

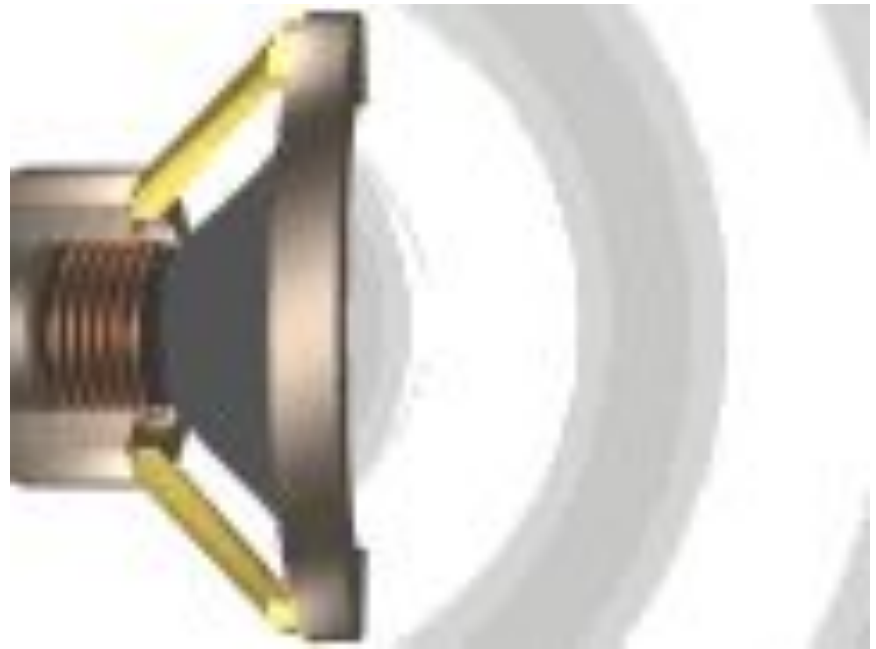
Лекция. Распространение волн в упругой среде

Колеблющееся тело, помещенное в упругую среду, является **источником колебаний**, распространяющихся от него во все стороны.



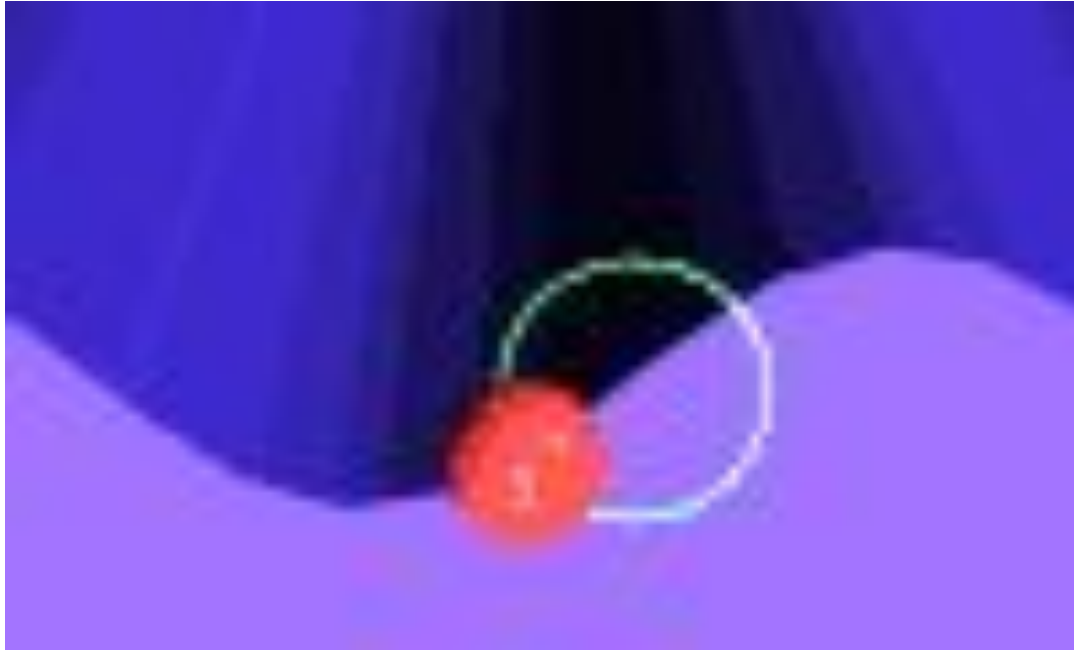
Круговая волна на поверхности жидкости, возбуждаемая точечным источником

*Процесс распространения колебаний в пространстве называется **волной***



Генерация акустической волны громкоговорителем.

При распространении волны, частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия.



Вместе с волной от частицы к частице, передается лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому *основным свойством всех волн независимо от их природы является перенос энергии без переноса вещества.*

Виды упругих волн

Волны бывают поперечными (колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения), и продольными (сгущение и разрежение частиц среды происходят в направлении распространения).



В поперечной волне колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны



Процесс распространения продольной упругой волны

Виды упругих волн



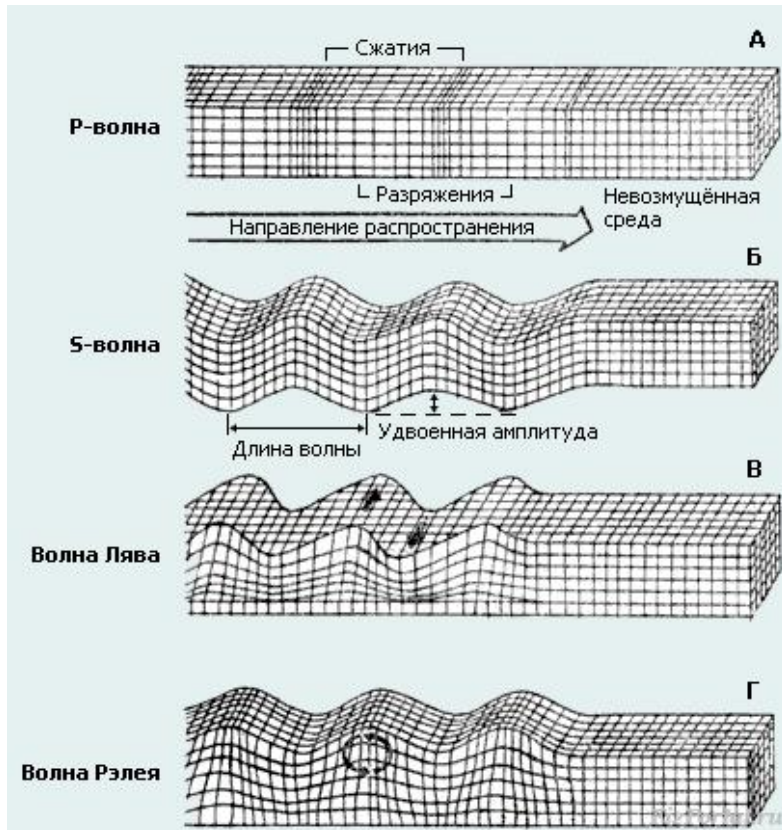
Движение частичек жидкости в поверхностной волне

У **поверхностных волн** взаимосвязь между соседними молекулами при передаче колебаний осуществляется **не силами упругости, а силами поверхностного натяжения и тяжести**. В случае малой амплитуды волны каждая молекула движется по окружности, радиус которой **убывает с расстоянием от поверхности**. Нижние молекулы находятся в покое

Упругие гармонические волны

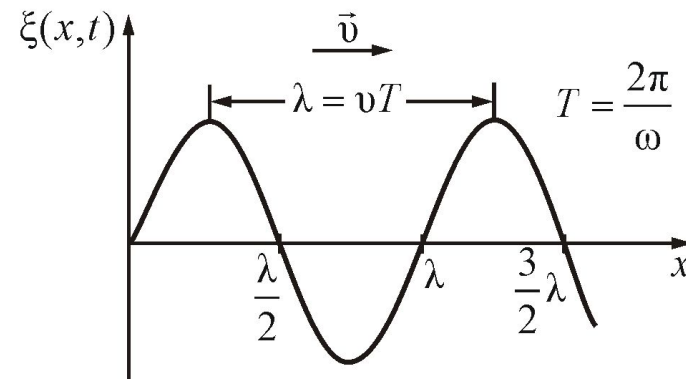
Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется **волной**. При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. *Основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.*

Классификация упругих волн. В сплошной среде могут распространяться три типа волн: продольные, поперечные и поверхностные.



В твердых телах – продольные, поперечные и поверхностные.

В жидкостях и газах – продольные.



Длина волны – путь, который волна проходит в среде за время одного периода колебаний

$$\lambda = c T, \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

Упругие волны. Уравнение бегущей волны. Фазовая скорость

Волновой фронт – геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .

Волновая поверхность – геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

По виду волнового фронта волны подразделяют на **плоские, цилиндрические и сферические**.

Рассмотри плоскую монохроматическую волну. Уравнение колебаний частиц имеет

$$\text{вид } \xi = \xi_m \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right).$$

Определим волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$, тогда $\xi = \xi_m \cos(\omega t - kx)$.

Скорость распространения волновой поверхности – скорость с которой движется поверхность одинаковой фазы – **фазовая** скорость: $\omega t - kx = \text{const}$.

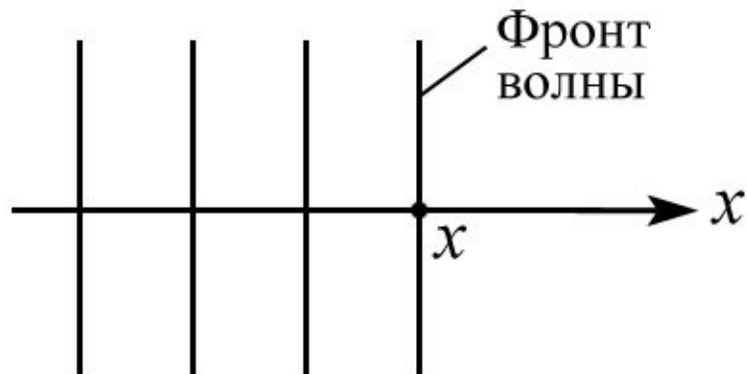
$$x = \frac{\omega t}{k}, \quad \frac{dx}{dt} = c = \frac{\omega}{k} - \text{фазовая скорость волны.}$$

Если фазовая скорость зависит от частоты (длины волны) то это среда с **дисперсией**.

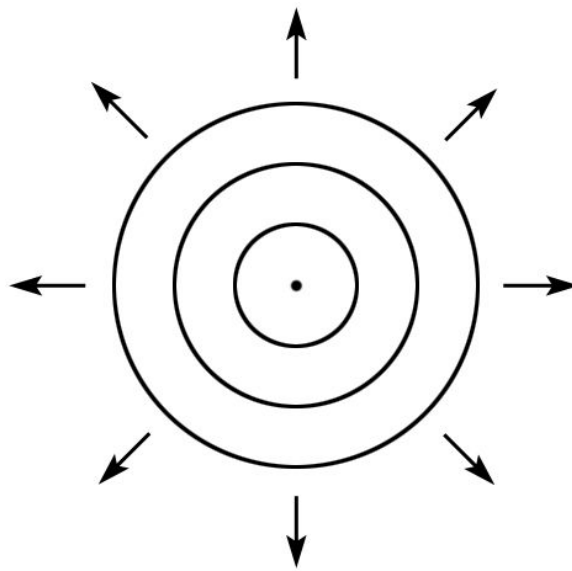
Если фазовая скорость не зависит от длины волны, среда **бездисперсионная**.

В зависимости от формы волновой поверхности различают

- ***плоские волны***: волновые поверхности – параллельные плоскости:



- ***сферические волны***: волновые поверхности – концентрические сферы.



Дисперсия. Волновой пакет. Групповая скорость

Дисперсия – явление зависимости фазовой скорости волны от ее частоты.

Для линейных волн справедлив принцип суперпозиции.

Для передачи информации волна должна быть промодулирована. В результате модуляции формируется **волновой пакет**.

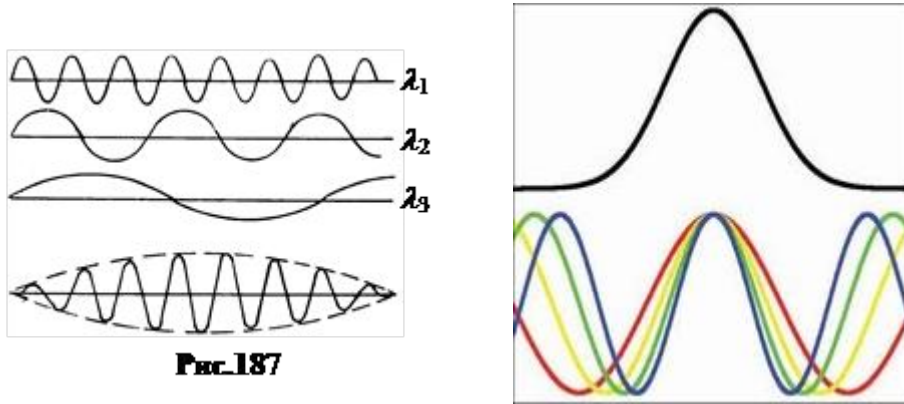
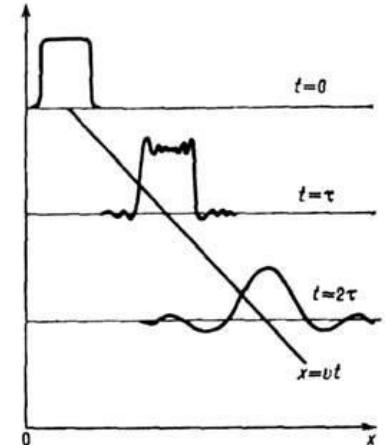
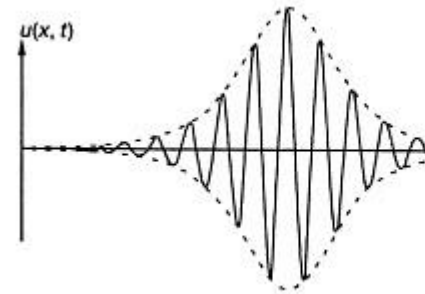
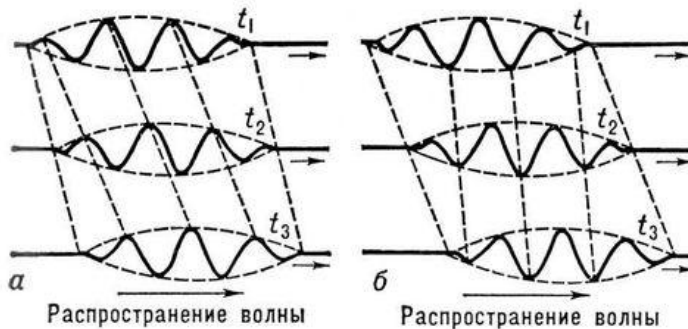
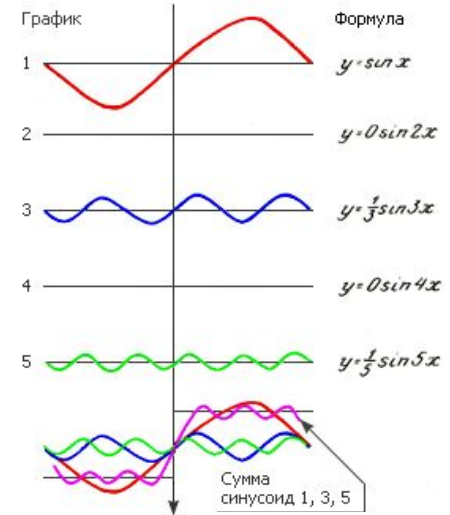


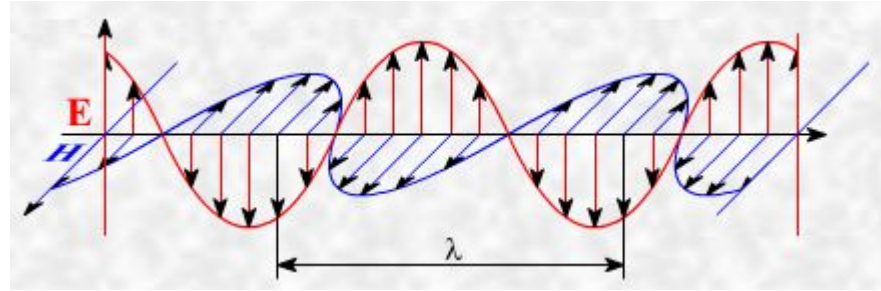
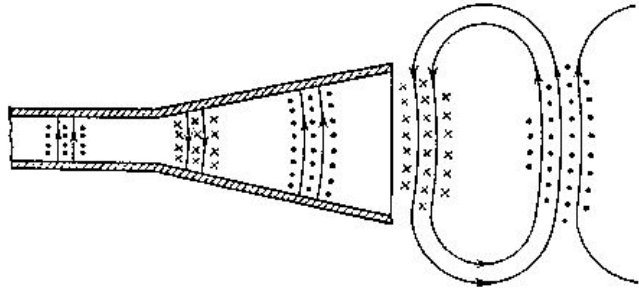
Рис.187



Групповая скорость – скорость с которой перемещается максимум волнового пакета.

Электромагнитные волны

Излучение ЭМВ. Поперечная



Колеблется вектор напряженности электрического (E) и магнитного поля (B, H)

$$\text{Фазовая скорость} - c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Мгновенные значения векторов E и H связаны

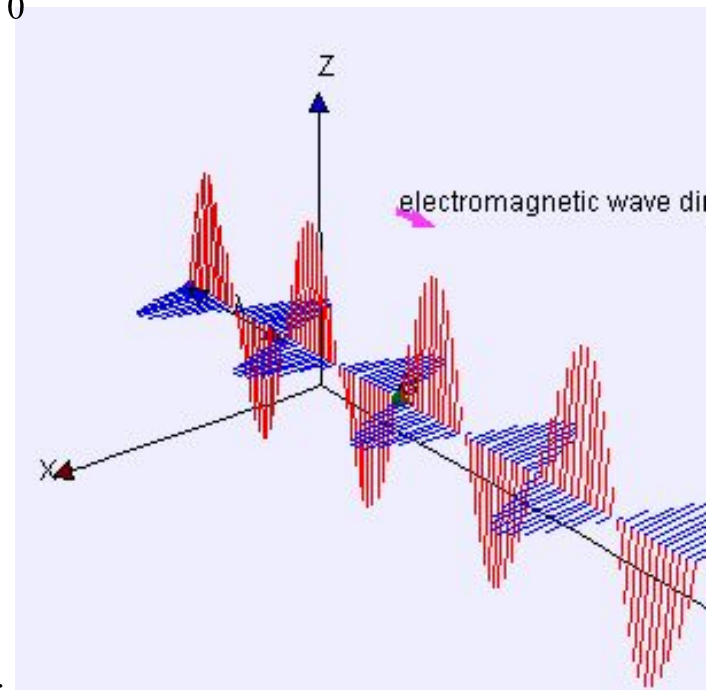
$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H.$$

Уравнение для векторов E и H в плоской ЭМВ

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi),$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi),$$

где E_0 и H_0 — соответственно амплитуды напряженностей электрического и магнитного поля.



Энергия ЭМВ

Волновой вектор \mathbf{k} – вектор перпендикулярный волновому фронту.

Объемная плотность w энергии ЭМВ складывается из объемных плотностей $w_{\text{эл}}$ и $w_{\text{м}}$, электрического и магнитного полей:

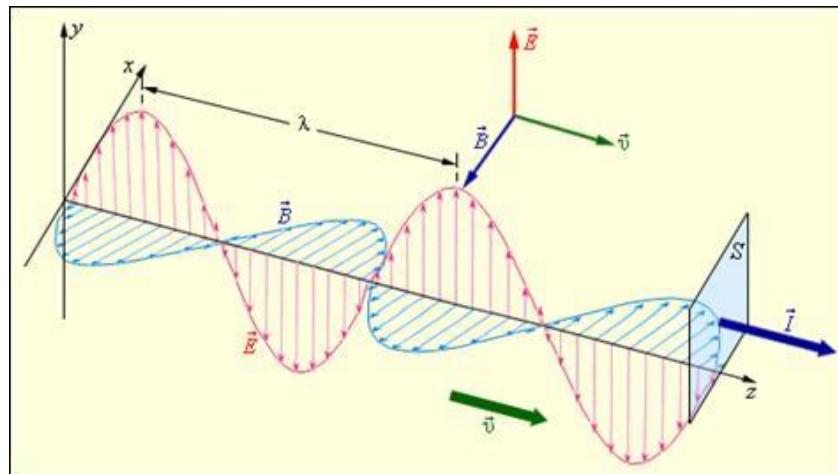
$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{м}} = \epsilon_0 \epsilon E^2 / 2 + \mu_0 \mu H^2 / 2.$$

Плотность энергии электрического и магнитного полей в каждый момент времени одинаковы, т. е. $w_{\text{эл}} = w_{\text{м}}$. Поэтому

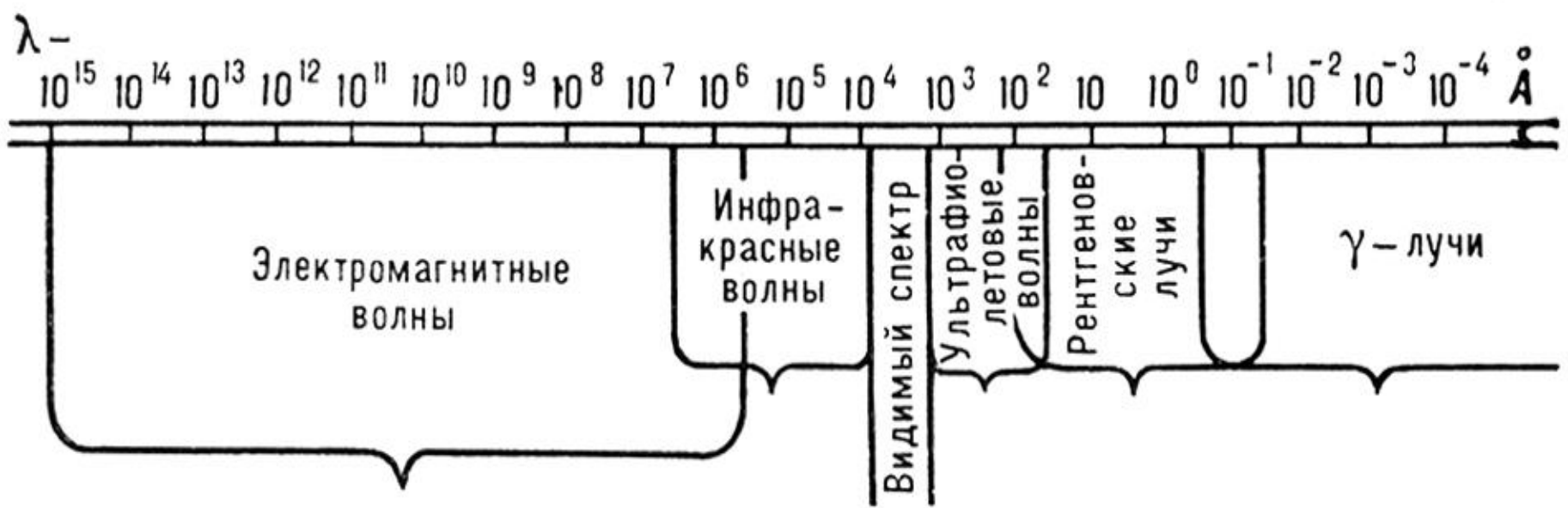
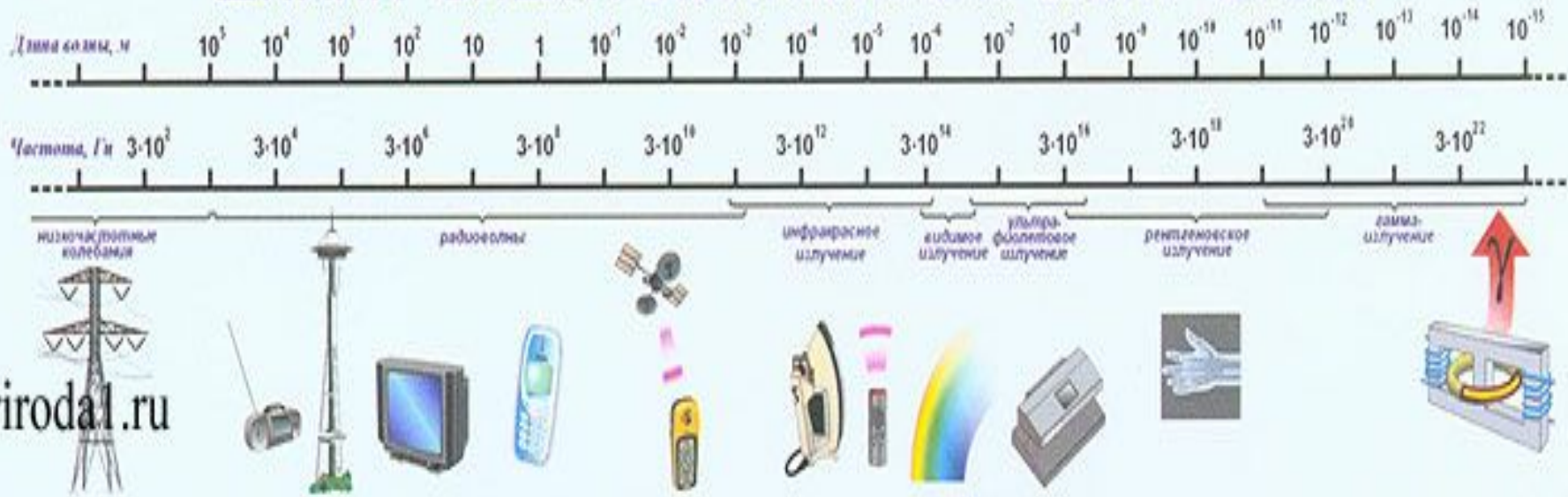
$$w = 2w_{\text{эл}} = \epsilon_0 \epsilon E^2 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu} E H.$$

Умножив плотность энергии w на скорость c распространения волны в среде, получим вектор плотности потока энергии – вектор Пойнтинга:

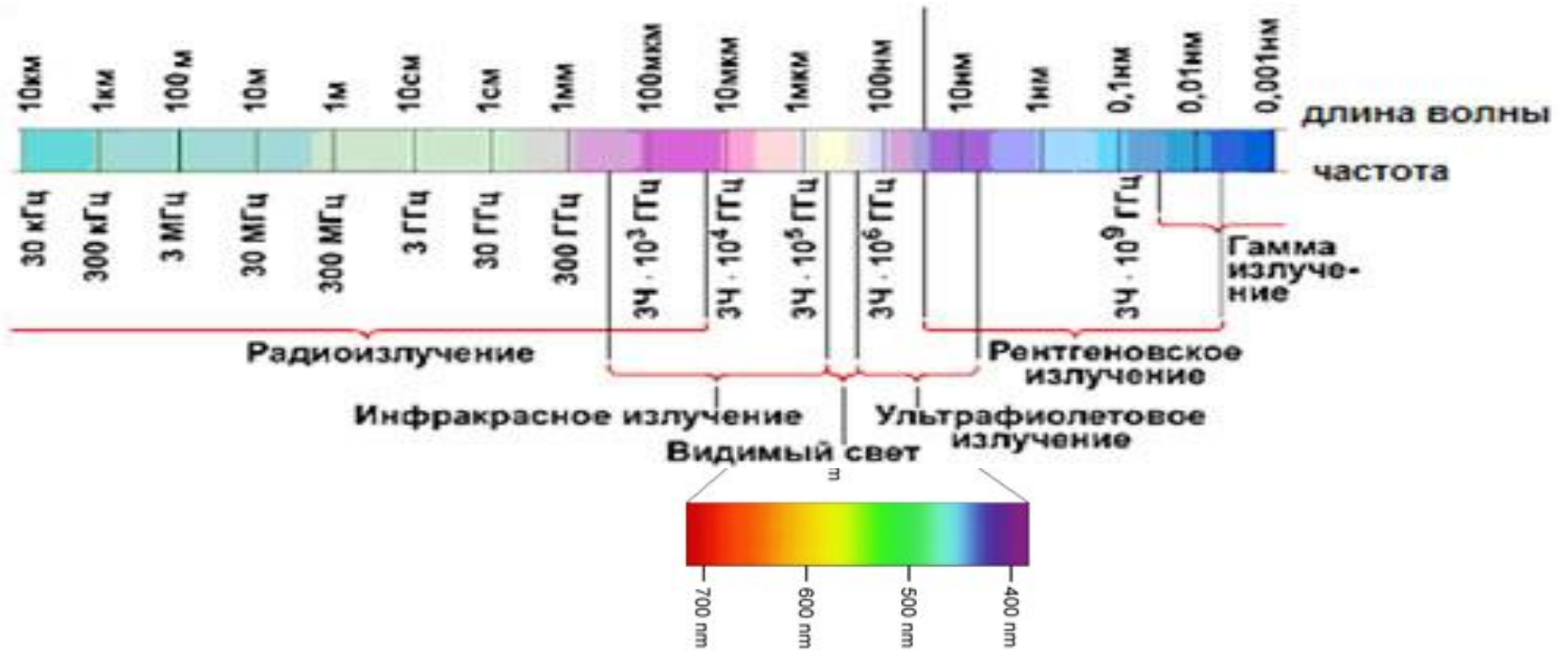
$$\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$$



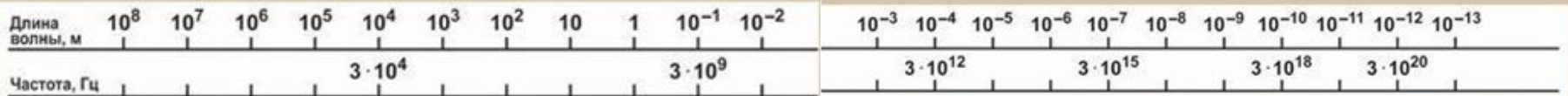
ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



Шкала ЭМВ



ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



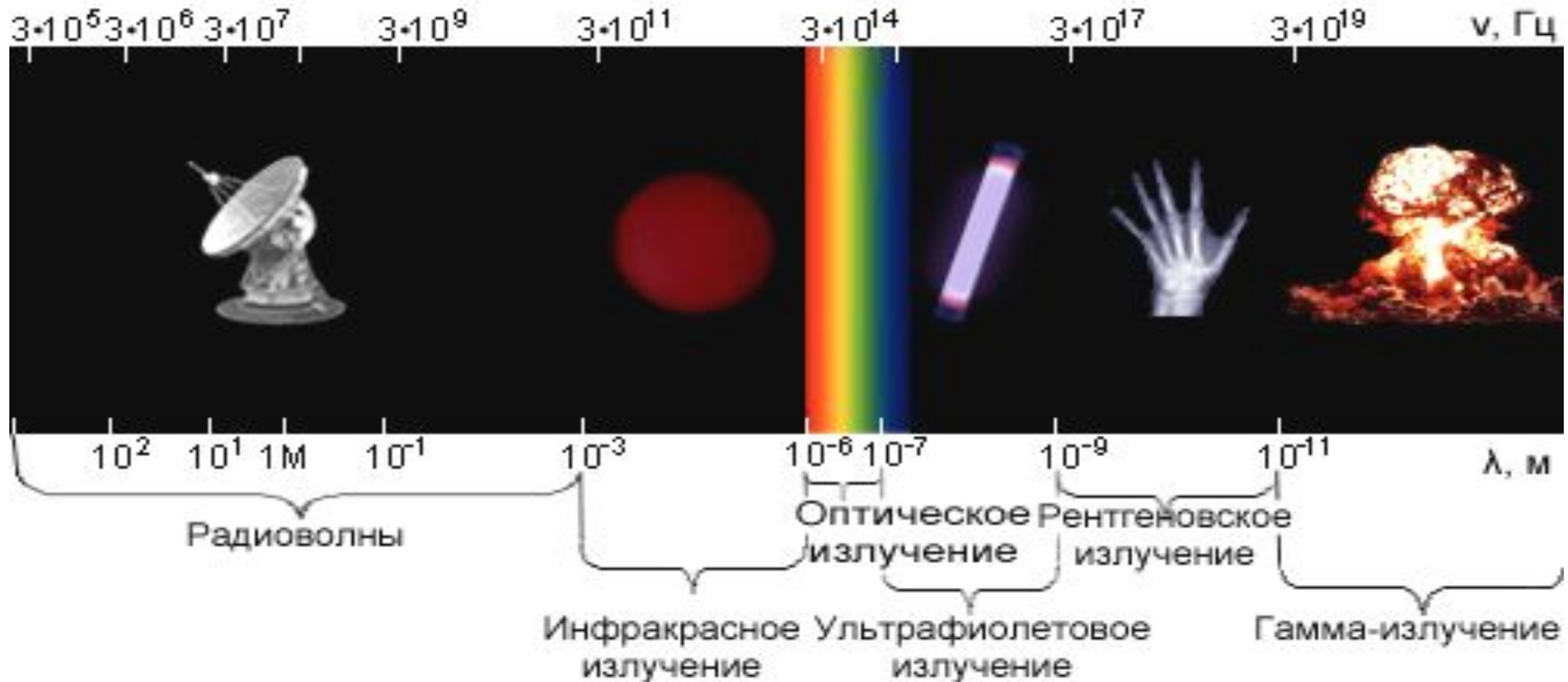
Контрольные вопросы. Упругие и электромагнитные ВОЛНЫ

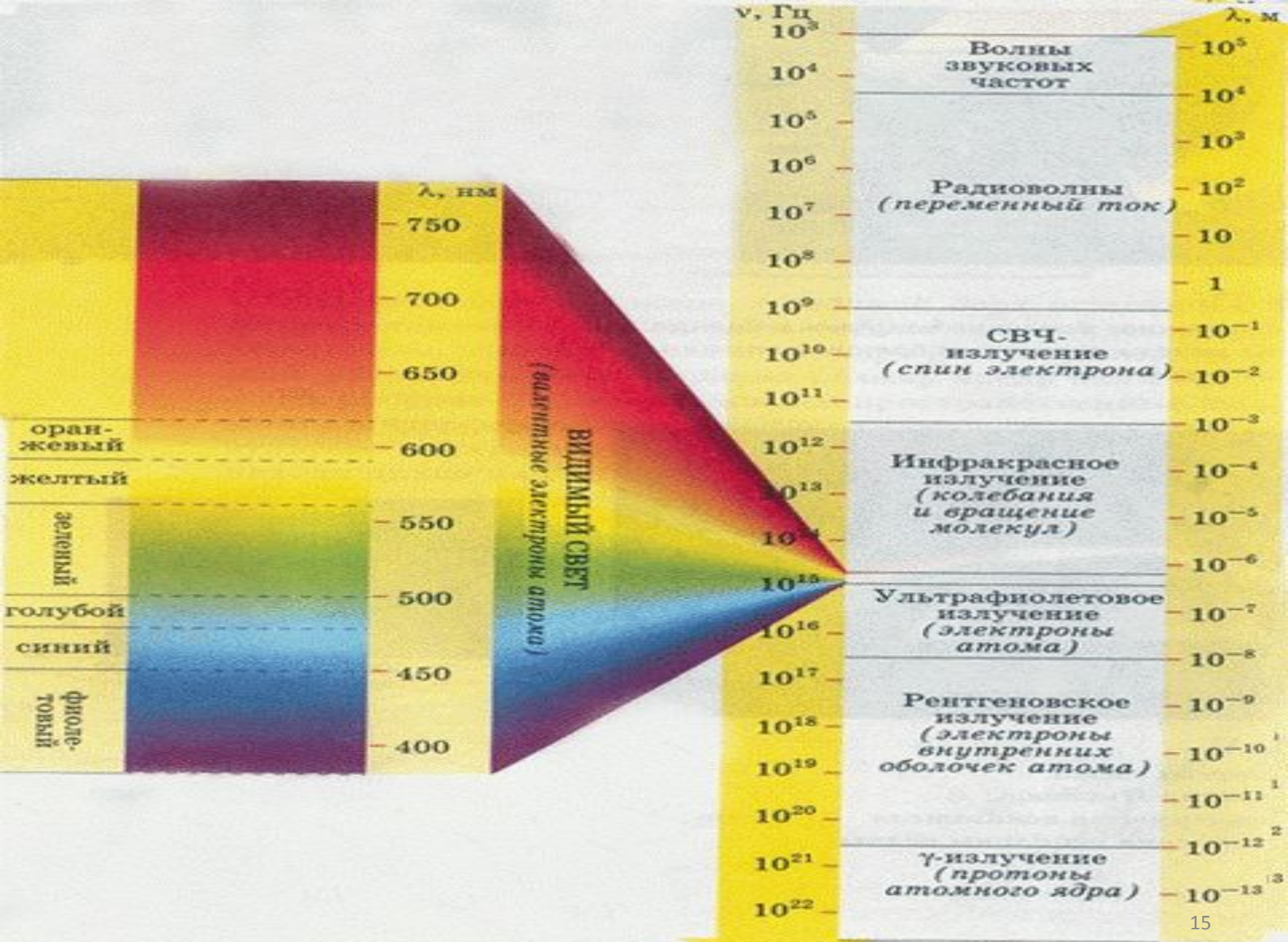
- 1) Какие вам известны виды упругих волн? В каких средах они распространяются? Приведите примеры.
- 2) Дайте определение длины волны. Запишите связь длины волны и волнового числа.
- 3) Дайте определение волнового фронта и волновой поверхности.
- 4) Как подразделяются волны по виду волнового фронта или волновой поверхности?
- 5) В чем различие волнового фронта и волновой поверхности?
- 6) Что такое монохроматическая волна?
- 7) Что такое фазовая скорость? Что такое групповая скорость? В чем различие?
- 8) К каким видам волн применимо понятие фазовая скорость?
- 9) Что такое дисперсия?
- 10) Что происходит с распространяющимся в среде импульсом при наличии дисперсии?
- 11) Есть ли дисперсия при распространении звуковых волн в воздухе? В воде? Электромагнитных волн в вакууме? В среде? Привести примеры.
- 12) Свойства электромагнитных волн. Перечислить.

Ответы на контрольные вопросы должны быть представлены письменно в формате Word или написаны рукой и сфотографированы, и отправлены на электронный адрес vlisiutin@mail.ru. ФИО студента и номер группы указать обязательно

Шкала ЭМВ. Свет

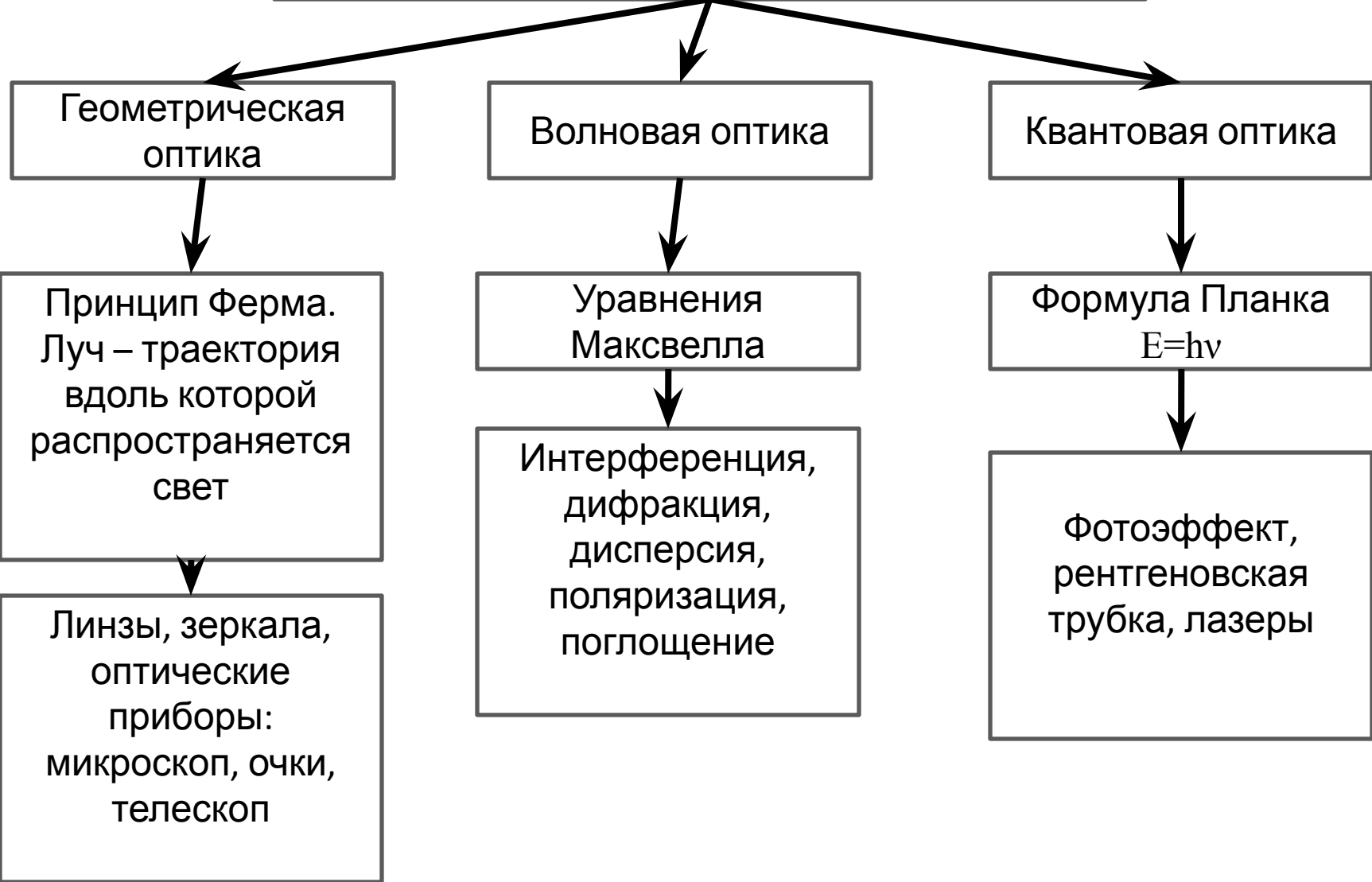
Оптический диапазон длин волн λ ограничен с одной стороны рентгеновскими лучами, а с другой – микроволновым диапазоном радиоизлучения.





Оптика. Свет

Свет



Оптика. Свет

Основные законы оптики известны еще с древности. Платон (430 г. до н. э.) установил закон прямолинейного распространения и отражения света. Аристотель (350 г. до н. э.) и Птоломей изучали преломление света. Первые представления о природе света возникли у древних греков и египтян, которые, по мере изобретения оптических инструментов, например параболических зеркал (XIII в.), фотоаппарата и микроскопа (XVI в.), зрительной трубы (XVII в.), развивались и трансформировались. В конце XVII в. на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли **две теории света: корпускулярная** (И. Ньютон) и **волновая** (Р. Гук и Х. Гюйгенс).

Согласно корпускулярной теории (теории истечения), свет представляет собой поток частиц, испускаемых светящимися телами и летящих по прямолинейным траекториям. Движение корпускул Ньютон подчинил законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика при ударе о плоскость. Преломление света Ньютон объяснял притяжением корпускул преломляющей средой, в результате чего скорость корпускул меняется при переходе из одной среды в другую. Из теории Ньютона следовало постоянство синуса угла падения к синусу угла преломления но *по теории Ньютона* скорость света в среде должна быть всегда больше скорости его распространения в вакууме.

Согласно волновой теории, свет представляет собой упругую волну, распространяющуюся в особой среде — эфире. Эфир заполняет все мировое пространство, пронизывает все тела и обладает механическими свойствами — упругостью и плотностью. Согласно Гюйгенсу, большая скорость распространения света обусловлена особыми свойствами эфира.

Таким образом, к началу XVIII в. существовало два противоположных подхода к объяснению природы света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса. Обе теории объясняли прямолинейное распространение, законы преломления. XVIII век стал веком борьбы этих теорий. Экспериментальное доказательство справедливости волновой теории было получено в 1851 г., когда Э. Фуко и А. Физо измерили скорость света в воде и получил значение, меньшее чем в воздухе. К началу XIX столетия корпускулярная теория была отвергнута и восторжествовала волновая теория. Большая заслуга в этом отношении принадлежит английскому физику Т. Юнгу и французскому физику О. Френелю (1788—1827), дополнившему принцип Гюйгенса и объяснившего эти явления.

Несмотря на признание волновой теории, она обладала целым рядом недостатков. Например, явления интерференции, дифракции и поляризации могли быть объяснены только в том случае, если световые волны считать поперечными. С другой стороны, если световые волны — поперечные, то их носитель — эфир — должен обладать свойствами твердых тел. Попытка же наделить эфир свойствами твердого тела успеха не имела, так как эфир не оказывает заметного воздействия на движущиеся в нем тела. Далее эксперименты показали, что скорость распространения света в разных средах различна, поэтому эфир должен обладать в разных средах различными свойствами. Теория Гюйгенса не могла объяснить также разных цветов.

Наука о свете накапливала экспериментальные данные, свидетельствующие о взаимосвязи световых, электрических и магнитных явлений, что позволило Максвеллу в 70-х годах прошлого столетия создать электромагнитную теорию света.

Согласно электромагнитной теории Максвелла, соотношение скорость света в среде зависит от диэлектрической и магнитной проницаемости ε и μ . По Максвеллу, ε и μ — величины, не зависящие от длины волны света, поэтому электромагнитная теория не могла объяснить явление дисперсии. Эта трудность была преодолена в конце XIX в. Лоренцем, предложившим **электронную теорию**, согласно которой диэлектрическая проницаемость ε зависит от длины волны падающего света. Теория Лоренца ввела представление об электронах, колеблющихся внутри атома, и позволила объяснить явления испускания и поглощения света веществом.

Несмотря на огромные успехи электромагнитной теории Максвелла и электронной теории Лоренца они основывались на гипотезе об эфире, только «упругий эфир» был заменен «эфиром электромагнитным» (Максвелл) или «неподвижным эфиром» (Лоренц). Теории не смогли объяснить процессов испускания и поглощения света, фотоэлектрического эффекта, вопрос о распределении энергии по длинам волн при тепловом излучении черного тела.

Перечисленные затруднения и противоречия были преодолены благодаря гипотезе (1900) немецкого физика М. Планка, согласно которой излучение и поглощение света происходит не непрерывно, а дискретно. Теория Планка не нуждалась в понятии об эфире. Она объяснила тепловое излучение черного тела.

Эйнштейн в 1905 г. создал **квантовую теорию света**, согласно которой не только *излучение* света, но и его *распространение* происходит в виде **потока световых квантов** — **фотонов**. В дальнейшем выяснилось, что свет обладает корпускулярно-волновым дуализмом – двойственной природой.

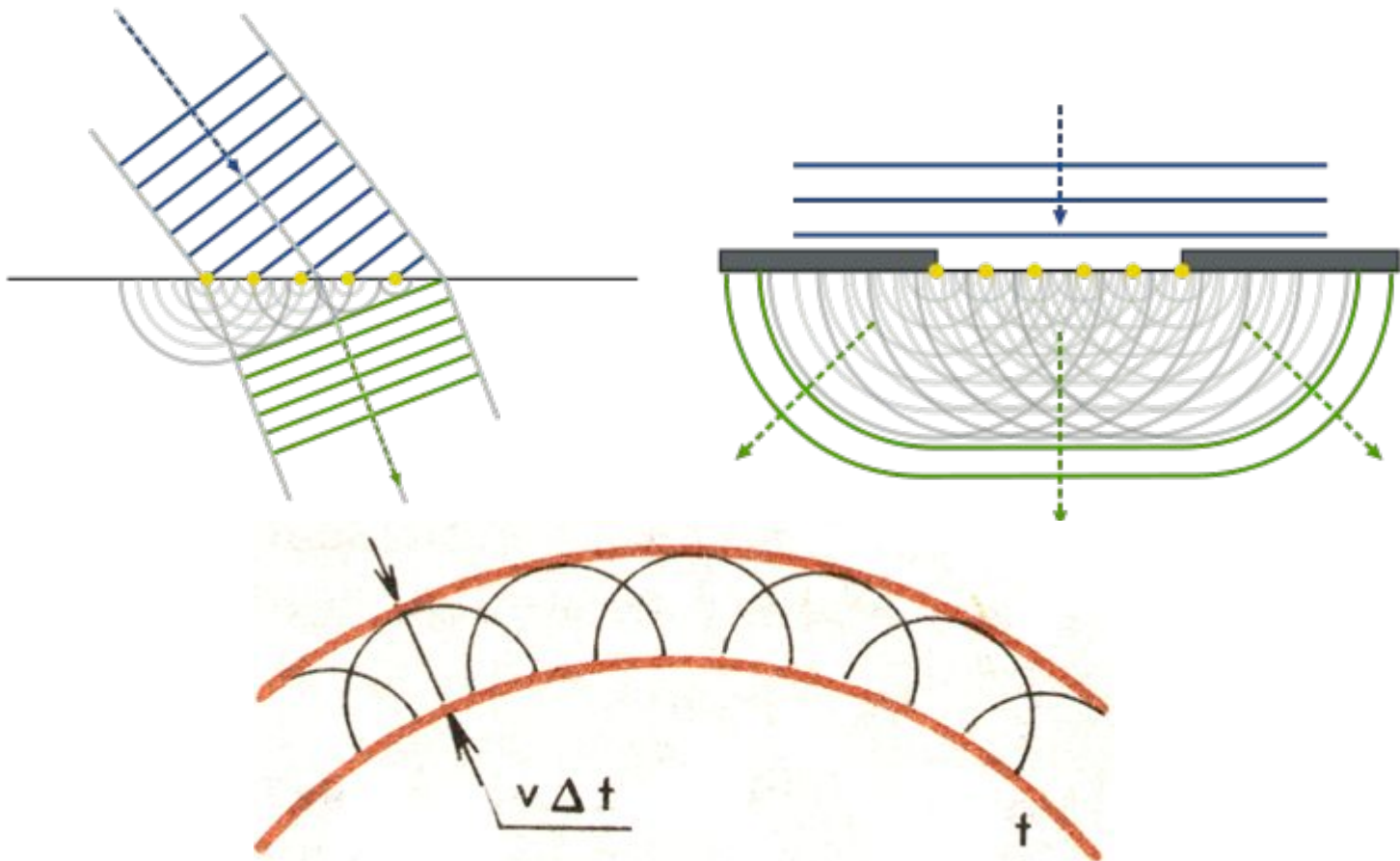
Принцип Ферма. Принцип Гюйгенса

Принцип Ферма – основной принцип геометрической оптики.

Свет распространяется вдоль луча – траектории, для прохождения которой ему требуется наименьшее время.

Принцип Гюйгенса – основной принцип волновой оптики.

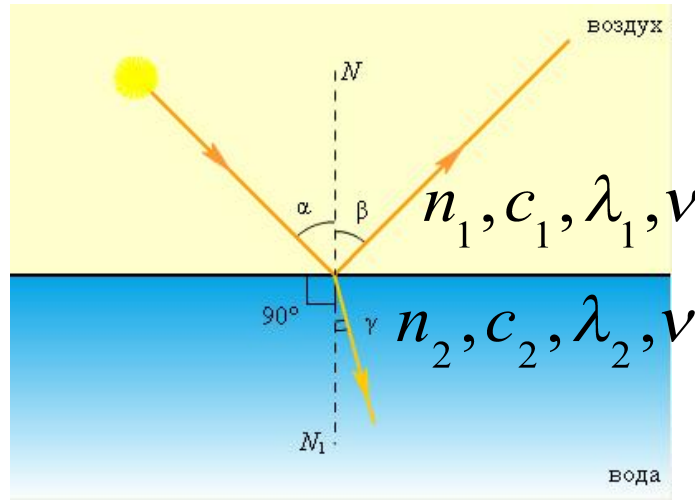
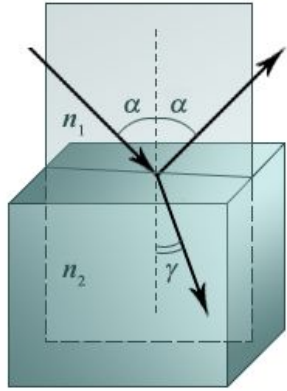
Каждая точка волновой поверхности является источником вторичных сферических волн.





Геометрическая оптика. Основной закон ГО – закон Снелля

Показатель преломления (оптическая плотность среды) – $n_1 = \frac{c_0}{c_1}$.

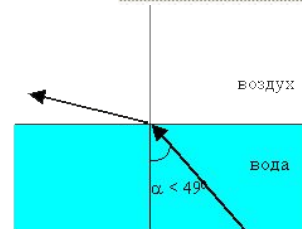
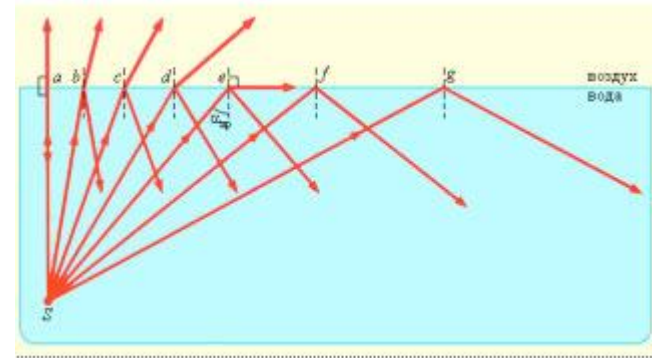


$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$$

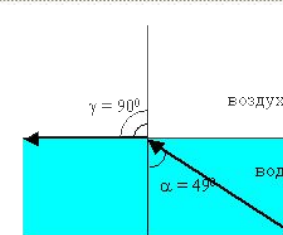
Полное внутреннее отражение

Предельный угол падения

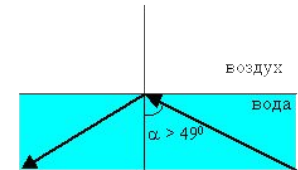
$$\frac{\sin \alpha}{1} = \sin \alpha_0 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1}$$



Луч преломляется в воздух



Луч идёт вдоль границы раздела



Свет отражается обратно в воду, преломлённый пучок исчезает. Это и есть полное отражение

Явление полного отражения используется в призмах полного отражения.

Показатель преломления стекла
равен

$n \approx 1,5$, поэтому предельный угол для
границы стекло – воздух

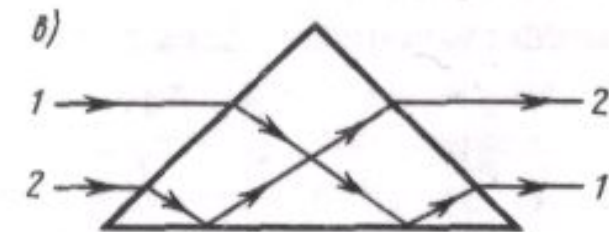
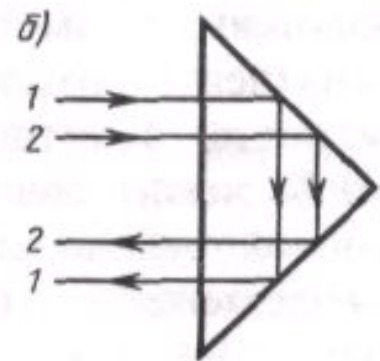
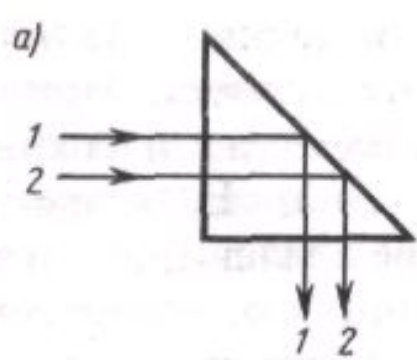
$$\alpha_{пр} = \arcsin (1/1,5) = 42^\circ.$$

При падении света на границу стекло
– воздух при $\alpha > 42^\circ$ всегда будет
иметь место полное отражение.

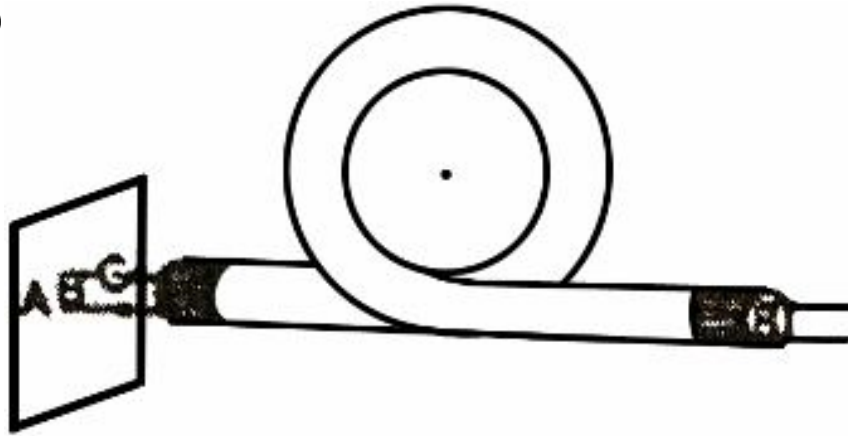
На рис. а – в показаны призмы
полного отражения, позволяющие:

а) повернуть луч на 90° ;

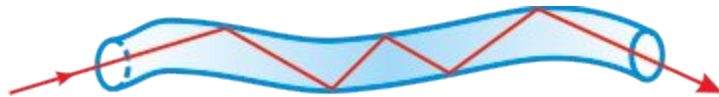
б) повернуть изображение:



Явление полного отражения используется также в **световодах** представляющих собой тонкий, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически пр

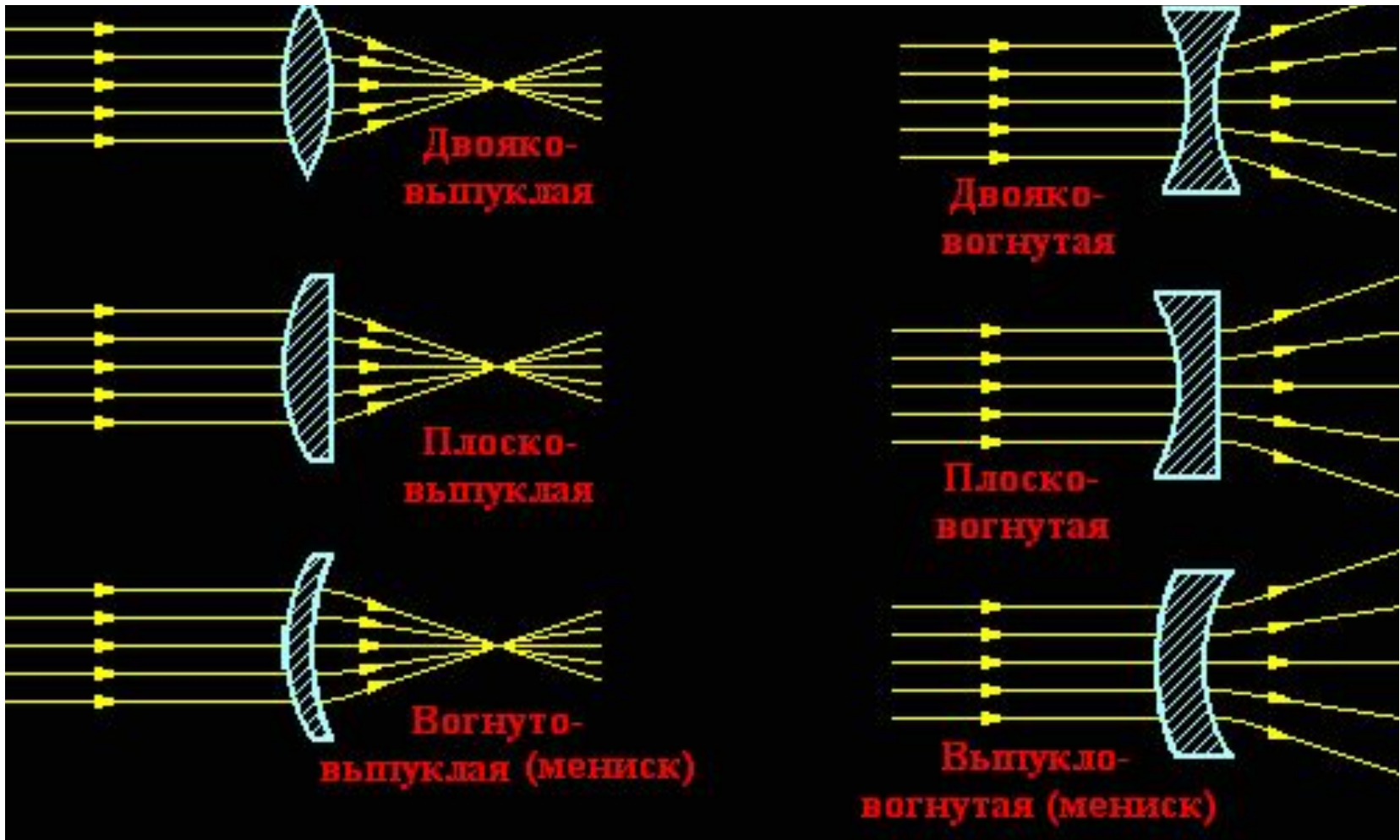


В волоконных деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления.



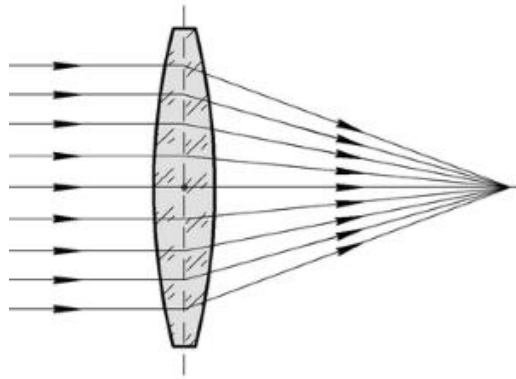
Свет, падающий на торец световода **под углами, большими предельного**, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки **полное отражение** и распространяется только по световедущей жиле.

Линзы



Преломляющая способность линзы зависит от показателя преломления стекла, радиусов кривизны поверхностей и характеризуется *фокусным расстоянием* F , [метр, м] или *оптической силой* линзы $D = \frac{1}{F}$, [диоптрия, дп = 1/м].

Линзы. Построение изображений



Двояковыпуклая
Плоско-выпуклая
Вогнуто-выпуклая

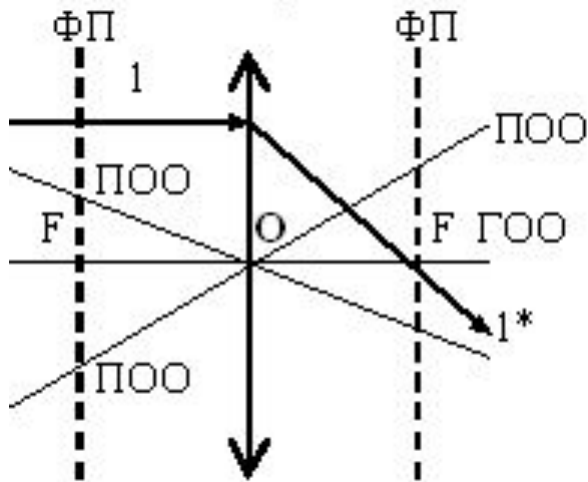


Двояковогнутая
Плоско-вогнутая
Выпукло-вогнутая



Преломляющая способность линзы зависит от показателя преломления стекла, радиусов кривизны поверхностей и характеризуется **фокусным расстоянием** F ,

[метр, м] или **оптической силой** линзы $D = \frac{1}{F}$, [диоптрия, дп = 1/м].



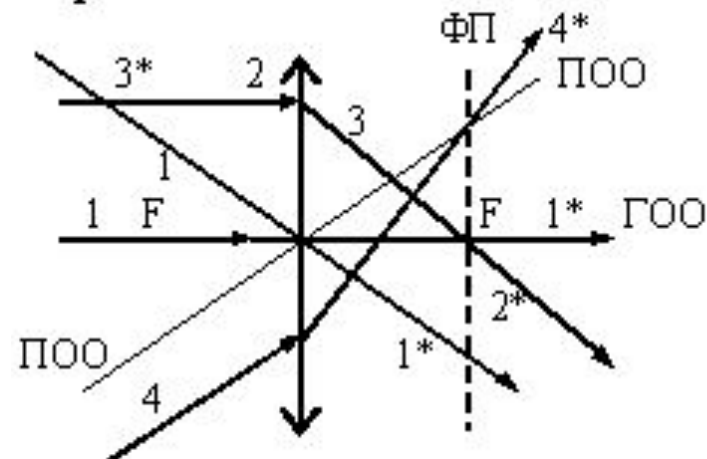
O – оптический (геометрический) центр линзы;
 GOO – главная оптическая ось, проходит через оптический центр O перпендикулярно плоскости линзы;
 GOO – побочная оптическая ось, проходит через оптический центр O под произвольным углом;
 F – фокус – точка, где пересекаются лучи, (1) идущие до преломления параллельно GOO ;
 $\Phi\Pi$ – фокальная плоскость – плоскость, проходящая через фокус F параллельно плоскости линзы;

ХОД ЧЕТЫРЁХ ВАЖНЕЙШИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ ЛИНЗУ

СОБИРАЮЩАЯ

РАСSEИВАЮЩАЯ

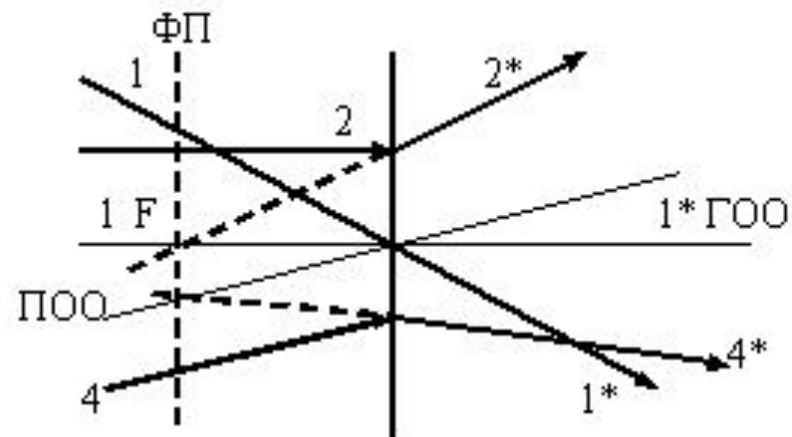
1. Луч, проходящий через оптический центр O не преломляется (простейший луч – ход которого совпадает с ГОО):
2. Луч, идущий ПАРАЛЛЕЛЬНО ГОО после преломления проходит через фокус F :
3. Луч, проходящий через фокус F после преломления проходит ПАРАЛЛЕЛЬНО ГОО;
4. ПРОИЗВОЛЬНЫЙ луч после преломления проходит через точку пересечения ПОО, параллельной падающему произвольному лучу и фокальной плоскости $\Phi\Pi$.



2. ОБРАТНОЕ продолжение луча, идущего ПАРАЛЛЕЛЬНО ГОО проходит через фокус F :
3. Луч, проходящий через фокус F - произвольный, см. ниже

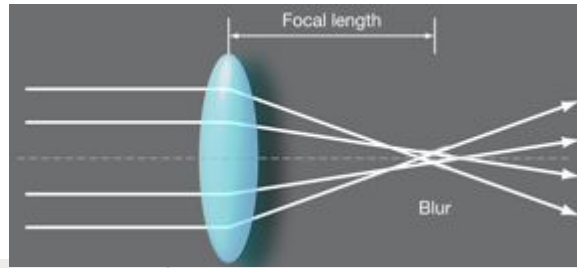


4. ОБРАТНОЕ продолжение ПРОИЗВОЛЬНОГО луча проходит через точку пересечения ПОО, параллельной падающему произвольному лучу и фокальной плоскости $\Phi\Pi$.

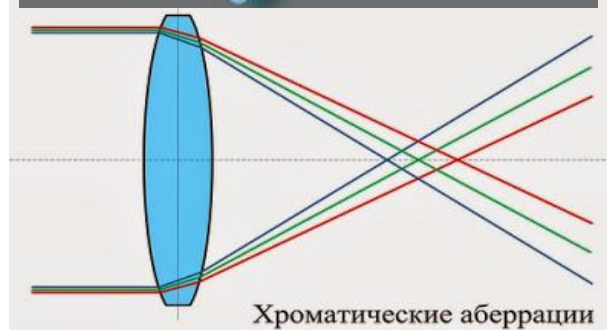


Аберрации линз

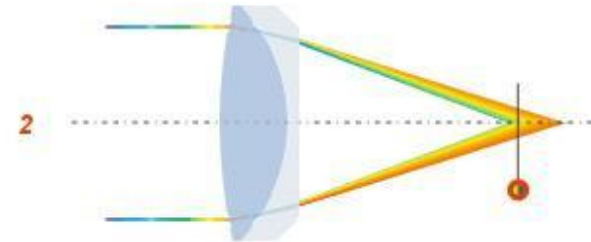
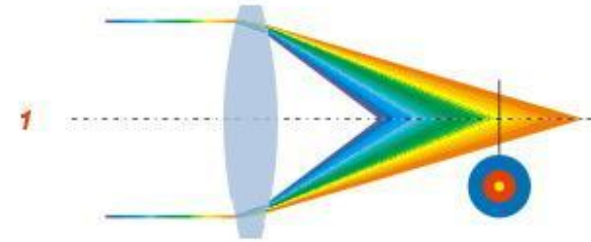
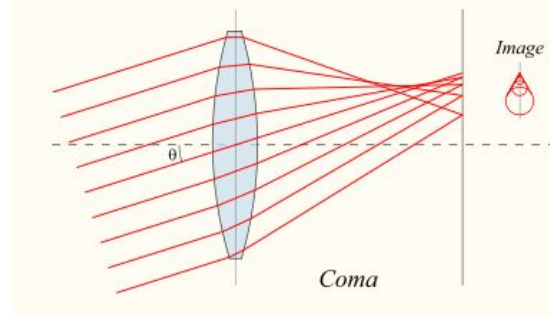
Сферическая
абберация



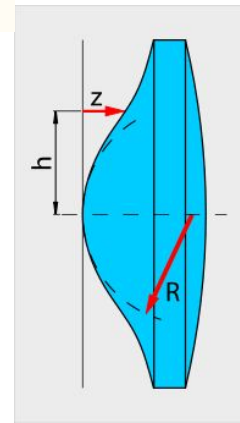
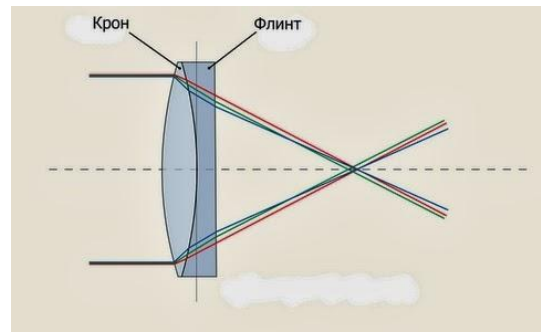
Хроматическая
абберация



Кома

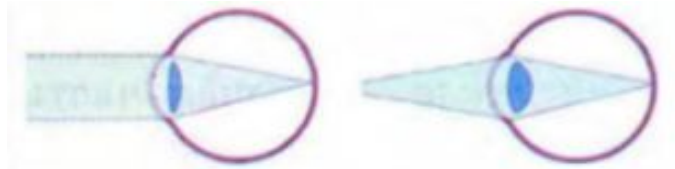
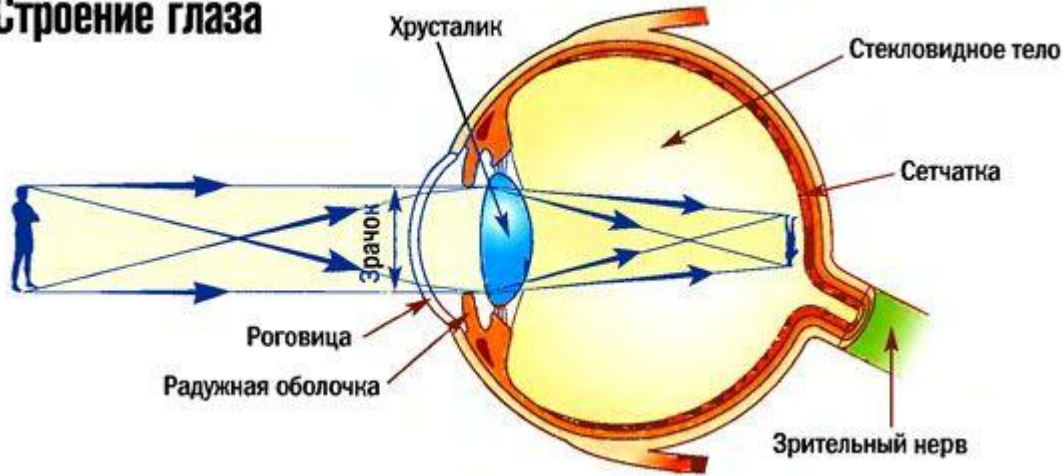


Исправление



Глаз как оптическая система

Строение глаза



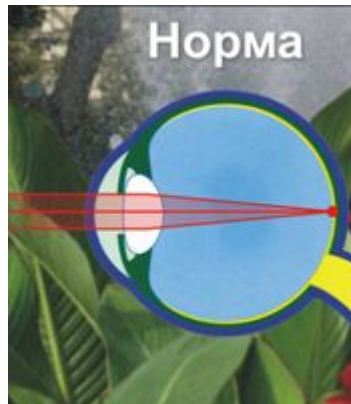
Зрение вдаль

Зрение вблизи



Близорукость

Дальнозоркость



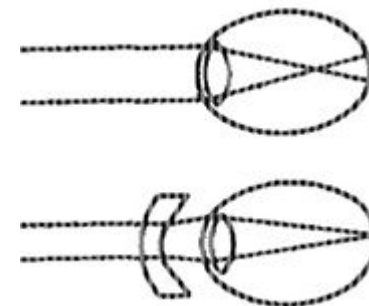
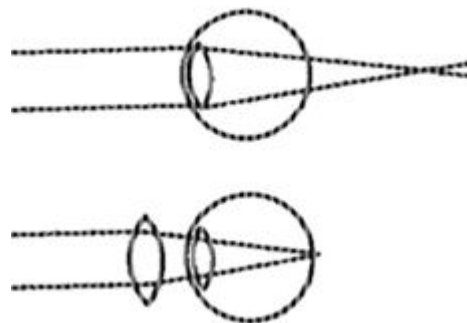
Норма



Дальнозоркость



Близорукость



Контрольные вопросы. Оптика, введение

- 1) Что такое свет в волновой точки зрения?
- 2) Каковы длины световых волн. Укажите соответствие между длиной волны и цветом для наиболее коротких и наиболее длинных волн.
- 3) Что колеблется в электромагнитной волне? Она продольная или поперечная?
- 4) Что означает приближение геометрической оптики? Какова должны быть длина волны света, чтобы можно было воспользоваться приближением геометрической оптики?
- 5) Как называется основной закон геометрической оптики?
- 6) Что такое явление полного внутреннего отражения?
- 7) Какие вам известны виды линз?
- 8) Как связаны фокусное расстояние и оптическая сила? В каких единицах они измеряются?
- 9) Какие вам известны дефекты линз?
- 10) Какой дефект обусловлен волновой природой света? Привести примеры проявления сферической и хроматической аберраций.

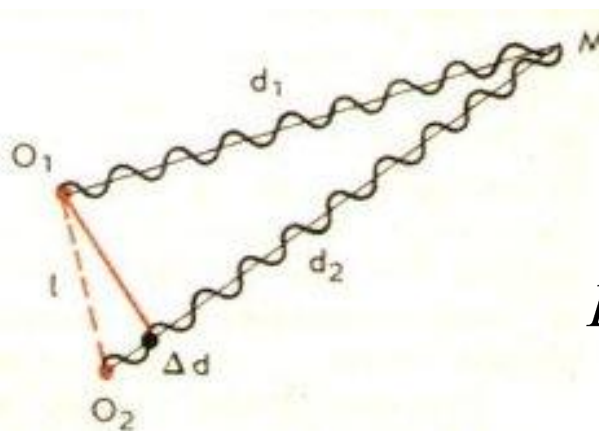
Ответы на контрольные вопросы должны быть представлены письменно в формате Word или написаны рукой и сфотографированы, и отправлены на электронный адрес vlisiutin@mail.ru. ФИО студента и номер группы указать обязательно

Интерференция света. Условие максимумов и минимумов

Интерференция – явление наложения двух или более когерентных волн, при котором происходит перераспределение энергии в пространстве и возникает устойчивая картина чередования максимумов и минимумов интенсивности света.

Монохроматическая волна – волна с одной длиной (одной частотой).

Когерентность – согласованное протекание волновых процессов, при котором сохраняется не зависящая от времени разность фаз.



Две волны, накладываясь друг на друга, возбуждают колебания светового вектора E одинакового направления:

$$E_1 = E_{m1} \cos(\omega t - kd_1) \quad E_2 = E_{m2} \cos(\omega t - kd_2)$$

Складывая эти волны, получаем

$$E^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(k(d_2 - d_1))$$

Переходя к интенсивности ($I \sim E^2$)

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(k\Delta d)$$

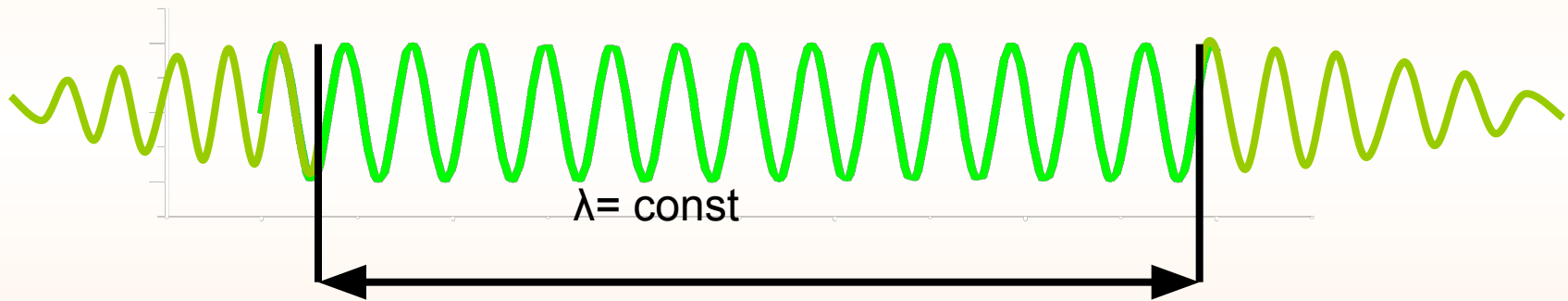
Если волны некогерентны, то сложение интенсивностей $I = I_1 + I_2$.

Если $k\Delta d = 2\pi m$, $m = 1, 2, \dots$ или $\Delta d = 2m \frac{\lambda}{2}$, $m = 1, 2, \dots$ - условие максимума;

Если $k\Delta d = (2m + 1)\pi$, $m = 1, 2, \dots$ или $\Delta d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$, $m = 1, 2, \dots$ - условие минимума

Когерентность

Периодическая последовательность горбов и впадин волны и образующиеся в процессе акта излучения одного атома, называется **цугом волн** или **волновым цугом**.



Процесс излучения одного цуга атома длится 10^{-8} с .

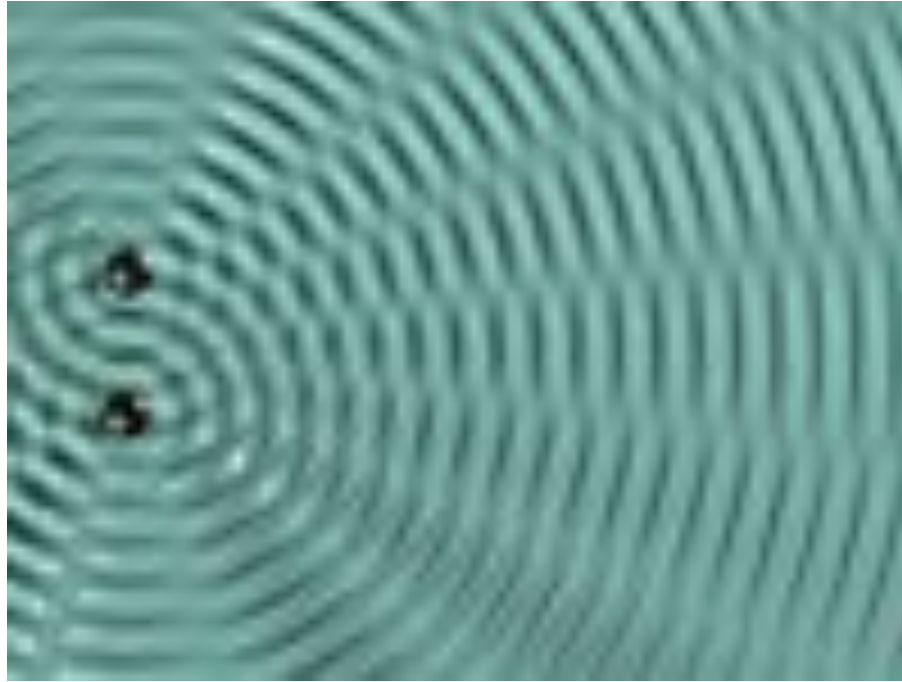
Длина цуга $l = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3 \text{ м}$

В одном цуге укладывается примерно 10^7 длин волн.



Интерференция двух волн на поверхности жидкости, возбуждаемых вибрирующими стержнями

Волны распространяются в противоположных направлениях и интерферируют с образованием стоячей волны. Красный шарик расположен в пучности стоячей волны и колеблется с максимальной амплитудой. Параллелепипед расположен в узле интерференционной картины и амплитуда его колебаний равна нулю (он совершает лишь вращательные движения, следуя наклону волны)



Интерференция поверхностных волн от двух точечных ИСТОЧНИКОВ

В точках, для которых $r_2 - r_1 = \lambda (1/2 + n)$, поверхность жидкости не колеблется (узловые точки (линии))



Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки

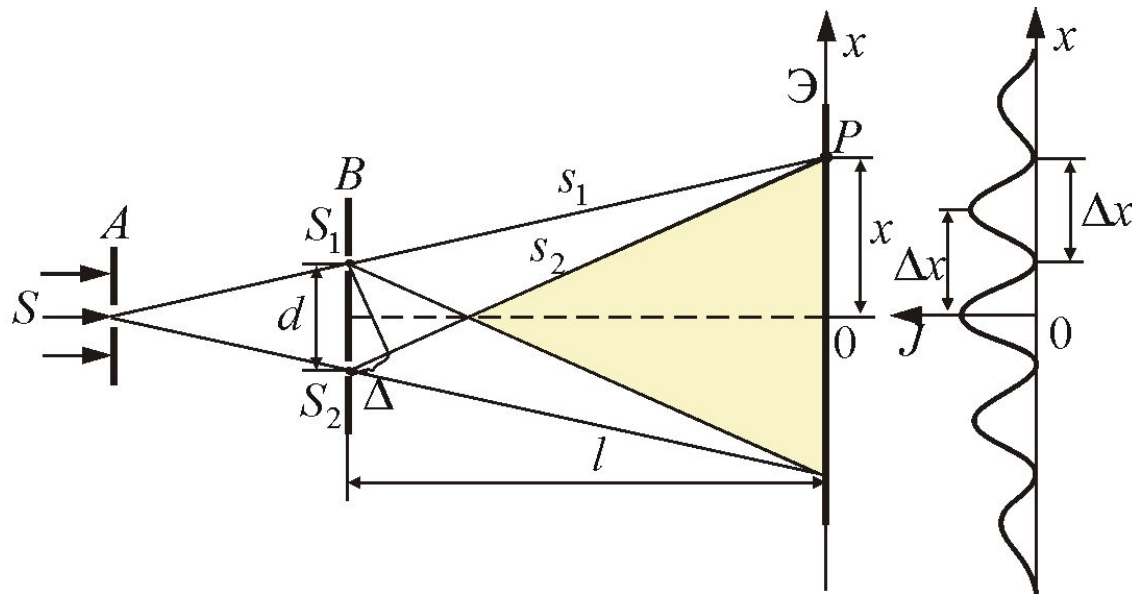
Расстояние от источника до стенки r кратно целому числу полуволн, исходная круговая волна интерферирует с волной, отражённой от стенки. Согласно пр. Гюйгенса, **отражённая волна совпадает с той, которая бы возбуждалась фиктивным точечным источником, расположенным по другую сторону стенки симметрично реальному источнику**. Т.к. r кратно целому числу полуволн, то справа от источника на оси соединяющей фиктивный и реальный источник разность фаз будет кратно целому числу волн, и круговая волна накладывается **в фазе с волной**, отражённой от стенки, увеличивая высоту гребней в интерференционной картине



Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки

Расстояние между точечным источником и стенкой кратно целому числу полуволн **плюс четверть волны**. При этом справа от источника круговая волна накладывается в противофазе с волной, отражённой от стенки. В результате в широкой полосе справа от источника колебания жидкости отсутствуют

Классический интерференционный опыт Юнга



Параллельный пучок света падает на экран с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерферируют на третьем экране.

Расстояние l от щелей, причем $l \gg d$

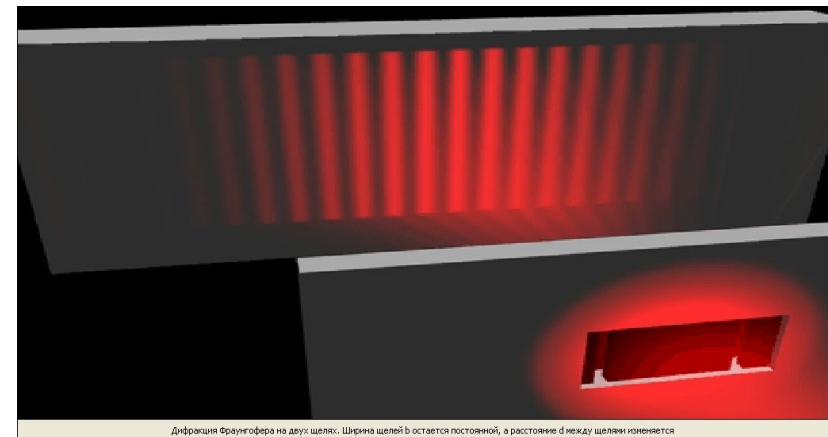
Показатель преломления среды – n .

Ширина интерференционной полосы $\Delta x = \frac{\lambda l}{d}$

Интерференционные максимумы $x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0$

Интерференционные минимумы

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0$$



Дифракция Фраунгофера на двух щелях. Ширина щелей b остается постоянной, а расстояние d между щелями изменяется

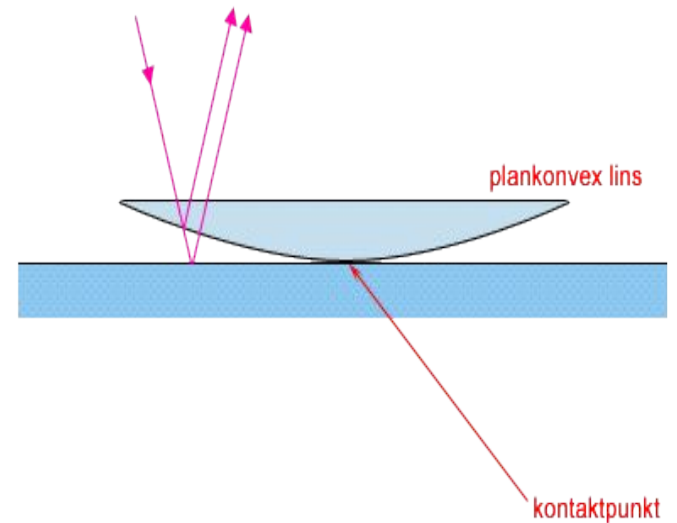
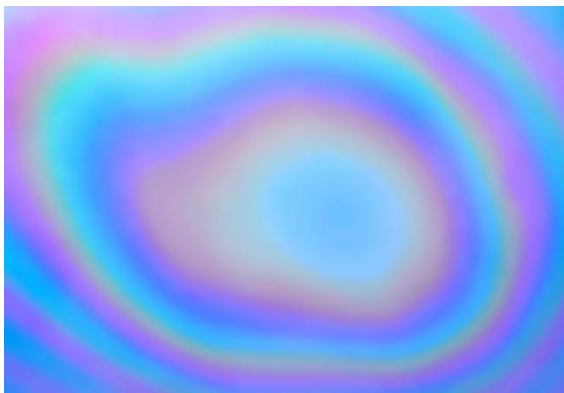
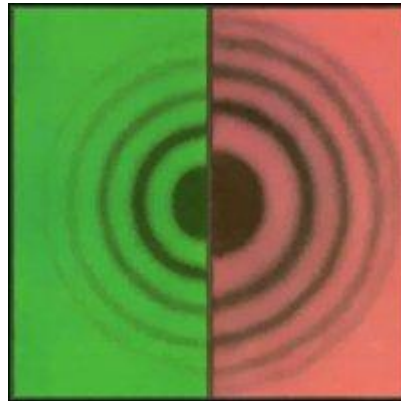
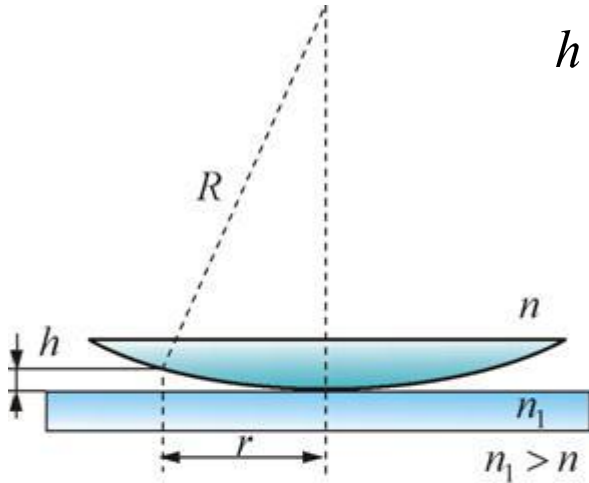
Интерференция света. Кольца Ньютона

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R} \quad \text{- толщина воздушного зазора}$$

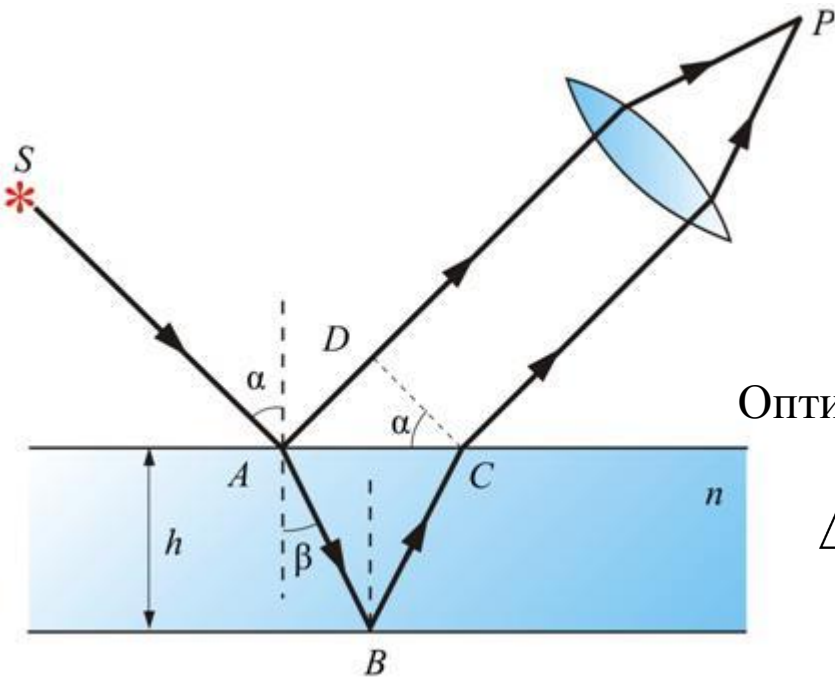
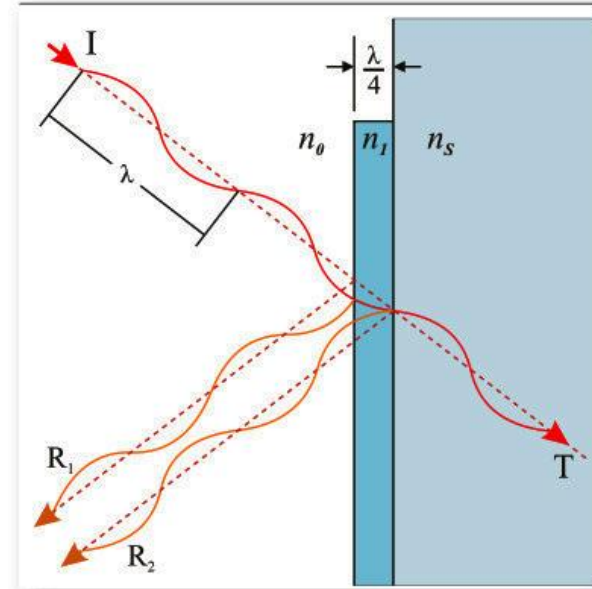
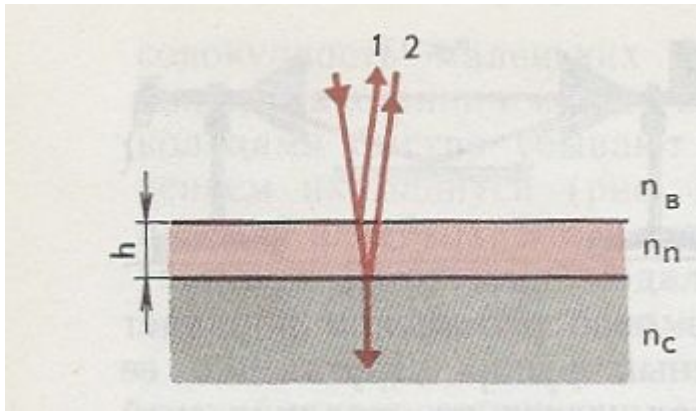
$$h = \frac{m\lambda}{2} \quad \text{- условия усиления света}$$

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda_0 R} \quad \text{- радиус } m\text{-го светлого кольца}$$

$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0} \quad \text{- радиус темного кольца}$$



Интерференция света. Просветление оптики



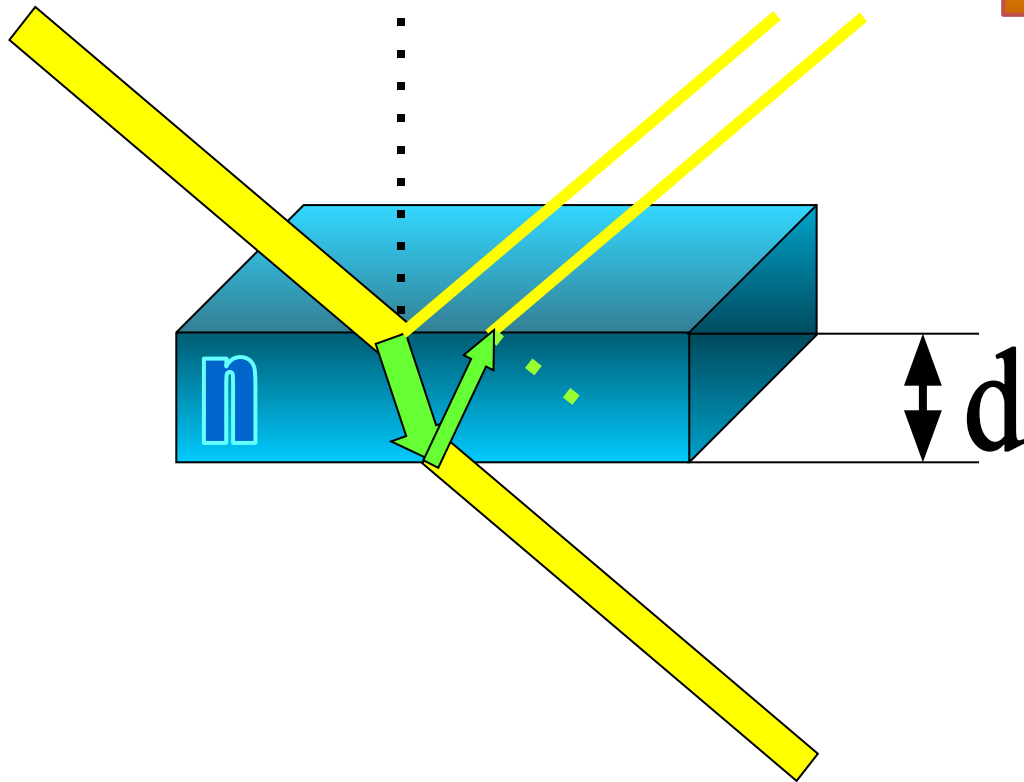
$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} \text{ -max интерференции}$$

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \text{ - min интерференции}$$

Оптическая разность хода с учетом потери полуволны:

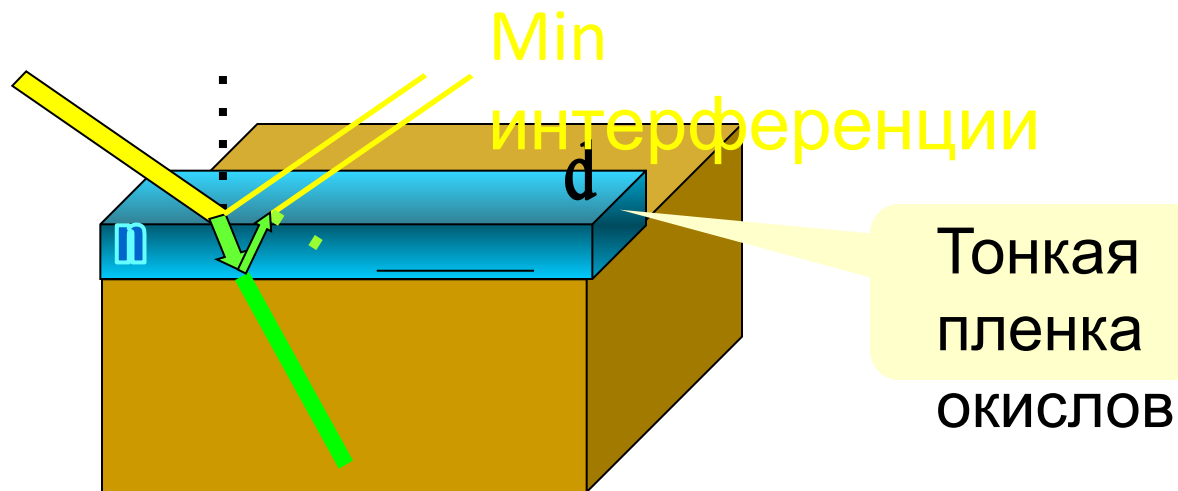
$$\Delta = 2nh \cos \beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

min отражения



тах пропускания!

Просветление линз и солнечных батарей

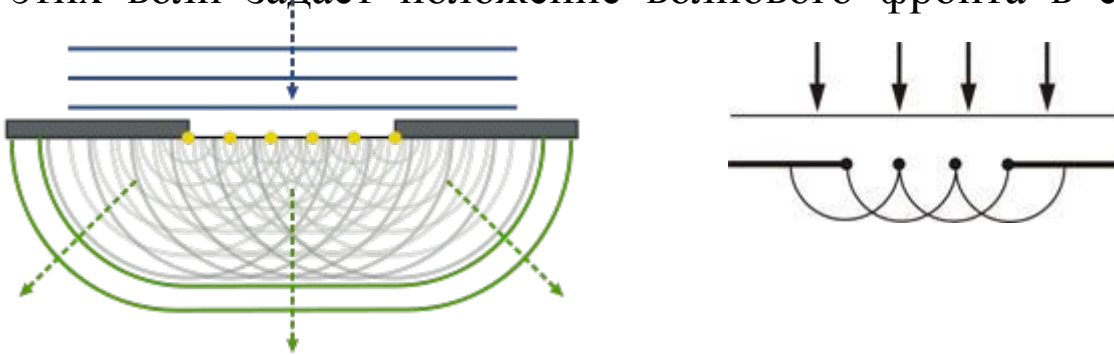


**тах пропускания света
в рабочий объем**

Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями, размеры которых сравнимы с длиной волны, и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Между интерференцией и дифракцией нет принципиальных различий. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн. Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени.

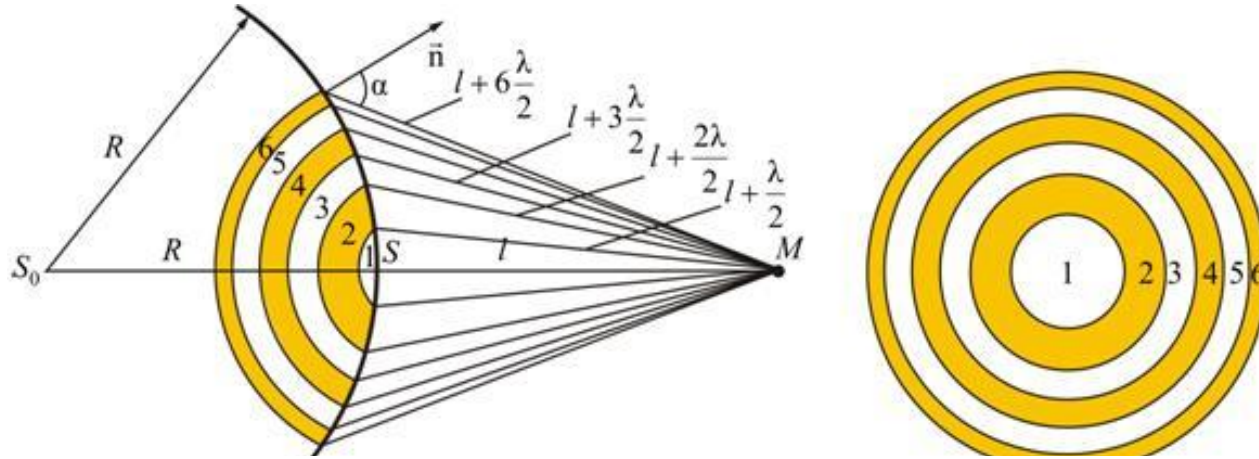


Построив огибающую вторичных волн для некоторого момента времени, видим, что фронт волны заходит в область геометрической тени, т.е. волна огибает края отверстия.

Принцип Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об амплитуде и интенсивности волн.

Френель вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей о интерференции вторичных волн.

Дифракция света. Метод зон Френеля



Френель предложил метод разбиения волновой поверхности S на зоны, позволивший сильно упростить решение осесимметричных задач дифракции (**метод зон Френеля**).

Границей первой зоны служат точки поверхности S , находящиеся на расстоянии $l + \lambda/2$ от точки M . Точки сферы S , находящиеся на расстояниях $l + 2\lambda/2$, $l + 3\lambda/2$, и т.д. от точки M , образуют 2, 3 и т.д. зоны Френеля. Колебания, возбуждаемые в точке M двумя соседними зонами, противофазны, поэтому при сложении они должны взаимно ослаблять друг друга:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots + A_i$$

Можно показать, что: 1) амплитуда колебаний, возбуждаемых зонами Френеля убывает с ростом номера зоны - $A_1 > A_2 > A_3 > \dots > A_i > \dots$ 2) амплитуды колебаний соседних зон

примерно одинаковы, т.е. $A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}$. Тогда первое выражение можно представить

$$\text{в виде } A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2} .$$

Метод зон Френеля

Таким образом, амплитуда, колебания от всей сферической поверхности, равна половине амплитуды, колебания 1-й зоны, а интенсивность $J = J_1 / 4$.

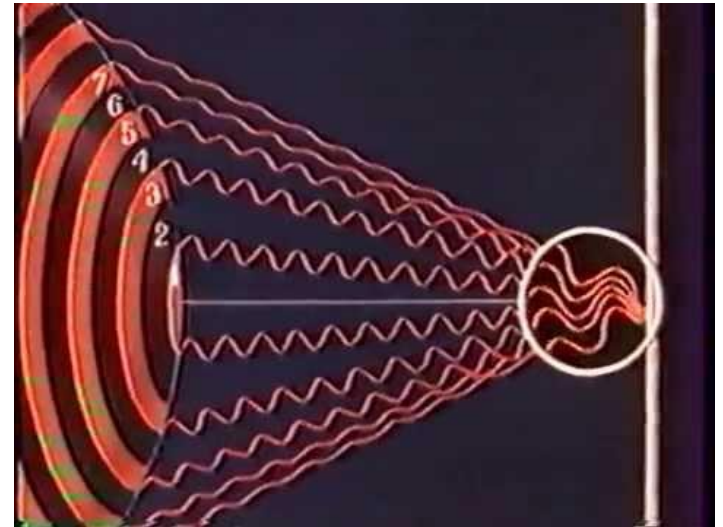
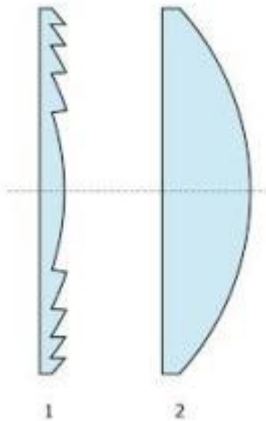
Если на пути волны поставить непрозрачный экран с отверстием, оставляющим открытой только 1-ю зону Френеля, то амплитуда в точке M будет равна A_1 .

Соответственно, интенсивность в точке M будет в 4 раза больше, чем при отсутствии экрана (т.к. $J = 4J_1$).

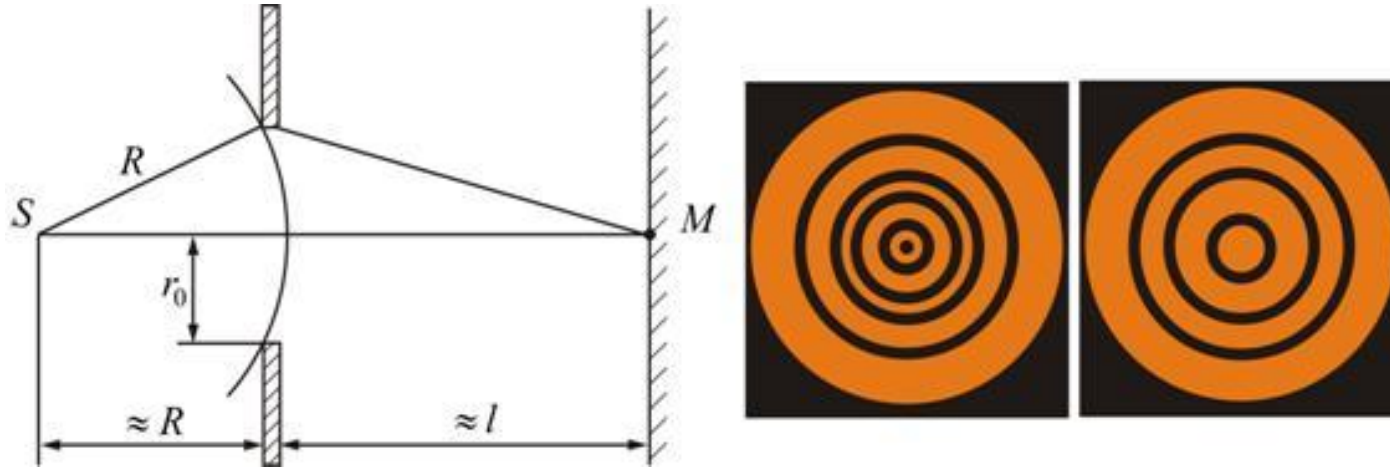
Интенсивность света **увеличивается** в 8 раз, если закрыть пластинкой все четные зоны. Такая пластинка называется зонной пластинкой.

Если сдвинуть фазу колебания всех четных зон на π с помощью фазовой зонной пластинки. В этом случае интенсивность **увеличится** в 16 раз.

Это называется **дифракционная фокусировка**.



Метод зон Френеля. Дифракция от круглого отверстия

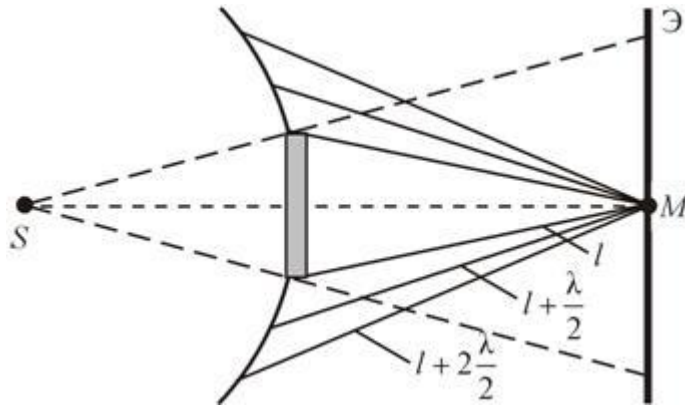


Поставим на пути волны непрозрачный экран с круглым отверстием радиуса r . Разобьем открытую часть волновой поверхности на зоны Френеля. Вид дифракционной картины зависит от числа зон Френеля, открываемых отверстием. Амплитуда результирующего колебания, возбуждаемого в точке M всеми зонами

$$A = \begin{cases} 1/2(A_1 + A_m) & (m - \text{нечетное}), \\ 1/2(A_1 - A_m) & (m - \text{четное}). \end{cases}$$

Таким образом, когда отверстие открывает нечетное число зон Френеля, то амплитуда (интенсивность) в точке M будет больше, чем при свободном распространении волны; если четное, то амплитуда (интенсивность) будет равна нулю

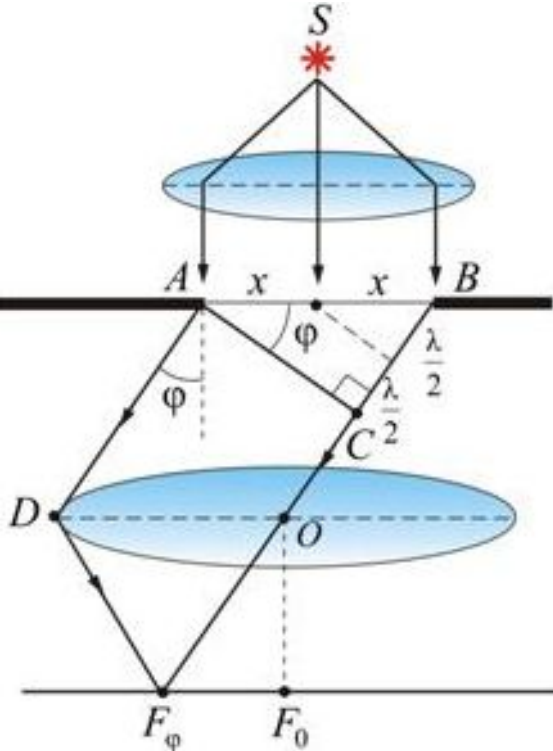
Метод зон Френеля. Дифракция от препятствия



Сферическая волна, распространяющаяся от точечного источника S , встречает на своем пути диск. Амплитуда световых колебаний в точке M равна половине амплитуды, обусловленной **первой открытой зоной**. Если размер диска невелик (охватывает небольшое число зон), то действие первой зоны немногим отличается от действия центральной зоны волнового фронта. Таким образом, освещенность в точке M будет такой же, как и в отсутствие экрана. Вследствие симметрии центральная светлая точка будет окружена кольцами света и тени (вне границ геометрической тени).

Парадоксальное, на первый взгляд, заключение, в силу которого в самом центре геометрической тени может находиться светлая точка, было выдвинуто Пуассоном в 1818 г. и впоследствии было названо его именем. «Пятно Пуассона» подтверждает правильность теории Френеля.

Дифракция Фраунгофера на щели



ракции Френеля от дифракции Фраунгофера в

Френеля – от сферического волнового фронта.

Фраунгофера – от плоского волнового фронта.

на ровном экране есть щель с шириной $|AB| = b$.

На

и лучи света (плоская волна).

и щель на зоны Френеля так, чтобы

между лучами, идущими

от соседних зон,

соседних зон взаимно гасят друг друга.

какая разность хода между первой и

1φ .

ширине щели укладывается четное число

зон,

ся минимум,

если нечетное число зон, то

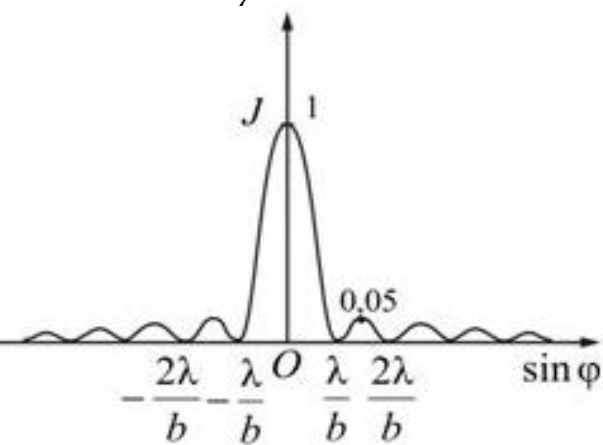
одна щель) интенсивности.

ло зон было четным, оптическая

последней должна быть

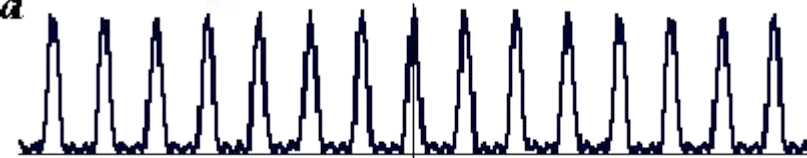
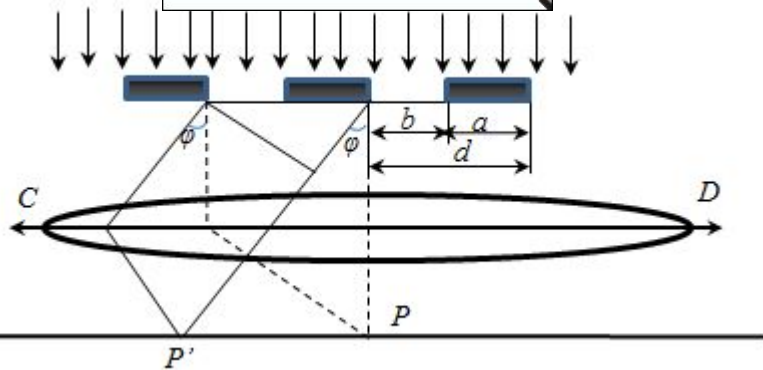
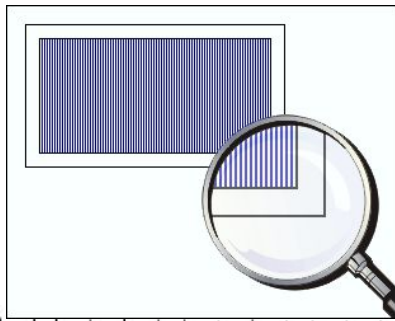
равна целому числу

условие минимумов

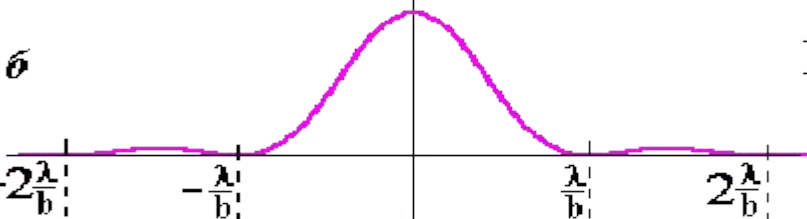


$$b \sin \phi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}$$

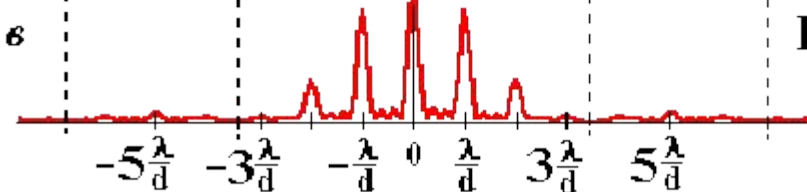
Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке



$I_{\text{инт}}$



$I_{\text{диф}}$



$I_{\text{ф}}$

Дифракционная решетка представляет систему из большого числа N одинаковых щелей в экране.

На д.р. падает плоская волна.

Результирующая картина на экране – наложение двух картин: дифракция от одной щели и интерференция от N щелей.

Представим, что в некотором направлении излучают по 1-й зоне Френеля от каждой щели. Тогда оптическая разность хода от соседних щелей $\Delta = d \cdot \sin \varphi$. Если для этой разности выполняется условие максимумов, то колебания всех щелей будут взаимно усиливать друг друга. Это условие имеет вид

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

$k = 1, 2, 3, \dots$ Максимумы, соответствующие этому условию, называются главными.

Величина k , соответствующая максимуму называется порядком дифракционного максимума.

Дифракционная решетка как спектральный прибор

Спектральный прибор – устройство, способное каким-либо образом разлагать белый свет в спектр по длинам волн.

Простейший спектральный прибор – призма. У стекла призмы показатель преломления зависит от длины волны в соответствии со своим законом дисперсии $n = f(\lambda)$.

Другой тип дисперсии у дифракционной решетки – угловая дисперсия, когда от длины волны зависит угол дифракции света.

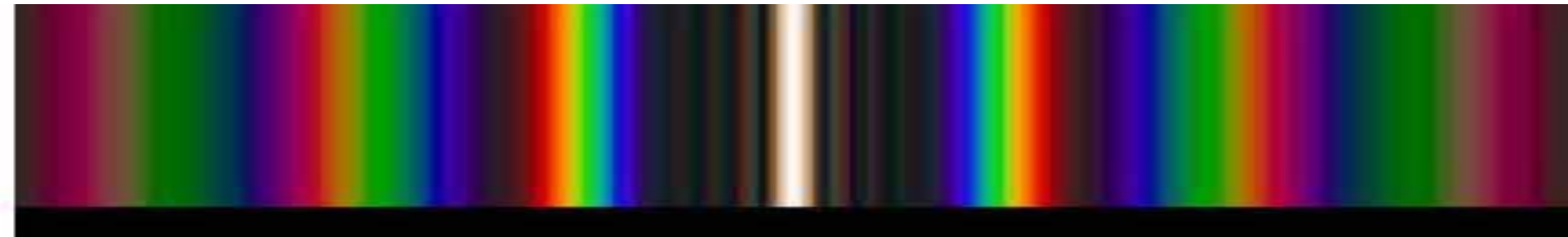
Определим угловую дисперсию как $D = \frac{d\varphi}{d\lambda}$.

Тогда, записав условие главных максимумов $d \sin \varphi = k\lambda$

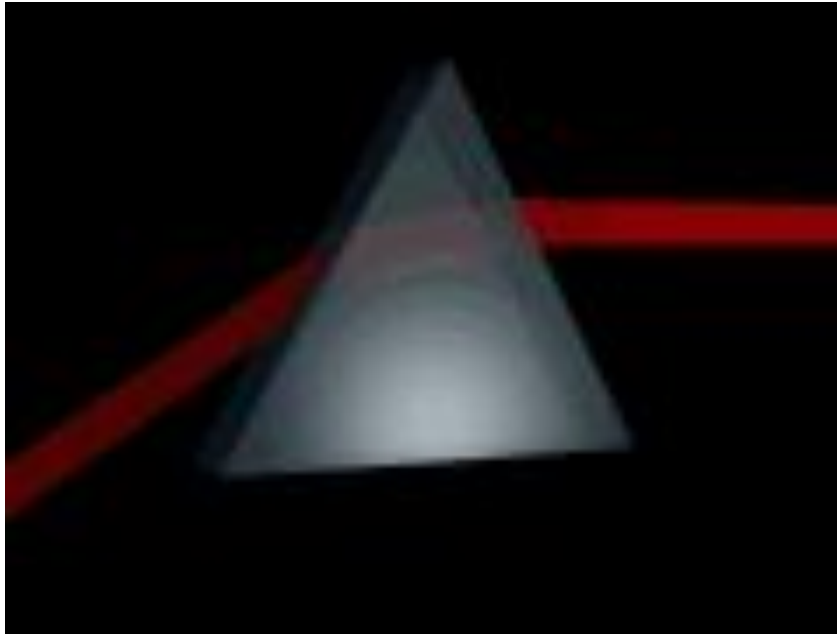
и взяв дифференциал от левой части по углу, от правой по длине волны, получим

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}$$

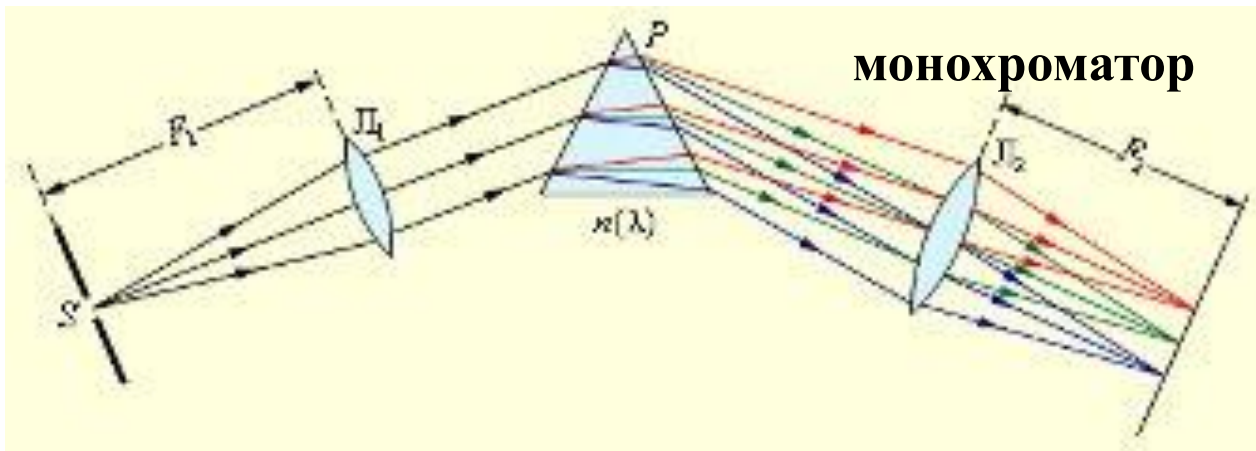
- формула для угловой дисперсии дифракционной решетки.



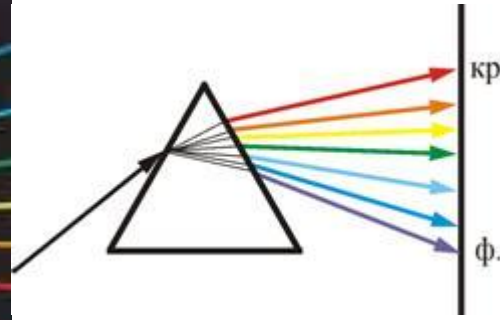
Дисперсия света



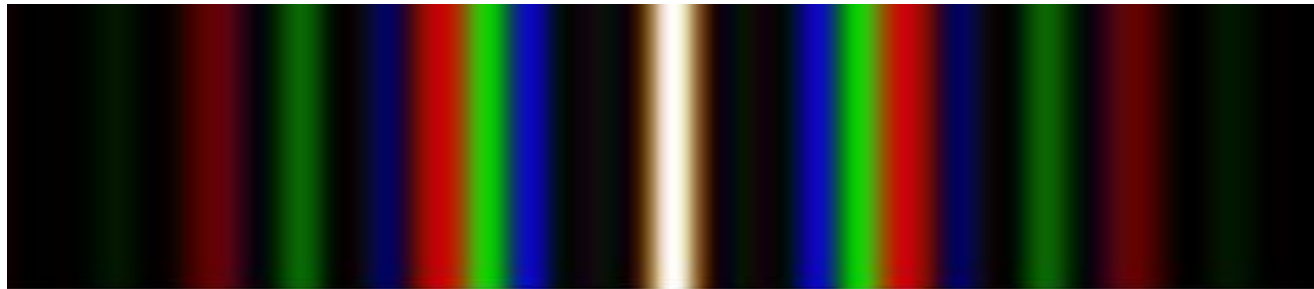
Дисперсия света – явление разложения белого света в спектр.
Осуществляется с помощью спектрального прибора – **монохроматора**.
Спектральные приборы – призма и дифракционная решетка.



Дисперсия света. Материальная и геометрическая дисперсия



Призматический спектр – чем меньше λ – тем больше отклонение.



Дифракционный спектр – чем меньше λ – тем меньше отклонение

Различия в дифракционном и призматическом спектрах:

Призматический спектр – чем меньше λ – тем больше отклонение, закон дисперсии $n = f(\lambda)$ должен быть установлен.

Дифракционный спектр – чем меньше λ – тем меньше отклонение, закон

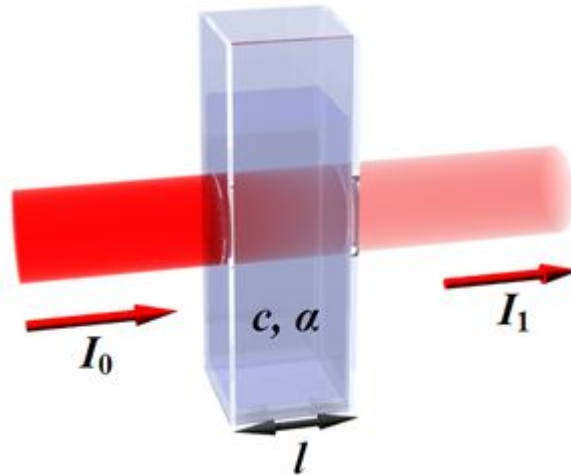
дисперсии прост и известен
$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}$$

Поглощение света

Поглощением (абсорбцией) света называется уменьшение энергии световой волны при ее распространении в веществе вследствие преобразования в другие виды энергии. Поглощение света в веществе описывается законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-\beta l}$$

где I_0 и I — интенсивности световой волны на входе и выходе слоя поглощающего вещества толщиной l , β — **коэффициент поглощения**. Коэффициент поглощения зависит от длины волны λ и для различных веществ различен.



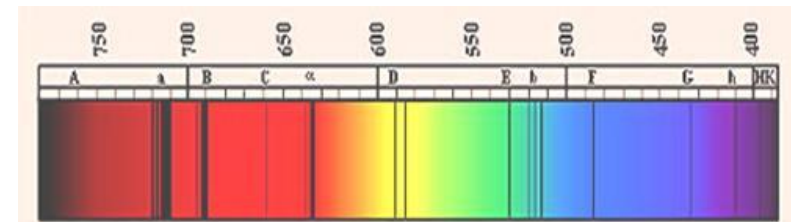
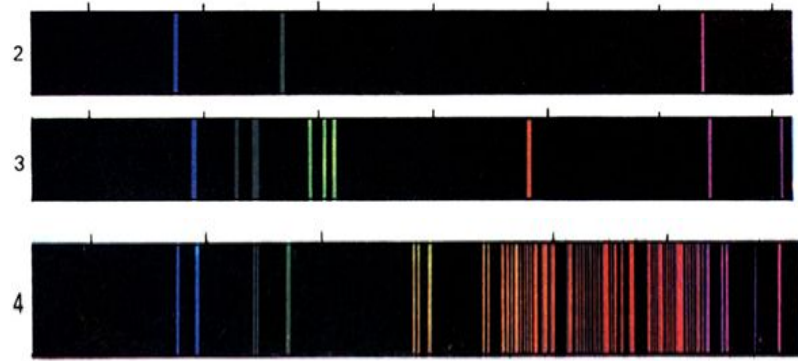
Виды спектров испускания и поглощения

Линейчатый спектр. Газы в атомарном состоянии и пары металлов (т.е. вещества, в которых атомы расположены на значительных расстояниях друг от друга и их можно считать изолированными) обладают близким к нулю коэффициентом поглощения и лишь для очень узких спектральных областей (примерно 10^{-12} — 10^{-11} м) наблюдаются резкие максимумы **поглощения**. Эти линии соответствуют частотам собственных колебаний электронов в атомах.

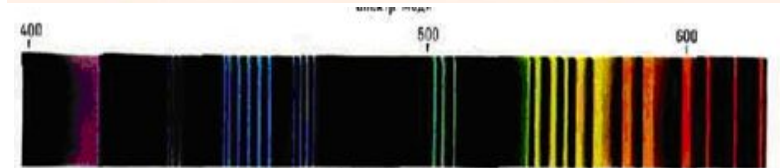
Спектр поглощения молекул, определяемый колебаниями атомов в молекулах, характеризуется **полосами поглощения** (примерно 10^{-10} — 10^{-7} м).

Полосатый спектр. Газы в молекулярном состоянии

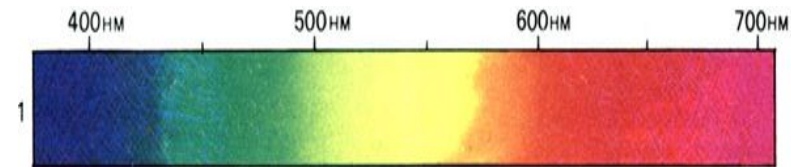
Сплошной спектр – нагретые тела.



Фраунгоферовы линии в спектре солнечного излучения



Спектр угольной дуги (пары молекул CN и C₂)



Поглощение и рассеяние света

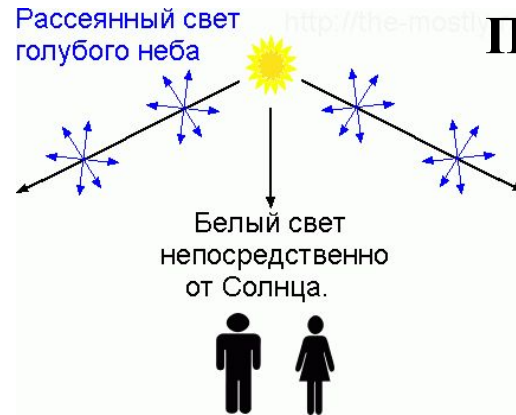
Дифракция на мелких неоднородностях – рассеяние света. Мелкие неоднородности: дымы, туманы, суспензии.

В законе Бугера добавляется коэффициент экстинкции α :

$$I = I_0 e^{-(\beta + \alpha)l}$$

Согласно закону Рэля интенсивность рассеянного света

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}$$



Почему небо голубое



Молекулы рассеивают, а пыль отражает солнечный свет

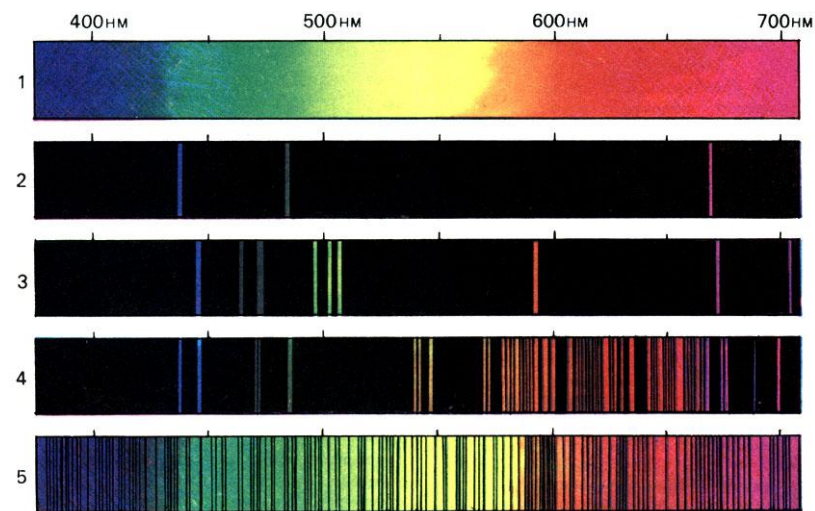
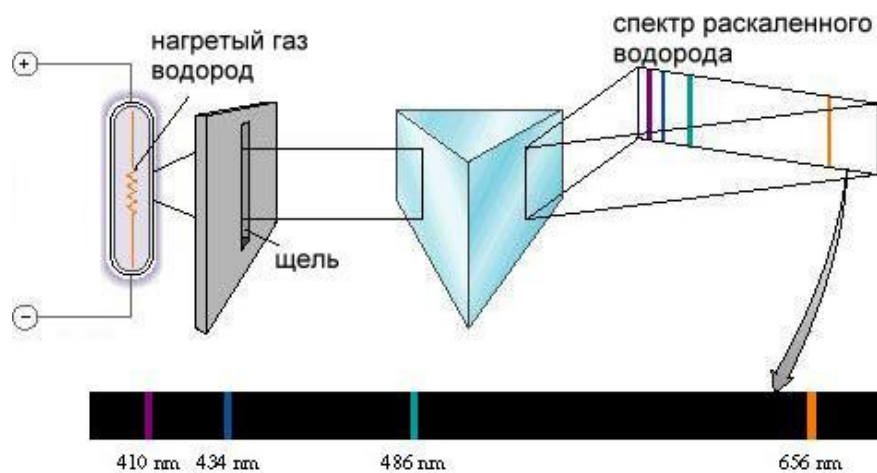


Почему Солнце и небо на закате красное

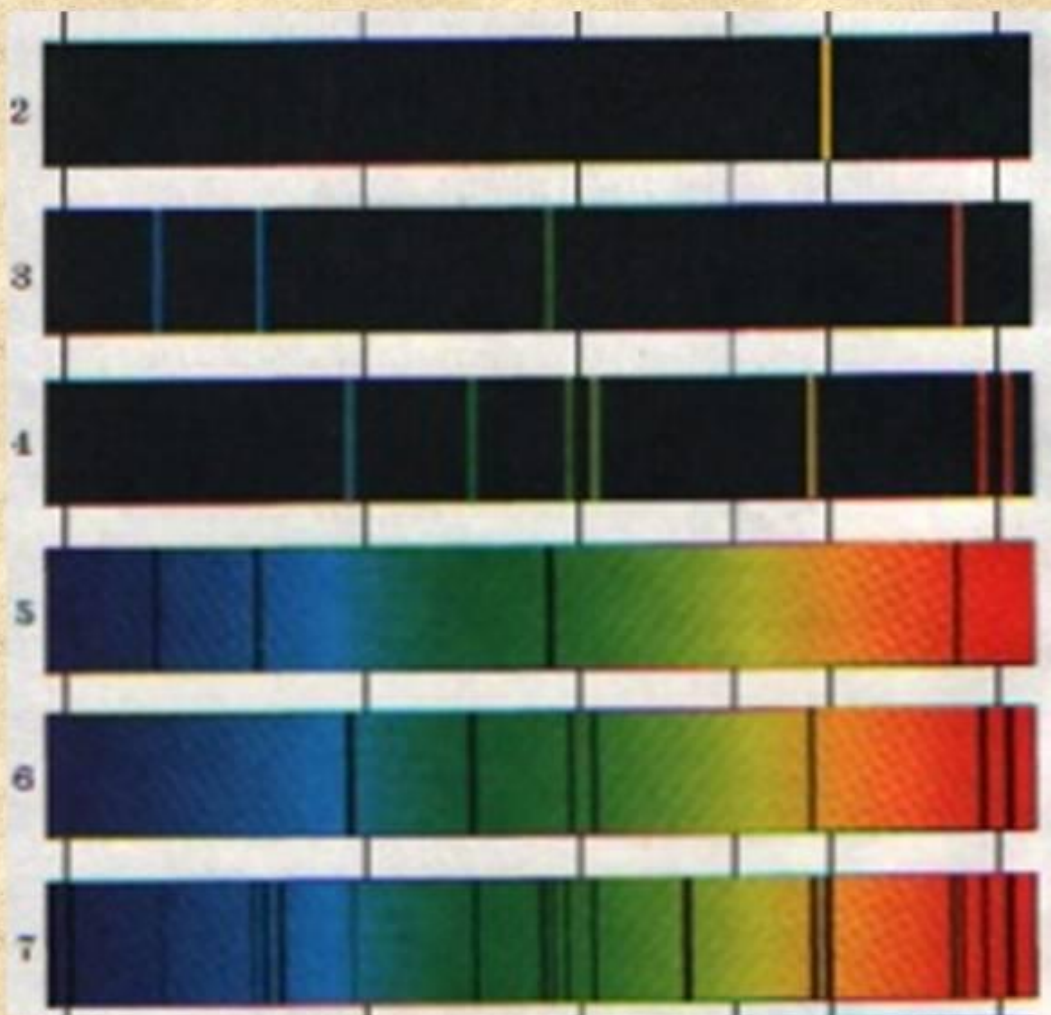


Спектральный анализ. Виды спектров

Коэффициент поглощения зависит от длины волны λ и для различных веществ различен. Например, газы в атомарном состоянии и пары металлов (т.е. вещества, в которых атомы расположены на значительных расстояниях друг от друга и их можно считать изолированными) обладают близким к нулю коэффициентом поглощения и лишь для очень узких спектральных областей (примерно 10^{-12} — 10^{-11} м) наблюдаются резкие максимумы (так называемый **линейчатый спектр поглощения**). Эти линии соответствуют частотам собственных колебаний электронов в атомах. Спектр поглощения молекул, определяемый колебаниями атомов в молекулах, характеризуется **полосами поглощения** (примерно 10^{-10} — 10^{-7} м).



Спектры излучения и поглощения зеркально симметричны, если они изображены в шкале частот



2 - натрий

3, 5 - водород

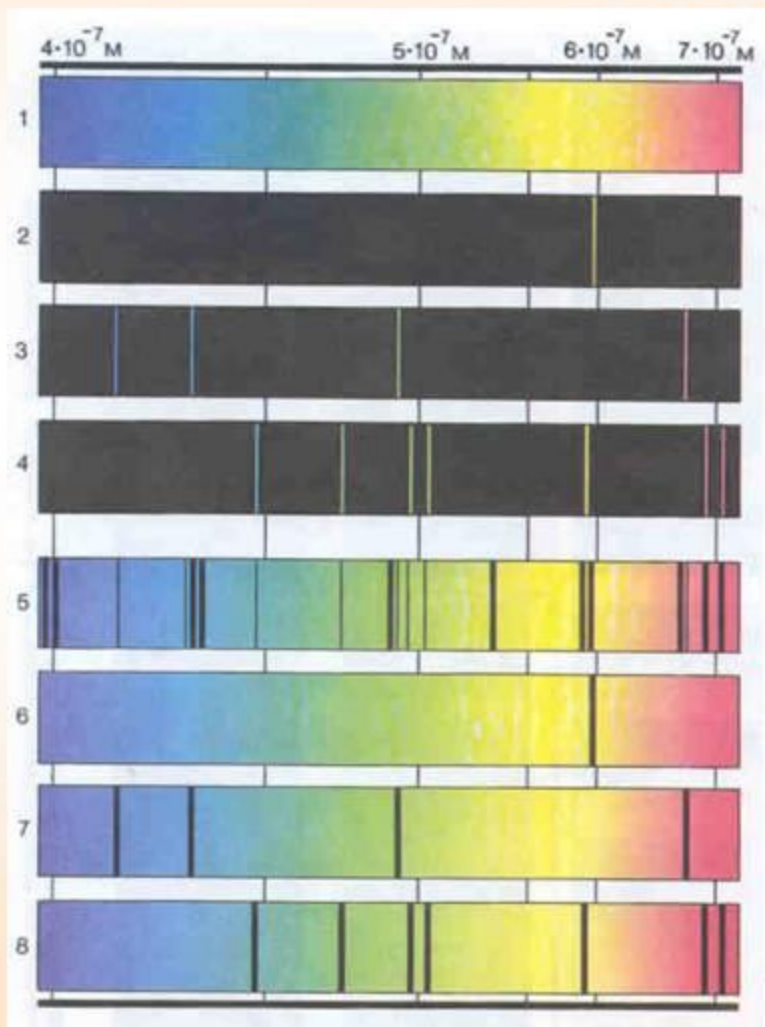
4, 6 - гелий

7 - солнечный

Какие из этих веществ есть на солнце?



Спектры испускания и поглощения



Спектры испускания:

1- сплошной;

2- натрия;

3- водорода;

4- гелия.

Спектры поглощения:

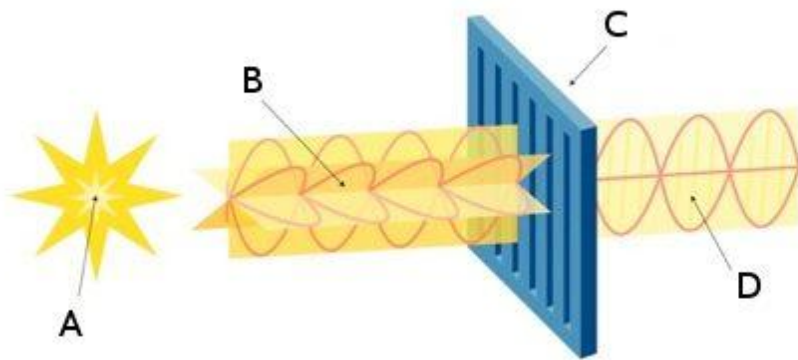
5- солнечный;

6- натрия;

7- водорода;

8- гелия.

Поляризация света



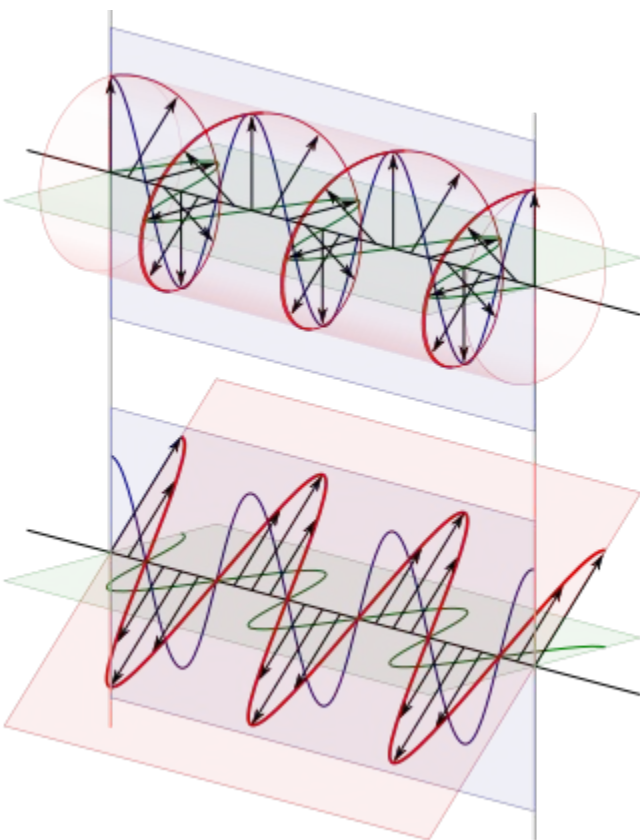
Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора. Это **естественный свет**.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется **поляризованным**.

Свет, в котором вектор E колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу, называется **плоскополяризованным** (линейно поляризованным).

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны, называется **плоскостью поляризации**.

Плоскополяризованный свет является предельным случаем **эллиптически поляризованного света**.



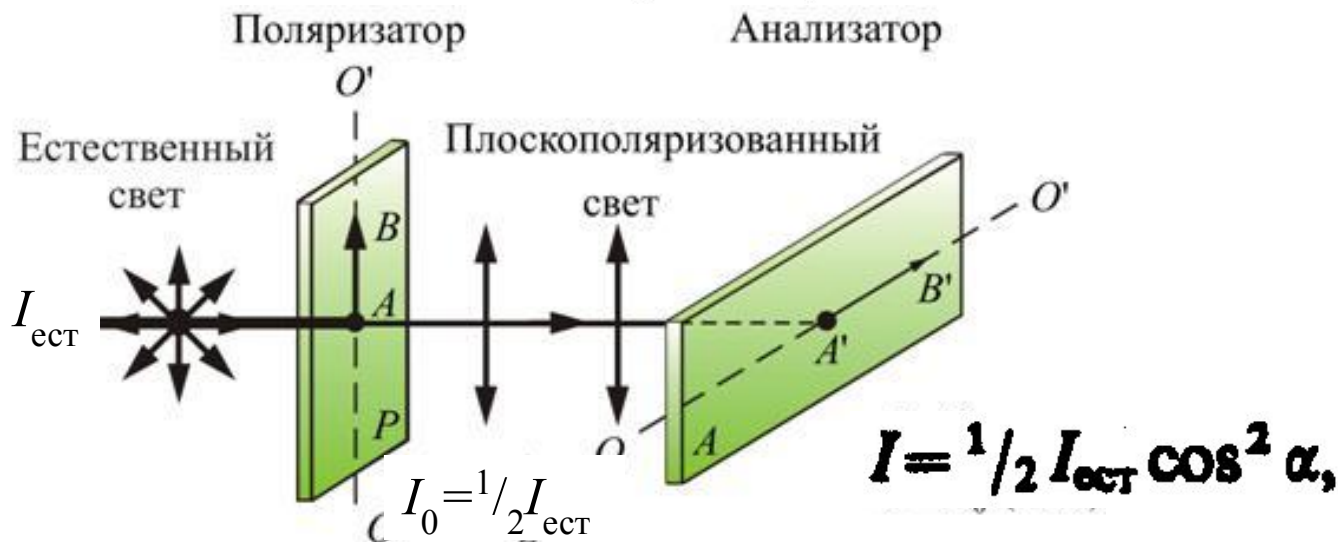
Поляризация света. Закон Малюса

Степенью поляризации называется величина $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$,

где I_{\max} и I_{\min} — соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором. Для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P=0$, для плоскополяризованного $I_{\min} = 0$ и $P=1$.

Рассмотрим опыт с поляризатором. Направим естественный свет на идеальный поляризатор. На выходе получаем поляризованный с интенсивностью $I_0 = 1/2 I_{\text{ест}}$. Если на пути луча поставить второй поляризатор, называемый **анализатор** и вращать его вокруг направления луча, то интенсивность света, прошедшего через систему поляризатор-анализатор, меняется в зависимости от угла α между оптическими осями поляризатора и анализатора по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$



Методы получения поляризованного света

Поляризация при отражении

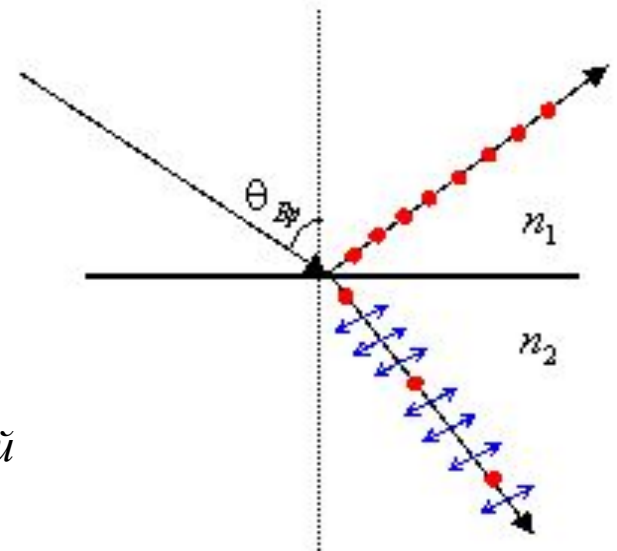
Степень поляризации зависит от угла падения лучей и показателя преломления. Шотландский физик **Д. Брюстер** установил закон, согласно которому при угле падения θ_B (угол Брюстера), определяемого соотношением

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

(n_{21} — показатель преломления второй среды относительно первой), *отраженный луч является плоскополяризованным (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения). Преломленный же луч при угле падения θ_B поляризуется максимально, но не полностью.*

Если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи *взаимно перпендикулярны.*

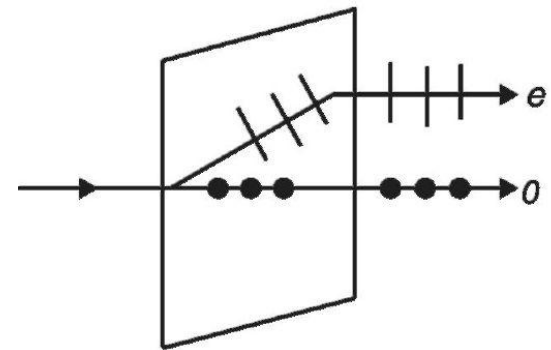
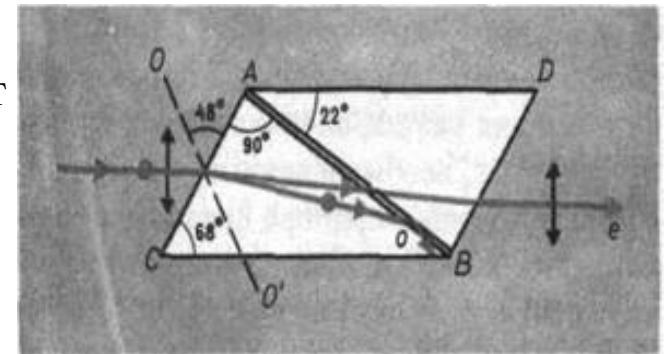
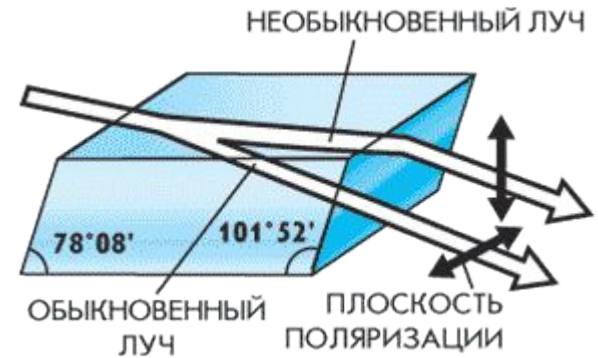
Следствия: поляризационные светофильтры, блики



Методы получения поляризованного света

Поляризация при двойном лучепреломлении

Почти все прозрачные кристаллы обладают способностью **двойного лучепреломления**, т. е. раздваивания каждого падающего на них светового пучка. Это явление, в 1669 г. впервые обнаружено датским ученым Э. Бартолином (1625—1698) для исландского шпата, объясняется особенностями распространения света в анизотропных средах. Если на толстый кристалл исландского шпата направить узкий пучок света, то из кристалла выйдут два пространственно разделенных луча, параллельных друг другу и падающему лучу. Даже в том случае, когда первичный пучок падает на кристалл нормально, преломленный пучок разделяется на два, причем один из них является продолжением первичного, а второй отклоняется. Второй из этих лучей получил название **необыкновенного** (e), а первый — **обыкновенного** (o). Необыкновенный луч полностью поляризован.

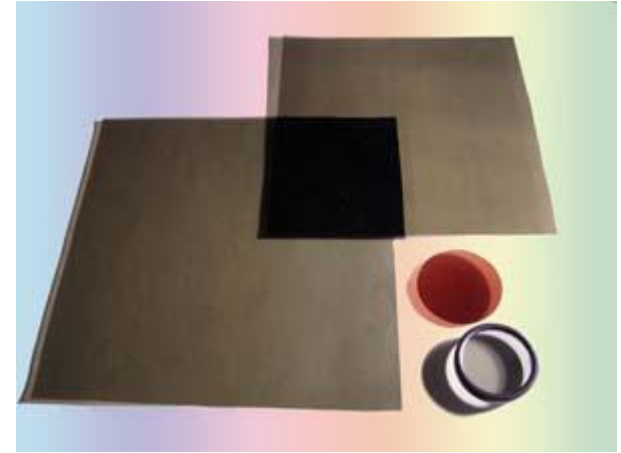


Методы получения поляризованного света

Оптический дихроизм. Поляроиды

Двойкопреломляющие кристаллы обладают свойством дихроизма, т. е. различного поглощения света в зависимости от ориентации электрического вектора световой волны, и называются дихроичными кристаллами.

Дихроичные кристаллы приобрели еще более важное значение в связи с изобретением поляроидов. Примером поляроида может служить тонкая пленка, в которую вкраплены кристаллики герпатита (сернокислого иодхинина). Герпатит — двойкопреломляющее вещество с очень сильно выраженным дихроизмом в области видимого света. Установлено, что такая пленка уже при толщине 0,1 мм полностью поглощает обыкновенные лучи видимой области спектра, являясь в таком тонком слое совершенным поляризатором. Преимущество поляроидов перед призмами — возможность изготавливать их с площадями поверхностей до нескольких квадратных метров.



Контрольные вопросы. Явления волновой оптики
При ответах излишней детализации не требуется

- 1) Что такое монохроматичность, когерентность?
- 2) Дать определение интерференции света. От чего зависит появление интерференционного минимума или максимума. Привести примеры практического применения.
- 3) Дать определение дифракции света.
- 4) Дать определение дисперсии света.
- 5) Дать определение поляризации света.
- 6) Почему небо голубое?

Ответы на контрольные вопросы должны быть представлены письменно в формате Word или написаны рукой и сфотографированы, и отправлены на электронный адрес vlisiutin@mail.ru. ФИО студента и номер группы указать обязательно