области полос поглощения дисперсия света имеет существенно другой вид. Такое поведение дисперсии называется **аномальным**.

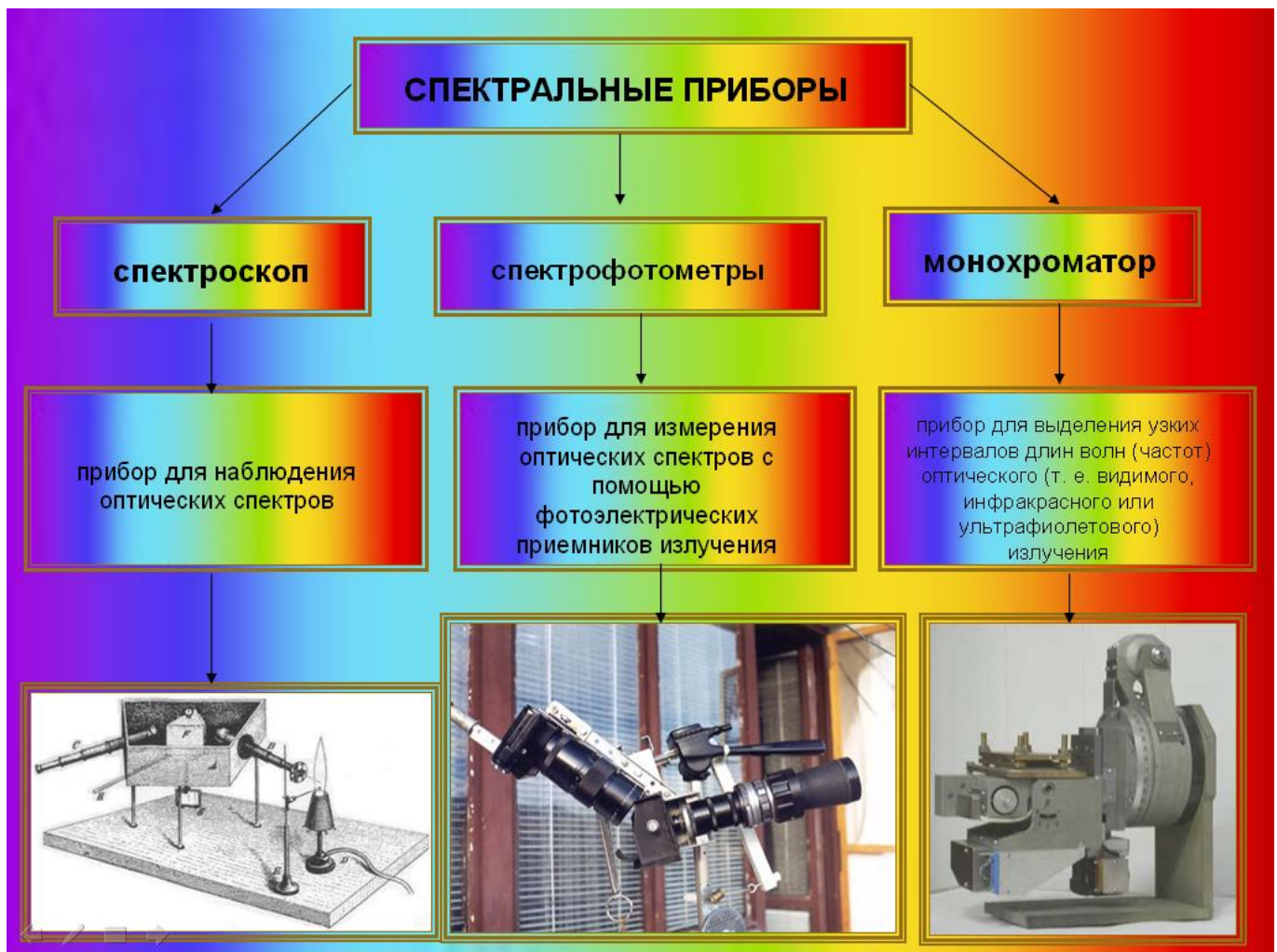
Если полосы поглощения вещества расположены в видимой области спектра, то вещество выглядит окрашенным.



Аномальная дисперсия

Разложение белого цвета в спектр призмой и явление радуги после дождя объясняются **дисперсией света**





Виды спектров

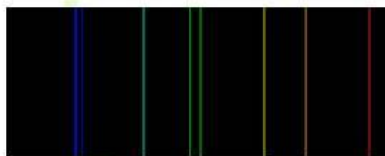
Непрерывные

Линейчатые

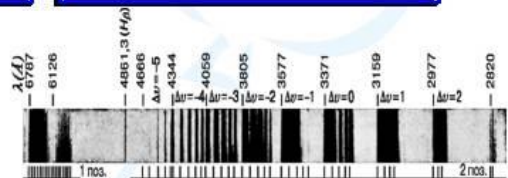
Полосатые



Непрерывные спектры дают тела, находящиеся в твердом, жидком состоянии, а также сильно сжатые газы.

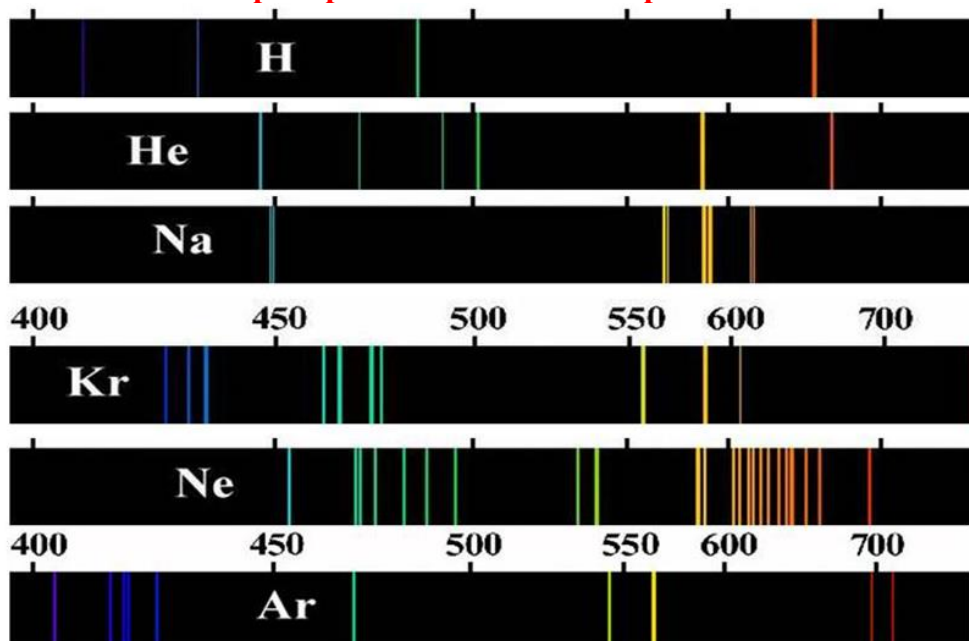


Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии. Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн.



Полосатые спектры в отличие от линейчатых спектров создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Примеры линейчатых спектров



$$42 * 0 = 0$$

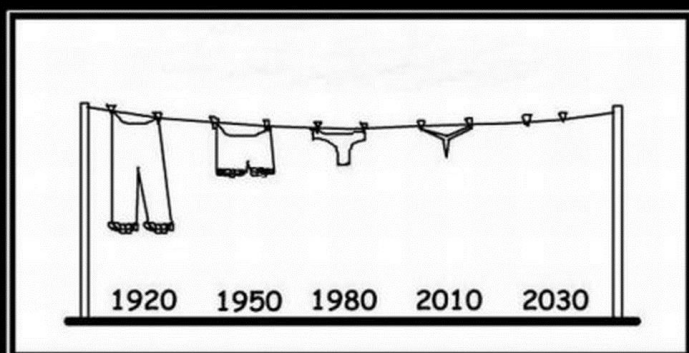
СЛЕДОВАТЕЛЬНО

$$0 / 0 = 42$$

Дискретная математика
это ведь так просто



Вот зачем нам нужен
Крым!



Мир становится проще

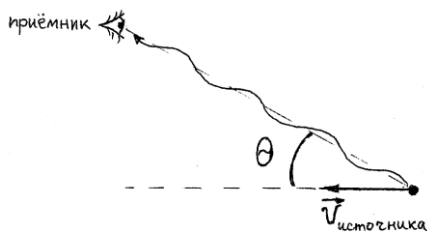


Эффект Доплера

Эффектом Доплера называется явление изменения частоты колебаний волн, воспринимаемых наблюдателем при движении источника волн и наблюдателя относительно друг друга.

Эффект Доплера наблюдается и для механических и для электромагнитных волн.

В случае электромагнитных волн частоту электромагнитного излучения, принимаемого приёмником $\nu_{\text{приёмника}}$ при относительном движении источника излучения со скоростью v относительно приёмника, можно определить по формуле:



$$\nu_{\text{приёмника}} = \nu_{\text{источника}} \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$$

$\nu_{\text{источника}}$ – частота излучения источника волн, Гц,

$\nu_{\text{приёмника}}$ – частота излучения, которую воспринимает приемник, Гц,

v – относительная скорость источника волн относительно приемника, м/с ,

c – скорость света в вакууме, м/с,

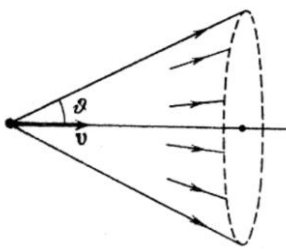
θ – угол между вектором скорости $\vec{v}$ источника относительно приёмника излучения и радиус-вектором, проведенным из приемника в источник.

1. При удалении источника света происходит увеличение длины волны λ воспринимаемого света (наблюдается так называемое **красное смещение**).
2. При приближении источника света происходит уменьшение длины волны λ воспринимаемого света (наблюдается так называемое **фиолетовое смещение**).

Эффект Доплера используется в радарх для определения скорости движения тел.

Излучение Вавилова-Черенкова

Излучением Вавилова-Черенкова называется явление излучения света электрически заряженной частицей, возникающее при её движении в среде со скоростью v , превышающей фазовую скорость света в этой среде.



Особенностью излучения Вавилова-Черенкова является то, что излучение света происходит не по всем направлениям пространства, а лишь вдоль образующей конуса с острым углом θ вдоль траектории частицы.

$$\cos \theta = \frac{v_{\text{света в вещ}}}{v_{\text{частицы}}} = \frac{c}{n v_{\text{частицы}}}$$

Излучение Вавилова-Черенкова объясняется следующим образом: при прохождении заряженной частицы через вещество, она вызывает кратковременную поляризацию молекул вещества, которые становятся на мгновение когерентными источниками вторичных волн, интерферирующих друг с другом при их наложении.

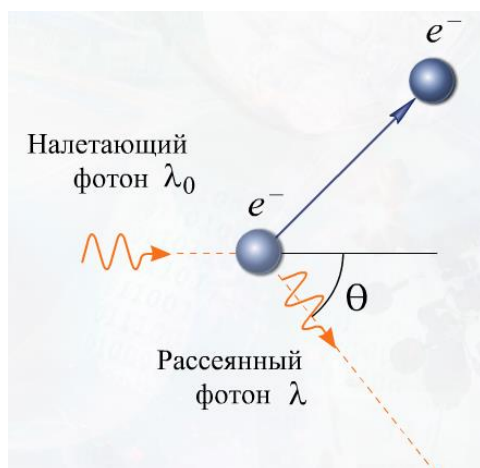
- если скорость частицы v оказывается меньше скорости света в веществе, то эти электромагнитные волны гасят друг друга при интерференции по всем направлениям и излучение Вавилова-Черенкова не наблюдается.

- Если скорость частицы v оказывается больше скорости света в веществе, то в некоторых направлениях под углом θ к вектору скорости частицы $\vec{v}$ не происходит гашения вторичных электромагнитных волн при их интерференции и наблюдается излучение Вавилова-Черенкова.

Излучение Вавилова-Черенкова наблюдается в прозрачных жидких, газообразных и твердых телах и используется в счётчиках Черенкова для определения скоростей элементарных частиц.

Эффект Комптона

Эффектом Комптона называется явление упругого рассеивания рентгеновского или гамма излучения на свободных и слабосвязанных с атомом электронах, которое сопровождается увеличением длины волны рассеянного электромагнитного излучения.



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) = 2 \frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$\Delta\lambda$ - изменение длины волны падающего рентгеновского излучения, м,

λ' - длина волны рассеянного рентгеновского излучения, м,

λ - длина волны падающего рентгеновского излучения, м,

h - постоянная Планка;

θ - угол рассеивания рентгеновского излучения,

m - масса частицы, на которой происходит рассеяние рентгеновского излучения, кг,

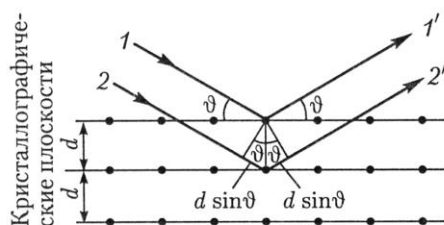
c - скорость света в вакууме, м/с.

При эффекте Комптона одновременно выполняются следующие законы:

1. Закон сохранения импульса
2. Закон сохранения релятивистской энергии

Дифракция рентгеновского излучения на пространственной дифракционной решётке (на кристалле вещества)

Дифракцией называется явление отклонения распространения волн от прямолинейного при прохождении ими препятствий.



Если луч монохроматического рентгеновского излучения падает на поверхность кристалла под углом скольжения θ , а затем отражается от атомов кристалла, то на экране можно наблюдать дифракционную картину.

При падении параллельного пучка монохроматических рентгеновских лучей 1 и 2 под углом скольжения θ на кристалл вещества, ЭМ поле волны действует на электроны атомов кристаллической решётки. Эти атомы становятся источниками вторичных когерентных волн 1' и 2', которые интерферируют между собой. Эти вторичные волны гасят друг друга по всем направлениям кроме направлений, в которых наблюдаются дифракционные максимумы и которые можно определить по **формуле Вульфа-Бреггов:**

$$2d \sin \theta = m\lambda$$

где θ - угол скольжения; λ - длина волны падающего на кристалл рентгеновского излучения, м; d - межплоскостное расстояние (расстояние между атомными плоскостями в кристалле), м; m - номер дифракционного максимума.

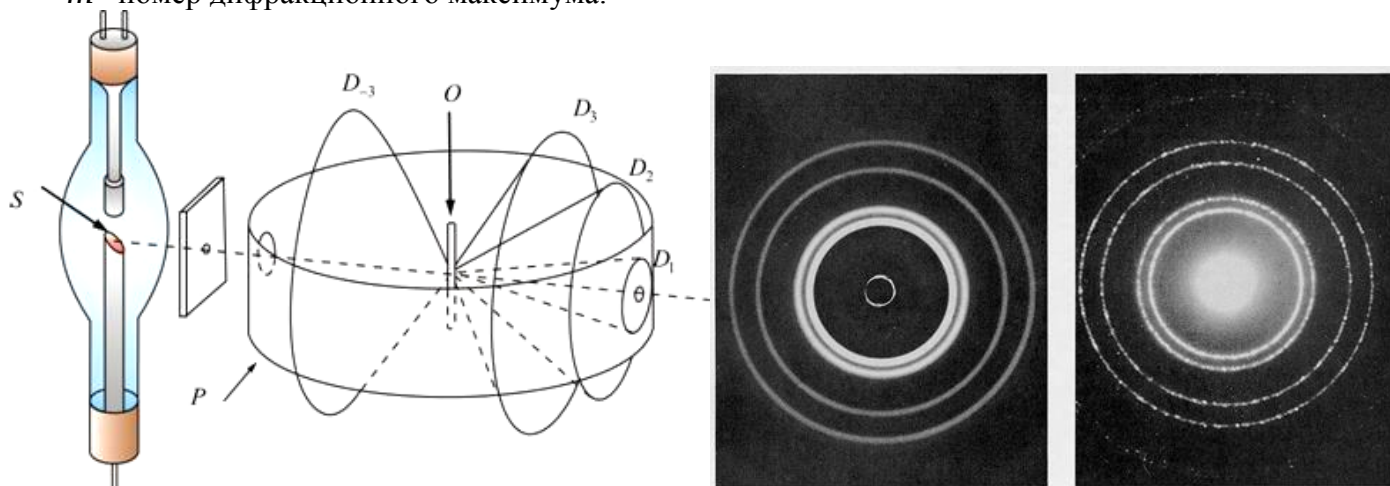


Рис. 46 Дифракция рентгеновских лучей на поликристаллическом веществе

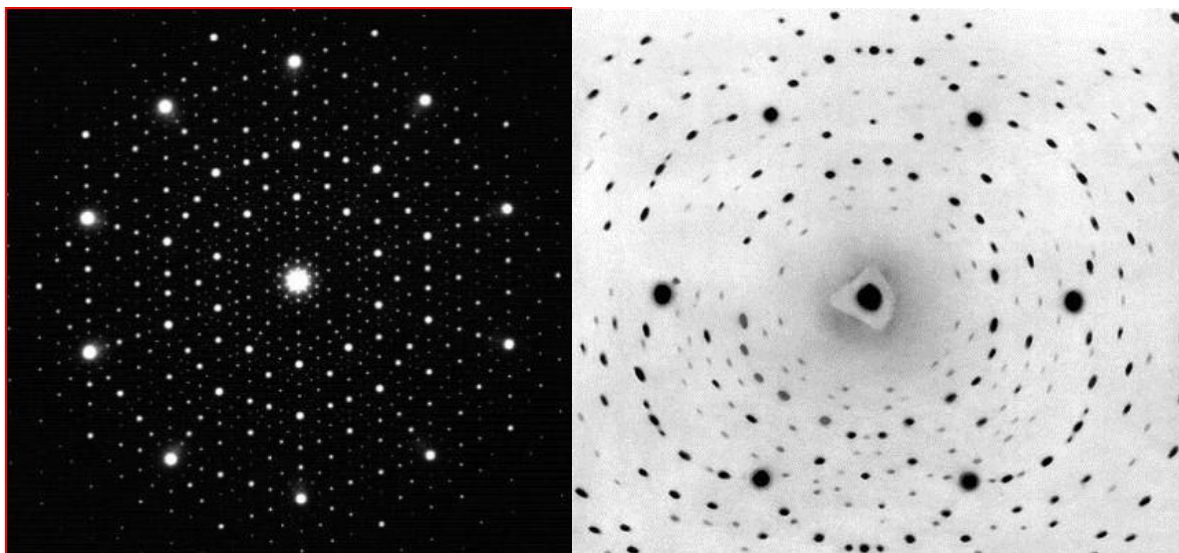


Рис. 47 Дифракция рентгеновских лучей на кристалле вещества

Проверь зрение



и скажи



Сколько здесь лошадей?

Мозголомка № 4 «Туристы 2»



Глядя на рисунок, ответь на следующие вопросы:

1. Давно ли ребята занимаются туризмом?
2. Хорошо ли они знакомы с домоводством?
3. Судходна ли река?
4. В каком направлении она течёт?
5. Какова глубина и ширина реки на ближайшем перекате?
6. Долго ли будет сохнуть бельё?
7. Намного ли вырастет ещё подсолнух?
8. Далеко ли от города разбит лагерь туристов?
9. Каким транспортом добирались сюда ребята?
10. Любят ли в этих местах пельмени?
11. Свежая ли газета? (Газета датирована 22 августа)
12. В какой город летит самолёт?

(ответ ищи на следующих страницах)



Страничка красоты



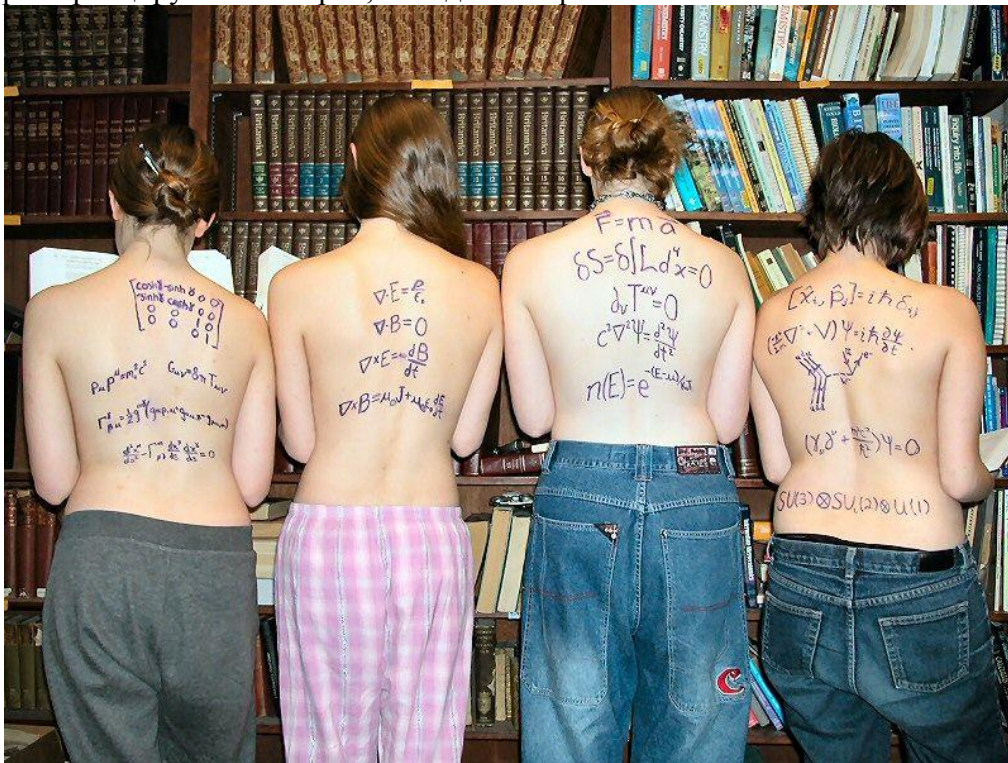
СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ

При решении задач по волновой оптике необходимо помнить, что:

- величина показателя преломления n для данного вещества зависит от частоты падающего на вещество света (то есть от скорости распространения света в данном веществе),
- цвет прозрачных тел зависит от диапазона световых волн, который они пропускают, а цвет отражающих поверхностей определяется диапазоном световых волн, который они отражают,
- при определении оптической разности световых волн необходимо учитывать следующее обстоятельство:

если свет отражается от вещества с большим показателем преломления n , то его оптическая длина пути увеличивается на пол длины световой волны $\frac{\lambda}{2}$, если же свет отражается от вещества с

- меньшим показателем преломления n , то его оптическая длина пути не изменяется,
- если оптическая схема для наблюдения интерференции или дисперсии содержит линзы, то следует помнить, что линзы не дают дополнительную разность хода для световых волн, которые после прохождения через линзу могут интерферировать,
- если дифракционная картина проецируется на экран, расположенный на большом расстоянии от щели или дифракционной решётки, то синусы углов в уравнениях дифракционной решётки из-за их малости при необходимости можно заменить на тангенсы,
- так как на линзу падает параллельный пучок световых лучей, то изображение дифракционной картины, которая проецируется на экран, находится в фокальной плоскости линзы.



Не забуду физику родную



Найди три отличия



Найди девушку (увеличь картинку)

КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Квантовая оптика - это раздел оптики, изучающий явления, в которых проявляются квантовые свойства света (фотоэффект, тепловое излучение, эффект Рамана, эффект Комптона, вынужденное излучение).

Тепловое излучение

Тепловым называется электромагнитное излучение, обусловленное тепловым движением атомов и молекул вещества (то есть его внутренней энергией) и зависящее только от температуры и оптических свойств вещества.

Все тела при температуре выше абсолютного нуля $T = 0K$, излучают тепловую энергию. При обычных и низких температурах максимум излучения приходится на инфракрасную область спектра. При повышенных температурах максимум излучения переходит в видимую область спектра.

Излучение тела сопровождается потерей энергии. Поэтому излучение возможно либо за счет внутренней энергии самого тела, либо за счет энергии, подводимой извне.

Так, кроме теплового излучения, обусловленного внутренней энергией тела, существуют и другие виды излучения, например,

- **фотолюминесценция** – излучение, обусловленное поглощением электромагнитной энергии,
- **хемилюминесценция** – излучение, обусловленное химическими реакциями, происходящими в теле,
- **электролюминесценция** – излучение, обусловленное взаимодействием электрического тока с газом,
- **радиоактивное излучение** – излучение, обусловленное превращениями протонов и нейтронов в ядрах атомов.

Всякое тело, излучая само, вместе с тем поглощает часть лучистой энергии, испускаемой другими телами. Этот процесс называется **лучепоглощением**.

Коэффициентом поглощения $\alpha_{\nu,T}$ называется величина, равная отношению падающей на тело энергии $W_{\text{падающая}}$ за какой-то промежуток времени, к величине поглощённой энергии $W_{\text{поглощённая}}$ за тот же промежуток времени:

$$\alpha_{\nu,T} = \frac{W_{\text{поглощённая}}}{W_{\text{падающая}}}, \quad [\alpha_{\nu,T}] = \text{безразмерная}.$$

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент поглощения	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент поглощения
Железо окисленное	100	0,736	Платина полированная	225—625	0,054—0,104
Золото полированное	225—635	0,018—0,035	Картон асбестовый	24	0,96
Медь полированная	80—115	0,018—0,023	Вода	0—100	0,95—0,963
Медь расплавленная	1075—1275	0,16—0,13	Кирпич	20	0,93
Никель полированный	225—375	0,07—0,087	Сажа	95—270	0,952
			Бархат черный . .	20	0,996

По оптическим свойствам все тела делятся на:

- абсолютно чёрные тела,
- серые тела,
- реальные тела.

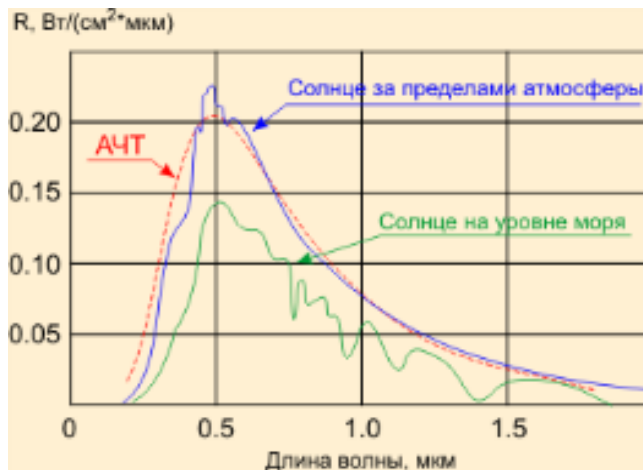
Абсолютно чёрным телом называется тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него тепловое излучение.

Для абсолютно чёрного тела коэффициент поглощения $\alpha_{\nu,T} = 1$.

Серым телом называется тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы $\alpha_{\nu,T} < 1$, но одинаков для всех частот при данной температуре.

(при разных температурах T , коэффициент поглощения серого тела $\alpha_{\nu,T}$ в общем случае может быть различным).

Реальным телом называется тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы $\alpha_{\nu,T} < 1$, но зависит от частоты и температуры тела.



Явление термодинамического равновесия

Испуская энергию и одновременно поглощая, тело может прийти в состояние теплового равновесия, когда его температура уже не изменяется. Температура, соответствующая этому состоянию, называется **температурой лучистого равновесия**.

Термодинамическим равновесием системы называется такое состояние системы, при котором любое тело системы излучает ровно столько тепловой энергии, сколько его поглощает за одно и то же время.

При термодинамическом равновесии все тела системы имеют одну и ту же температуру T . Это выравнивание температуры происходит автоматически: каждое тело за одно и то же время поглощает такое же количество теплоты, сколько его и излучает за тот же промежуток времени.

Основные характеристики теплового излучения

Для количественной оценки процессов лучеиспускания и лучепоглощения вводятся следующие характеристики:

- **спектральная плотность энергетической светимости** (или **спектральная лучеиспускательная способность тела**) $r_{\lambda,T}$ (или $r_{\nu,T}$) - величина, равная отношению энергии dW , которую излучает поверхность площадью dS за время dt в интервале длин волн $d\lambda$ (или частот $d\nu$).

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\lambda}, \quad [r_{\lambda,T}] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^3} \equiv \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

или

$$r_{\nu,T} = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\nu}, \quad [r_{\nu,T}] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{1}{\text{с}}} \equiv \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}.$$

- **энергетическая светимость R_T** (или **интегральная лучеиспускательная способность тела**) – величина, равная отношению энергии dW , которую излучает поверхность площадью dS за время dt во всём интервале длин волн $0 < \lambda < \infty$ (или частот $0 < \nu < \infty$):

$$R_T = \frac{dW}{dS \cdot dt}, \quad [R_T] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \equiv \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Причём:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu.$$



Ну, что ты, не грусти!

Модель абсолютно чёрного тела

Абсолютно чёрных тел в природе не существует. Однако, модель такого тела создать можно (рис.48).

Если взять твёрдую замкнутую оболочку, зачёрнённую с внутренней стороны и имеющую маленькое входное отверстие, то полость этой оболочки будет вести себя как абсолютно чёрное тело. Любое тепловое излучение, попавшее вовнутрь этой оболочки, будет испытывать многократные отражения от её стенок, пока полностью поглотится.

Если же такую оболочку окружить теплоизолирующими стенками и нагреть, то из отверстия этой оболочки будет выходить излучение подобное излучению абсолютно чёрного тела.

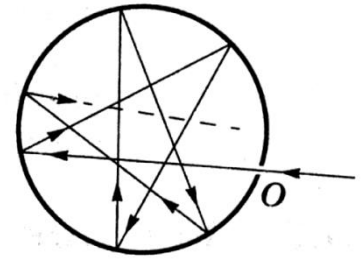
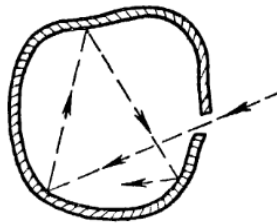
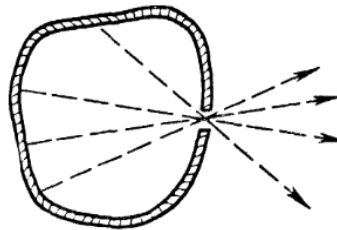


Рис. 48



АЧТ поглощает свет



АЧТ испускает свет

Разлагая это излучение в спектр, и, измеряя интенсивность различных участков спектра, можно экспериментально получить **кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела**.

Результаты таких исследований показаны на рис 49.

Кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела при различных температурах

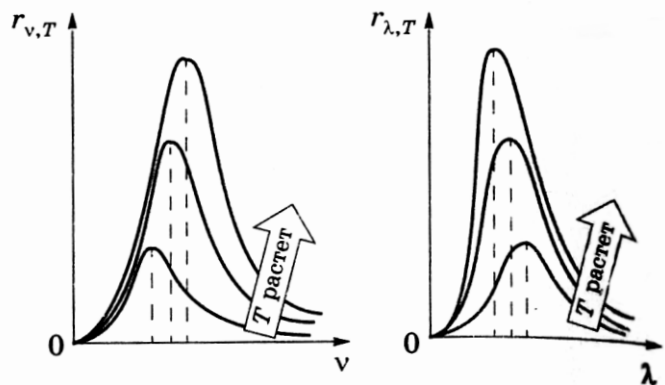
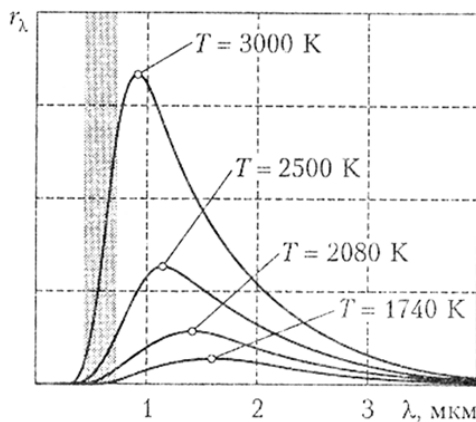


Рис. 49

Анализ этих кривых показывает, что:

- тепловое излучение абсолютно чёрного тела имеет сплошной спектр,
- с увеличением температуры тела максимум интенсивности излучения смещается в сторону меньших длин волн (или в сторону больших частот),
- с увеличением температуры резко возрастает максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости тела.

Площадь под любой кривой теплового излучения равна энергетической светимости абсолютно черного тела R_T при данной температуре.



Правдивая история:

- Как вы думаете, если абсолютно черное тело нагреть сильнее, в какую сторону сместиться масимум его спектра - в красную или в синюю?
- Конечно, в красную.
- Почему????????
- Ну, ведь краны с водой, которые горячие - красные, а холодные - синие!

Закон Кирхгофа для теплового излучения реальных тел

Связь между излучательной $r_{\nu,T}$ и поглощательной $\alpha_{\nu,T}$ способностью любых тел теоретически установил Кирхгоф в 1859 г, основываясь на втором начале термодинамики и анализе условий термодинамического равновесия тел.

Пусть внутри оболочки, где температура $T = \text{const}$, находятся несколько тел. Обмен энергией между телами и оболочкой происходит исключительно путем излучения и поглощения тепловой энергии.

Из второго начала термодинамики следует, что через некоторое время вся система тел должна прийти в состояние теплового равновесия, при котором все тела системы примут одну и ту же температуру T , равную температуре оболочки. Таким образом, весь объём оболочки будет заполнен **равновесным тепловым излучением**.

В таком состоянии тело, поглощающее за единицу времени больше энергии, должно и излучать энергии больше за то же самое время, иначе оно будет постоянно нагреваться. Следовательно, чем больше поглощательная способность тела $\alpha_{\nu,T}$, тем больше у него должна быть и его излучательная способность $r_{\nu,T}$.

Отсюда вытекает следующее соотношение для любых реальных тел:

$$\left(\frac{r_{\nu,T}}{\alpha_{\nu,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\nu,T}}{\alpha_{\nu,T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\nu,T}}{\alpha_{\nu,T}} \right)_3 = \dots \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует **закон Кирхгофа**:

Отношение излучательной способности любого тела $r_{\nu,T}$ к его поглощательной способности $\alpha_{\nu,T}$ при данной температуре T не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией длины волны и температуры, равной излучательной способности абсолютно чёрного тела, т.е.

$$\frac{r_{\nu,T}}{\alpha_{\nu,T}} = r_{\nu,T}^0. \quad (2)$$

Для абсолютно чёрного тела по определению $\alpha_{\nu,T} = 1$. Следовательно, из (2) вытекает, что универсальная функция Кирхгофа $r_{\nu,T}^0$ есть излучательная способность абсолютного чёрного тела.

Таким образом, из закона Кирхгофа следует, что:

- тепловое излучение реальных тел не может превышать тепловое излучение абсолютно чёрного тела,
- тело, которое сильнее поглощает тепловое излучение в каком-либо интервале частот $d\nu$ (или длин волн $d\lambda$), будет сильнее в этом же интервале частот $d\nu$ (или длин волн $d\lambda$) и излучать,
- если два тела при одной и той же температуре T поглощают разное количество тепловой энергии, то и излучение этих тел при этой же температуре должно быть различным.

Закон Стефана-Больцмана для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Экспериментально зависимость энергетической светимости R_T абсолютно чёрного тела от его абсолютной температуры T была установлена Стефаном (1979 г), а теоретически - Больцманом (1884 г).

Закон Стефана-Больцмана:

энергетическая светимость абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R_T = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ - постоянная Стефана-Больцмана, T - абсолютная температура тела, К.

Закон Стефана-Больцмана не даёт ответа относительно распределения энергии излучения абсолютно чёрного тела по спектру.

Законы Вина для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Вин в 1893 году, применяя электромагнитную теорию Максвелла к проблеме теплового излучения абсолютно чёрного тела, получил следующие законы.

Закон смещения Вина (первый закон Вина):

Длина волны $\lambda_{\max}$, на которую приходится максимум теплового излучения абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре T :

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина, T – абсолютная температура тела, К .

Наглядным примером, подтверждающим изменение длины волны $\lambda_{\max}$, на которую приходится максимум теплового излучения тела с ростом его температуры, является постепенное изменение цвета свечения нагреваемого металла от красного при невысоких температурах, до белого при увеличении его температуры.

Вин также получил закон зависимости максимальной спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $r_{\lambda,T}^{\max}$ от его абсолютной температуры.

Второй закон Вина:

Величина максимального значения спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $r_{\lambda,T}^{\max}$ прямо пропорциональна пятой степени его абсолютной температуры T :

$$r_{\lambda,T}^{\max} = CT^5,$$

где $C = 1,30 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$ – постоянная Вина, T – абсолютная температура тела, К .

Закон Рэлея-Джинса для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Вид функции Кирхгофа $r_{\nu,T}^0$ пытались определить многие учёные, например, Рэлея (1900 г) и Джинс (1909 г), которые исходя из теоремы классической статистической физики о равнораспределении энергии по степеням свободы, получили

закон Рэлея-Джинса:

Спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна его абсолютной температуре

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT. \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура тела, К

Формула Рэлея-Джинса даёт совпадение с кривыми теплового излучения абсолютно чёрного тела в области малых частот ν и приводит к абсурду в области больших частот

(см. рис. 50). Из анализа закона Рэлея –Джинса (3) следует, что энергия, излучаемая телом, должна по мере увеличения частоты излучения ν возрастать, стремясь к бесконечности.

На самом деле, согласно экспериментальным данным, начиная с некоторой частоты $\nu_{\max}$, энергия излучения начинает уменьшаться. Такое резкое противоречие выводов, вытекающих из представлений классической физики с экспериментом получило название «*ультрафиолетовой катастрофы*».



Рис. 50

Вид функции Кирхгофа $r_{\nu,T}^0$ долгое время не удавалось получить теоретически. Впервые это удалось Макс Планку в 1900 г.

Закон Планка для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Попытки теоретически установить закон распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, основанные на законах классической термодинамики, не увенчались успехом. Только в 1900 году Макс Планку удалось получить вид функции $r_{\lambda,T}^0$, который хорошо согласовывался с опытными данными во всём спектре излучения абсолютно чёрного тела.

Для получения функции $r_{\lambda,T}^0$ Планку пришлось отказаться от классических представлений о непрерывности излучения электромагнитных волн. Он высказал гипотезу, что электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии ε (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν - частота излучения, Гц.

На основе этих предположений был сформулирован **закон Планка**:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (4)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка; ν - частота излучения, Гц;

T - абсолютная температура тела, К; $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ - скорость света в вакууме;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - постоянная Больцмана; $e = 2,72$ - основание натуральных логарифмов.

Формула Планка (4) находится в полном соответствии с опытными данными. Из этой формулы получаются как следствие все законы теплового излучения.

На основе теории Планка Эйнштейн в 1905 году создал квантовую теорию внешнего фотоэффекта, а Бор в 1913 году разработал теорию строения атома.



А ты все законы теплового излучения выучил?

Внешний фотоэффект

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу теплового излучения АЧТ, получила дальнейшее развитие при объяснении явления фотоэффекта.

Фотоэффектом называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения (открыто в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем).

Внутренним фотоэффектом называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения без вылета их за пределы вещества.

(при этом происходит перераспределение электронов по энергетическим состояниям внутри вещества в результате их перехода из связанных с атомами состояний в свободные).

Внешним фотоэффектом называется явление вылета электронов с поверхности твёрдых и жидких веществ под действием электромагнитного излучения.

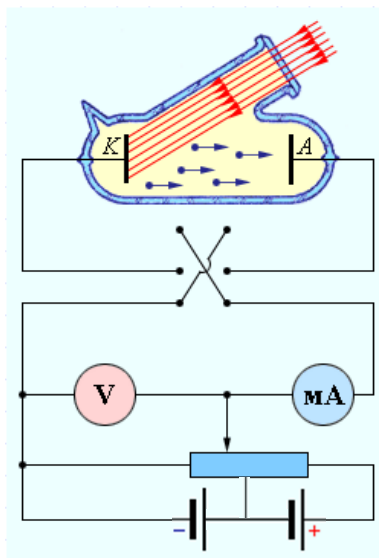
(при этом вещество электризуется, приобретая положительный заряд).

Внешний фотоэффект является результатом трёх следующих процессов:

1. поглощение фотона атомом и в результате этого отрыв электрона из атома.
2. движение этого электрона к поверхности вещества.
3. выход электрона через поверхность вещества в другую среду.

Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта

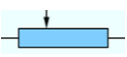
Схема для исследования внешнего фотоэффекта состоит из:

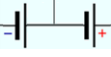


- вакуумного фотоэлемента ,

- вольтметра  для измерения напряжения на вакуумном фотоэлементе,

- миллиамперметра  для измерения силы тока текущего через фотоэлемент,

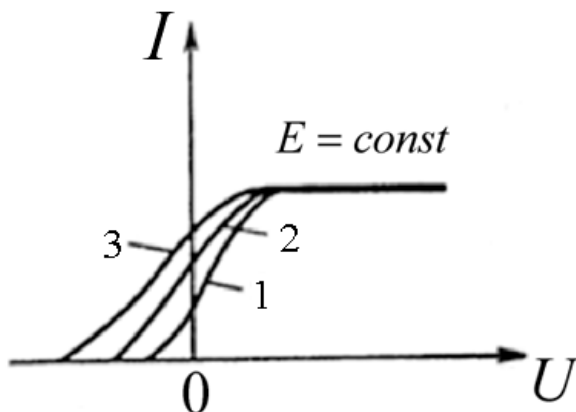
- реостата , включённого в схему как потенциометр для изменения напряжения на электродах фотоэлемента,

- батареи источников постоянного тока , присоединённых таким образом, чтобы можно было менять полярность электродов фотоэлемента.

Вольт-амперные характеристики фотоэлемента

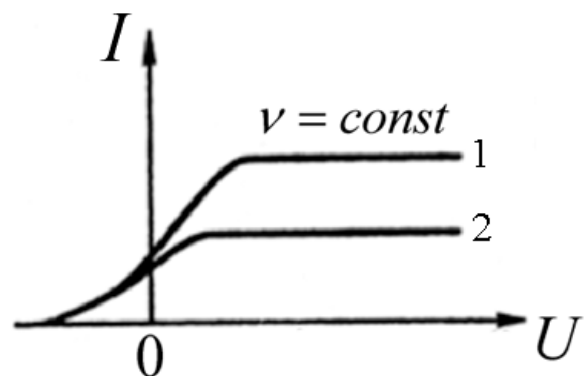
С помощью такой схемы были получены следующие вольт-амперные характеристики фотоэлемента.

Вольт - амперной характеристикой (ВАХ) называется зависимость фототока I , текущего через фотоэлемент, от напряжения U на его электродах.



ВАХ при одинаковой освещённости фотокатода ($E = \text{const}$), но разной частоте падающего на фотокатод света

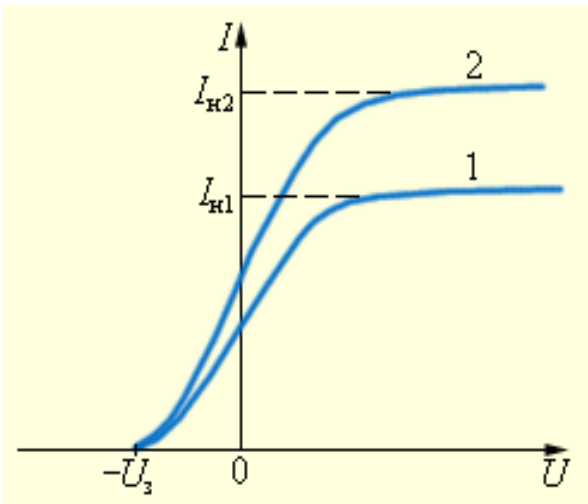
$$(\nu_3 > \nu_2 > \nu_1)$$



ВАХ при одинаковой частоте падающего на фотокатод света ($\nu = \text{const}$), но разной освещённости фотокатода ($E_1 > E_2$).

Рис. 51

Анализ вольт - амперных характеристик



Анализ вольт - амперных характеристик показывает следующие закономерности:

1. При любой освещённости существует, так называемый, **ток насыщения I_n** , то есть максимальная величина тока при данной интенсивности света. (это объясняется тем, что анода достигают все фотоэлектроны, которые возникают при фотоэффекте за одно и то же время)

2. При $U = 0$ В наблюдается небольшой фототок. (это объясняется тем, что некоторая часть фотоэлектронов обладает достаточной скоростью и направлением движения, чтобы самостоятельно долететь до анода)

3. Чтобы прекратить фототок, необходимо на катод подать обратное напряжение (то есть подать на катод более высокий потенциал по отношению к аноду). Это напряжение называется **задерживающим** или **запирающим U_3** .

Изучая различные вольт-амперные характеристики фотоэлемента были получены следующие законы внешнего фотоэффекта.

Законы внешнего фотоэффекта

1. Максимальная начальная скорость вылетающих фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего на вещество света и не зависит от его интенсивности.

2. При фиксированной частоте падающего на вещество электромагнитного излучения, величина фототока (то есть число вылетающих из вещества за единицу времени электронов) прямо пропорциональна интенсивности света.

3. Для каждого вещества существует, так называемая, **красная граница фотоэффекта**, то есть минимальная частота $\nu_{кр}$ (или максимальная длина волны $\lambda_{кр}$) падающего на вещество света, при которых ещё возможен фотоэффект.

4. Фотоэффект — явление безынерционное, то есть вылет электронов с поверхности вещества происходит сразу после поглощения веществом света.

(эти закономерности можно объяснить только исходя из квантовых представлений света, так как волновая теория света даёт совершенно другие закономерности при фотоэффекте)

Красная граница фотоэффекта ($\nu_{кр}$ или $\lambda_{кр}$) является характеристикой вещества и зависит от величины работы выхода электрона из вещества $A_{вых}$.

Работой выхода электрона из вещества $A_{вых}$ называется минимальная работа, которую необходимо совершить электрону, чтобы вылететь с поверхности вещества в вакуум. (работа выхода является характеристикой вещества (величина табличная) и её значение не зависит от частоты и интенсивности падающего на вещество света).

Красную границу фотоэффекта можно найти по формуле:

$$\begin{cases} h\nu_{кр} = A_{вых} \\ \frac{hc}{\lambda_{кр}} = A_{вых} \end{cases}$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

В 1905 году Эйнштейн показал, что явление внешнего фотоэффекта и его закономерности можно объяснить на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта.

Он предположил, что:

1. свет частотой ν не только излучается порциями с энергией $E = h\nu$, как предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом тоже только квантами с энергией $E = h\nu$.
2. каждый квант поглощается целиком (не наблюдается поглощение половины кванта), только одним электроном.

Основываясь на этой теории, Эйнштейн получил следующее уравнение для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где $E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ - энергия фотона, Дж или эВ. эВ – электрон-вольт; $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$,

$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка, $[\nu] = \text{Гц}$ - частота падающего света,

$[\lambda] = \text{м}$ - длина волны падающего света, $c = \lambda\nu = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость света в вакууме,

$T_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ - максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов, Дж или эВ,

$m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ - масса электрона, v_{max} - максимальная скорость вылетающих фотоэлектронов, м/с.

$A_{\text{вых}}$ - работа выхода электрона из поверхности вещества, Дж или эВ.

Фотоэффект можно прекратить, приложив к веществу **запирающее** (или **задерживающее**) **напряжение** $U_{\text{зан}}$, которое можно найти по формуле:

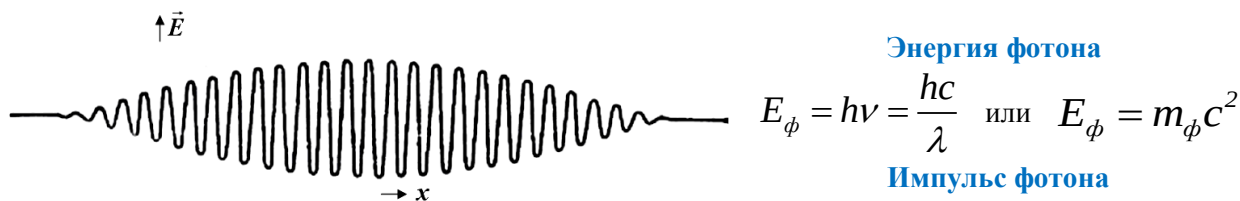
$$|e|U_{\text{зан}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где $U_{\text{зан}}$ - запирающее напряжение, В; $e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона.

У каждого вещества существует, так называемая, **красная граница фотоэффекта**, то есть минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ (или максимальная длина $\lambda_{\text{кр}}$) световой волны, при которой ещё возможен фотоэффект.

Уравнение Эйнштейна было неоднократно подтверждено различными экспериментами.

Связь волновых и корпускулярных свойств света



Схематическое представление кванта света.
Рисунок показывает распределение напряжённости электрического поля E от координаты x в некоторый момент времени.

где E_{ϕ} - энергия фотона в Дж или эВ; p_{ϕ} - импульс фотона, Н·с;

$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$ - масса фотона, кг; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка;

$c = \lambda\nu = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость света в вакууме.

Скорость фотона не зависит от частоты и интенсивности света и во всех веществах одна и та же и равна скорости света в вакууме.

СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФОТОЭФФЕКТУ

При решении задач по фотоэффекту необходимо помнить, что:

- при фотоэффекте количество выбиваемых из вещества электронов определяется только интенсивностью света, а их кинетическая энергия только частотой (длиной волны) падающего света,
- работа выхода электронов не зависит от характеристик падающего на вещество света, а определяется лишь свойствами самого вещества.

- если энергия падающего на вещество фотона много меньше энергии покоя электрона $h\nu \ll mc^2$, то кинетическую энергию фотоэлектрона можно определить по формуле для классической частицы

$$T = \frac{mv^2}{2}.$$

- если энергия падающего на вещество фотона много больше энергии покоя электрона $h\nu \gg mc^2$, то кинетическую энергию фотоэлектрона необходимо определить по формуле для релятивистской

частицы

$$T = mc^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right).$$



СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО КОРПУСКУЛЯРНО–ВОЛНОВЫМ СВОЙСТВАМ СВЕТА

При решении задач по корпускулярно – волновым свойствам света кроме выше приведённых формул

Энергия фотона

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{или} \quad E_{\phi} = m_{\phi}c^2$$

Импульс фотона

$$p_{\phi} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{или} \quad p_{\phi} = m_{\phi}c$$

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

необходимо помнить, что:

- Скорость фотона не зависит от частоты и интенсивности света и во всех веществах он имеет одну и ту же скорость, равную скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ (не путайте со скоростью распространения света в веществе).



Ответы на **Мозголомку № 4 «Туристы 2»**

1. Очевидно, недавно: опытные туристы в ложбине палатку не станут разбивать.
2. По всей вероятности, не очень: рыбу с головы не чистят, пуговицу пришивать слишком длинной ниткой неудобно, перерубать ветку топором надо на чурбачке.
3. Судоходна. Об этом говорит стоящая на берегу навигационная мачта.
4. Слева направо. Почему? Смотри ответ на следующий вопрос.
5. Навигационный знак на берегу реки устанавливается строго определенным образом. Если смотреть со стороны реки, то справа по течению подвешиваются знаки, показывающие ширину реки на ближайшем перекате, а слева — знаки, показывающие глубину. Глубина реки равна 125 см (прямоугольник 1 м, большой круг 20 см и малый круг 5 см), ширина реки — 30 м (большой круг 20 м и 2 малых по 5 м). Такие знаки устанавливаются за 500 м до переката.
6. Недолго. Есть ветер: поплавки удочек отнесло против течения.
7. Подсолнух, очевидно, сломан и воткнут в землю, так как «шляпка» его не обращена к солнцу, а сломанное растение больше расти не будет.
8. Не далее 100 км, на большем расстоянии теле антенна была бы более сложной конструкции.
9. У ребят есть, по всей вероятности, велосипеды: на земле лежит гаечный велосипедный ключ.
10. Нет. Здесь любят вареники. Мазанка, пирамидальный тополь и большая высота солнца над горизонтом (63° — по тени от подсолнуха) показывают, что это украинский пейзаж.
11. Судя по высоте солнца над горизонтом, дело происходит в июне. Для Киева, например, 63° — наибольшая угловая высота солнца. Это бывает лишь в полдень 22 июня. Газета датирована августом — стало быть, она, по крайней мере, прошлогодняя.
12. Ни в какой. Самолет производит сельскохозяйственные работы.



Как запоминать стихотворения с помощью образов



Как ныне собирается вещий Олег отмстить неразумным хозарам: их сёла и нивы за буйный набег обрек он мечам и пожарам; С дружиной своей, в цареградской броне, князь по полю едет на верном коне. Из темного леса навстречу ему Идет вдохновенный кудесник, Покорный Перуну старик одному, Заветов грядущего вестник, В мольбах и гаданьях проводший весь век. И к мудрому старцу подъехал Олег.

Стихотворение «Соковыжималка»

скажи		а - а -	
! с.л.		мне ✂ вам жалко	
		и вот уже	в

Скажи мне маленький дружок,

Ты любишь пить фруктовый сок?

А ягодный? А овощной?

Тебе полезен он любой!

Но самый лучший сок, ребята,

Который только что отжатый.

Его мне сделать вам не жалко,

Была бы соковыжималка.

В нее мы овощи кладём,

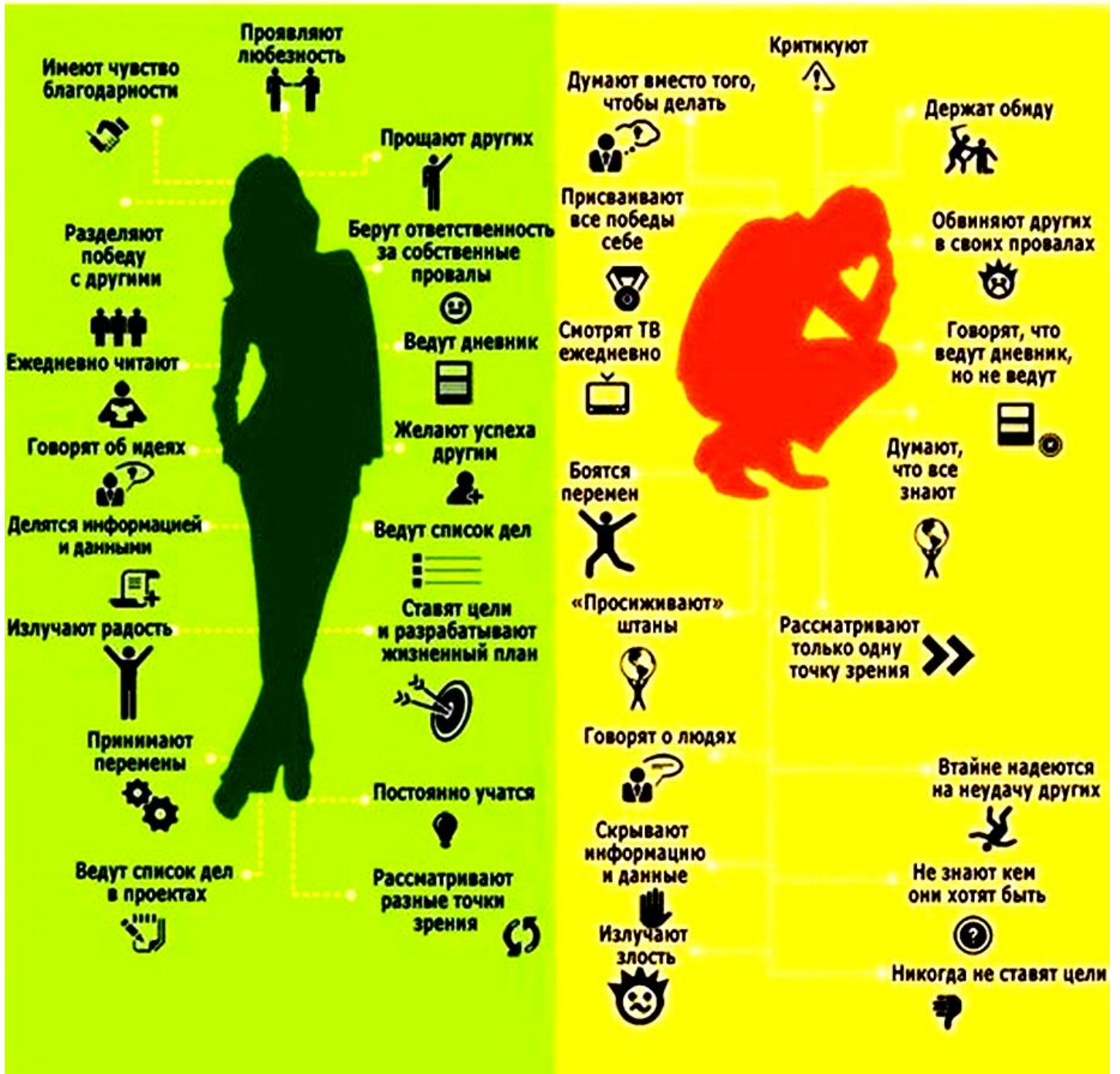
Включаем и слегка нажмём...

И вот уже ручьём потек

В стаканчик вкусный свежий сок!

УСПЕШНЫЕ ЛЮДИ

БЕЗУСПЕШНЫЕ ЛЮДИ



Витамины

ВИТАМИНЫ

D Эргокальциферол лосось, рыбий жир, грибы, молоко Способствует сохранению структуры костей, ускоряет выведение тяжелых металлов, уничтожает туберкулезную палочку, нормализует свертывание крови.	E Токоферол облепиха, брокколи, яйца, черешня, миндаль Ускоряет заживление ожогов, снижает утомляемость, эффективен при лечении мышечной дистрофии, предотвращает развитие катаракты.	A Ретинол морковь, сладкий перец, персики, арбузы, яичный желток Способствует росту и укреплению костей, сохранению здоровья кожи, волос, зубов.	B1 Тиамин капуста, хлеб, морковь, горох, картофель Стимулирует работу мозга, способствует росту организма, улучшает переваривание пищи, нормализует работу мышц и сердца.
K Филлохинон тыква, помидоры, горох, яичный желток, рыбий жир Ускоряет заживление ран, усиливает сокращения мышц, снабжает организм энергией, предотвращает внутренние кровотечения, нужен для кальцификации костей.	C Аскорбиновая кислота шиповник, облепиха, черная смородина, красный перец Предохраняет организм от многих инфекций, повышает эластичность и прочность кровеносных сосудов, помогает очищать организм от ядов, улучшает состояние печени.	B2 Рибофлавин творог, брокколи, миндаль, яйца, молоко Уменьшает утомляемость глаз, сохраняет здоровыми кожу, ногти, волосы, нужен для синтеза гормонов.	B6 Пиридоксин помидоры, грецкий орех, картофель, клубника, апельсин Нужен для нормальной работы центральной нервной системы, поддержания иммунитета, синтеза нуклеиновых кислот, которые препятствуют старению организма.

ВИТАМИНЫ

B3 Пантотеновая кислота орехи, яйца, зеленые овощи, мясо Участвует в обезвреживании алкоголя, необходим для нормального развития центральной нервной системы, поддерживает иммунитет, ускоряет заживление ран.	B9 Фолиевая кислота морковь, цветная капуста, грибы, абрикосы, дыня Требуется для нормального белкового обмена, необходим организму для производства новых клеток, обеспечивает здоровый вид кожи.
B12 Цианокобаламин крабы, сардины, мясо, птица, лосось Обеспечивает нормальное кроветворение, играет большую роль в образовании миелиновой оболочки, которая покрывает нервы, необходим для роста, улучшает аппетит.	PP Никотиновая кислота хлеб из муки грубого помола, яйца, сыр, картофель, чернослив Необходим для нормальной работы нервной системы и головного мозга, улучшает пищеварение, способствует поддержанию кожи в здоровом состоянии, участвует в обеспечении нормального зрения.

8 ГЛАВНЫХ ПОМОЩНИКОВ ТЕЛОСТРОИТЕЛЯ

Куриные грудки главный источник протеина	Яйца сбалансированный набор аминокислот	Овсянка основной поставщик энергии	Грецкие орехи снимают усталость
Скумбрия кладезь Омега-3	Творог любимый ночной белок	Вода мышцы на 80% из нее	Фрукты, овощи витаминки и клетчатка

10 натуральных продуктов для здоровых глаз

Рыба для остроты зрения содержит А, В6, жирные кислоты Омега-3	Грейпфрут против старения Вит С, А, В, калий, фосфор, фолиевая кислота	Черника А, В1, С, РР от усталости
Творог улучшает кровоснабжение В2, В12	Капуста от покраснения С и Р, В1, В2, РР, А также холин	Фисташки для сетчатки медь, магний, фосфор, калий, клетчатка, лютеин и зеаксантин
Тыква для четкости зрения лютеин и зеаксантин, С, А, В1, В2 и цинк	Морковка для "сумеречного зрения" А, В, РР, С, Е	Черный шоколад для укрепления кровеносных сосудов флавоноиды
Лук и чеснок для четкости зрения сера		

Продукты, богатые кальцием

Продукты, богатые железом

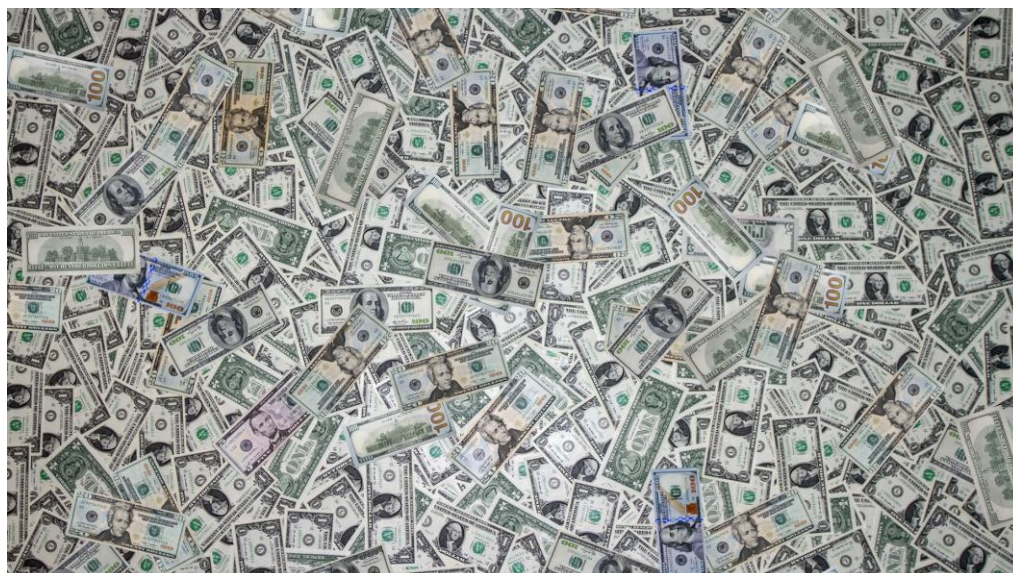


Улучшает усвоение: витамин D



Улучшает усвоение: витамин С и другие органические кислоты, содержащиеся в овощах и фруктах; замачивание и проращивание бобовых перед приготовлением.

Затрудняет усвоение: кальций, кофе, чай (в том числе травяные).



Будешь хорошо учиться, будешь много денежек зарабатывать