

# **Лекция №8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ.**

**Фазовая скорость и понятие дисперсии**

**Группа волн. Групповая скорость**

**Классическая теория дисперсии  
и поглощения**

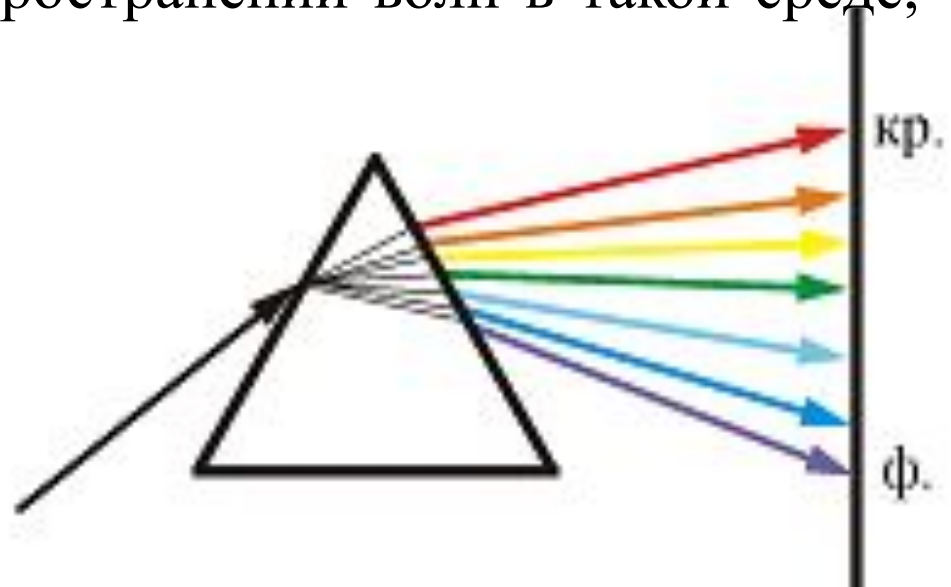
**Поглощение света. Закон Бугера**

**Рассеяние света. Закон Рэлея**

**Метаматериалы**

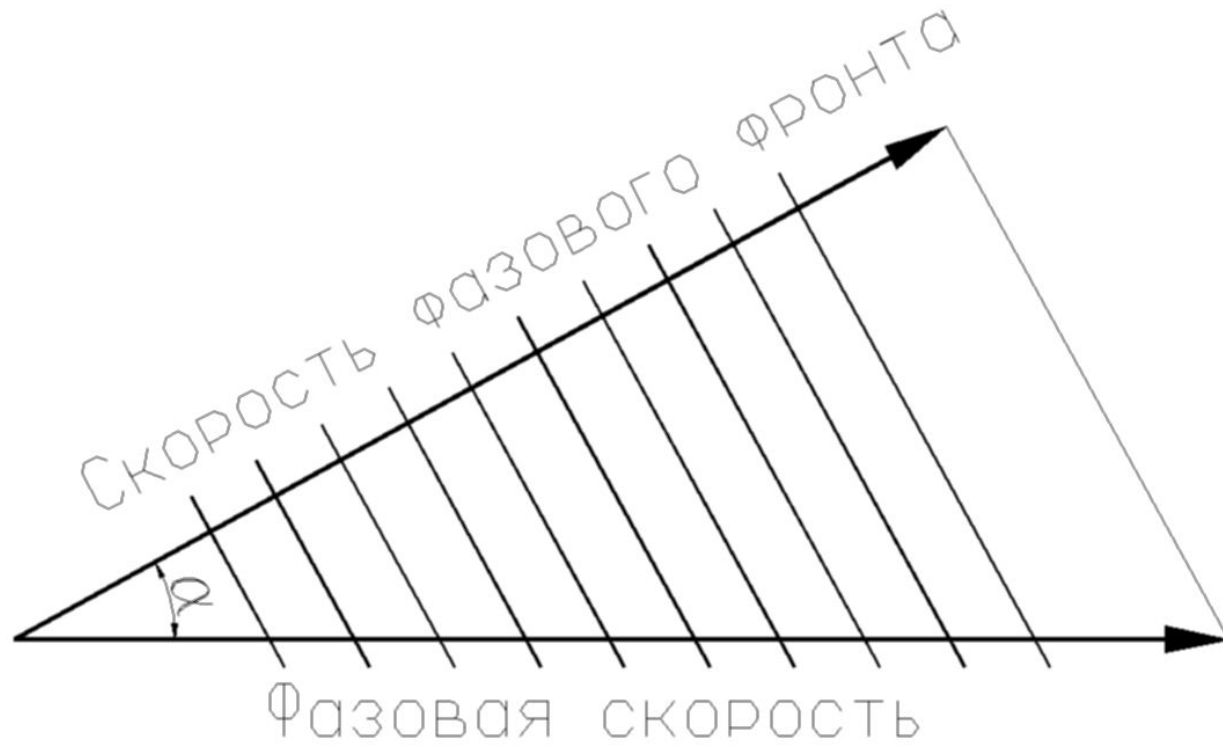
# Фазовая скорость и понятие дисперсии

- Известно, что показатель преломления определяется как  $n=c/v$ , где  $c$  – скорость света в вакууме;  $v$  – фазовая скорость монохроматической волны в оптически прозрачной среде. Волны с различными значениями  $\lambda$  распространяются в среде с разными фазовыми скоростями:  $n = n(\lambda)$ . В этом легко убедиться, например, в опыте по разложению белого света в спектр при прохождении стеклянной призмы (рис.). Среда, в которой  **$n$  зависит от  $\lambda$** , называется **диспергирующей**, а явления, наблюдаемые при распространении волн в такой среде, – **дисперсией волн.**



- **Фа́зовая ско́рость** — скорость перемещения точки, обладающей постоянной **фазой** колебательного движения в пространстве, вдоль заданного направления. Обычно рассматривают направление, совпадающее с направлением **волнового вектора**, и фазовой называют скорость, измеренную именно в этом направлении. (Т.е., если не указано направление, отличное от направления волнового вектора **Фазовая скорость по направлению волнового вектора совпадает со скоростью движения фазового фронта (поверхности постоянной фазы)**). Ее можно рассматривать при желании как векторную величину.
- Наиболее употребительное обозначение:

$$V_{\phi}$$



- **Фазовая скорость** вдоль направления, отклонённого от волнового вектора на угол  $\alpha$ . Рассматривается монохроматическая плоская волна.

# Фазовая скорость фигурирует в качестве параметра в выражении для плоской монохроматической волны (см. лекцию 2-3( Тема. Волны))

В случае плоской волны колебания напряженности  $\vec{E}$  электрического поля записываются в виде:

$$E = E_m \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) = E_m \cos(\omega t - kx),$$

где  $E_m$  - постоянная амплитуда; начальная фаза принята за нуль;  $k$  - волновое число, равное

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c} n \quad |$$

Фиксируя некоторое значение фазы  $\Phi_0 = const$ , получим уравнение плоской фазовой поверхности (поверхности постоянной фазы), перпендикулярной оси  $x$ :

$\omega t - kx = \Phi_0$ . Дифференцируя его, найдем выражение для фазовой скорости  $v_\Phi = \frac{dx}{dt}$ , как скорости

движения фазовой поверхности:  $v_\Phi = \frac{\omega}{k}$ .

**Понятие фазовой скорости применимо только к строго монохроматической волне с одной частотой, бесконечно протяженной в пространстве и во времени.**

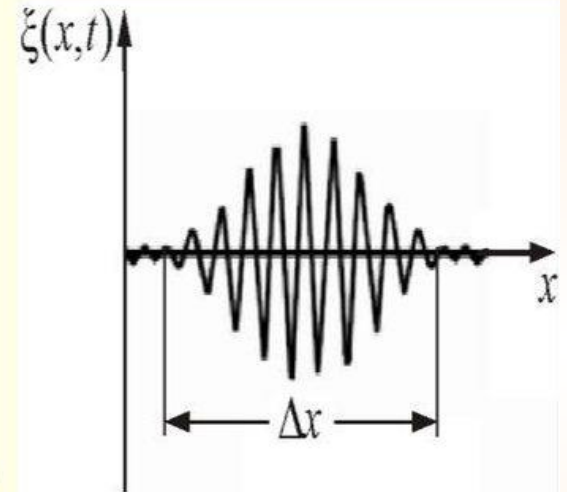
# Волновой пакет

## Волновой пакет

– Суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, называется **волновым пакетом** или группой волн.

– Скорость, перемещения центра (точка с максимальным значением  $A$ ), называется **групповой скоростью**  $u$ .

– Скорость перемещения пакета  $u$  совпадает с фазовой скоростью  $v$ , если нет зависимости в среде фазовой скорости от частоты (недиспергирующая среда).



# Группа волн. Групповая скорость

**Групповая скорость** — это величина, характеризующая скорость распространения «группы волн» - то есть более или менее хорошо локализованной квазимонохроматической волны (волны с достаточно узким спектром). Обычно интерпретируется как скорость перемещения максимума амплитудной оггибающей квазимонохроматического волнового пакета (или цуга волн).

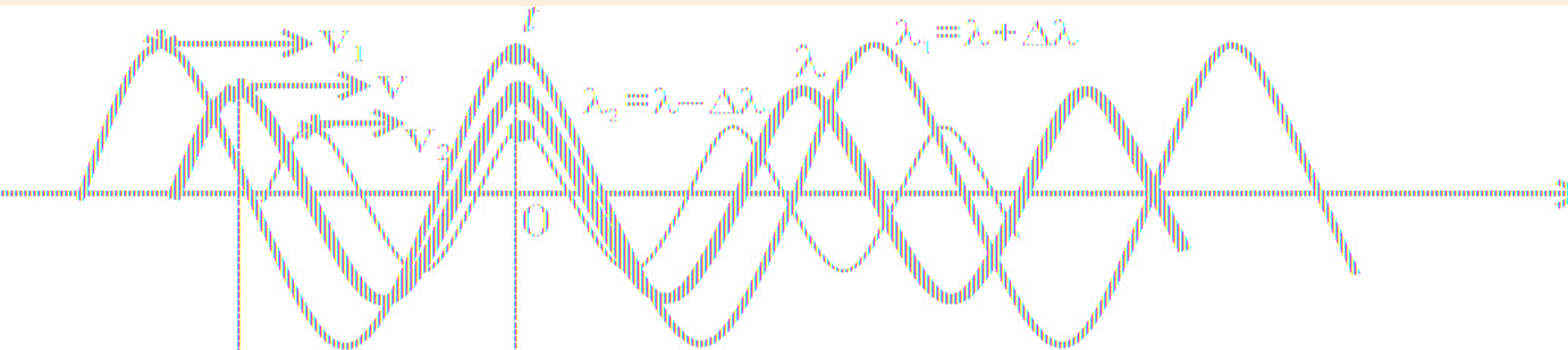
- **Групповая скорость** во многих важных случаях определяет скорость переноса энергии и информации квазисинусоидальной волной (хотя это утверждение в общем случае требует серьёзных уточнений и оговорок).
- Групповая скорость определяется динамикой физической системы, в которой распространяется волна (конкретной среды, конкретного поля и т.п).
- В большинстве случаев подразумевается линейность этой системы (точно или приближенно).
- Для одномерных волн групповая скорость вычисляется из закона дисперсии:

$$v_{gp} = v - \frac{\lambda}{\tau} = v - \frac{dv}{d\lambda} \lambda \quad \text{или} \quad v_{gp} = \frac{d\omega}{dk}$$

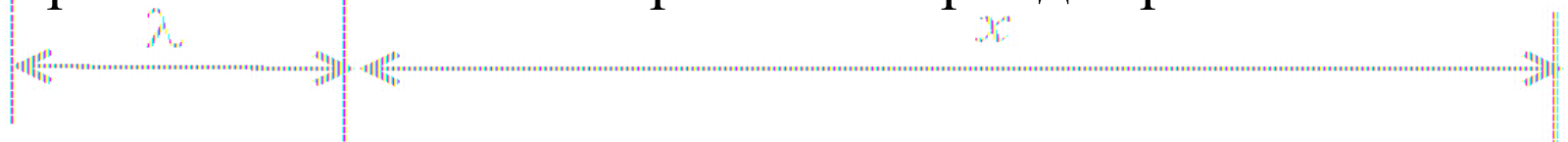


# Группа волн. Групповая скорость

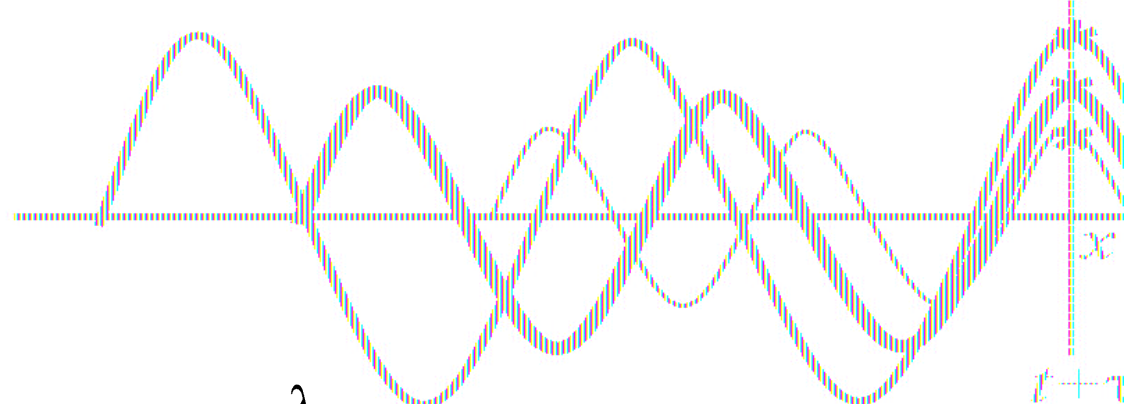
$$v_1(\lambda + d\lambda) > v(\lambda) > v_2(\lambda - d\lambda)$$



За время  $\tau$  волна с  $\lambda$  со скоростью  $v$  пройдет расстояние



$$v_{gp} = v - \frac{\lambda}{\tau}$$



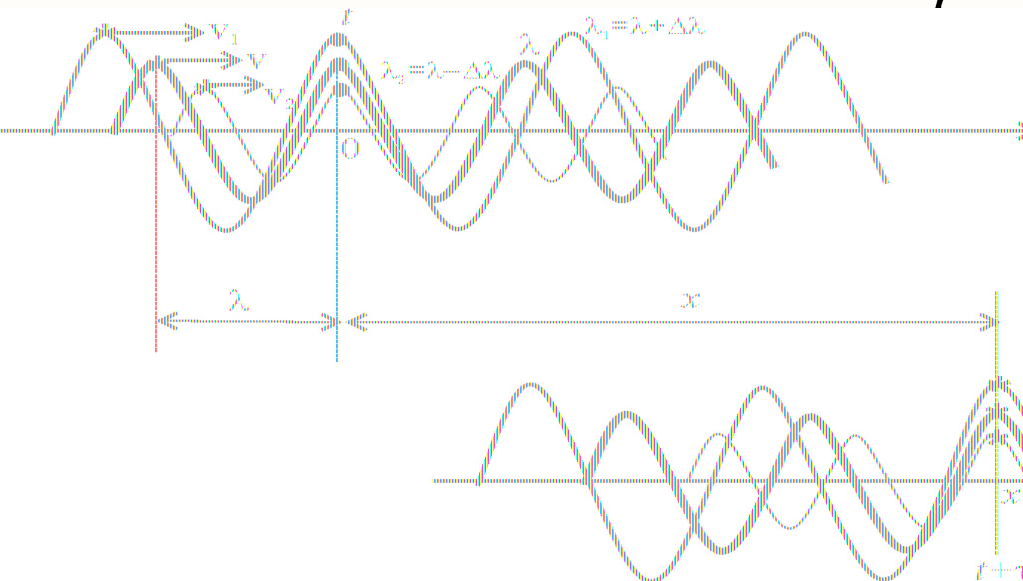
$$x + \lambda = v\tau; x = v\tau - \lambda = \left(v - \frac{\lambda}{\tau}\right)\tau = v_{gp}\tau$$

Время  $\tau$  можно определить из условия, что координаты гребней, обозначенных крестиками, в момент времени  $t+\tau$  совпадают:

$$v_1\tau - \lambda_1 = v_2\tau - \lambda_2; (v + dv)\tau - (\lambda + d\lambda) = (v - dv)\tau - (\lambda - d\lambda), \frac{1}{\tau} = \frac{dv}{d\lambda}$$

Для групповой скорости  $V_{gp} = \frac{x}{\tau}$  имеем:

$$V_{gp} = v - \frac{\lambda}{\tau} = v - \frac{dv}{d\lambda} \lambda$$



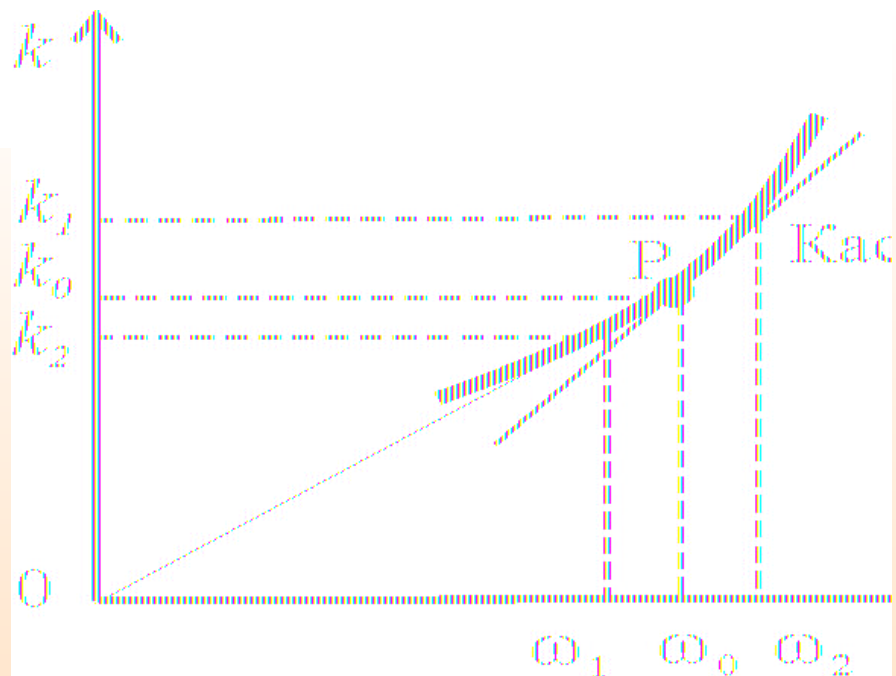
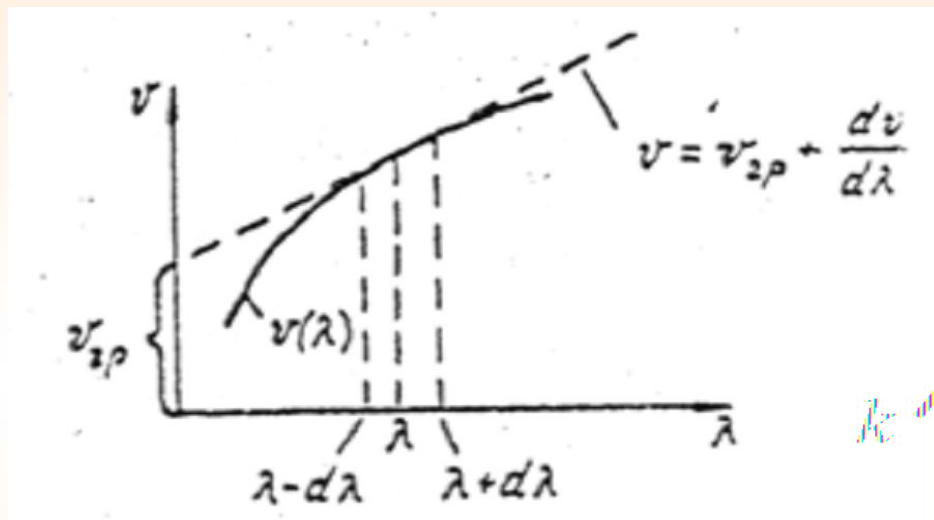
- Из этих результатов просматривается следующая картина распространения группы волн. Возмущение с максимальной энергией движется вдоль оси  $x$ , но его форма непрерывно изменяется. Однако по истечении времени  $t$  возмущение принимает форму, почти совпадающую с исходной, но за это время оно проходит расстояние  $x = v_{gr} t$ . **Происходит и передача энергии возмущения.** Этот процесс периодически повторяется. Однако в этом процессе распространения не учтены искажения формы возмущения при каждом очередном восстановлении, связанные с приближенной заменой участка кривой отрезком прямой. Если возмущение распространяется достаточно долго, то малые искажения будут накапливаться и настолько сильно исказят его форму, что само возмущение потеряет всякое сходство с исходным.

- Дисперсия волн (красные точки движутся со скоростью фазы, зелёные - с групповой скоростью). В данном случае фазовая скорость в два раза превышает групповую.



$$v_{gp} = v - \frac{\lambda}{\tau} = v - \frac{dv}{d\lambda} \lambda$$

**Формула Рэлея**



# Классическая теория дисперсии и поглощения (СРС)

Известно, что на заряд  $q$ , находящийся в электрическом поле напряженности, действует сила  $F = qE$

Под действием переменного электрического поля волны

$$E = Ae^{i(\omega t - kx)} = E_0(x)e^{i\omega t}$$

электроны вещества совершают вынужденные колебания. Смещение электронов относительно массивных положительно заряженных ядер приводит к возникновению индуцированной поляризации и дипольного момента атома  $P = qr(t)$

Дипольный момент единицы объема вещества (вектор поляризации) равен  $P = Nqr$ , где  $N$  – число атомов-осцилляторов в единицах объема;  $q$  – заряд электрона.

Известно, что вектор поляризации связан с напряженностью соотношением:

$$P = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E$$

Запишем уравнение вынужденных колебаний электрона

$$m \ddot{r} = -fr - g \dot{r} + qE; \quad \ddot{r} + 2\beta \dot{r} + \omega_0^2 r = \frac{qE}{m}$$

Частное решение  $r = r_0 e^{i\omega t} = \frac{q/m}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\beta\omega} E_0$

$$\varepsilon = 1 + \frac{Nq^2 / \varepsilon_0 m}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i2\beta\omega}$$

$$n^* = n - i\gamma$$

$$E = Ae^{i(\omega t - kx)} = Ae^{i(\omega t - \frac{\omega}{v^*}x)} = Ae^{i(\omega t - \frac{\omega}{c}n^*x)} = [Ae^{-\frac{\omega}{c}\gamma x}]e^{i(\omega t - \frac{\omega}{c}nx)}$$

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды

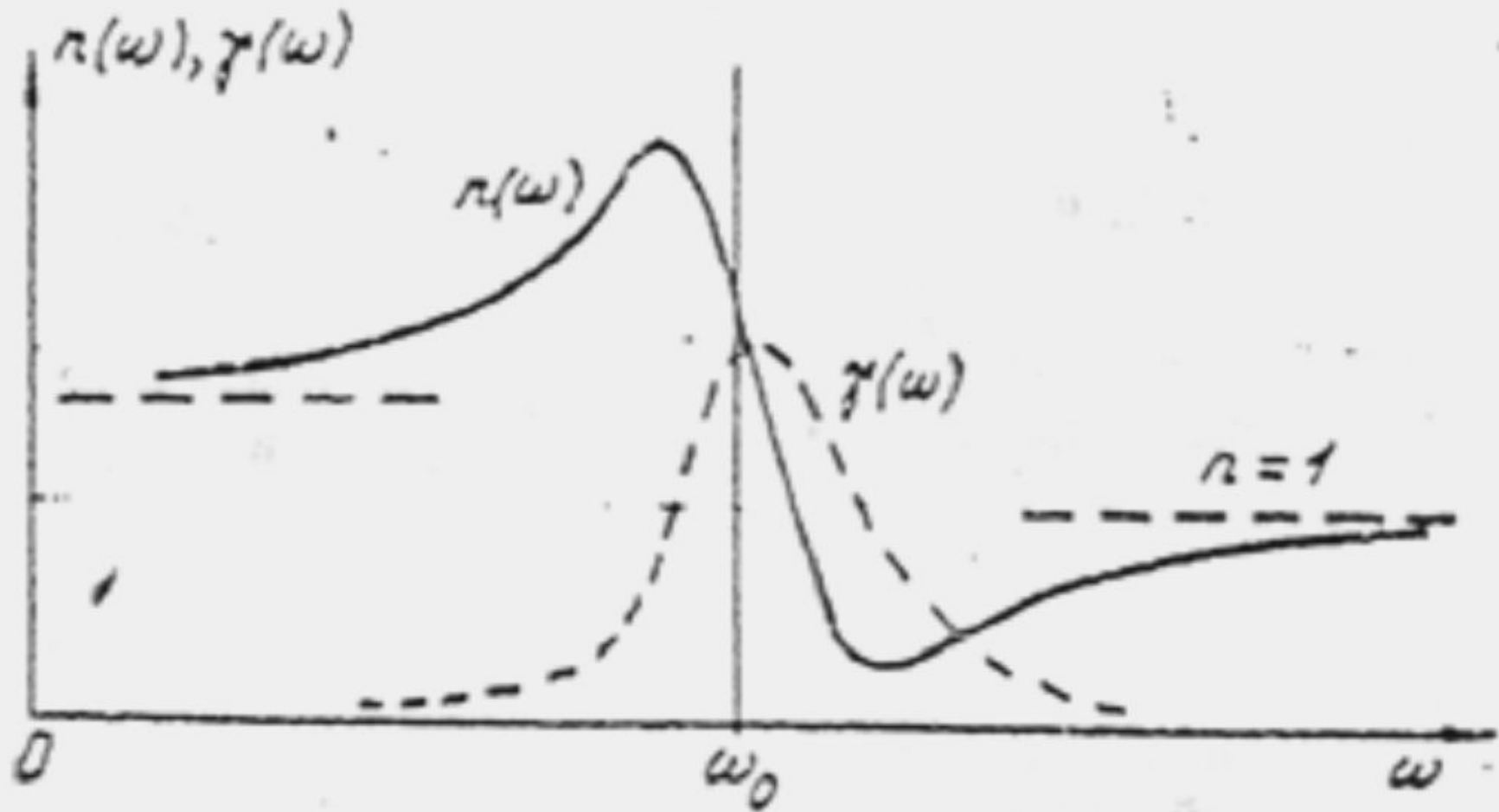
$$I_0 \sim A_0^2$$

$$I = I_0 e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma x} = I_0 e^{-\alpha x}$$

$\alpha = 2\frac{\omega}{c}\gamma$  характеризует потерю энергии электромагнитной волны и называется коэффициентом поглощения

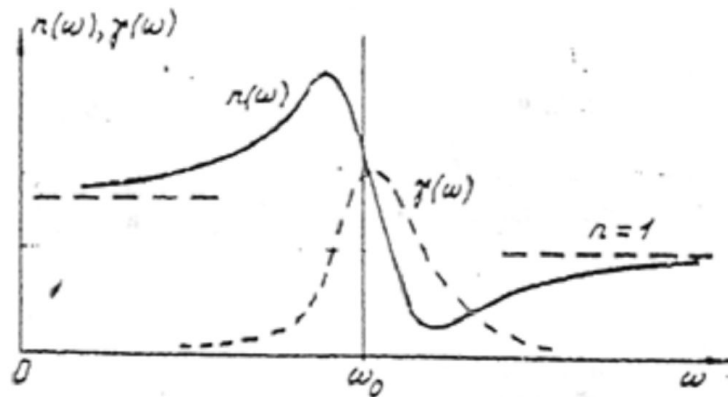


$$n^2 - \gamma^2 = 1 + N \frac{q^2}{\epsilon_0 m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta\omega^2}; n\gamma = N \frac{q^2}{\epsilon_0 m} \frac{\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta\omega^2}$$



В зависимости от знака величины  $\frac{dn}{d\omega}$  (или  $\frac{dn}{d\lambda}$ ), называемой дисперсией вещества, возможны три случая:

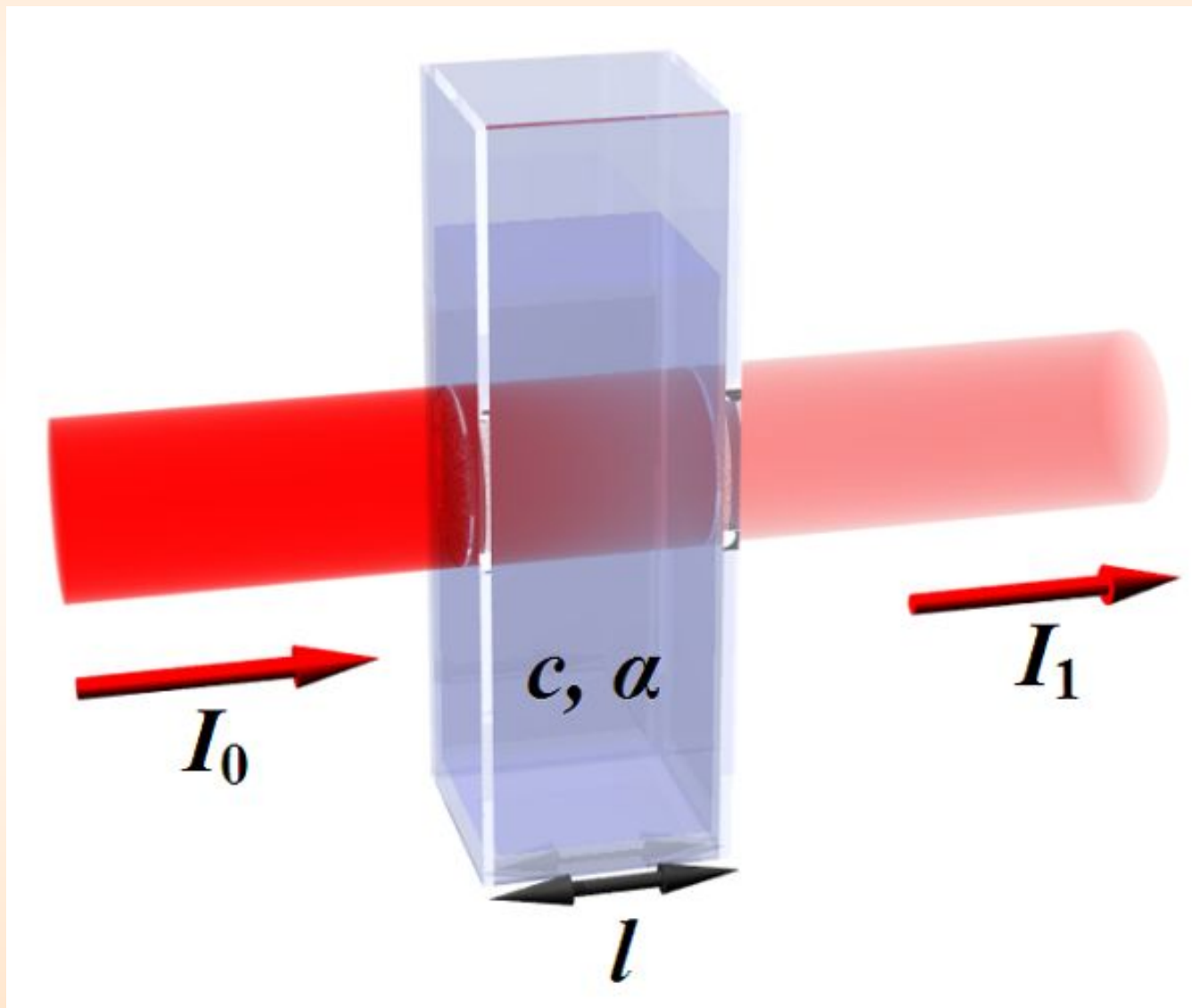
- 1) среда без дисперсии ( $\frac{dn}{d\omega} = 0$ ), для которой  $v = \frac{\omega}{k} = const$  и  $v_{gp} = v$ ; примером может служить свободное пространство (вакуум) для световых волн;
- 2) область нормальной дисперсии, где  $\frac{dn}{d\omega} > 0$  ( $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ ) и  $v_{gp} < v$ ; нормальной дисперсией обладают многие прозрачные бесцветные вещества (такие, как стекло) в видимой части спектра;
- 3) область аномальной дисперсии, где  $\frac{dn}{d\omega} < 0$ ; такая дисперсия наблюдается вблизи собственных частот  $\omega_0$ , при которых происходит резонансное поглощение энергии волн веществом. В области аномальной дисперсии понятие групповой скорости теряет смысл вследствие сильного поглощения.



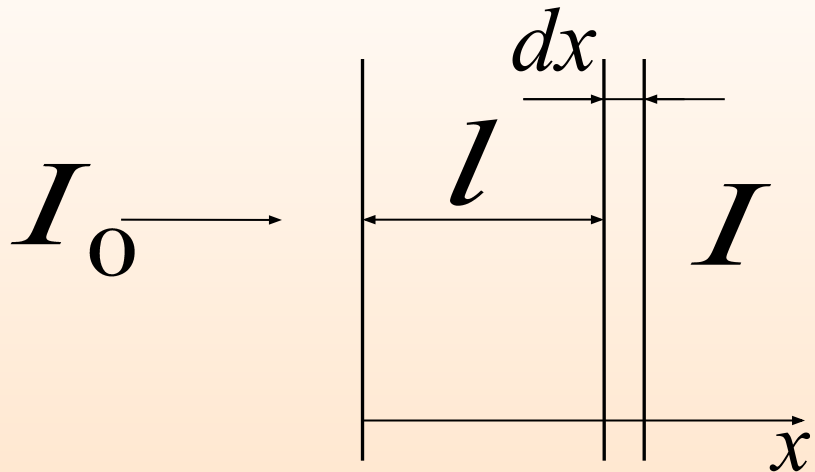
# Поглощение света. Закон Бугера

- Под действием электрического поля световой волны с круговой частотой  $\omega$  отрицательно заряженные электроны атомов и молекул смещаются относительно положительно заряженных ядер, совершая гармоническое колебательное движение с частотой, равной частоте действующего поля. Колеблющийся электрон, превращаясь в источник, сам излучает вторичные волны. В результате интерференции падающей волны со вторичной в среде возникает волна с амплитудой, отличной от амплитуды вынуждающего поля. Поскольку интенсивность есть величина, прямо пропорциональная квадрату амплитуды, то соответственно изменится и интенсивность излучения, распространяющегося в среде; другими словами, не вся поглощённая атомами и молекулами среды энергия возвращается в виде излучения – произойдёт поглощение. Поглощённая энергия может превратиться в другие виды энергии. В частности, в результате столкновения атомов и молекул поглощённая энергия может превратиться в энергию хаотического движения – тепловую

# Закон Бугера



- Выберем систему координат. Поместим начало координат на лицевой поверхности среды, направим ось  $y$  параллельно этой поверхности, а ось  $x$  - вдоль направления распространения света. Выделим в веществе бесконечно тонкий слой толщиной  $dx$ . Очевидно, что уменьшение интенсивности света в слое толщиной  $dx$  будет пропорционально величина интенсивности падающего на этот слой света и толщине поглощающего слоя, т. е.

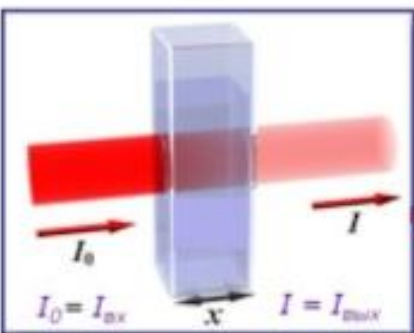


$$dI = -\alpha I dx$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^l \alpha dx.$$

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

## Закон поглощения света – закон Бугера



$$\ln I \Big|_{I_0}^I = -k x \Big|_0^x \Rightarrow \ln I - \ln I_0 = \ln \frac{I}{I_0} = -kx \Rightarrow \frac{I}{I_0} = e^{-kx}$$

- **закон Бугера** для:

$$I = I_0 e^{-kx}$$

- 1) прозрачных,
- 2) нерассеивающих и
- 3) нефлюоресцирующих сред любой концентрации

**Интенсивность  $I$  света, прошедшего через среду:**

- 1) прямо пропорциональна интенсивности падающего света  $I_0$ ,
- 2) уменьшается по экспоненте с увеличением толщины среды  $x$

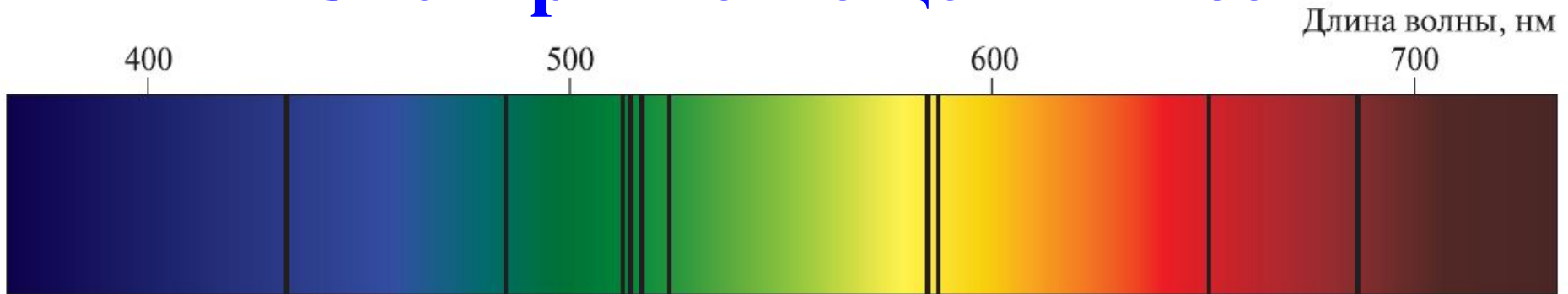
$k$  - **показатель поглощения**, в обратные метрах ( $\text{м}^{-1}$ )

**Зависит:** 1) от природы вещества и 2) длины волны падающего излучения, но **от интенсивности не зависит**

Зависимость  $k=f(\lambda)$  **индивидуальна** для каждого вещества и **определяет его спектр поглощения**

Физический смысл **показателя поглощения  $k$**  - это величина, обратная толщине вещества  $x$ , при которой интенсивность  $I$  прошедшего света **уменьшается в  $e$  раз**.  $e \approx 2,7$

# Спектры поглощения газов



## Линии поглощения (фраунгоферовы линии в спектре Солнца)

В качестве примера можно упомянуть, что для поисков следов жизни на планетах, вращающихся вокруг звезд, необходимо зарегистрировать линии поглощения воды, кислорода, углекислого газа и озона, присутствие которых может свидетельствовать о наличии условий для появления жизни.

Чтобы отсеять свет звезд, мешающих наблюдению, исследования проводят в ИК-диапазоне ( $\lambda = 7 - 20$  мкм). В этой области находятся полоса поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  вблизи  $\lambda = 8$  мкм, линия поглощения  $\text{O}_3$  с  $\lambda = 9,6$  мкм и  $\text{CO}_2$  с  $\lambda = 15$  мкм.

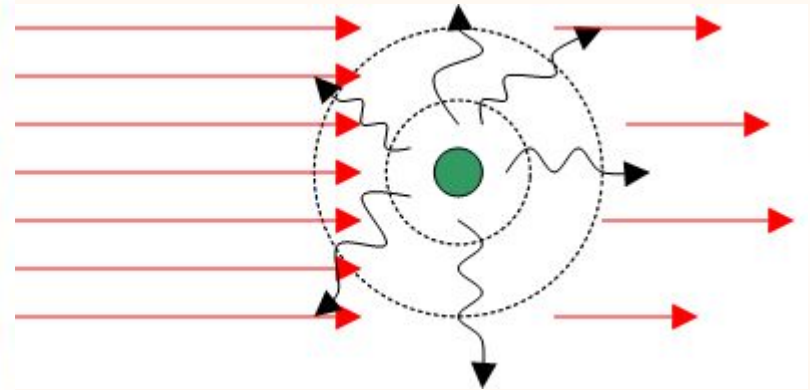
Например, спектрометр, установленный на борту летательного космического аппарата, регистрирует в спектре поглощения атмосферы Земли сильную полосу поглощения паров воды, линию озона (свидетельство большого количества кислорода) и углекислого газа.

Хорошо известно, что в Солнечной системе атмосфера, помимо Земли, сохранилась у Марса и Венеры. В спектрах поглощения атмосфер этих планет первые две линии поглощения отсутствуют.

# Рассеяние света

Изменение характеристик потока оптического излучения, **перераспределение интенсивности света по направлениям** при его взаимодействии с веществом называют **рассеянием света**.

Во многих случаях оказывается достаточным описание рассеяния света в рамках волновой теории излучения. С точки зрения этой теории электрическое поле распространяющейся в веществе световой волны раскачивает входящие в состав атомов и молекул электроны, и они становятся центрами вторичных сферических волн, излучаемых во все



стороны. Поэтому распространение света в веществе должно, казалось бы, всегда сопровождаться рассеянием. Однако в прозрачной однородной среде плоская волна распространяется только в одном направлении, не испытывая рассеяния в стороны. Такой результат сложения всех вторичных волн обусловлен их *когерентностью*.



С макроскопической точки зрения рассеяние света может быть обусловлено только *неоднородностями* среды. При слабых нарушениях однородности рассеянный в стороны свет составляет лишь малую долю первичного пучка. Параллельный пучок света в высококачественном стекле или тщательно очищенной воде почти не виден при наблюдении сбоку, т.е. свет почти не рассеивается в стороны. В то же время пучок света отчетливо виден со всех сторон, если в воде содержатся мельчайшие пузырьки воздуха или капельки другой нерастворимой жидкости, находящиеся во взвешенном состоянии. Рассеяние света происходит и тогда, когда сами частицы имеют размеры, меньшие длины волны видимого света. Такие среды называют мутными. Основные закономерности рассеяния света в мутных средах были впервые экспериментально исследованы Тиндалем в 1869 г. (Джон Тиндаль, английский физик, 1820–1893).

В качестве примера рассмотрим легко доступный для воспроизведения опыт. В стеклянную кювету, заполненную водой, добавляют несколько капель молока. При наблюдении сбоку рассеянный свет имеет более голубой оттенок, чем свет источника; свет, прошедший сквозь кювету, имеет при достаточной её толщине красноватый оттенок.

Если среда может рассматриваться как непрерывная, то рассеяние будет происходить на её оптических неоднородностях. В этом случае диэлектрическая проницаемость среды (показатель преломления) является функцией координат  $\varepsilon = \varepsilon(\vec{r})$  или  $n = n(\vec{r})$ . Тогда электромагнитная волна в среде будет определяться суперпозицией падающей и рассеянной волн:  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  и  $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}'$ . Для сплошной среды рассеяние по своему физическому содержанию сводится к дифракции волн на неоднородностях среды.

Опыт показывает, что рассеяние света происходит не только в мутных средах, но и тщательно очищенных от посторонних примесей или включений жидкостях и газах. Рассеяние в чистом веществе, как правило, слабое, но, тем не менее, оно представляется принципиально важным явлением. Физическая причина оптической неоднородности в идеально чистых средах была указана польским физиком М. Смолуховским в 1908 г. (Мариан Смолуховский, польский физик, 1872–1917).

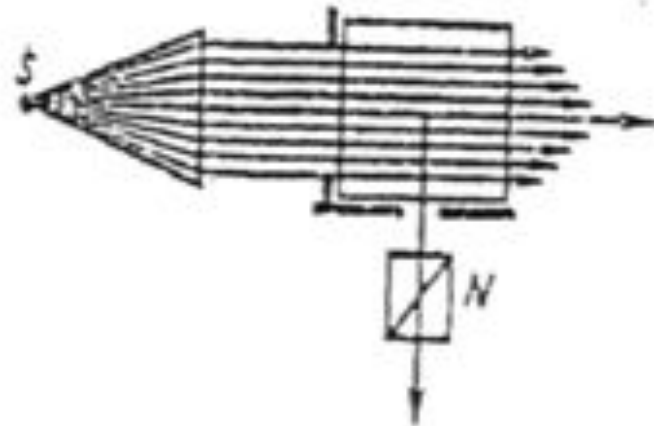
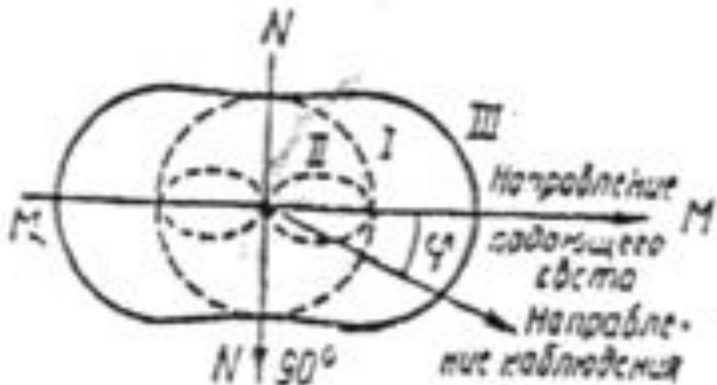
Из-за хаотического характера теплового движения молекул в среде возникают *флуктуации плотности* и, следовательно, флуктуации показателя преломления. Такой тип рассеяния света называют *молекулярным*.

*Упругое рассеяние*, т.е. такое, при котором рассеянный свет характеризуется той же частотой, что и падающее излучение. Различают несколько типов рассеяния, при этом характер рассеяния зависит от соотношения между длиной волны света  $\lambda$  и линейным размером частиц  $a$ .

- 1) *Рэлеевское рассеяние* - размеры частиц малы по сравнению с длиной волны:  $a \leq \frac{1}{15} \lambda$ . Это обычно рассеяние в мутных средах.
- 2) Если  $a > \frac{1}{15} \lambda$  - *рассеяние Ми* (Густав Адольф Ми, немецкий физик, 1868–1957).
- 3) Рассеяние на оптических неоднородностях – здесь много различных случаев. Среди них, например, важный случай рассеяния на оптических неоднородностях, создаваемых звуковой волной. Т.е. под ее воздействием возникает гармоническое распределение оптической неоднородности. В результате наблюдается дифракция света на волне, при этом наблюдается изменение частоты дифрагированного света. Это – явление Мандельштама – Бриллюэна (Леонид Исаакович Мандельштам, советский физик, 1879-1944; Леон Бриллюэн, французский физик, 1889-1969) – напоминает (и является следствием) доплеровского изменения частоты при отражении от акустической волны.
- 4) Специфическое рассеяние – *комбинационное рассеяние* или *Рамановское рассеяние* (Чандрасекхара Венката Раман, индийский физик, 1888–1970), характеризуется изменением частоты рассеянного света по сравнению с падающим. Это рассеяние носит квантовый характер.
- 5) Можно выделить *многократное рассеяние* – рассеяние в каждом из последовательных актов осуществляется по законам однократного рассеяния. Результат – рассматривается как сумма результатов однократных рассеяний с учетом статистических характеристик их следования друг за другом.

# Опыты Тиндала

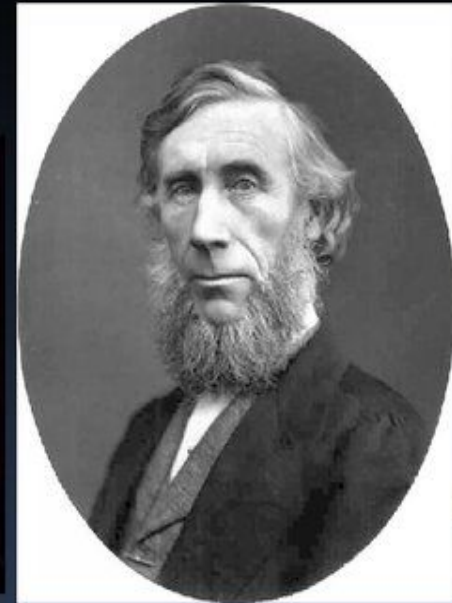
- Пропуская интенсивный пучок белого света вдоль оси стеклянной трубы, внутри которой находилось небольшое количество малых по сравнению с длиной волны видимого света, частиц, Тиндаль произвёл наблюдение рассеянного света под различными углами к направлению падающего света



- Тиндаль и ряд его последователей установили следующие закономерности:
- 1. Свет, рассеянный под углом к первичному пучку (в боковом направлении), обнаруживает сине – голубой оттенок, другими словами, рассеяние происходит преимущественно в коротковолновой части видимой области спектра;
- 2. Свет, рассеянный под прямым углом к первичному пучку естественного света, полностью (если рассеивающие частицы изотропные) или почти полностью линейно – поляризован;
- 3. Кривая распределения интенсивности рассеянного света в зависимости от угла рассеяния симметрична относительно направлений первичного пучка и перпендикулярного ему.

$$I_{\varphi} = I_{\pi/2} (1 + \cos^2 \varphi)$$

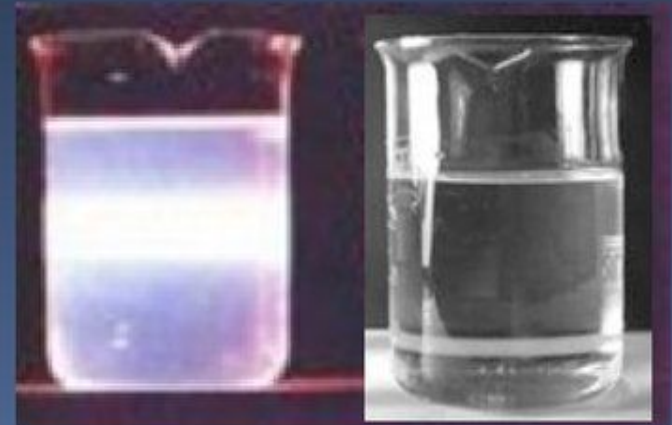
# Эффект Тиндала



John Tyndall

Эффект связан с рассеянием света

При освещении коллоидного раствора сбоку пучком света наблюдается яркий светящийся след — *конус Тиндала*, или *эффект Тиндала*).



в случае низкомолекулярного раствора жидкость кажется оптически пустой

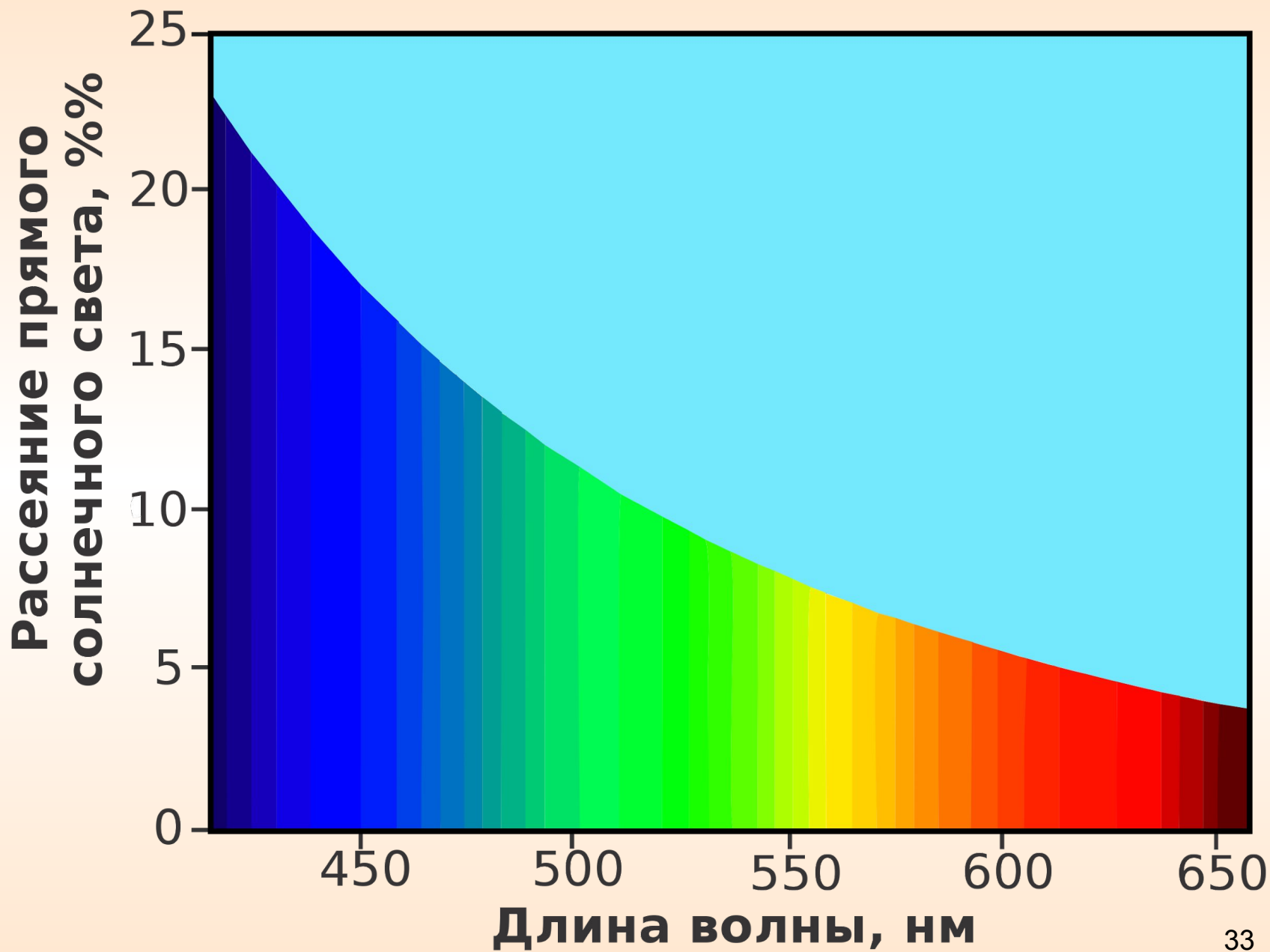
- **Рэлей** в 1889 году рассматривал задачу о распространении естественного света в сплошной среде с вкраплёнными в неё **частицами** сферической формы, размеры которых малы по сравнению с длиной волны света и **диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$**  отлична от **диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0$**  сплошной **среды**. Он получил следующие формулы для интенсивности рассеянного света:

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{9\pi^2 \epsilon_0^2 N_1^2 V_1^2}{r^2 \lambda^4} \left( \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + \epsilon_0} \right) (1 + \cos^2 \varphi)$$

$$I_{\phi} = I_0 \frac{9\pi^2 \varepsilon_0^2 N_1^2 V_1^2}{r^2 \lambda^4} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right) (1 + \cos^2 \phi) (*)$$

- где  $r$  – расстояние от рассеивающей частицы до точки наблюдения,  $N_1$  – число частиц в  $1 \text{ см}^3$ ,  $V$  – объём одной частицы,  $\phi$  - угол рассеяния. При выводе формулы Рэлей полагал, что вторичные волны, исходящие от разных рассеивающих свет частиц, взаимно когерентны, и поэтому при вычислении интенсивности рассеянного света он суммировал именно амплитуды рассеянных волн.
- Легко видеть из формулы (\*), что при  $\varepsilon = \varepsilon_0$  интенсивность рассеянного света  $I_{\phi} = 0$ , т. е. рассеяние света не имеет места если диэлектрические проницаемости частиц и окружающей среды совпадают, другими словами, если оптическая неоднородность (разность  $\varepsilon - \varepsilon_0$ ) отсутствует. Из формулы (\*) вытекают два очень важных вывода:
  - 1. Интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна шестой степени радиуса частицы.
  - 2. Интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны (закон Рэля).





Почему на закате Солнце  
красное?





Голубой цвет неба.

Цвет зари.



## Голубой цвет неба. Цвет зари.

- Как видно из закона Рэля, чем короче световые волны, тем сильнее они рассеиваются. Голубой цвет неба и красный цвет Солнца на восходе и на закате объясняются этой закономерностью, законом Рэля. Небо мы видим светлым (т. е. голубым) только благодаря рассеянию света в атмосфере. Поскольку интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны, то более интенсивное рассеяние произойдёт в коротковолновой части видимой области и поэтому небо примет голубой оттенок (точнее говоря, цвет неба будет обусловлен кроме закона Рэля также спектральным составом солнечного излучения и кривой спектральной чувствительности глаза).
- В случае, когда Солнце стоит низко над горизонтом, до нас доходят лучи света Солнца, ослабленные благодаря рассеянию при прохождении сквозь сравнительно большую толщу атмосферы. Поскольку рассеяние сильнее в коротковолновой части видимого спектра, то диск Солнца на восходе и закате мы видим красным.

# Рассеяние Ми (Gustav Mie) – на крупных частицах

*Слабо зависит от длины волны* для частиц радиусом  $a >$

$\lambda/15$ . Благодаря этому, голубое небо вблизи солнца кажется почти белым (одинаковое рассеяние на всех цветах сливается в белый).

При увеличении размеров частиц, например, в дождевых облаках, *индикатриса рассеяния Ми* вытягивается вперед, и окраска облаков меняется от белой в ясную погоду до темно серой перед дождем.

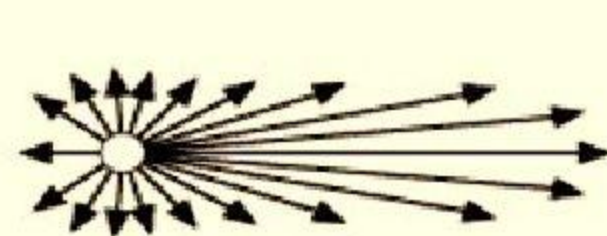
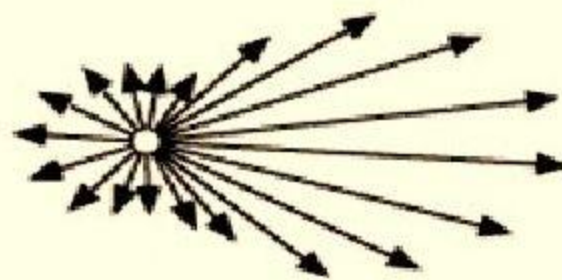
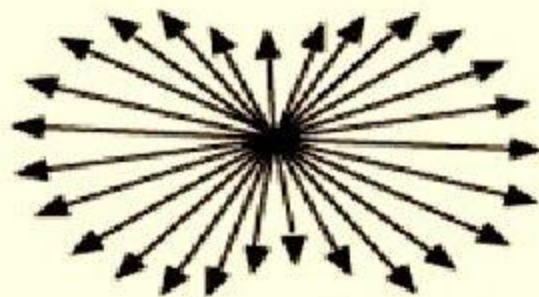
Очень крупные капли непрозрачны в направлении излучения.

## Рассеяние Ми

### Рассеяние Рэлея

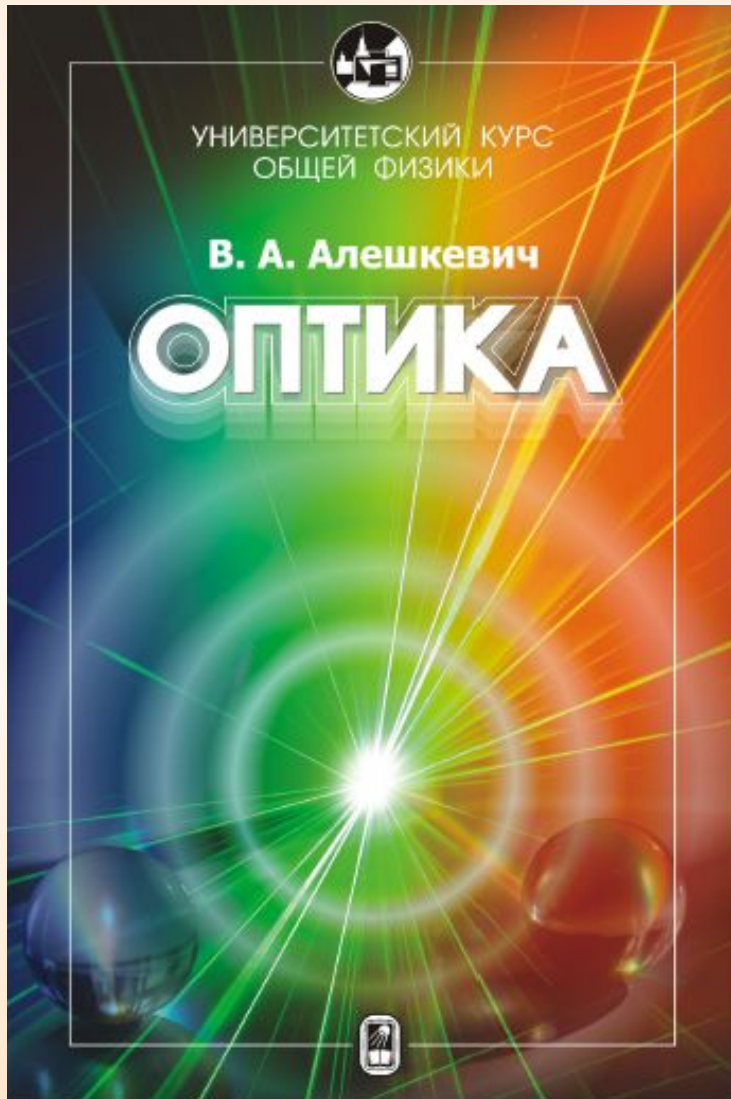
мелкие ч-цы

крупные ч-цы

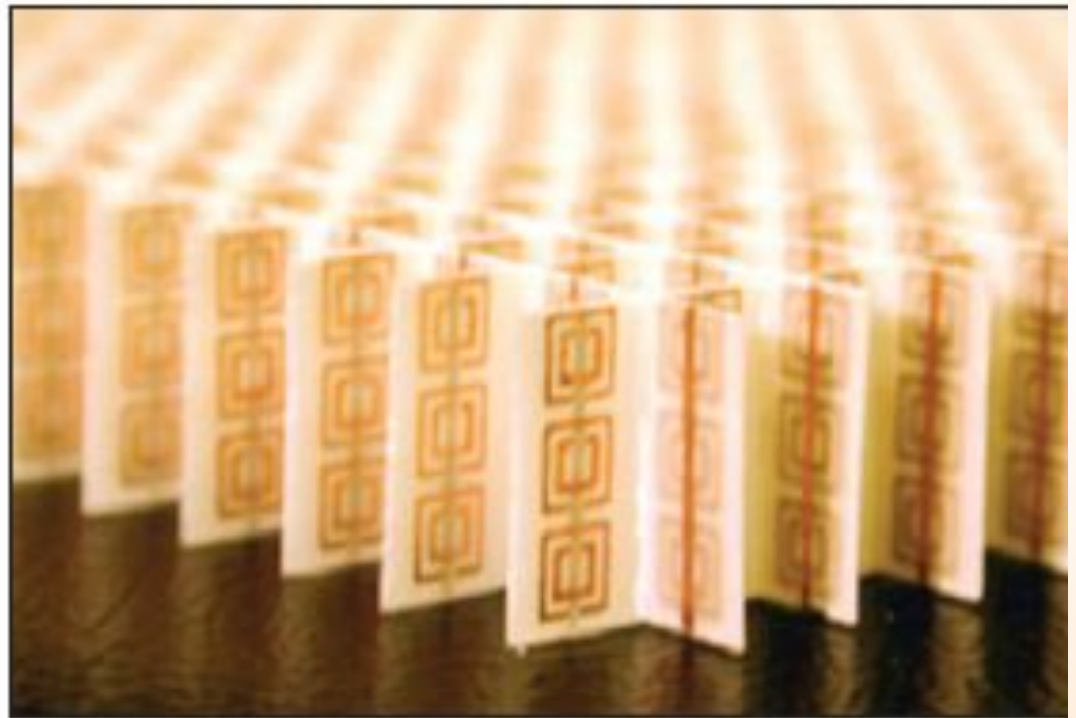


→ направление внешнего излучения

# Среды с отрицательным показателем преломления. Метаматериалы.

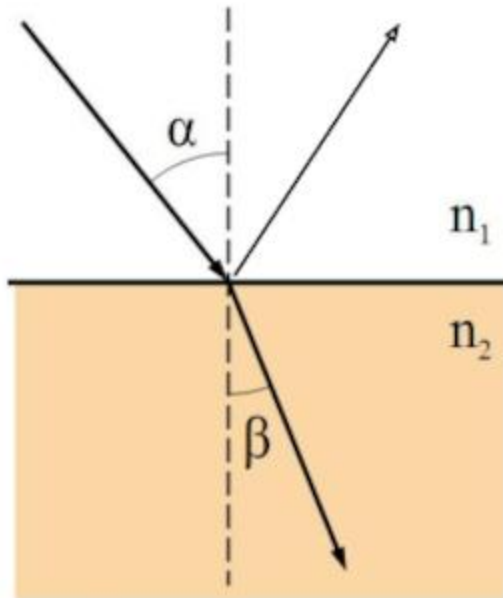


- Структура метаматериала



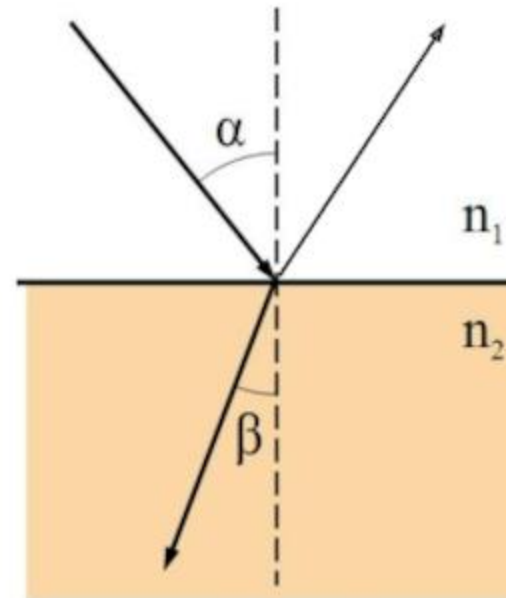
## Среды Веселаго

случай  $n_2 > 0$



случай  $n_2 < 0$

свет преломляется в ином направлении («отрицательном»)



ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ  
ПРЕЛОМЛЕНИЕ

## Метаматериалы



Фотография метаматериала с отрицательным показателем преломления

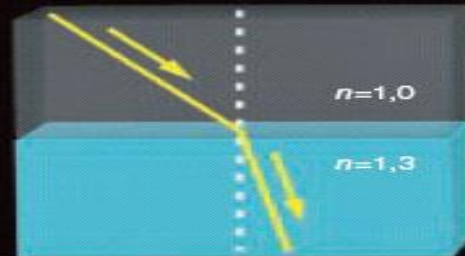
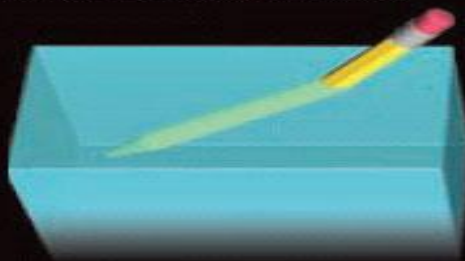


# СТРАННОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В среде с отрицательным показателем преломления свет (и все другие виды электромагнитного излучения) ведет себя не так, как в обычных материалах с положительным преломлением, причем во многих отношениях это поведение противоречит интуиции

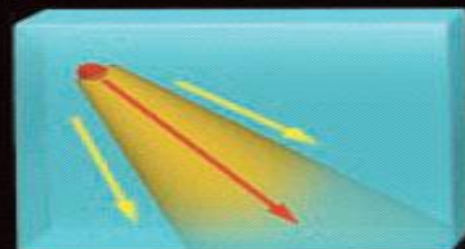
## СРЕДА С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш в воде кажется изогнутым из-за более высокого показателя преломления воды



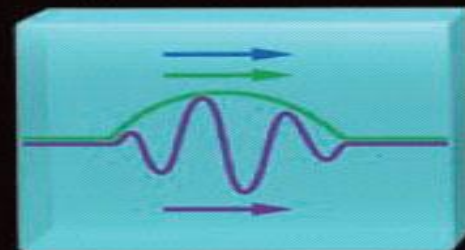
Когда свет переходит из среды с низким показателем преломления ( $n$ ) в среду с более высоким, он отклоняется в сторону нормали (пунктирная линия под прямым углом к поверхности раздела)

Удаляющийся объект кажется более красным из-за эффекта Доплера



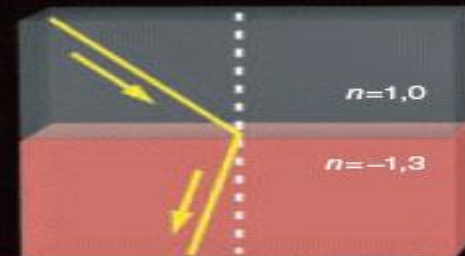
Заряженный объект (красный), движущийся быстрее скорости света, создает конус Черенковского излучения (желтый), направленный вперед

В среде с положительным показателем преломления отдельные максимумы электромагнитного импульса (фиолетовый) движутся в том же направлении, что и огибающая (зеленая) импульса и энергия (синяя)



## СРЕДА С ОТРИЦАТЕЛЬНОМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш, погруженный в среду с отрицательным преломлением, будет казаться изогнутым наружу



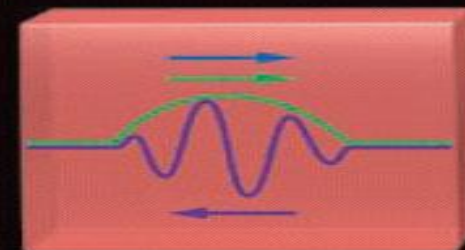
Когда свет идет из среды с положительным преломлением в среду с отрицательным, он отклоняется назад, оставаясь по ту же сторону нормали, что и падающий свет

Удаляющийся объект кажется более синим



Конус обращен назад

Отдельные всплески движутся в сторону, противоположную движению огибающей импульса и энергии



# СУПЕРЛИНЗА

Прямоугольный брусок из материала с отрицательным показателем преломления образует суперлинзу. Свет (желтые линии) от объекта (слева) преломляется на поверхности линзы и снова сходится, формируя перевернутое изображение внутри бруска. Выходя из него, свет преломляется снова и создает второе изображение (справа). Для некоторых метаматериалов изображение содержит детали, более мелкие, чем длина волны используемого света, что невозможно для линз с положительным преломлением

