

Дисперсия света.

- **Электронная теория дисперсии света.**

•

Дисперсия света.

В 1665-1667 годах в Англии свирепствовала эпидемия чумы, и молодой Исаак Ньютон решил укрыться от неё в своём родном Вулсторпе. Перед отъездом в деревню он приобрёл стеклянные призмы, чтобы «**произвести опыты со знаменитыми явлениями цветов**».

Уже в 1 веке новой эры было известно, что при прохождении через прозрачный монокристалл с формой шестиугольной призмы солнечный свет разлагается в цветную полосу – спектр. Ещё раньше, в 4 веке до новой эры, древнегреческий учёный Аристотель выдвинул свою теорию цветов. Он полагал, что основным является солнечный (белый) свет, а все остальные цвета получаются из него добавлением к нему различного количества тёмного света. Такое представление о свете господствовало в науке вплоть до 17 века, несмотря на то, что были проведены многочисленные опыты по разложению солнечного света с помощью стеклянных призм.

Исследуя природу цветов, Ньютон придумал и выполнил целый комплекс различных оптических экспериментов. Некоторые из них без существенных изменений в методике, используются в физических лабораториях до сих пор.

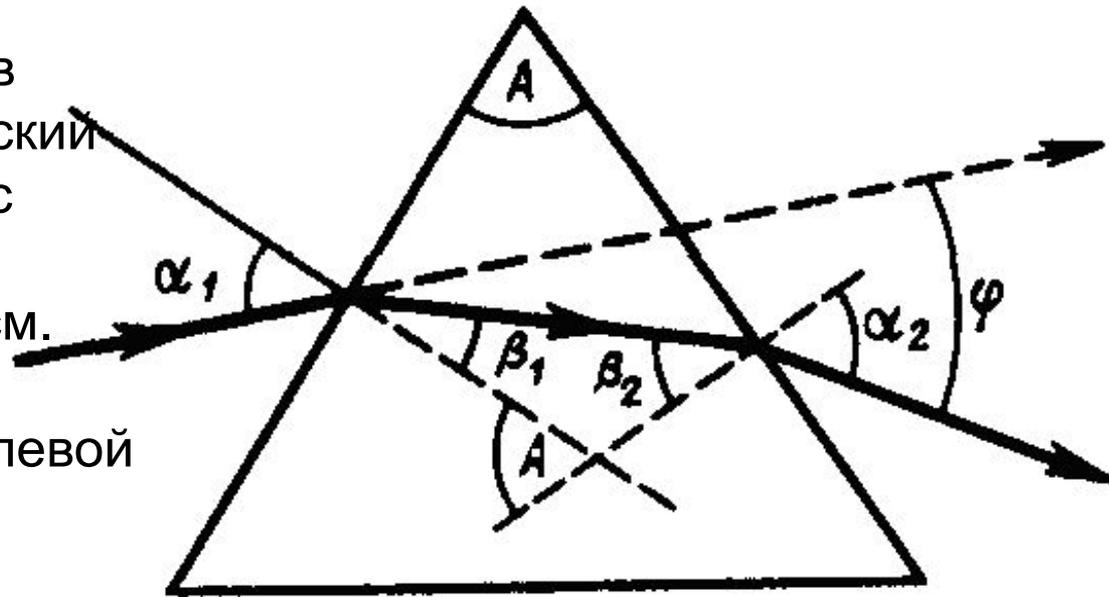
Дисперсия света.

Первый опыт по дисперсии был традиционным. Прорезав небольшое отверстие в ставне окна затемнённой комнаты, Ньютон поставил на пути пучка лучей, проходивших через это отверстие, стеклянную призму. На противоположной стене он получил изображение в виде полосы чередующихся цветов. Полученный таким образом спектр солнечного света Ньютон разделил на семь цветов радуги. **Установление именно семи основных цветов спектра в известной степени произвольно:** Ньютон стремился провести аналогию между спектром солнечного света и музыкальным звуковым рядом. Если же рассматривать спектр без подобного предубеждения, то полоса спектра возникающего из-за дисперсии распадается на три главные части – **красную, желто-зелёную и сине-фиолетовую (RGB)**. Остальные цвета занимают сравнительно узкие области между этими основными. Вообще же человеческий глаз способен различать в спектре солнечного света до 160 различных цветовых оттенков. В последующих опытах по дисперсии Ньютону удалось соединить цветные лучи в белый свет. В результате своих исследований Ньютон, в противоположность Аристотелю, пришёл к выводу, что **при смешивании «белизны и черноты никакого цвета не возникает...».**

Дисперсия света.

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (длины волны λ) света или зависимость фазовой скорости v световых волн от его частоты ν . Дисперсия света представляется в виде зависимости $n=f(\lambda)$. Следствием дисперсии является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму.

Рассмотрим дисперсию света в призме. Пусть монохроматический пучок света падает на призму с преломляющим углом A и показателем преломления n (см. рисунок) под углом α_1 . После двукратного преломления (на левой и правой гранях призмы) луч оказывается отклоненным от первоначального направления на угол ϕ . Из рисунка следует, что



Дисперсия света

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 и β_2 будут также малы и вместо синусов этих углов можно воспользоваться их

значениями. Поэтому $\beta_2/\alpha_2 = 1/n$, а так как $\beta_1 + \beta_2 = A$, то

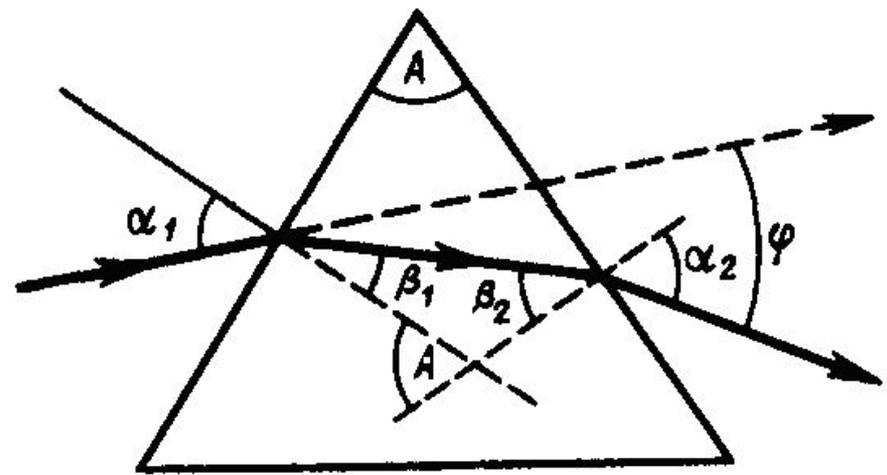
$$\alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) = n(A - \alpha_1/n) = nA - \alpha_1, \text{ откуда } \alpha_1 + \alpha_2 = nA.$$

Из выражений (***) и (**) следует, что $\varphi = A(n - 1)$. **Угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше преломляющий угол призмы A и показатель преломления стекла призмы n .**

Из выражения (****) вытекает, что угол отклонения лучей призмой зависит от величины $n - 1$, а n — функция длины волны, поэтому лучи разных длин волн после прохождения призмы окажутся отклоненными на разные углы, т. е. **пучок белого света за призмой разлагается в спектр.**

Таким образом, с помощью призмы,
так же как и с помощью дифракционной решетки,

разлагая свет в спектр, можно определить его спектральный состав.



Дисперсия света.

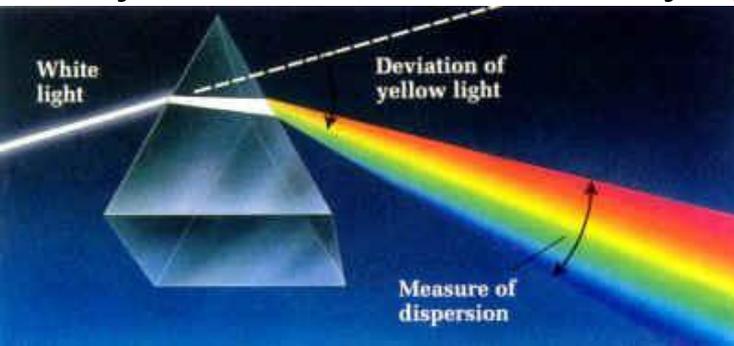
Рассмотрим различия в дифракционном и призматическом спектрах.

1. Дифракционная **решетка** разлагает падающий свет непосредственно **по длинам волн**, поэтому по измеренным углам в направлении соответствующих максимумов можно вычислить длину волны.

Разложение света в спектр **в призме** происходит **по значениям показателя преломления**,

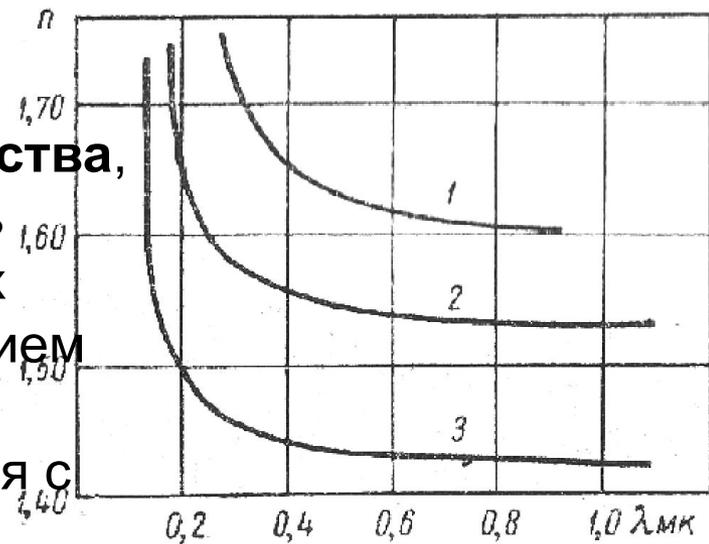
поэтому для определения длины волны света надо знать $n=f(\lambda)$.

2. **Составные цвета в дифракционном и призматическом спектрах располагаются различно.** В дифракционной решетке синус угла отклонения пропорционален длине волны. Следовательно, **красные лучи**, имеющие большую длину волны, чем фиолетовые, **отклоняются дифракционной решеткой сильнее**. Призма же разлагает лучи в спектр по значениям показателя преломления, который для всех прозрачных веществ с увеличением длины волны уменьшается. Поэтому **красные лучи отклоняются призмой слабее**,



Дисперсия света.

Величина $D = \frac{dn}{d\lambda}$, являемая **дисперсией вещества**, показывает, как быстро изменяется показатель преломления с длиной волны. Для прозрачных веществ показатель преломления с уменьшением длины волны увеличивается; следовательно, величина $dn/d\lambda$ по модулю также увеличивается с уменьшением λ . Такая **дисперсия**



называется **нормальной**. Как будет показано ниже, ход кривой $n(\lambda)$ — **кривой дисперсии** — вблизи линий и полос поглощения будет иным: n уменьшается с уменьшением λ . Такой ход зависимости n от λ называется **аномальной дисперсией**.

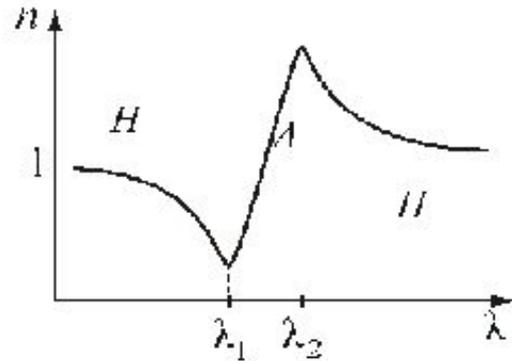
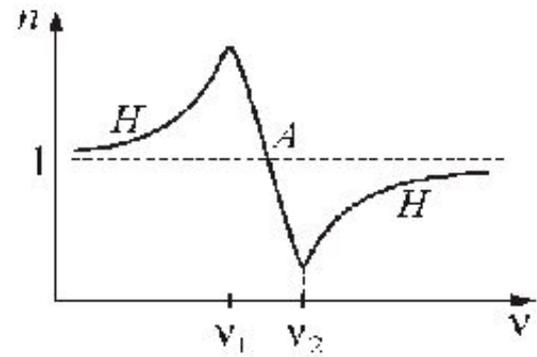
На явлении нормальной дисперсии основано действие **призмных спектрографов**. Несмотря на их некоторые недостатки (например, необходима градуировка и учет различной дисперсии в разных участках спектра) при определении спектрального состава света, призмные спектрографы находят широкое применение в спектральном анализе. Это объясняется тем, что изготовление хороших призм значительно проще, чем изготовление хороших дифракционных решеток. В призмных спектрографах также легче получить большую светосилу.

Дисперсия света.

Нормальная дисперсия: $\frac{dn}{d\nu} > 0$ $\frac{dn}{d\lambda} < 0$

и/или

Аномальная дисперсия: $\frac{dn}{d\nu} < 0$ $\frac{dn}{d\lambda} > 0$



Есть много веществ, которые обладают аномальной дисперсией, и все они сильно поглощают свет в той области, где наблюдается отклонение от нормальной дисперсии. Исследования показали, что любое вещество дает аномальную дисперсию, но она наблюдается в невидимой части спектра — либо ИК, либо УФ, а чаще и там, и там. У любого вещества есть свои полосы поглощения, и поэтому аномальная дисперсия, по сути дела, — это та же нормальная дисперсия, присущая всем прозрачным веществам, и противопоставлять их друг другу не имеет смысла.

Дисперсия определяется как зависимость фазовой скорости света в среде от его частоты

Электронная теория дисперсии света.

Из макроскопической электромагнитной теории Максвелла следует, что абсолютный показатель преломления среды $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, μ — магнитная проницаемость. В оптической области спектра для всех веществ $\mu \approx 1$, поэтому $n = \sqrt{\epsilon}$.

Из формулы (*) выявляются некоторые противоречия с опытом: величина n , являясь переменной, остается в то же время равной определенной постоянной $\sqrt{\epsilon}$. Кроме того, значения n , получаемые из этого выражения, не согласуются с опытными значениями.

Трудности объяснения дисперсии света с точки зрения электромагнитной теории Максвелла устраняются в электронной теории Лоренца.

В теории Лоренца дисперсия света рассматривается как результат взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами, входящими в состав вещества и совершающими вынужденные колебания в переменном электромагнитном поле волны.

Электронная теория дисперсии света.

Применим электронную теорию дисперсии света для однородного диэлектрика, предположив формально, что дисперсия света является следствием зависимости ε от частоты ω световых волн. Диэлектрическая проницаемость вещества, по определению, равна

$$\varepsilon = 1 + \varepsilon = 1 + P/(\varepsilon_0 E),$$

где ε — диэлектрическая восприимчивость среды, ε_0 — электрическая постоянная, P — мгновенное значение поляризованности. Следовательно, $n^2 = 1 + P/(\varepsilon_0 E)$, показатель преломления среды зависит от поляризованности P . В данном случае основное значение имеет **электронная поляризация**, т.е. вынужденные колебания электронов под действием электрической составляющей поля волны, так как для ориентационной поляризации молекул частота колебаний в световой волне очень высока ($\nu \approx 10^{15}$ Гц).

В первом приближении можно считать, что вынужденные колебания совершают только внешние, наиболее слабо связанные с ядром электроны — оптические электроны.

Электронная теория дисперсии света.

Для простоты рассмотрим колебания только одного оптического электрона. Наведенный дипольный момент электрона, совершающего вынужденные колебания, равен $\mathbf{p} = e\mathbf{x}$, где e — заряд электрона, \mathbf{x} — смещение электрона под действием электрического поля световой волны. Если концентрация атомов в диэлектрике равна n_0 , то мгновенное значение поляризованности $\mathbf{P} = n_0 \mathbf{p} = n_0 e\mathbf{x}$. Из (***) и (***) получим

$n^2 = 1 + n_0 e x / (\epsilon_0 E)$. вательно, задача сводится к определению смещения \mathbf{x} электрона под действием внешнего поля \mathbf{E} . Поле световой волны будем считать функцией частоты ω , т. е. изменяющимся по гармоническому закону: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos \omega t$.

Электронная теория дисперсии света.

Уравнение вынужденных колебаний электрона для простейшего случая (без учета силы сопротивления и связанной с ней поглощения энергии падающей волны) запишется в виде $\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t = \frac{e}{m} E_0 \cos \omega t$,

где $F_0 = eE_0$ — амплитудное значение силы, действующей на электрон со стороны поля волны, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ собственная частота колебаний электрона, m — масса электрона. Решив уравнение (5*), найдем $\varepsilon = n^2$ в зависимости от констант атома (e, m, ω_0) и частоты ω внешнего поля, т.е. **решим задачу дисперсии**. Решение уравнения (5*) можно записать в виде 6* где

$x = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t$, представляя (6*) и (7*) в (8*), получим

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

Если в веществе имеются различные заряды e_i , совершающие вынужденные колебания с различными собственными частотами ω_{0i} , то

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\varepsilon_0} \sum_i \frac{e_i^2/m_i}{\omega_{0i}^2 - \omega^2}$$

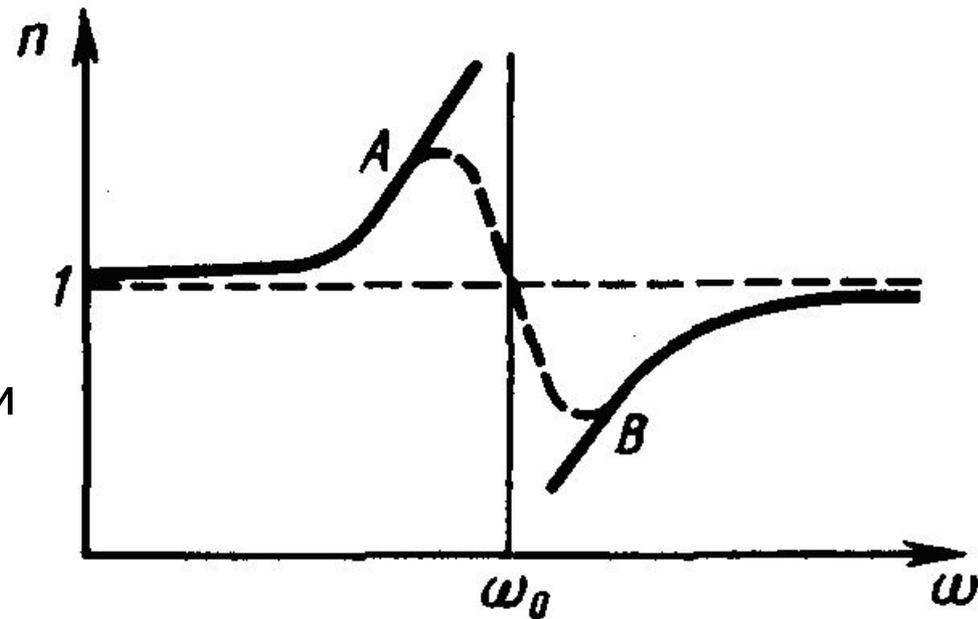
— масса i -го заряда.

Из выражений (8*) и (9*) вытекает, что показатель преломления n зависит от частоты ω внешнего поля, т. е. полученные зависимости действительно подтверждают явление дисперсии света, хотя и при указанных выше допущениях, которые мы сейчас постараемся устранить.

Электронная теория дисперсии света.

Из выражений (8*) и (9*) следует, что в области от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_0$ n^2 больше единицы и возрастает с увеличением ω (нормальная дисперсия); при $\omega = \omega_0$ $n^2 = \pm\infty$; в области от $\omega = \omega_0$ до $\omega = \infty$ n^2 меньше единицы и возрастает от $-\infty$ до 1 (нормальная дисперсия).

Переходя от n^2 к n , получим, что график зависимости n от ω имеет вид, изображенный на рисунке. Такое поведение n вблизи ω_0 — результат допущения об отсутствии сил сопротивления при колебаниях электронов. Если принять в расчет и это обстоятельство, то график функции $n(\omega)$ вблизи ω_0 будет иметь вид штриховой линии АВ. Область АВ — область аномальной



дисперсии (n убывает при возрастании ω), остальные участки зависимости n от ω описывают нормальную дисперсию (n возрастает с возрастанием ω).

Электронная теория дисперсии света

Российскому физику

Д. С. Рождественскому принадлежит классическая работа по изучению аномальной дисперсии в парах натрия.

Он разработал интерференционный метод для очень точного измерения показателя преломления паров и экспериментально показал, что

формула (9*) правильно характеризует зависимость n от удельного заряда частицы e/m ,

а также ввел в нее поправку, учитывающую квантовые свойства света и атомов.

