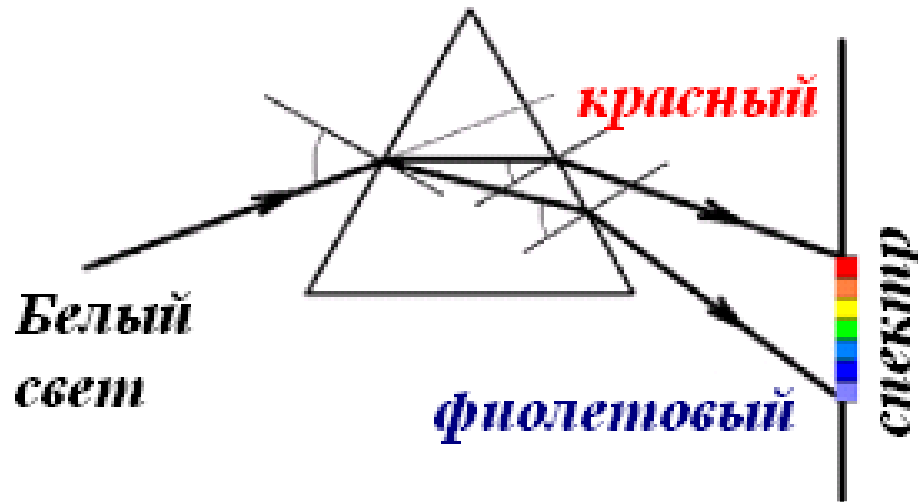


ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ВЕЩЕСТВОМ

Дисперсия света

Дисперсия света – зависимость фазовой скорости света (показателя преломления $n=c/v$) в среде от его частоты (длины волны λ): $n=f(\lambda)$.



Следствие дисперсии:

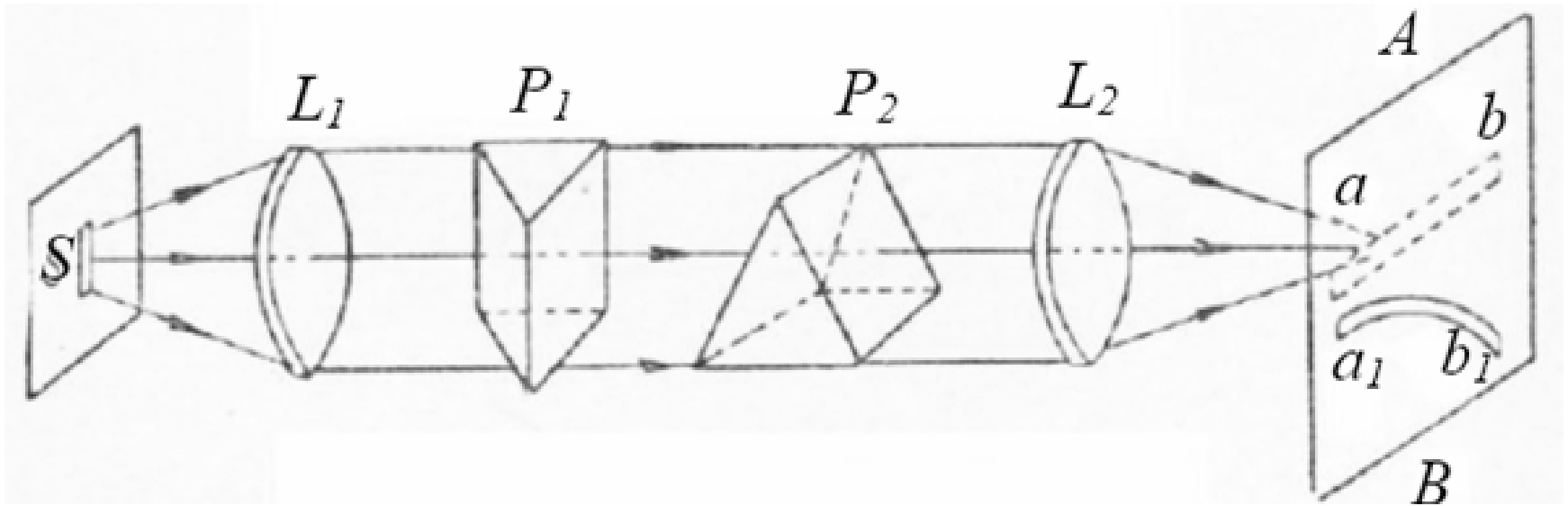
разложение в спектр пучка белого света при прохождении через призму.

Зависимости

$$n = f(\lambda); \quad n = f(\nu)$$

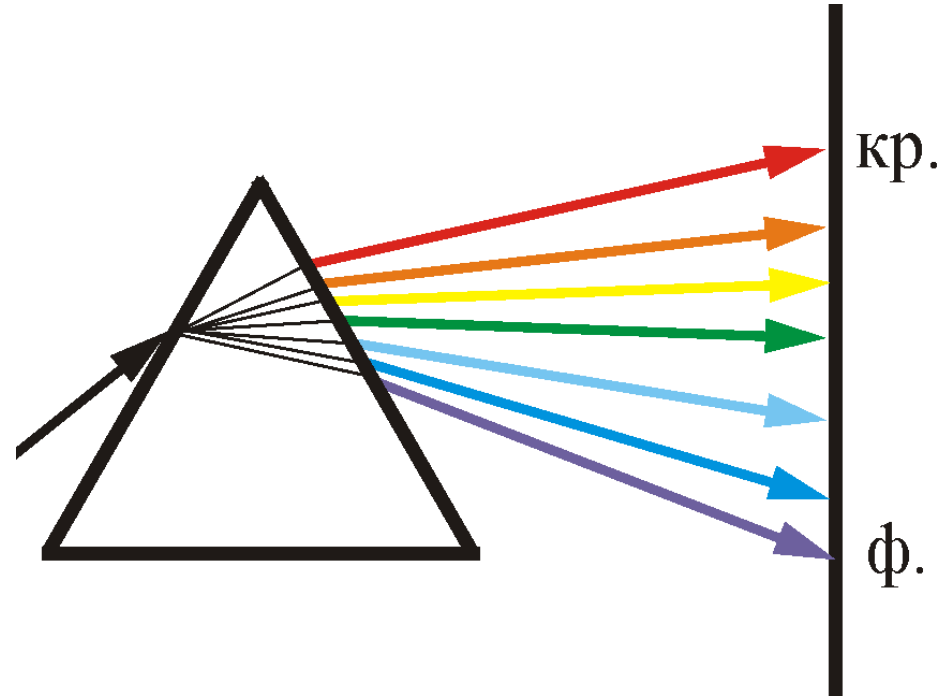
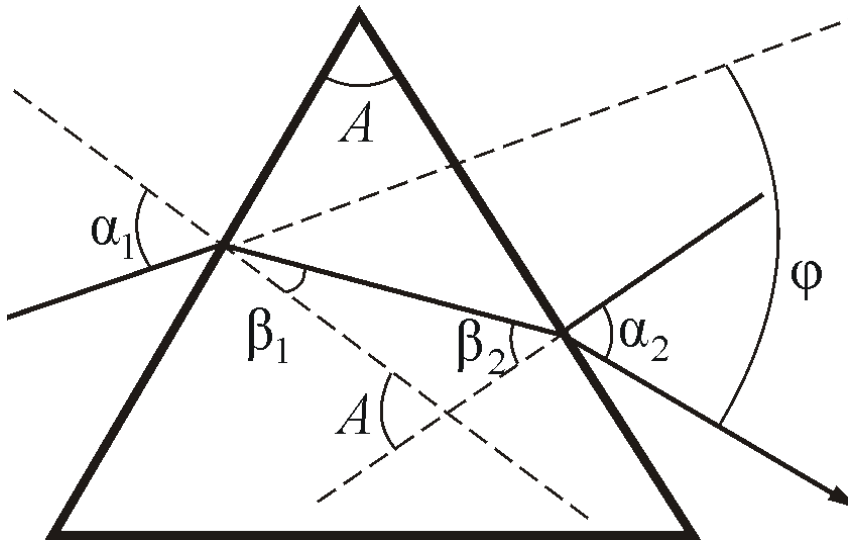
– нелинейные и немонотонные

Дисперсия света



- P_1 и P_2 – призмы, преломляющие ребра которых взаимно перпендикулярны.
- L_1 и L_2 – линзы, собирающие свет на экран.
- Если в схеме находится только призма P_1 , то на экране получается горизонтальный сплошной спектр ab .
- Если в схеме находятся две призмы P_1 и P_2 , то на экране каждый луч будет отклоняться вниз, красный – меньше, фиолетовый больше.

Дисперсия света



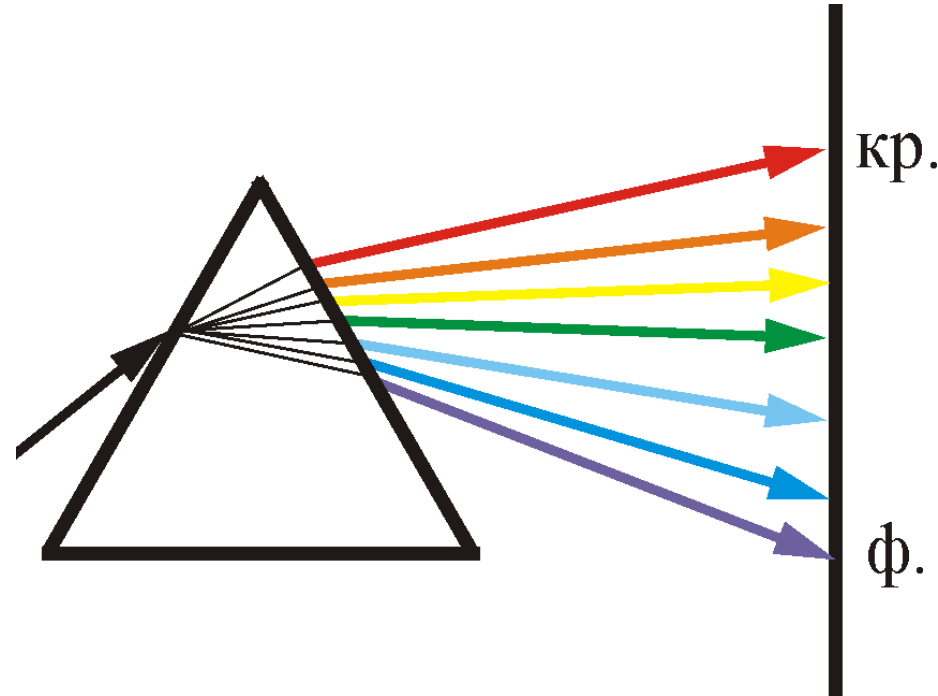
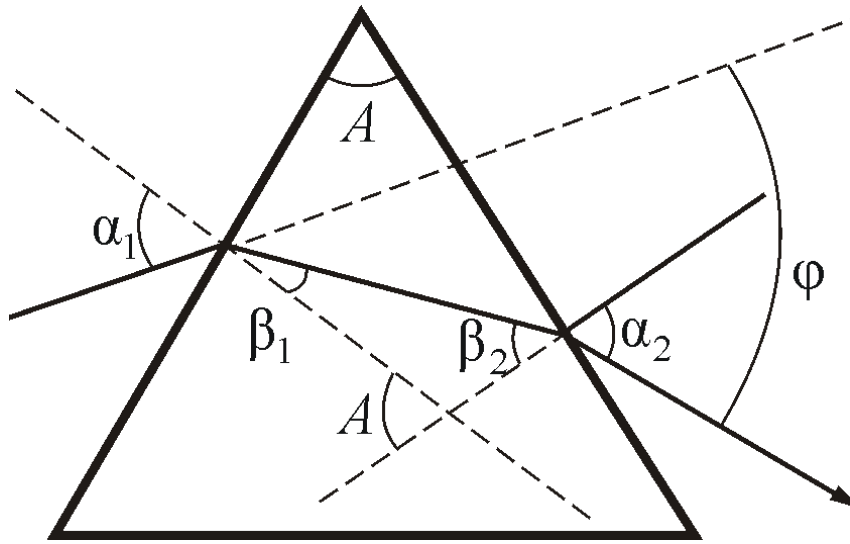
$$\varphi = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2)$$

$$\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - \beta_2\right) + A = \pi \quad \Rightarrow \quad \varphi = \alpha_1 + \alpha_2 - A$$



$$\beta_1 + \beta_2 = A$$

Дисперсия света



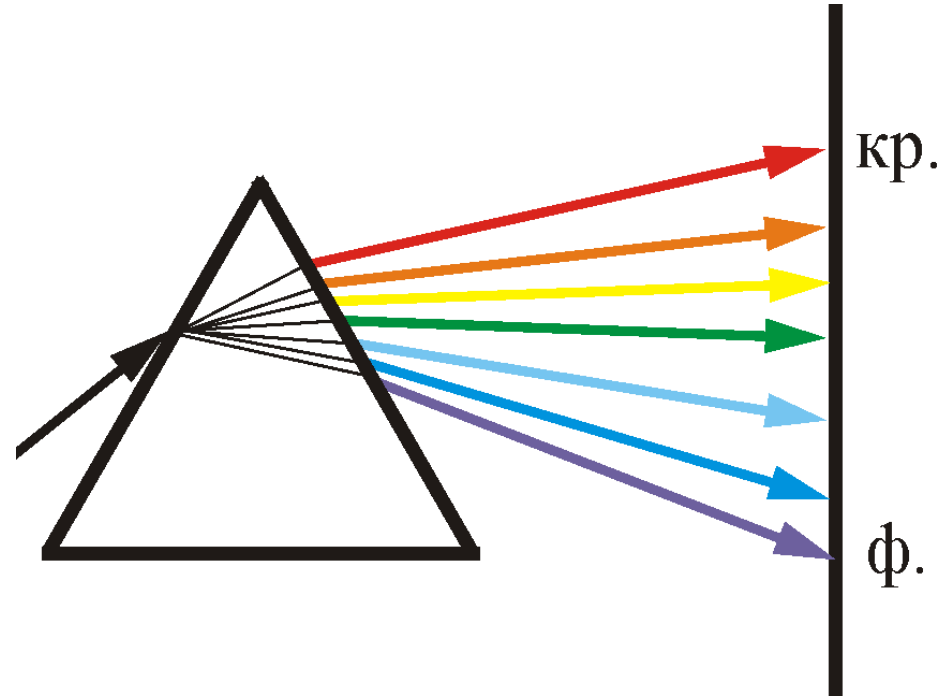
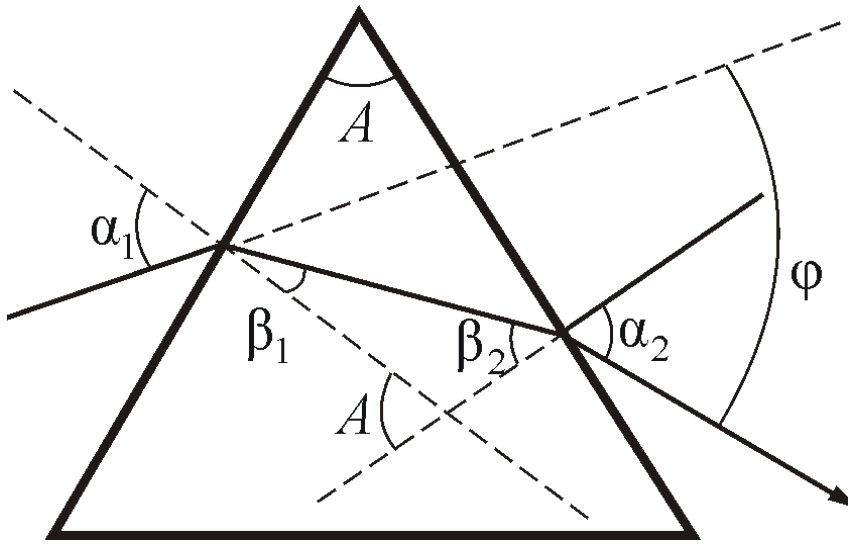
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} \approx \frac{\alpha_1}{\beta_1} = n, \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) =$$

$$n\left(A - \frac{\alpha_1}{n}\right) = nA - \alpha_1$$

$$\frac{\sin \beta_2}{\sin \alpha_2} \approx \frac{\beta_2}{\alpha_2} = \frac{1}{n} \quad \Downarrow$$

$$\beta_1 + \beta_2 = A \quad \alpha_1 + \alpha_2 = nA$$

Дисперсия света

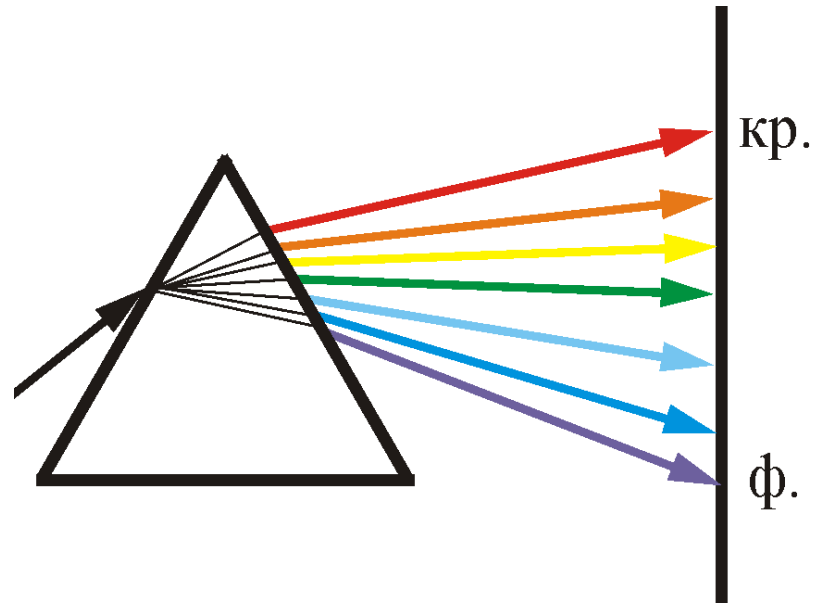
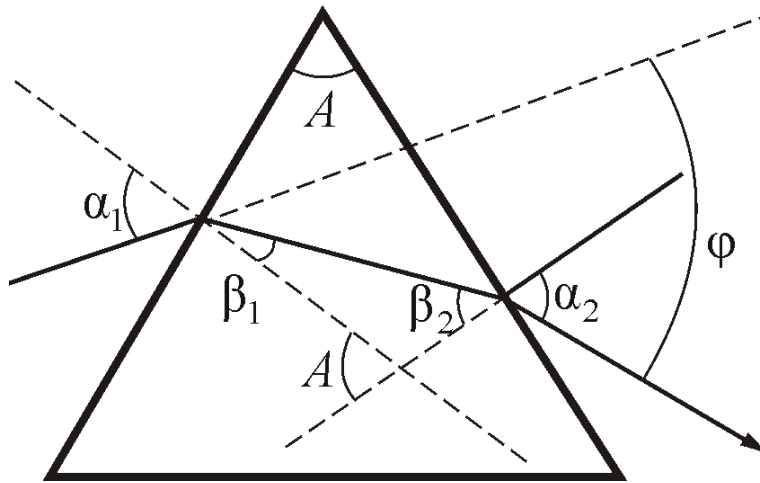


$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 - A$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA$$

$$\Rightarrow \varphi = A(n - 1)$$

Дисперсия света



$$\varphi = A(n - 1)$$

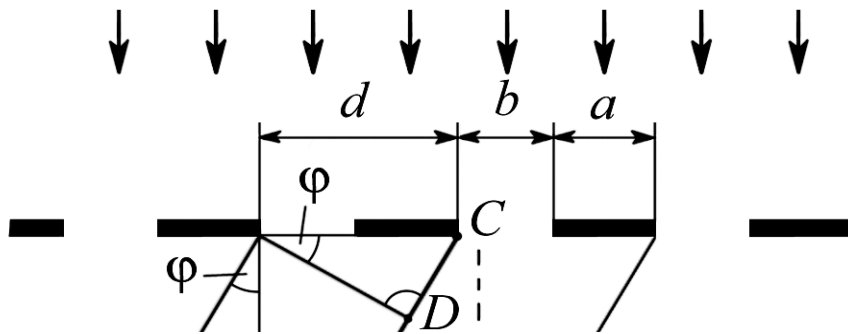
Угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше преломляющий угол призмы.

Лучи разных длин волн после прохождения призмы отклоняются на разные углы.

Пучок белого света за призмой разлагается в спектр, который называется **дисперсионным** или **призматическим**.

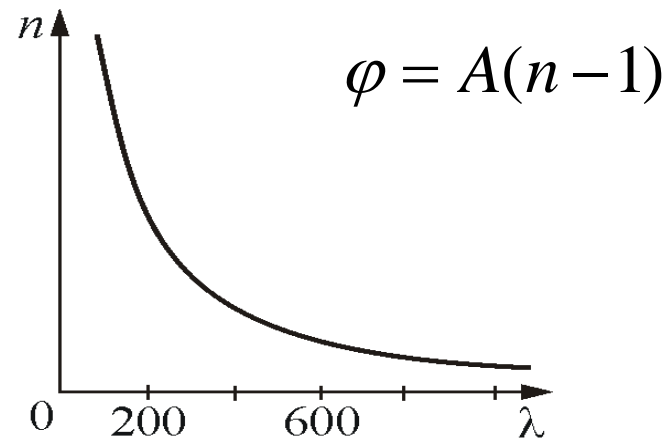
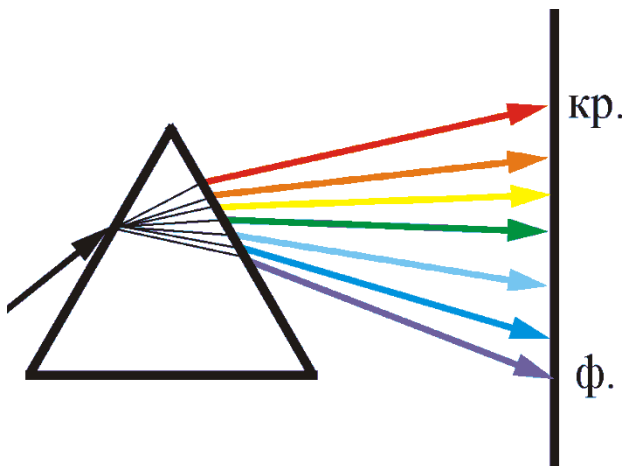
Дисперсия света

Различия в дифракционном и призматическом спектрах.
Дифракционная решетка разлагает свет непосредственно по длинам волн:



$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{d}$$

призма – по показателям преломления:



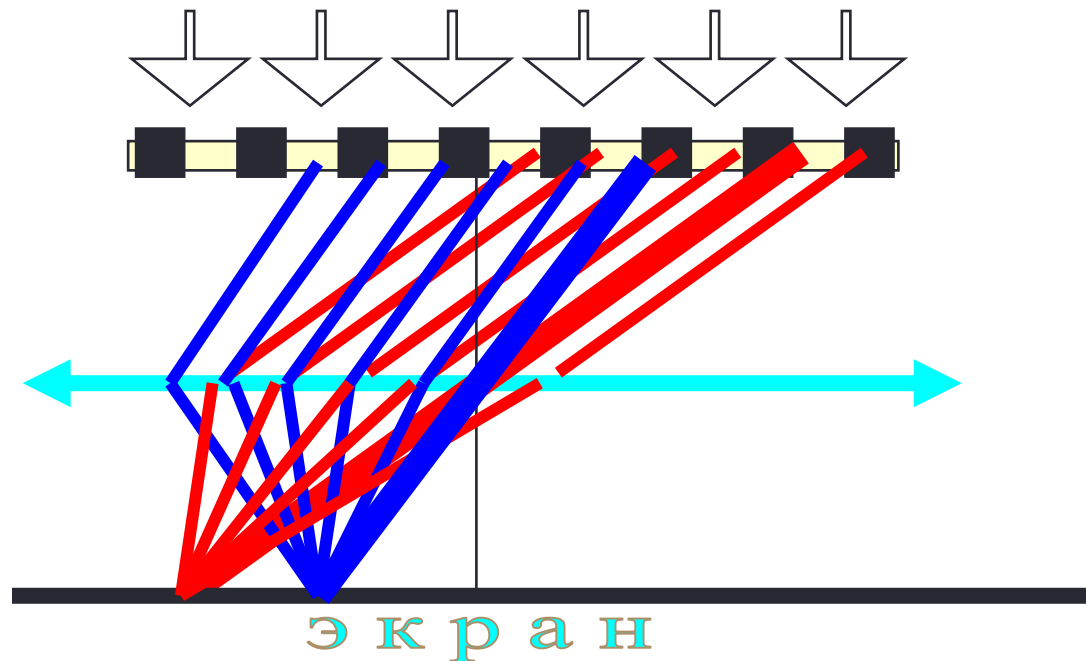
Дисперсия света

Дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие, причем из формулы

$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{d}$$

видно, что свет с большей длиной волны (красный) отклоняется на больший угол

(в отличие от призмы, где все происходит наоборот)

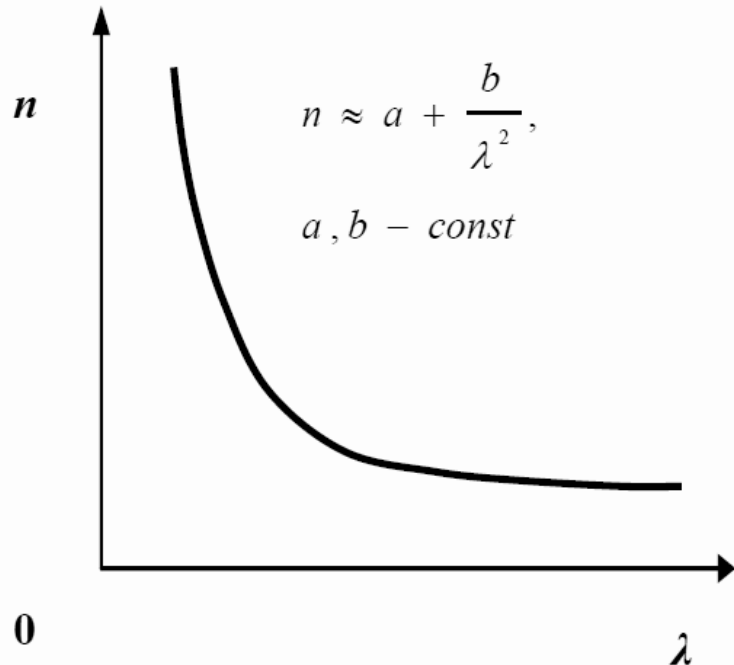


Дисперсия света

Дисперсия вещества – величина, определяемая соотношениями:

$$D = \frac{dn}{d\lambda}; D = \frac{dn}{d\nu}.$$

Показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.



Области значений ν , λ , в которых дисперсия D увеличивается по модулю с ростом ν соответствуют **нормальной дисперсии света**. Наблюдается у веществ прозрачных для света (стекло).

Групповая скорость

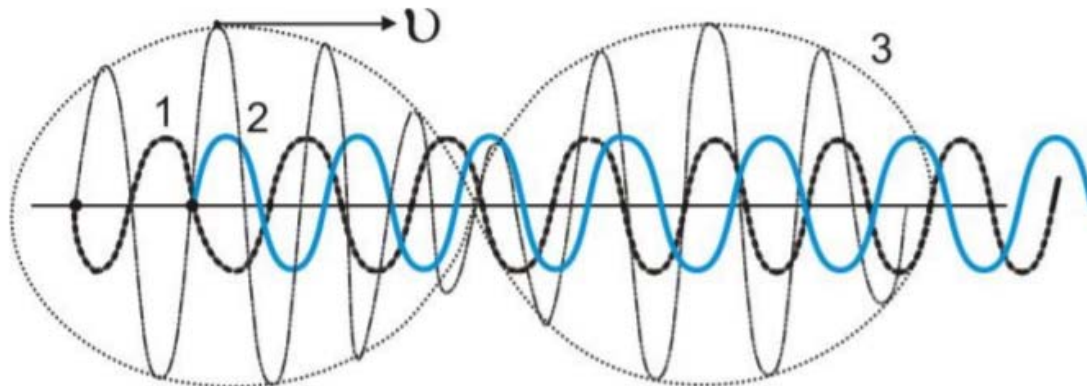
Взаимодействие излучения и вещества имеет два аспекта:

- среда влияет на процесс распространения излучения,
- излучение при прохождении через вещество воздействует на структуру среды.

Что понимается под скоростью света в среде?

Если выделен свет определенной длины волны, световые колебания всегда представляют собой сложное колебание, так как некоторое число осцилляторов имеют близкие частоты.

Суперпозиция этих волн дает волну с модулированной амплитудой и с той же фазовой скоростью, т.е. имеет вид импульсов.

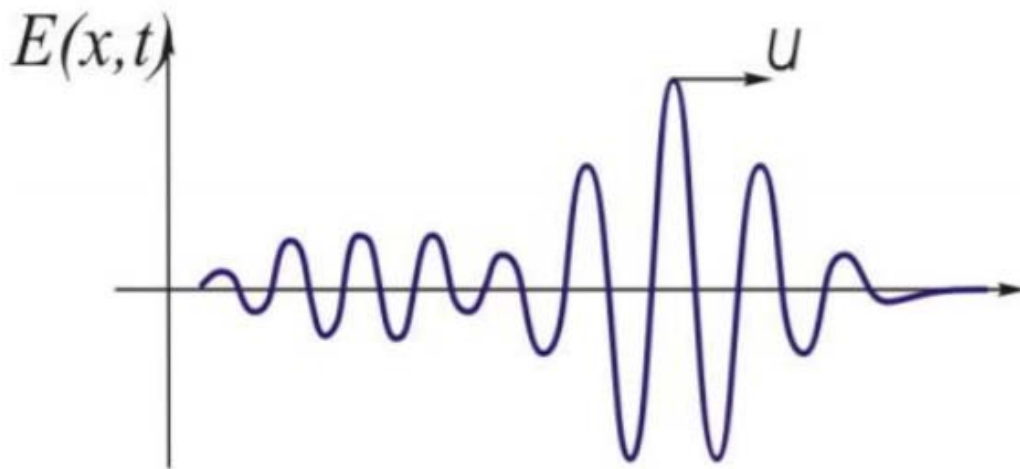


Групповая скорость

Волновой пакет – группа волны, возникающая в результате суперпозиции волн с близкими частотами, амплитуда которой отличается от нуля в ограниченной области.

Центру пакета можно приписать скорость u , которая называется **групповой скоростью**.

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$$



При наличии дисперсии групповая скорость отличается от фазовой. В результате, при наличии дисперсии волновой пакет распространяется с изменением формы.

Нормальная и аномальная дисперсия

Области значения ν , в которых

$$\boxed{\frac{dn}{d\nu} > 0} \quad \text{или} \quad \boxed{\frac{dn}{d\lambda} < 0}$$

соответствует **нормальной** дисперсии света

(с ростом частоты ν , показатель преломления n увеличивается).

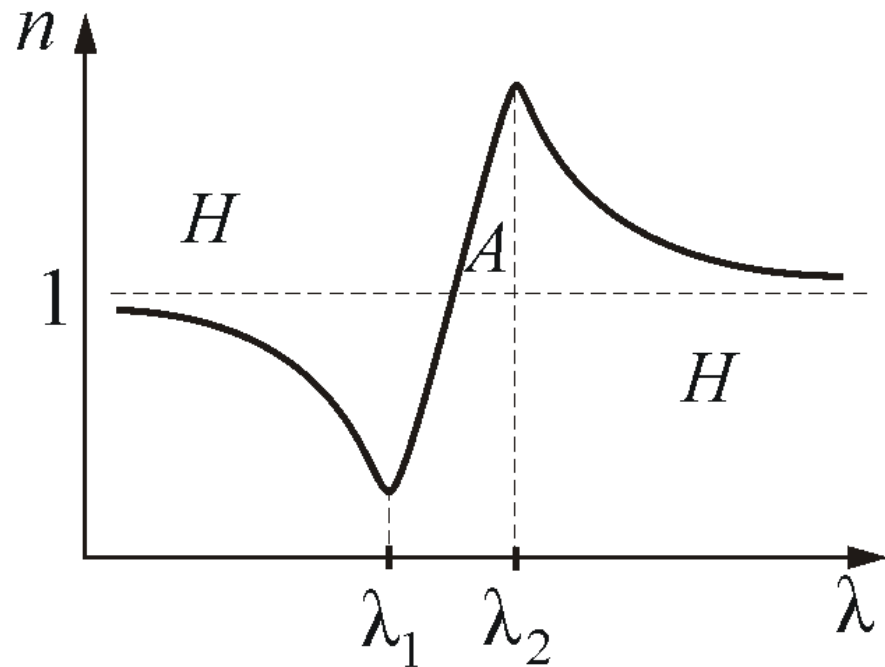
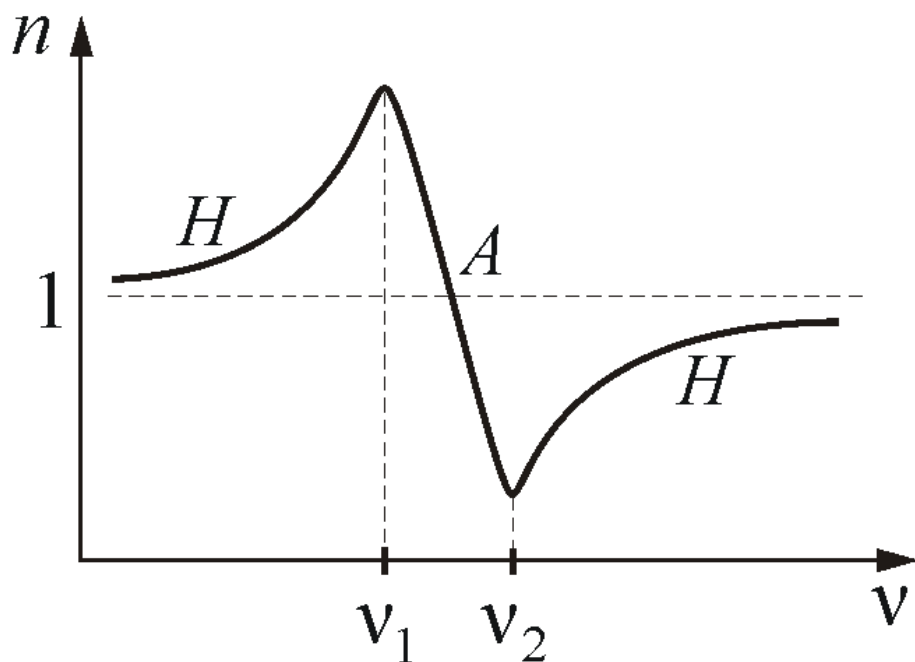
Дисперсия называется **аномальной**, если

$$\boxed{\frac{dn}{d\nu} < 0} \quad \text{или} \quad \boxed{\frac{dn}{d\lambda} > 0}$$

т.е. с ростом частоты ν показатель преломления n уменьшается.

Нормальная и аномальная дисперсия

Зависимости n от ν и λ :



В недиспергирующей среде $u = \nu$

u – групповая скорость, ν – фазовая скорость

Нормальная и аномальная дисперсия

Групповая скорость связана с циклической частотой и волновым числом:

$$u = \frac{d\omega}{dk}, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu n}{c}$$

Тогда:
$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{2\pi d\nu}{\frac{2\pi}{c} \left(n d\nu + \nu \frac{dn}{d\nu} d\nu \right)} = \frac{c}{n + \nu \frac{dn}{d\nu}},$$

$$u = \frac{\nu}{1 + \frac{\nu}{n} \frac{dn}{d\nu}},$$

При нормальной дисперсии $\frac{dn}{d\nu} > 0$ и $u < \nu$.

При аномальной дисперсии $\frac{dn}{d\nu} < 0$ и $u > \nu$.

В частности, если $n + \nu \frac{dn}{d\nu} < 1$, то $u > c$.

Элементарная теория дисперсии

Дисперсия света является результатом взаимодействия электромагнитной волны с заряженными частицами, входящими в состав вещества.

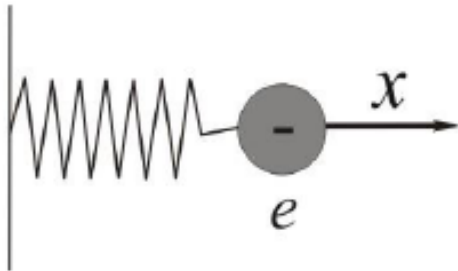
Теория Максвелла не могла объяснить это явление, так как тогда не было известно о сложном строении атома.

Классическая теория дисперсии была разработана Х.А. Лоренцем лишь после создания им электронной теории строения вещества.

В основу ее положено следующее соображение:

Дисперсия является следствием зависимости поляризованности атомов от частоты электрического поля.

Элементарная теория дисперсии



Под влиянием внешнего поля электрон сместится из положения равновесия на расстояние x , тем самым превращая атом в диполь.

$$P = Nex$$

$$P = \kappa E$$

Оптический электрон совершает вынужденные колебания под действием следующих сил:

- вынуждающей силы

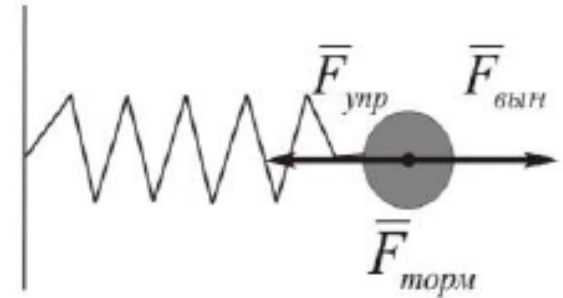
$$F_{\text{вын}} = eE = eE_0 \sin \omega t$$

- возвращающей силы

$$F_{\text{упр}} = -\kappa x$$

- тормозящей силы

$$F_{\text{торм}} = -r\nu = -r\dot{x}$$



Элементарная теория дисперсии

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний электрона массой m в поле суммарной силы:

$$m\ddot{x} = eE_0 \sin \omega t - \kappa x - r\dot{x}$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x &= f \sin \omega t \\ 2\beta &= \frac{r}{m}, \omega_0^2 = \frac{\kappa}{m}, f = \frac{eE_0}{m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} x &= A \sin \omega t \quad (\beta \rightarrow 0) \\ A &= \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \end{aligned}$$

Найдем абсолютный показатель преломления среды:

$$\varepsilon = 1 + \kappa = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{Nex}{\varepsilon_0 E}$$

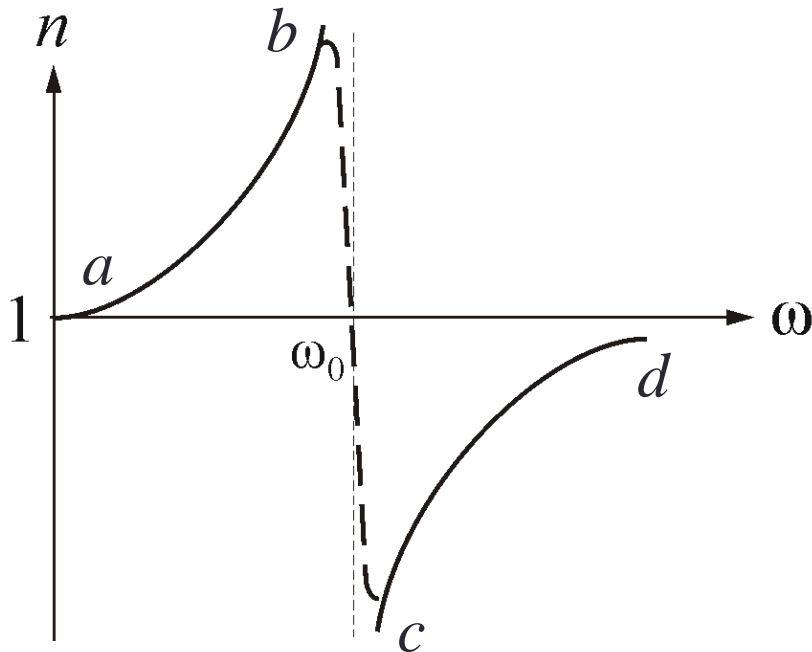
$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

- уравнение дисперсии
Зельмейера

Элементарная теория дисперсии

Каждое вещество обладает не одной частотой ω_0 собственных колебаний электрона, а характеризуется определенным набором собственных частот ω_{ok} . Получаем закон дисперсии в виде:

$$n^2 = 1 + \frac{N}{\epsilon_0} \sum_k \frac{e^2 / m}{(\omega_{ok}^2 - \omega^2)}$$



1. При частотах, заметно отличающихся от ω_0 , $n^2 \approx 1$.

2. При $\omega \rightarrow \omega_0$ функция терпит разрыв.
 \Rightarrow уравнение дисперсии имеет смысл лишь для частот, отличающихся от собственных частот колебаний электронов.

3. Участки ab и cd – области **нормальной** дисперсии.

Участок bc – область **аномальной** дисперсии.

Поглощение (абсорбция) света

Поглощением (абсорбцией) света называется явление потери энергии световой волной, проходящей через вещество.

Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , имеем:

$$E(x) = E_0 e^{-\beta t} = E_0 e^{-\alpha x}$$

β – коэффициент затухания колебаний,

α – коэффициент поглощения, зависящий от химической природы света и от длины волны проходящего света, $\alpha = \beta/v_{\phi}$.

В соответствии с **законом Бугера**: $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$

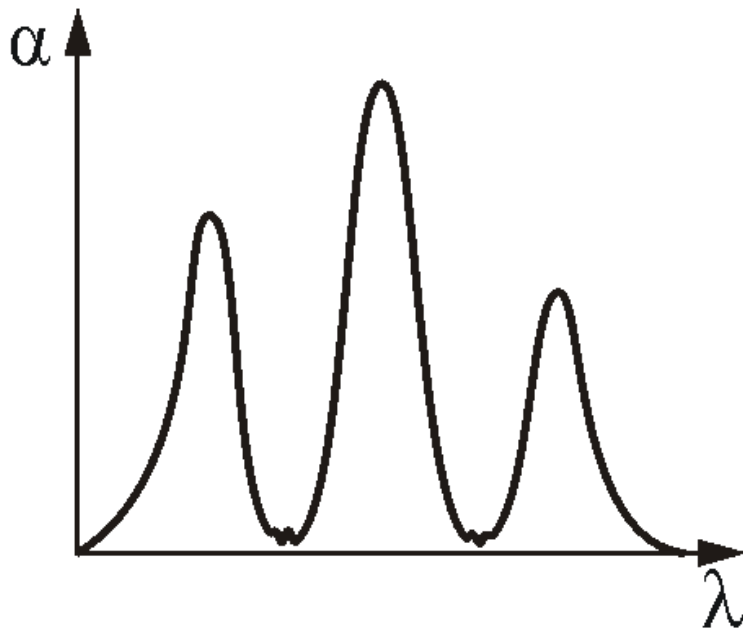
I_0 – интенсивность волны на входе в среду.

При $\alpha = 1/x$, $I = I_0/e$. Следовательно, **коэффициент поглощения** – физическая величина, численно равная обратному значению толщины слоя вещества, в котором интенсивность волны убывает в $e = 2,72$ раз.

Поглощение (абсорбция) света

Зависимость коэффициента поглощения от длины волны определяет **спектр** поглощения материала.

В веществе (например в газе) может присутствовать несколько сортов частиц, участвующих в колебаниях под действием распространяющейся электромагнитной волны.

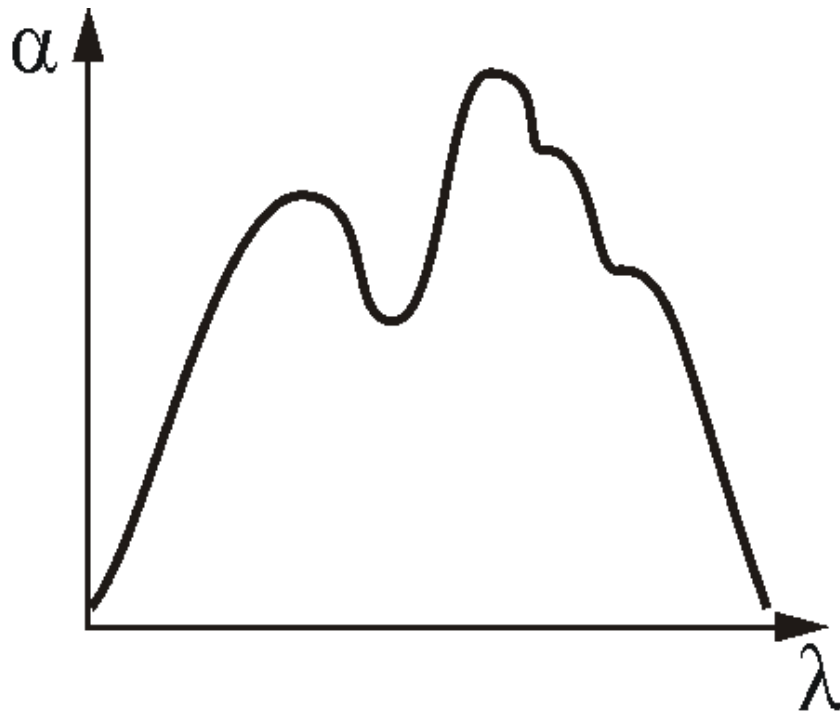


Если эти частицы слабо взаимодействуют, то коэффициент поглощения мал для широкого спектра частот, и лишь в узких областях он резко возрастает.

Спектр поглощения таких веществ **линейчатый** и представляет собой темные полосы на радужной окраске спектра, если это видимая область.

Поглощение (абсорбция) света

При увеличении давления газа полосы поглощения уширяются. В жидком состоянии они сливаются, и спектр поглощения принимает вид, показанный на рисунке. Причиной уширения является усиление связи атомов (молекул) в среде.

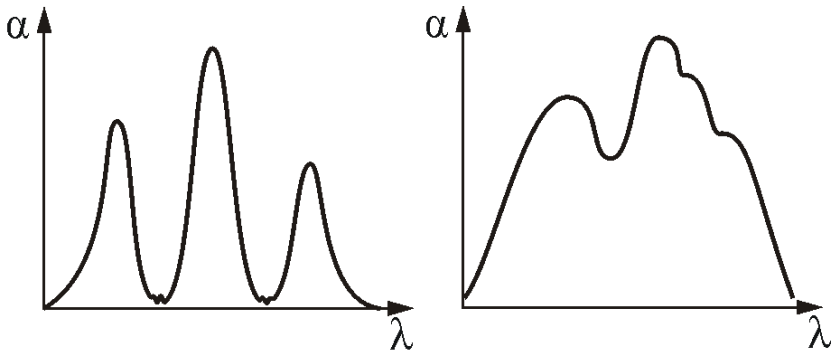


Поглощение (абсорбция) света

Одноатомные газы и пары металлов обладают близким к нулю коэффициентом поглощения и лишь для очень узких спектральных областей (примерно 10^{-12} – 10^{-11} м) наблюдаются резкие максимумы (**линейчатый спектр поглощения**).

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

Коэффициент поглощения для диэлектриков невелик (примерно 10^{-3} – 10^{-5} см⁻¹), однако у них наблюдается селективное поглощение света в определенных интервалах длин волн и, как следствие, сравнительно широкие полосы поглощения (примерно 10^{-7} – 10^{-6} м), т.е. **сплошной спектр поглощения**.



Коэффициент поглощения для металлов имеет большие значения (примерно 10^3 – 10^4 см⁻¹), поэтому металлы практически непрозрачны для света.

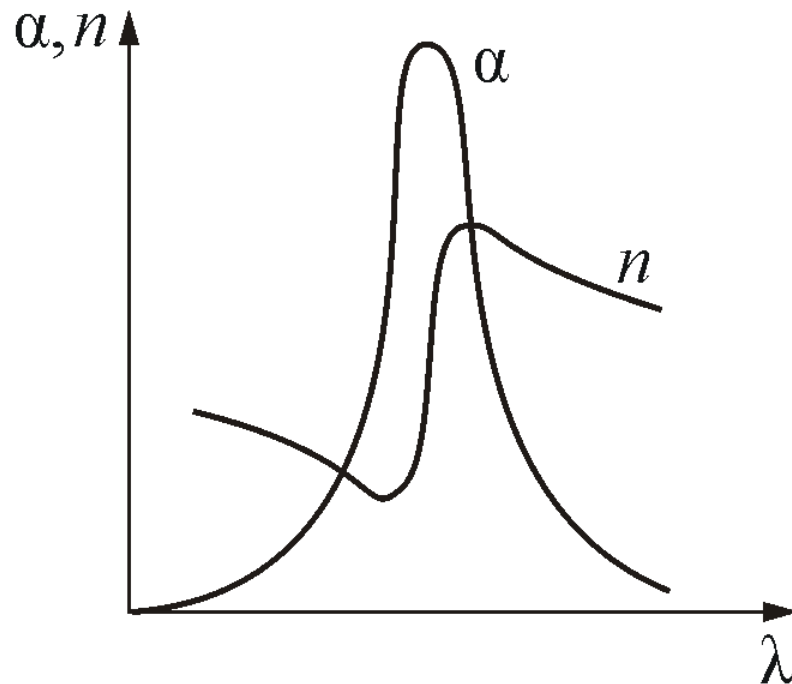
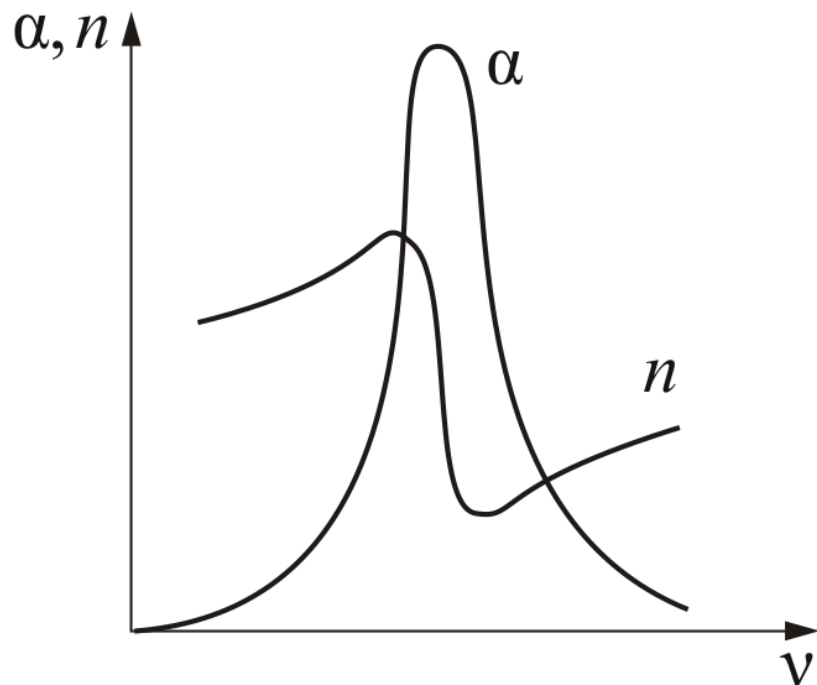
Поглощение (абсорбция) света

На рисунке представлена типичная зависимость коэффициента поглощения α от частоты света ν и зависимость показателя преломления n от ν в области полосы поглощения. Из рисунка следует, что внутри полосы поглощения наблюдается **аномальная дисперсия**

n убывает с увеличением ν

или

n убывает с уменьшением λ .



Поглощение (абсорбция) света

Зависимостью коэффициента поглощения от частоты (длины волны) объясняется окрашенность поглощающих тел.

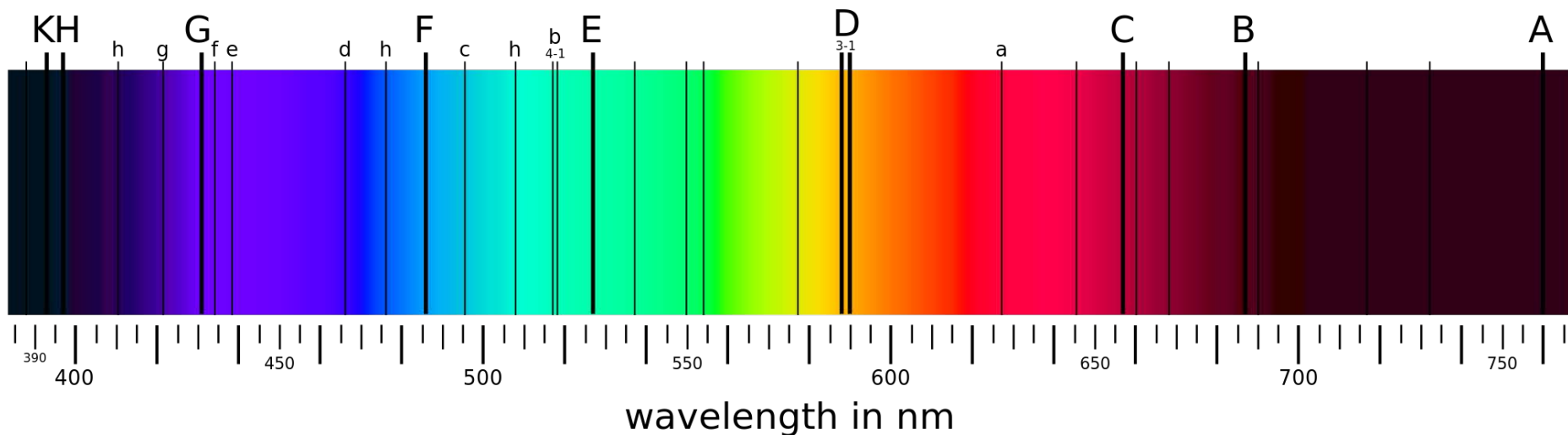
Разнообразие пределов селективного (избирательного) поглощения у различных веществ объясняет разнообразие и богатство цветов и красок, наблюдающееся в окружающем мире.



Поглощение (абсорбция) света

Явление поглощения широко используется в абсорбционном **спектральном анализе** смеси газов, основанном на измерениях спектров частот и интенсивностей линий (полос) поглощения.

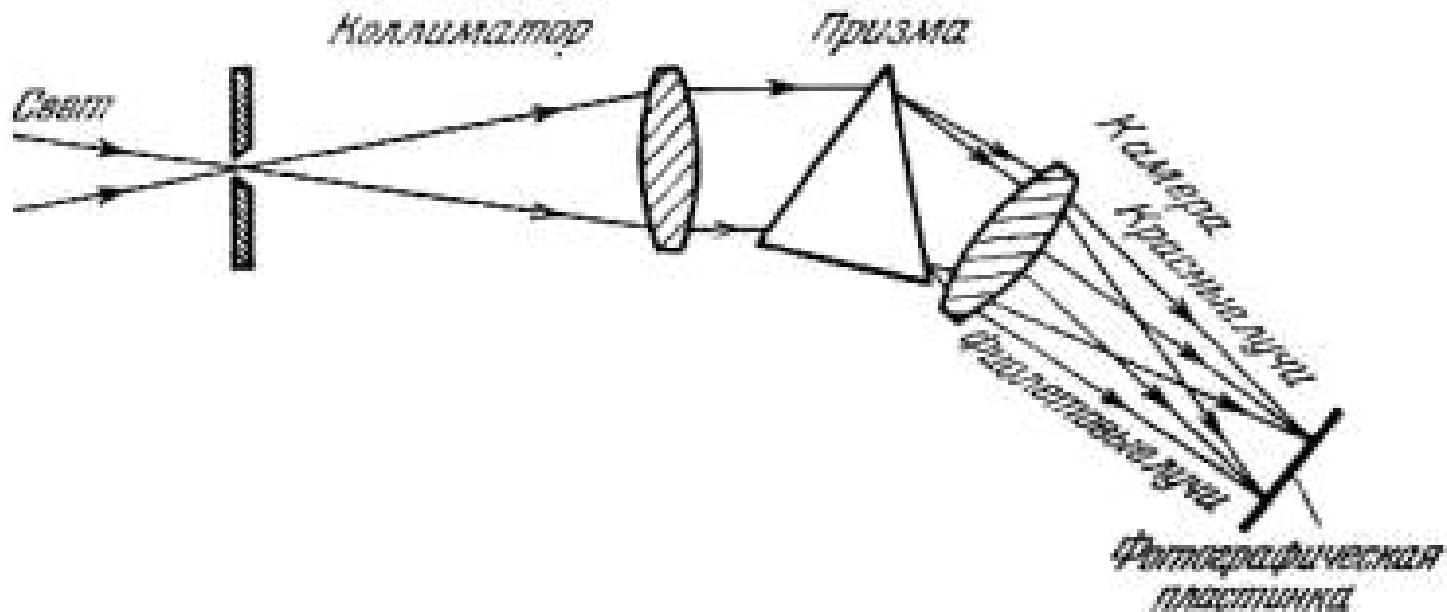
Структура спектров поглощения определяется составом и строением молекул, поэтому *изучение спектров поглощения является одним из основных методов количественного и качественного исследования веществ.*



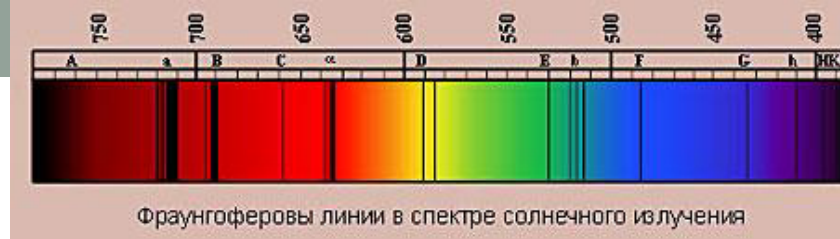
Спектральные приборы - спектрограф

Ход лучей в спектрографе:

1. Через узкую щель проходит пучок света.
2. Линза №1 делает пучок света параллельным.
3. Призма раскладывает белый свет по длинам волн на спектр.
4. Линза №2 собирает разошедшийся пучок излучения по длинам волн в разные концы экрана.
5. Фотопластинка фиксирует спектр и получается спектрограмма.



Спектральный анализ



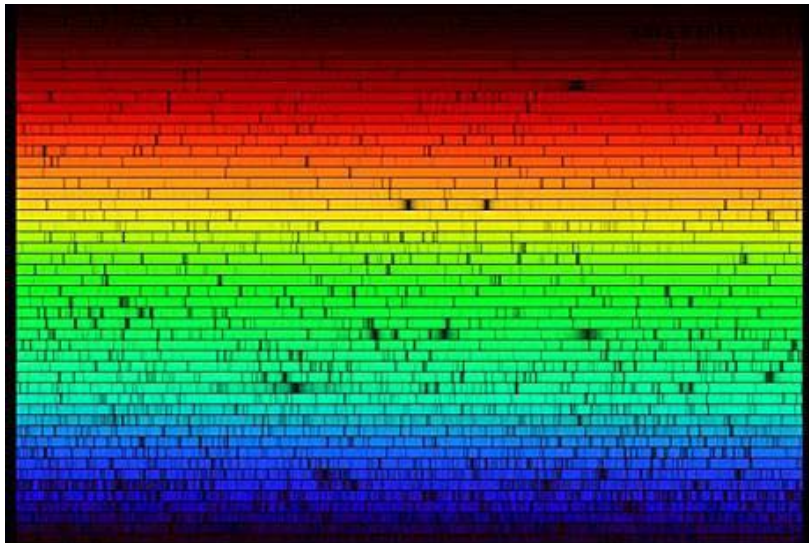
Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определенный набор длин волн.

Видимая часть солнечного излучения при изучении с помощью спектроанализирующих приборов оказывается неоднородной – в спектре наблюдаются линии поглощения, впервые описанные в 1814 году И. Фраунгофером.

Спектральный анализ позволяет получить информацию о составе

Солнца, поскольку определенный набор спектральных линий исключительно точно характеризует химический элемент. Так, с помощью наблюдений спектра Солнца был открыт гелий.

С помощью спектрального анализа узнали, что звезды состоят из тех же самых элементов, которые имеются и на Земле.

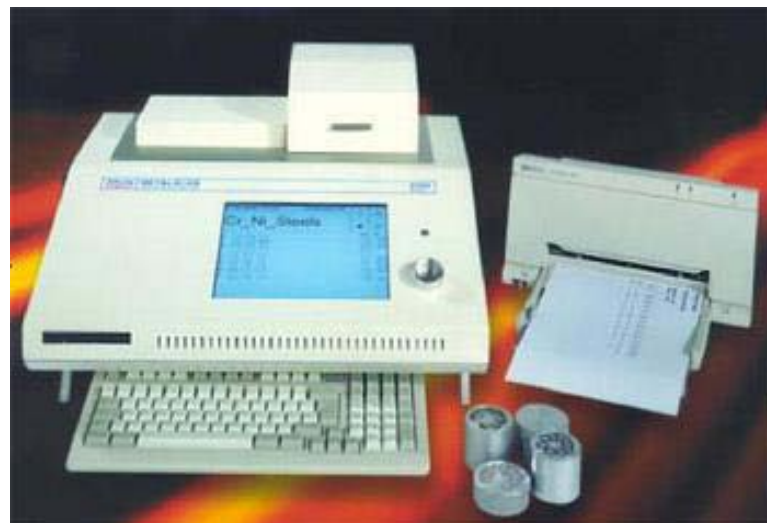


Спектральный анализ

С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества. Благодаря универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии.



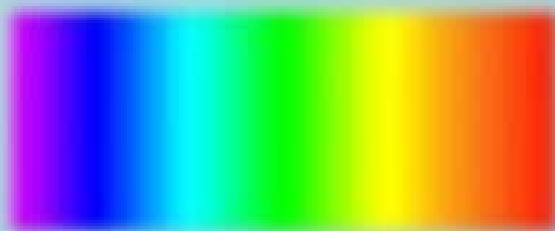
Лабораторная электролизная установка для анализа металлов «ЭЛАМ». Установка предназначена для проведения весового электролитического анализа меди, свинца, кобальта и др. металлов в сплавах и чистых металлах.



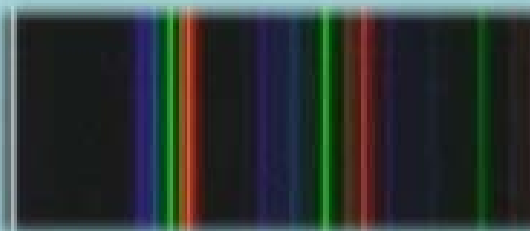
Стационарно – искровые оптико - эмиссионные спектрометры «МЕТАЛСКАН –2500». Предназначены для точного анализа металлов и сплавов, включая цветные, сплавы черных металлов и чугуны.

Виды спектров

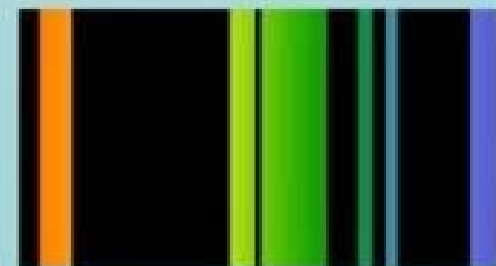
Непрерывные



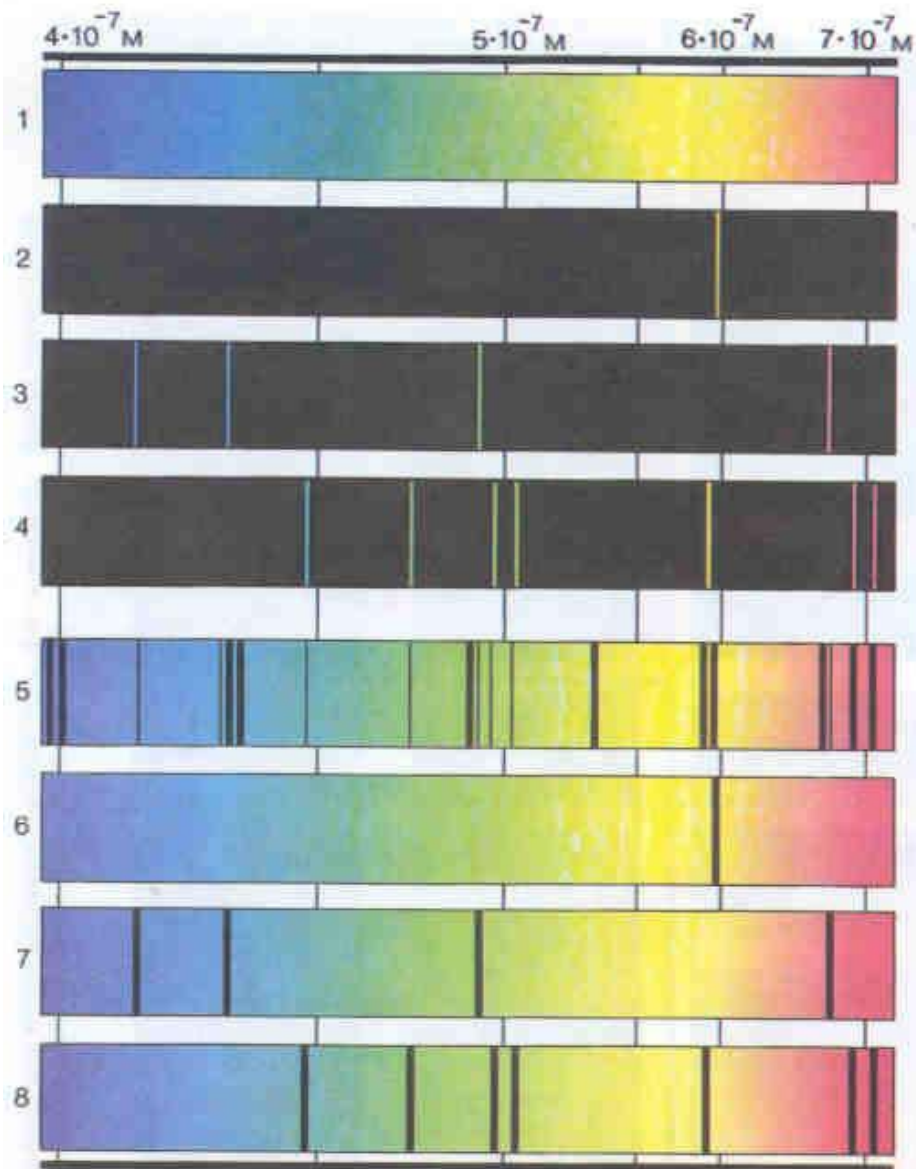
Линейчатые



Полосатые



Спектры испускания и поглощения



Спектры испускания:

1- сплошной;

2- натрия;

3- водорода;

4- гелия.

Спектры поглощения:

5- солнечный;

6- натрия;

7- водорода;

8- гелия.

Излучение Вавилова-Черенкова

В 1934 году П.А.Черенков, и С.Н. Вавилов, обнаружили особый вид свечения жидкости под действием γ -лучей радия.

В 1937 году И.Е. Тамм и И.М. Франк объяснили механизм свечения.

В 1940 году В.Л. Гинзбург создал квантовую теорию.

Излучение Вавилова-Черенкова – это излучение электрически заряженной частицы, движущейся в среде с групповой скоростью u , превышающей фазовую скорость света в этой среде.

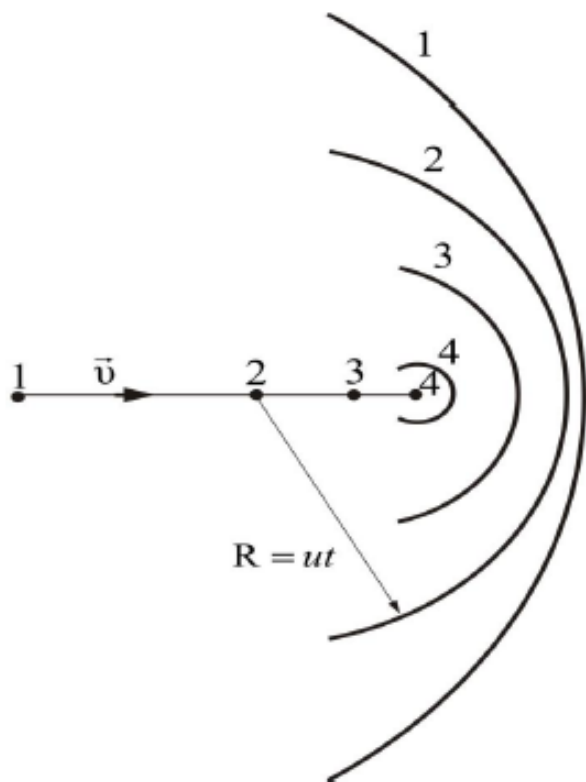
$$\frac{c}{n} < u < c$$

Излучение Вавилова-Черенкова

При движении заряженной частицы в изотропной среде со скоростью

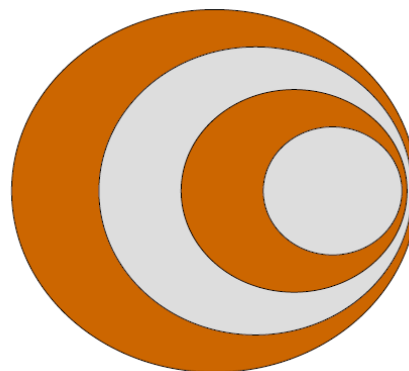
$$v < u = \frac{c}{n}$$

элементарные волны будут представлять собой сферы, находящиеся одна в другой, распространяющиеся со скоростью $u = \frac{c}{n}$

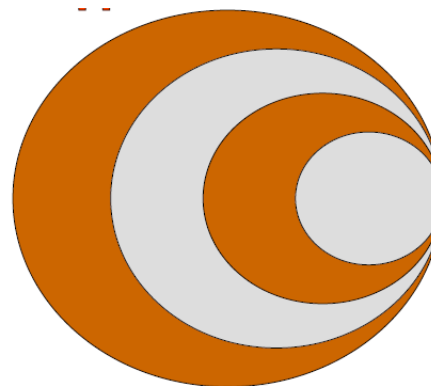


Излучение Вавилова-Черенкова

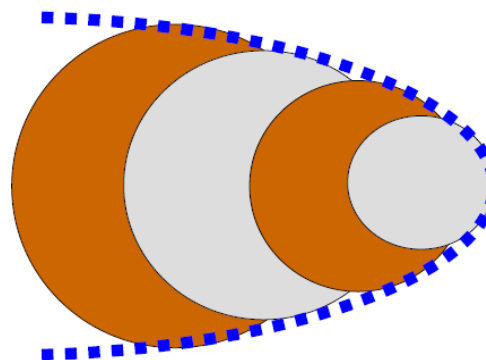
Скорость движения источника
меньше фазовой скорости:



Скорость движения источника
равна фазовой скорости:



Скорость движения источника
больше фазовой скорости:



Излучение Вавилова-Черенкова

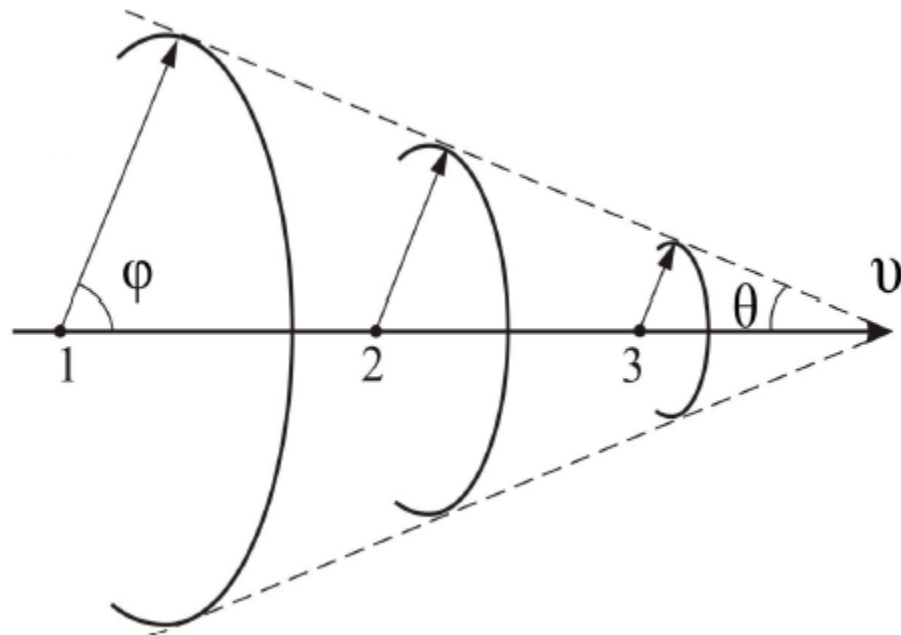
Если частица движется быстрее, чем распространяются волны в среде, то соответствующие элементарным волнам сферы пересекаются, и их общая огибающая (волновая поверхность) представляет собой конус с вершиной в точке, совпадающей с мгновенным положением движущейся частицы.

Нормали к образующим конуса определяют волновые векторы, т.е. направления распространения света.

Угол, который составляет волновой вектор с направлением движения частиц

$$\cos \varphi = \frac{u}{v} = \frac{c}{nv}$$

$$R = ut$$

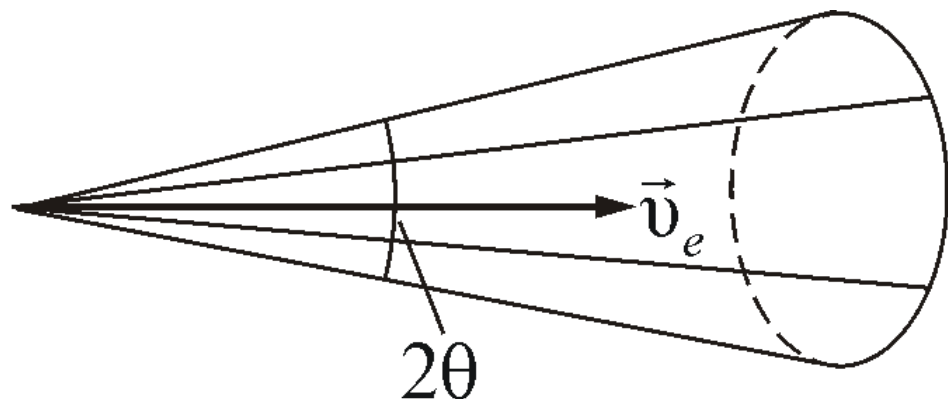


Излучение Вавилова-Черенкова

Нормали к образующим конуса определяют волновые векторы распространения света.

В этих направлениях вторичные волны будут усиливаться и формировать излучение Вавилова– Черенкова.

Свет, возникающий на каждом малом участке траектории частицы, распространяется вдоль образующей конуса, ось которого совпадает с направлением движения электрона v_e , а угол при вершине равен 2θ .



В жидкостях и твердых телах условие $v > c$ начинает выполняться для электронов при энергиях $> 10^5$ эВ, а для протонов $> 10^8$ эВ.

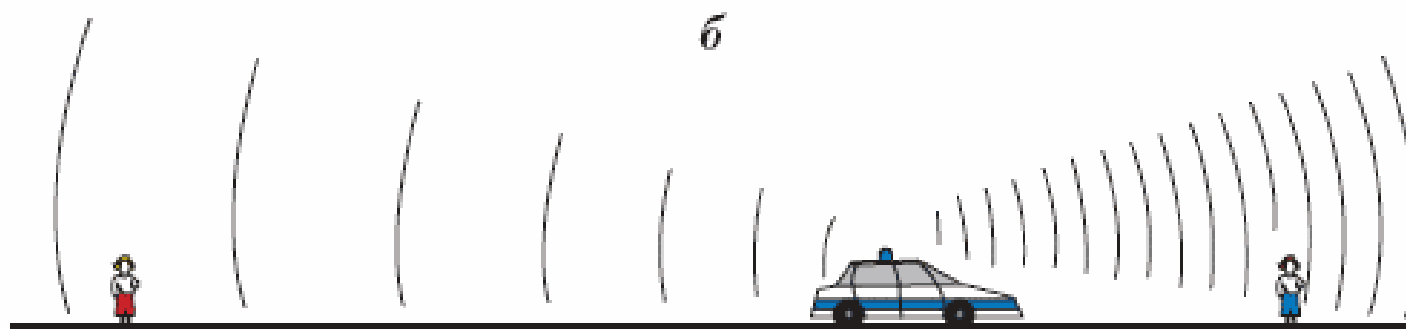
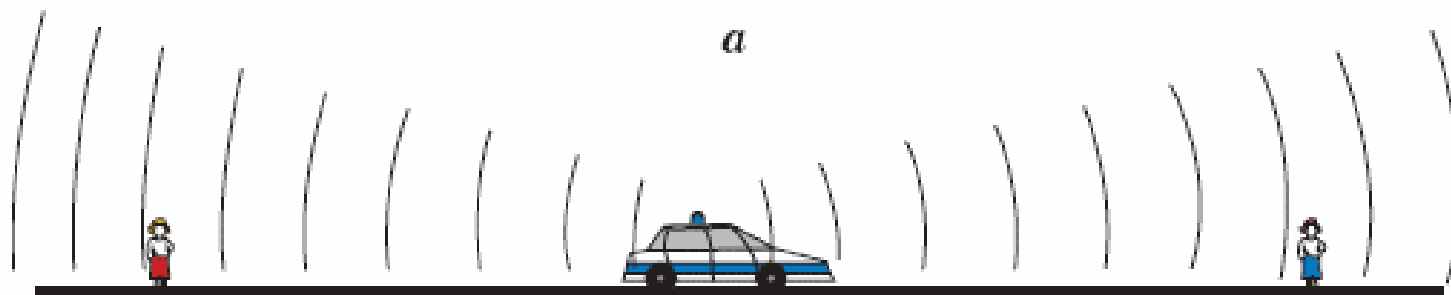
Излучение Вавилова-Черенкова

Описанный эффект используют в счетчиках Черенкова, предназначенных для регистрации заряженных микрочастиц (электронов, протонов, мезонов, и т.п.). В них световая вспышка, возникающая при движении частицы, преобразуется в электрический сигнал с помощью фотоумножителя, который и регистрируется.

В некоторых черенковских счетчиках можно определить угол θ и по условию $\cos\theta = c/(nv_e)$ оценить скорость частицы и, зная массу, определить ее энергию.

Эффект Доплера

- **Эффект Доплера** – изменение частоты волн, регистрируемых приёмником, при движении источника волн и приёмника друг относительно друга.



Эффект Доплера

Приёмник приближается к источнику $v_{np} > 0$, $v_{ист} = 0$.

Длина волны в среде $\lambda = \lambda_0 = \frac{v}{v_0}$.

Скорость распространения волн относительно приёмника равна $v + v_{np}$.

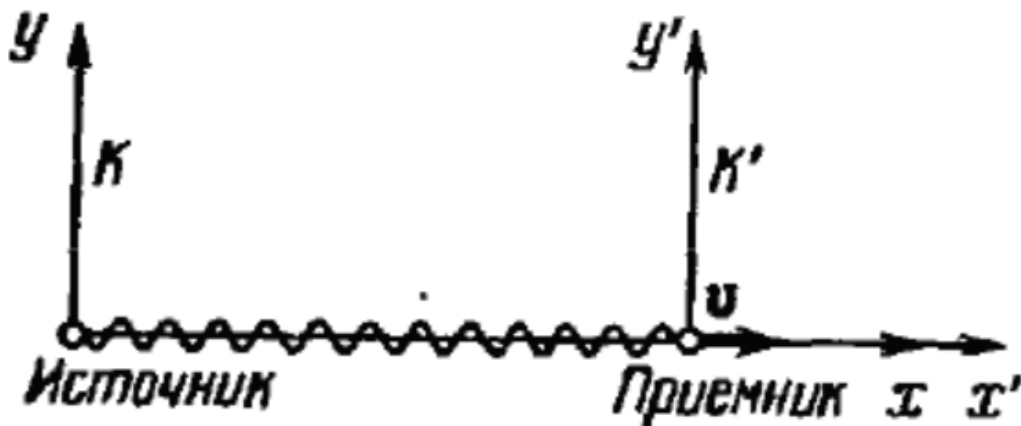
$$v = \frac{v + v_{np}}{\lambda_0} = \frac{v + v_{np}}{vT} = \frac{v + v_{np}}{v} v_0 = v_0 \left(1 + \frac{v_{np}}{v} \right) > v_0,$$

Источник и приемник движутся навстречу друг другу.

$$v = v_0 \left(\frac{v + v_{np}}{v - v_{ист}} \right)$$

Эффект Доплера

- Система K – источник;
- Система K' – приемник.
- Световая волна, испускаемая источником:



$$E(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \alpha \right]$$

- Световая волна в системе K' :

$$E(x', t') = A' \cos \left[\omega' \left(t' - \frac{x'}{c} \right) + \alpha' \right]$$

- Преобразования Лоренца:

$$t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

⇓

Эффект Доплера

$$E(x', t') = A \cos \left[\omega \left(\frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x' + vt'}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) + \alpha \right] =$$

$$= A \cos \left[\omega \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left(t' - \frac{x'}{c} \right) + \alpha \right]$$

$$E(x', t') = A' \cos \left[\omega' \left(t' - \frac{x'}{c} \right) + \alpha' \right]$$

$$\Rightarrow \omega' = \omega \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \omega \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$$

$\omega \rightarrow \omega_0$ (источник) $\omega' \rightarrow \omega$ (приемник)

$$\Rightarrow \omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$$

Эффект Доплера

ω_0 (источник) ω (приемник)

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}} \quad v = v_0 \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$$

Продольный эффект
Доплера

- При удалении приемника $v > 0 \rightarrow \omega < \omega_0$
- При приближении приемника к источнику $v < 0 \rightarrow \omega > \omega_0$
- Если $v \ll c$, то

$$\omega \approx \omega_0 \frac{1 - \frac{1}{2} \frac{v}{c}}{1 + \frac{1}{2} \frac{v}{c}} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v}{c}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v}{c}\right)$$

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = - \frac{v}{c}$$

$$\Rightarrow \omega = \omega_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

Эффект Доплера

$$\omega_0 (\text{источник}) \quad \omega (\text{приемник})$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

Поперечный эффект
Доплера

- Существование поперечного эффекта Доплера было доказано экспериментально Айвсом в 1938 г.
- В регистрируемом прибором излучении присутствуют все частоты, заключенные в интервале $\omega_0(1 - v/c)$ до $\omega_0(1 + v/c)$
- *Доплеровская ширина спектральной линии:*

$$\delta\omega_D = 2\omega_0 \frac{v}{c}$$

