

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

1. Дисперсия света. Методы наблюдения

Дисперсией света называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны.

Для каждого данного вещества показатель преломления n является определенной функцией от длины волны λ :

$$n=f(\lambda).$$

Дисперсией вещества называется величина, определяющая как быстро изменяется показатель преломления n с длиной волны λ . Дисперсию вещества обозначим η .

$$\eta = \frac{dn}{d\lambda} \quad (1)$$

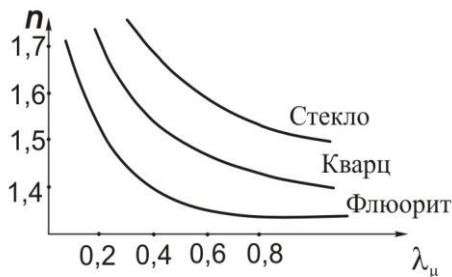


Рис.1

На рисунке 1 приведены кривые дисперсии для нескольких веществ. Для всех **прозрачных** веществ показатель преломления n монотонно возрастает (рис.1) с уменьшением длины волны λ со все возрастающей скоростью. Дисперсия $dn/d\lambda$ отрицательна и растет по модулю с уменьшением λ . Такая дисперсия называется **нормальной**.

Среды, обладающие дисперсией, называются диспергирующими. В диспергирующих средах скорость световых волн зависит от длины волны λ или частоты ω .

Для обнаружения дисперсии применяется любой метод для определения показателя преломления – преломление в призмах, полное внутреннее отражение, интерференционные приборы.

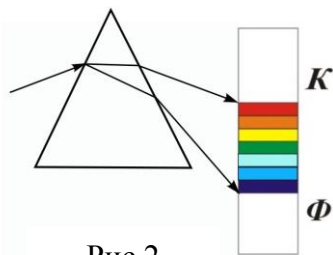


Рис.2

Вопросом возникновения спектра всерьез занялся Ньютон. В своих мемуарах «Новая теория света и цветов» в 1666г. он сообщает, что «достал треугольную стеклянную призму, чтобы с ней произвести опыты над знаменитым явлением цветов». По Ньютону белый свет дает спектр, а «однородные» цвета (как мы сейчас называем их – монохроматические волны) уже далее не разлагаются на составные цвета.

Свет Солнца дает **сплошной спектр** с непрерывным переходом (рис.2) одних цветов в другие, это означает наличие в солнечном свете колебаний всевозможных длин волн.

Ньютон разработал еще один метод наблюдения дисперсии, метод скрещенных призм (рис.2а).

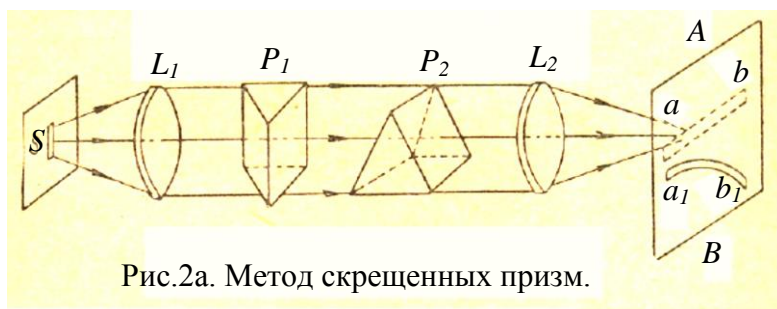
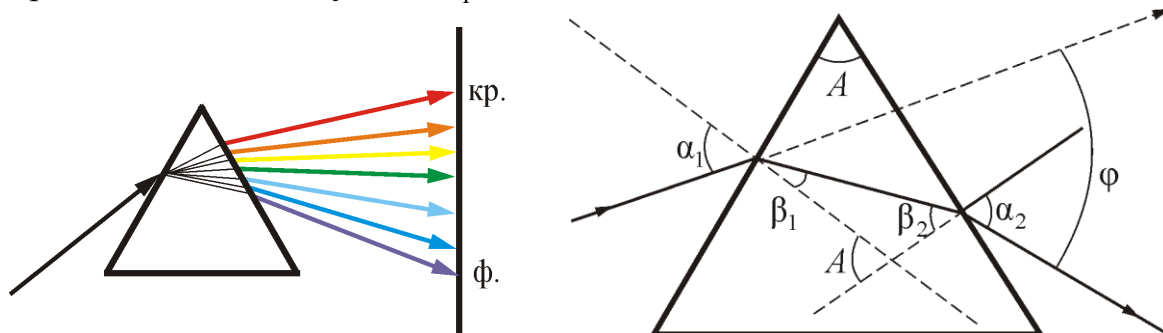


Рис.2а. Метод скрещенных призм.

Белый свет от источника S проходит через две призмы P_1 и P_2 , преломляющие ребра которых взаимно перпендикулярны. Линзы L_1 и L_2 собирают свет на экран. Если в схеме находится только призма P_1 , на экране получается горизонтальный сплошной спектр. Если находятся две призмы, P_1 и P_2 каждый луч будет отклоняться вниз, красный луч сместится на меньшее расстояние, фиолетовый на большее, т.к. показатель преломления фиолетового луча больше, чем красного.

Следствием дисперсии является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму. Первые экспериментальные наблюдения дисперсии света проводил в 1672 г. И. Ньютон. Он объяснил это явление различием масс корпускул.

Рассмотрим дисперсию света в призме. Пусть монохроматический пучок света падает на призму с *преломляющим углом* A и показателем преломления n под углом α_1 .



После двукратного преломления (на левой и правой гранях призмы) луч оказывается, преломлен от первоначального направления на угол φ . Из рисунка следует, что

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

Предположим что углы A и α_1 малы, тогда углы α_2 , β_1 , β_2 будут также малы и вместо синусов этих углов можно воспользоваться их зна-

чениями. Поэтому $\alpha_1/\beta_1 = n$, $\beta_2/\alpha_2 = 1/n$, а т.к. $\beta_1 + \beta_2 = A$, то $\alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) = n(A - \alpha_1/n) = nA - \alpha_1$ или $\alpha_1 + \alpha_2 = nA$.

Отсюда следует, что

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

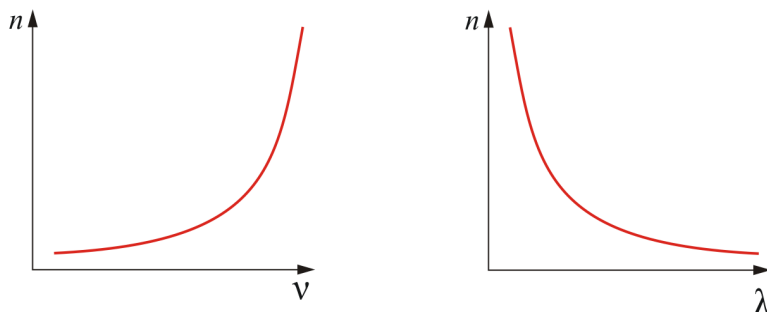
т.е. *угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше преломляющий угол призмы.*

Из выражения вытекает, что угол отклонения лучей призмой зависит от показателя преломления n , а n – функция длины волны, поэтому *лучи разных длин волн после прохождения призмы отклоняются на разные углы.* Пучок белого света за призмой разлагается в спектр, который называется **дисперсионным** или **призматическим**, что и наблюдал Ньютон. Таким образом, с помощью призмы, так же как с помощью дифракционной решетки, разлагая свет в спектр, можно определить его спектральный состав.

Рассмотрим различия в дифракционном и призматическом спектрах.

- *Дифракционная решетка разлагает свет непосредственно по длинам волн*, поэтому по измеренным углам (по направленьям соответствующих максимумов), можно вычислить длину волны (частоты). Разложение света в спектр в призме, происходит по значениям показателя преломления, поэтому, для определения частоты или длины волны света надо знать зависимость $n = f(\nu)$ или $n = f(\lambda)$.

- *Составные цвета в дифракционном и призматическом спектрах располагаются различно.* Мы знаем, что синус угла в дифракционной решетке пропорционален длине волны $\left(d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \right)$. Следовательно, *красные лучи, имеющие большую длину волны, чем фиолетовые, отклоняются дифракционной решеткой сильнее.* Призма же разлагает лучи света в спектре по значениям показателя преломления, который для всех прозрачных веществ с увеличением длины волны (т.е. с уменьшением частоты) уменьшается.



Поэтому, красные лучи отклоняются призмой слабее, в отличие от дифракционной решетки.

Величина $D = \frac{dn}{dv}$ (или $D = \frac{dn}{d\lambda}$), называемая **дисперсией вещества**,

показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.

Из рисунка следует, что показатель преломления для прозрачных веществ с увеличением длины волны увеличивается, следовательно, величина $dn/d\lambda$ по модулю так же увеличивается с уменьшением λ . Такая дисперсия называется **нормальной**. Вблизи линий и полос поглощения, ход кривой дисперсии $n(\lambda)$ будет иным, а именно n уменьшается с уменьшением λ . Такой ход зависимости n от λ называется **аномальной дисперсией**. Рассмотрим подробнее эти виды дисперсии.

2. Взаимодействие электромагнитных волн с веществом. Групповая скорость

Электромагнитные волны могут распространяться как в пустоте, так и в различных средах. Взаимодействие излучения и вещества среды имеет два аспекта:

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

Причина дисперсии света заключается в различии скоростей распространения лучей разной окраски. Что вообще понимается под скоростью света в среде?

Понятие скорости при волнообразном распространении в случае монохроматической незатухающей синусоидальной волны было введено, как скорость фазы волны, или фазовой скорости v . В действительности все реальные источники волн совершают затухающие колебания, осциллятор обладает ограниченным запасом энергии, следовательно, колебания носят ограниченный промежуток времени. Реальные волны в той или иной степени отличаются от синусоидальных.

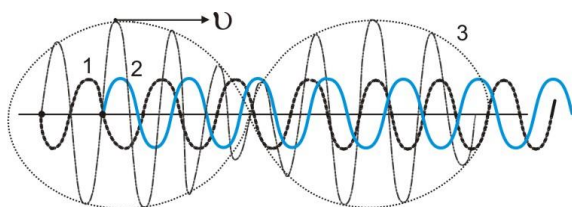


Рис.3

Фактически, если выделен свет определенной длины волны, световые колебания всегда представляют собой сложное колебание,

так как некоторое число осцилляторов имеют близкие частоты. Для простоты пусть два осциллятора с близкими частотами излучают мо-

нохроматические волны 1 и 2 разной длины и они распространяются с одной и той же фазовой скоростью v в среде (рис.3), где нет дисперсии. **Суперпозиция этих волн дает волну с модулированной амплитудой 3 и с той же фазовой скоростью, т.е. имеет вид импульсов.**

Однако среда (за исключением пустого пространства) обычно характеризуется дисперсией, т.е. монохроматические волны распространяются с различными фазовыми скоростями, зависящими от их длины волны, поэтому импульс начинает деформироваться. Учтем еще такой момент – осцилляторы излучают обрывок синусоиды, волновой процесс имеет ограниченный протяжение в пространстве.

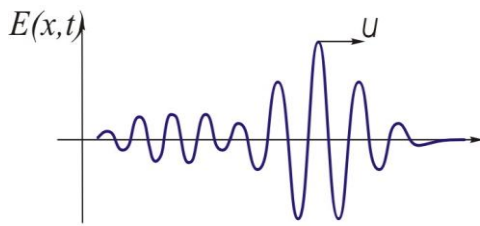


Рис.4

Таким образом, в результате суперпозиции получается практически одна группа, амплитуда которой отличается от нуля в ограниченной области. Такая группа волны называется **волновым пакетом**. Центру пакета можно приписать скорость u , которая называется **групповой скоростью (рис.4)**.

При наличии дисперсии групповая скорость отличается от фазовой. В результате, огибающая амплитуд и слагаемые волны движутся с различными скоростями, что приводит к изменению формы огибающей в процессе распространения волны, т.е. при наличии дисперсии волновой пакет распространяется с изменением формы.

Формула связи групповой и фазовой скоростей называется формулой Рэлея

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} \quad (2)$$

Из формулы видно: в зависимости от знака $\frac{dv}{d\lambda}$, групповая скорость может быть как меньше, так и больше фазовой скорости.

Энергия волнового пакета сосредоточена в сравнительно небольшом интервале частот, поэтому волновые пакеты называют также **импульсами**. Энергия импульса $E(x, t)$ распространяется с групповой скоростью.

Анализ различных методов определения скорости света показывает, что все они дают групповую скорость. Фазовая скорость есть величина, недоступная для непосредственного измерения.

Основной механизм взаимодействия излучения и вещества таков. Электромагнитная волна своим переменным электрическим полем периодически ускоряет электрические заряды вещества. Ускоренные заряды излучают новые волны. Таким образом, **распространение света в среде**

есть непрерывное поглощение и переизлучение электромагнитных волн зарядами вещества.

Нормальная и аномальная дисперсии

Итак, дисперсия света это зависимость показателя преломления вещества от частоты световой волны $n = f(\nu)$. Эта зависимость нелинейная и не монотонная. Области значения ν , в которых

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

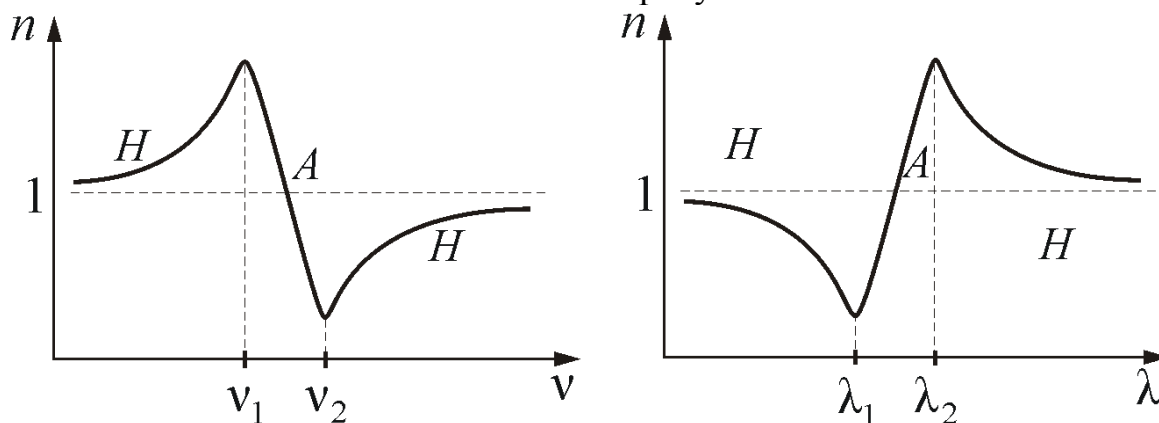
соответствует **нормальной дисперсии света** (с ростом частоты ν , показатель преломления n увеличивается). Нормальная дисперсия наблюдается у веществ, прозрачных для света. Например, обычное стекло прозрачно для *видимого* света и, в этой области частот, наблюдается *нормальная дисперсия света в стекле*. На основе явления нормальной дисперсии основано «разложение» света стеклянной призмой монохроматоров.

Дисперсия называется **аномальной**, если

$$\frac{dn}{d\nu} < 0 \quad (\text{или} \quad \frac{dn}{d\lambda} > 0),$$

т.е. с ростом частоты ν показатель преломления n уменьшается. Аномальная дисперсия наблюдается в областях частот, соответствующих полосам интенсивного поглощения света в данной среде. Например, у обычного стекла в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра наблюдается аномальная дисперсия.

Зависимости n от ν и λ показаны на рисунках.



В зависимости от характера дисперсии *групповая скорость* u в веществе может быть как больше, так и меньше *фазовой скорости* v (в не диспергирующей среде $u = v$).

Групповая скорость u связана с циклической частотой ω и волновым числом k соотношением: $u = \frac{d\omega}{dk}$, где $\omega = 2\pi\nu$, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu n}{c}$. Тогда:

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{2\pi d\nu}{\frac{2\pi}{c} (nd\nu + \nu \frac{dn}{d\nu} d\nu)} = \frac{c}{n + \nu \frac{dn}{d\nu}}. \text{ Отсюда можно записать}$$

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

Таким образом, при нормальной дисперсии $u < \nu$, и $\frac{dn}{d\nu} > 0$.

При аномальной дисперсии $u > \nu$ и, в частности, если $n + \nu \frac{dn}{d\nu} < 1$, то $u > c$. Этот результат не противоречит специальной теории относительности. Понятие групповой скорости правильно описывает распространение только такого сигнала (волнового пакета), форма которого не изменяется при перемещении сигнала в среде. (Строго говоря, это условие выполняется только для вакуума, т.е. в недиспергирующей среде). В области частот, соответствующих аномальной дисперсии групповая скорость не совпадает со скоростью сигнала, так как вследствие значительной дисперсии форма сигнала так быстро изменяется, что не имеет смысла говорить о групповой скорости.

3. Элементарная теория дисперсии

В основу теории дисперсии входит электромагнитная теория света и электронная теория вещества. Взаимодействие света с веществом в классической и квантовой трактовке, фактически, рассматривается с учетом одних и тех же основных существенных положений.

Классическая теория дисперсии была разработана после создания Г. Лоренцем электронной теории строения вещества. Теория была принята в то время с известной долей скептицизма. Тем не менее, она представляет собой вершину развития классической теории электромагнетизма и направляла все исследования по электронной теории.

В основу ее положено следующее соображение. **Дисперсия является следствием зависимости поляризованности атомов от частоты электрического поля.**

Для качественного понимания ряда оптических явлений *можно ограничиться гипотезой о существовании внутри атомов и молекул внешних электронов, связанных квазиупруго.*

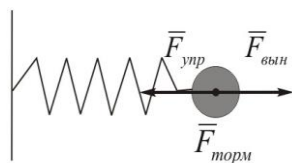


Рис.6

Если такой электрон вывести из положения равновесия, сообщив ему энергию, он приходит в колебание, затем теряет энергию на излучение. В результате, колебания будут затухающими.

Под влиянием *внешнего поля электрон смещается на расстояние x* из положения равновесия (рис.5), тем самым *превращая атом в диполь с дипольным электрическим моментом*

$$p = ex$$

Смещением ядра из положения равновесия пренебрегаем, поскольку масса ядра больше массы электрона.

Для простоты каждый атом считается диполем с одним внешним оптическим электроном.

Если в единице объема среды находится N атомов, то дипольный электрический момент

$$P = Nex.$$

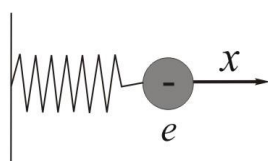


Рис.5

Поляризованность вещества задается внешним электрическим полем напряженностью E и диэлектрической восприимчивостью вещества ϵ

$$P = \epsilon E.$$

Проанализируем *механизм поляризации атома или молекулы* в электрическом поле световой волны. Составим уравнение движения связанного электрона. Нам предстоит решить задачу о вынужденных колебаниях электронов.

Механической аналогией системы электрон – атом может служить система шарик, соединенный пружиной с неподвижной стенкой.

В первом приближении можно считать, что на электрон действуют три силы (рис.6).

1. Вынуждающая сила.

Каждый электрон находится под воздействием лоренцовой силы

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

где E_0 - амплитуда и ω – частота электрической волны.

2. Возвращающая сила.

Возвращающая сила имеет характер упругой силы связи

$$F_{упр} = -kx,$$

где k - коэффициент упругой связи.

3. Тормозящая сила.

Растрата колебательной энергии, в основном, связана с взаимодействием атомов между собой. Сила трения зависит от скорости v движения электрона

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

где r – коэффициент сопротивления.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний электрона массы m в поле суммарной силы имеет вид

$$m \ddot{x} = e E_0 \sin \omega t - kx - r \dot{x} \quad (3)$$

Упростим это выражение

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = f \sin \omega t,$$

где $\frac{r}{m} = 2\beta$, β – коэффициент затухания,

$\frac{k}{m} = \omega_0^2$, ω_0 – собственная частота колебаний электрона,

$$\frac{e E_0}{m} = f.$$

Уравнение имеет решение в форме затухающей волны. Однако решение не представляет затруднений, если считать установившийся режим вынужденных колебаний незатухающим ($\beta \rightarrow 0$):

$$x = A \sin \omega t,$$

где

$$A = \frac{e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Пользуясь известным уравнением для диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon = 1 + \varkappa$, найдем абсолютный показатель преломления среды, $n = \sqrt{\varepsilon}$.

$$\begin{aligned} \varepsilon = 1 + \varkappa &= 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{N e^2 x}{\varepsilon_0 E} \\ n^2 &= 1 + \frac{N e^2}{m \varepsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

- это уравнение дисперсии Зельмейера (1871г).

Квантовомеханический расчет приводит к результатам такого же вида с некоторыми уточнениями.

Как показывают опыты, каждое вещество обладает не одной частотой ω_0 собственных колебаний оптического электрона, а характеризуется определенным набором различных частот $\omega_{ок}$. Таким образом, после суммирования по всем значениям $\omega_{ок}$ получаем закон дисперсии в виде

$$n^2 = 1 + \frac{N}{\varepsilon_0} \sum_{\kappa} \frac{e^2 / m}{\omega_{ок}^2 - \omega^2}.$$

Точные измерения показали: расхождение с опытом составляет в 2- 3%.

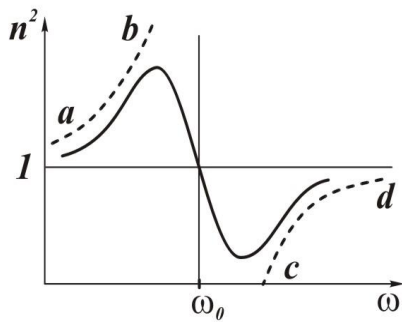


Рис.7

Это выражение позволяет объяснить явление дисперсии. График закона показан на рисунке пунктиром (рис.7).

1. При частотах заметно отличающихся от ω_0 , сумма в формуле справа мала по сравнению с единицей, $n^2 \approx 1$ (это соответствует точкам *a* и *d*).

2. При $\omega \rightarrow \omega_0$ слева на графике функция стремиться в $+\infty$, справа – в $-\infty$. Т.е. функция терпит разрыв.

Таким образом, уравнение дисперсии имеет смысл лишь для частот, отличающихся от собственных частот колебания электронов.

3. Более точная теория дисперсии учитывает затухание колебаний, график этой функции обозначен сплошной линией и называется **дисперсионной кривой**. Участки *ab* и *cd* называются областями **нормальной** дисперсии, показатель преломления растет с возрастанием частоты волны. Участок *bc*, вблизи резонансной частоты называется областью **аномальной** дисперсии, здесь показатель преломления уменьшается с возрастанием частоты волны. Аномальная дисперсия наблюдается в областях частот, соответствующих полосам интенсивного поглощения. В области аномальной дисперсии понятие групповой скорости теряет смысл, т.к. велико поглощение.

4. Наблюдение аномальной дисперсии

Американский физик Р.Вуд (1869-1925г.) для наблюдения аномаль-

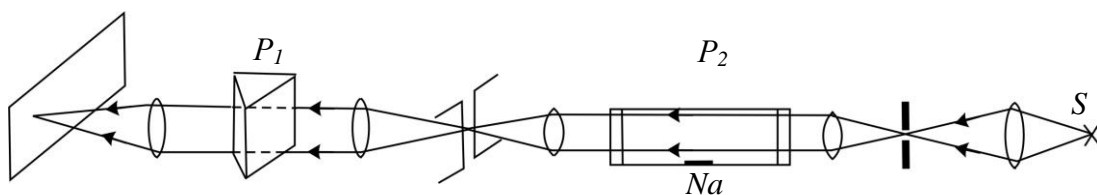


Рис.8. Метод наблюдения аномальной дисперсии в парах натрия.



Рис.9. Аномальная дисперсия в парах натрия.

ной дисперсии использовал метод скрещенных призм в парах натрия (рис.8). Одной призмой взята стеклянная призма P_1 , другая P_2 создается искусственно. Источник S – дуга между электродами из металлического натрия. Металлический натрий в откачанном сосуде P_2 нагревается снизу, одновременно охлаждается

верхняя часть сосуда. Плотность паров натрия будет неоднородной, снизу больше, наверху меньше. В результате формируется «призма» P_2 , скрещенная с P_1 . Благодаря аномальному характеру дисперсии спектр окажется не монотонно изогнутым, а обнаружит характерные изгибы вблизи линий поглощения (рис.9).

Явление аномальной дисперсии имеет большое значение для выяснения свойств вещества.

5. Поглощение (абсорбция) света

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

Свет поглощается в тех случаях, когда проходящая волна затрачивает энергию на различные процессы. Среди них: преобразование энергии волны во внутреннюю энергию, при нагревании вещества; затраты энергии на вторичное излучение в другом диапазоне частот (фотолюминесценция); затраты энергии на ионизацию, при фотохимических реакциях и т.п. При поглощении света, колебания затухают и амплитуда электрической составляющей уменьшается по мере распространения волны. Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , имеем

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

Здесь $E(x)$ – амплитудное значение напряженности электрического поля волны в точках с координатой x ; E_0 – амплитуда в точке с координатой $x = 0$; t – время, за которое волна распространилась на расстояние равное x ; β – коэффициент затухания колебаний; коэффициент поглощения, зависящий от химической природы среды и от длины волны проходящего света $\alpha = \beta / v_{\phi}$.

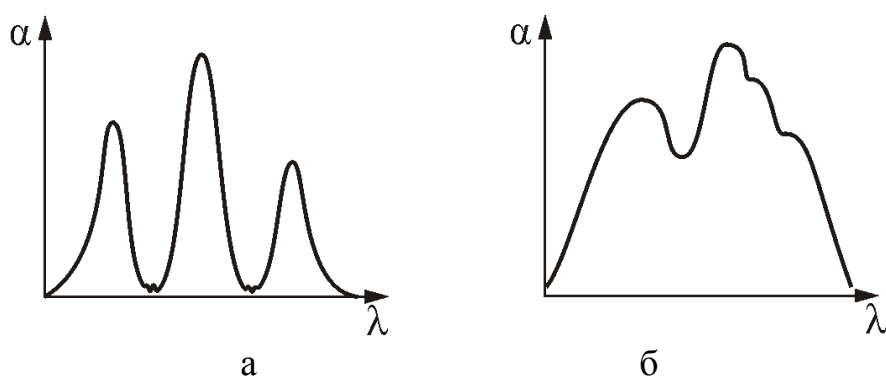
Интенсивность волны будет изменяться по закону Бугера (П. Бугер (1698 – 1758) – французский ученый)

$$J(x) = J_0 e^{-\alpha x},$$

где J_0 – интенсивность волны на входе в среду.

При $\alpha = 1/x$, $J = J_0 / e$, следовательно, **коэффициент поглощения – физическая величина, численно равная обратному значению толщины слоя вещества, в котором интенсивность волны убывает в $e = 2,72$ раз.**

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.



Эти области соответствуют частотам собственных колебаний оптических электронов в атомах разных сортов. Спектр поглощения таких веществ линейчатый и представляет собою темные полосы на радужной окраске спектра, если это видимая область. При увеличении давления газа полосы поглощения уширяются. В жидком состоянии они сливаются, и спектр поглощения принимает вид, показанный на рисунке б. Причиной уширения является усиление связи атомов (молекул) в среде.

Коэффициент поглощения зависящий от длины волны λ (или частоты ω) и для различных веществ различен. Например, одноатомные газы 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).

Коэффициент поглощения для диэлектриков невелик (примерно $10^{-3} - 10^{-5} \text{ см}^{-1}$), однако у них наблюдается селективное поглощение света в определенных интервалах длин волн, когда α резко возрастает и наблюдаются сравнительно широкие полосы поглощения (примерно $10^{-7} - 10^{-6}$ м), т.е. диэлектрики имеют сплошной спектр поглощения. Это связано с тем, что в диэлектриках нет свободных электронов и поглощение света обусловлено явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомов в молекулах диэлектрика.

Коэффициент поглощения для металлов имеет большие значения (примерно $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-1}$), и поэтому металлы практически непрозрачны для света. В металлах из-за наличия свободных электронов, движущихся под действием электрического поля световой волны, возникают быстропеременные токи, сопровождающиеся выделением джоулевой теплоты.

Поэтому энергия световой волны быстро уменьшается, превращаясь во внутреннюю энергию металла. Чем выше проводимость металла, тем сильнее в нем поглощение света.

На рисунке представлены типичная зависимость коэффициента поглощения α от частоты волны 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). Однако поглощение вещества должно быть значительным, чтобы повлиять на ход показателя преломления.

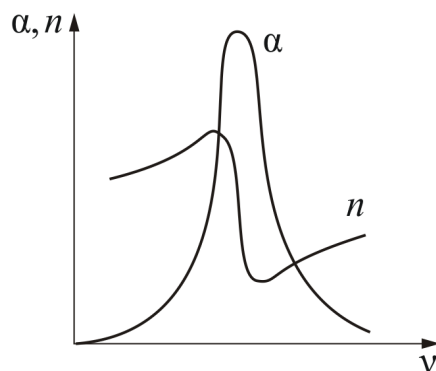


Рисунок 9.8

Зависимостью коэффициента поглощения от частоты (длины волны) объясняется окрашенность поглощающих тел. Например, стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи и сильно поглощающее зеленые и синие, при освещении белым светом будет казаться красным. Если на такое стекло направить зеленый и синий свет, то из-за сильного поглощения света этих длин волн стекло будет казаться черным. Это явление используется для изготовления светофильтров, которые в зависимости от химического состава (стекла с присадками различных солей, пленки из пластмасс, содержащие красители, растворы красителей и т. д.) пропускают свет только определенных длин волн, поглощая остальные. Разнообразие пределов селективного (избирательного) поглощения у различных веществ объясняет разнообразие и богатство цветов и красок, наблюдающееся в окружающем мире.

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.

6. Излучение Вавилова-Черенкова

В 1934 году П.А.Черенков, работавший тогда под руководством С.Н. Вавилова, изучая действие электромагнитного излучения на вещество, обнаружил особый вид свечения жидкости под действием γ -лучей радия. Характерными особенностями этого излучения были, во-первых то, что свечение имело голубоватый цвет и наблюдалось у всех чистых прозрачных жидкостей, причем яркость и цвет свечения мало зависели от химического состава жидкости; во-вторых, в отличие от люминесценции, не наблюдалось ни температурного, ни примесного свечения. Вавилов предположил, что обнаруженное явление не является люминесценцией, свет излучают быстрые электроны, движущиеся в жидкости. В 1937 году И.Е. Тамм и И.М. Франк объяснили механизм свечения и создали количественную теорию, основанную на уравнениях классической электродинамики. В 1940 году В.Л. Гинзбург создал квантовую теорию, которая привела к тем же результатам.

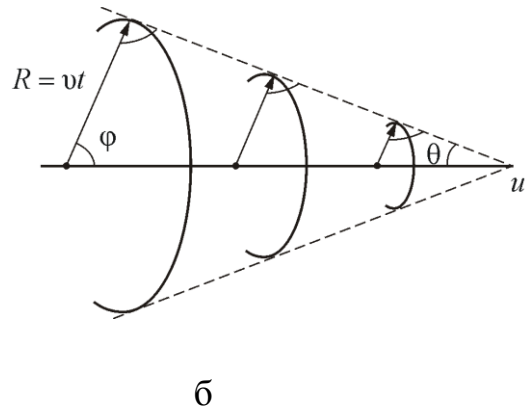
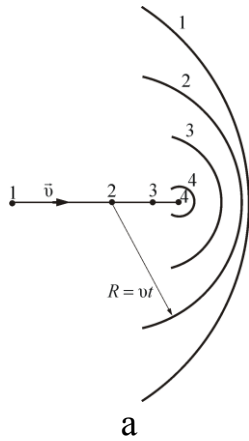
Излучение Вавилова-Черенкова это излучение электрически заряженной частицы, движущейся в среде с групповой скоростью u , превышающей фазовую скорость света в этой среде

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

Согласно электромагнитной теории, заряд, движущийся равномерно не излучает электромагнитной волны. Однако Тамм и Франк показали, что это справедливо лишь для скоростей частиц, не превышающих фазовую скорость волны в данной среде. В процессе излучения Вавилова-Черенкова, энергия и скорость излучающей свободной частицы уменьшается, то есть частица тормозится.

Заряженная частица вызывает кратковременную поляризацию вещества в окрестности тех точек, через которые она проходит при своем движении. Поэтому молекулы среды, лежащие на пути частицы, становятся кратковременно действующими когерентными источниками элементарных электромагнитных волн, которые интерферируют друг с другом.

При движении заряженной частицы в изотропной среде со скоростью $u < v = \frac{c}{n}$ элементарные волны будут представлять собой сферы распространяющиеся со скоростью $v = \frac{c}{n}$ (рис. а).

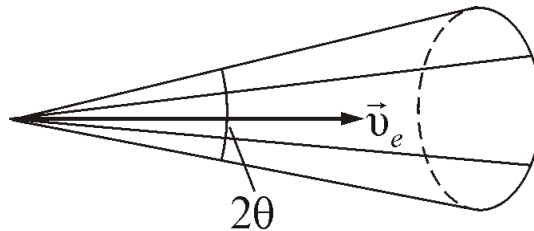


Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, в результате интерференции элементарные волны гасят друг друга всюду, за исключением их общей огибающей. А при движении частицы со скоростью $u < v$, общей огибающей волн нет: все окружности лежат одна в другой. Поэтому заряд, движущийся равномерно прямолинейно со скоростью $u < v$, свет не излучает.

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 (рис. б). Нормали к образующим конуса определяют волновые векторы, т.е. направления распространения света. Угол θ , который составляет волновой вектор с направлением движения частицы, удовлетворяют

$$\text{соотношению: } \cos\theta = \frac{v}{u} = \frac{c}{nu}.$$

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 освобожденного электрона v_e , а угол при вершине равен 2θ .



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

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 , по условию $\cos\theta = c/(mv_e)$, оценить скорость частицы и, зная массу, определить ее энергию.