

вторник, 1 ноября 2016 г.

Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры
ОФ ЕНМФ ТПУ

optcloud.ru

Тема 9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ

9.1. Дисперсия света

**9.2. Нормальная и аномальная
дисперсии**

9.3. Классическая теория дисперсии

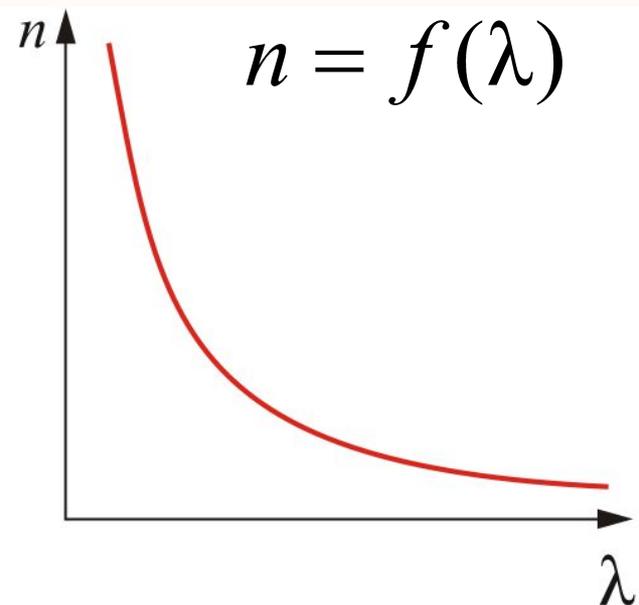
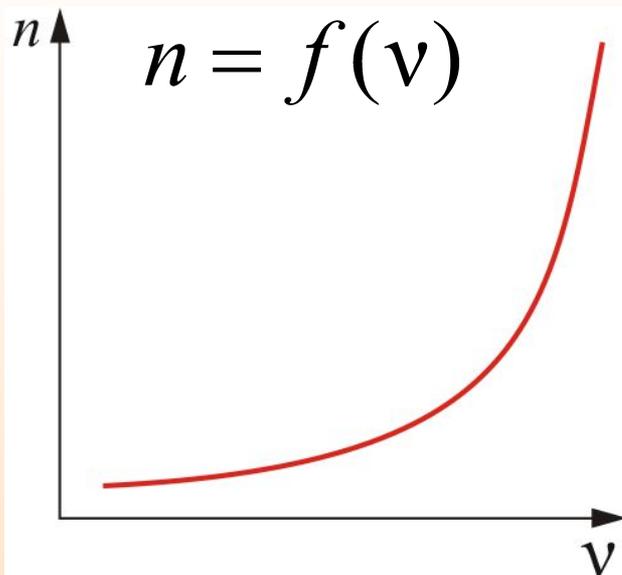
9.4. Поглощение (абсорбция света)

9.5. Излучение Вавилова-Черенкова

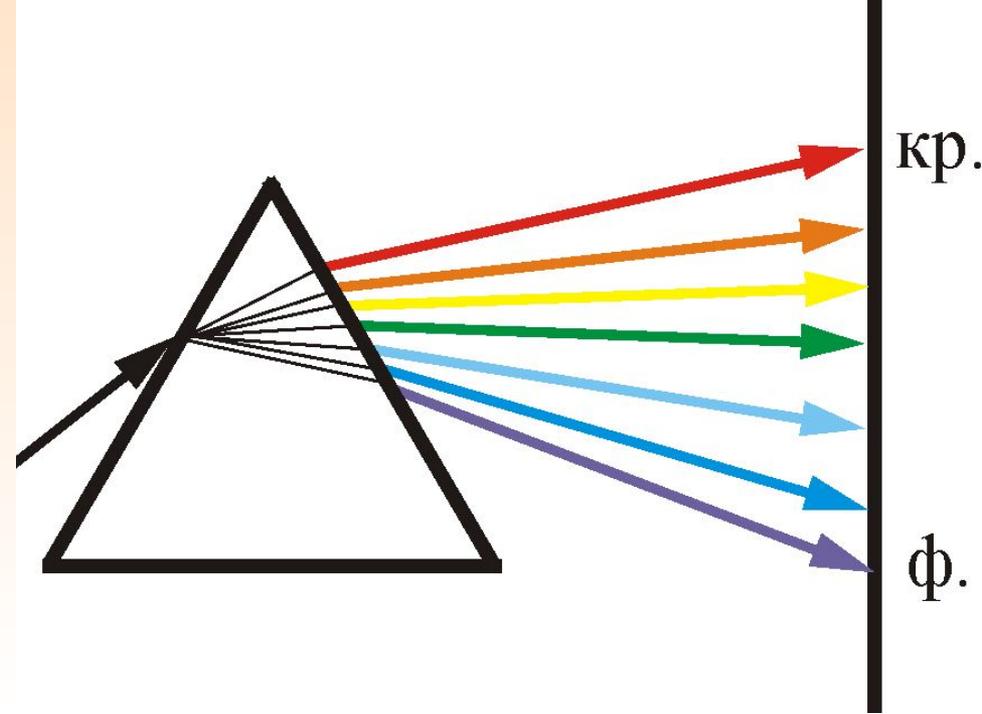
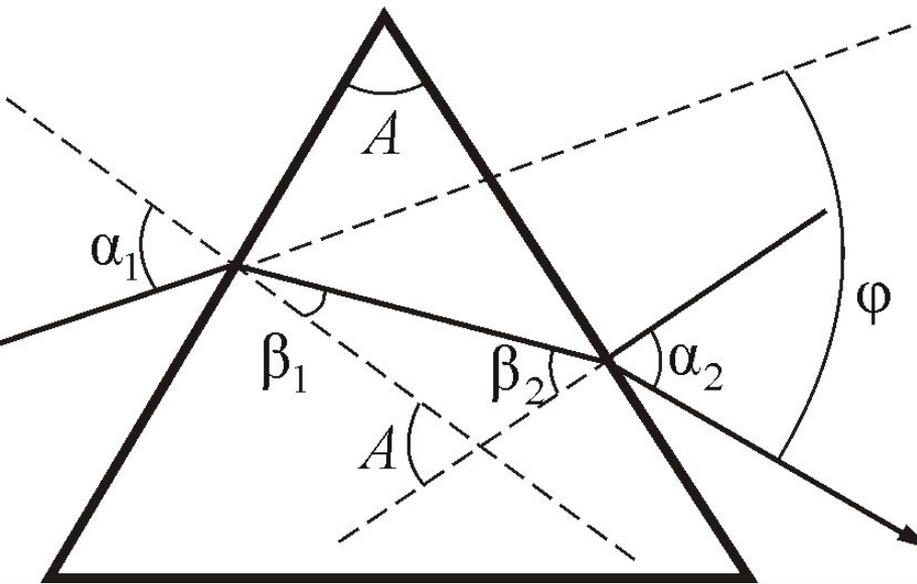
9.1. Дисперсия света

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (длины волн λ) света или зависимость фазовой скорости v световых волн от их частоты.

ИЛИ







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

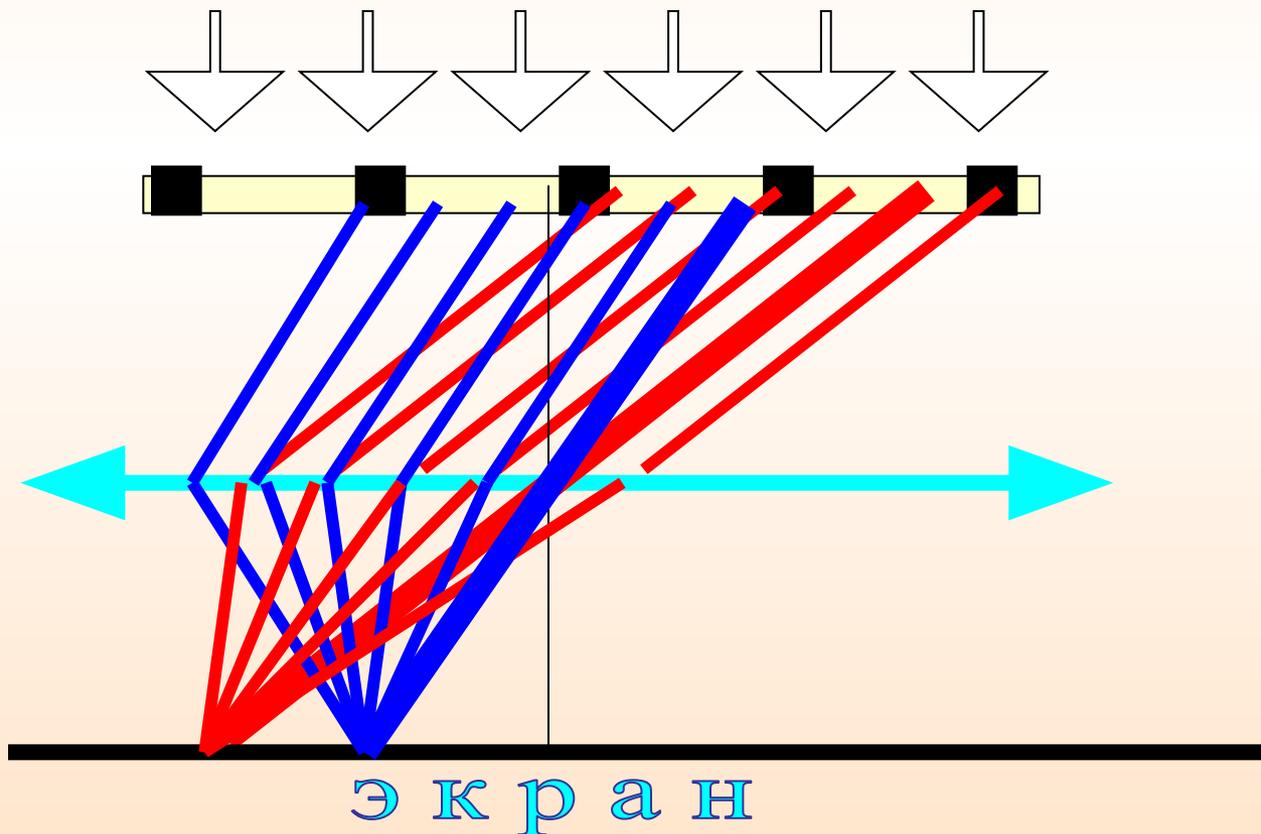
Угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше преломляющий угол призмы

*Лучи разных длин волн после прохождения призмы отклоняются на разные углы. **Пучок белого света** за призмой **разлагается в спектр**, который называется **дисперсионным** или **призматическим***

Дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие, причем из формулы $\sin \varphi = \frac{m\lambda}{d}$

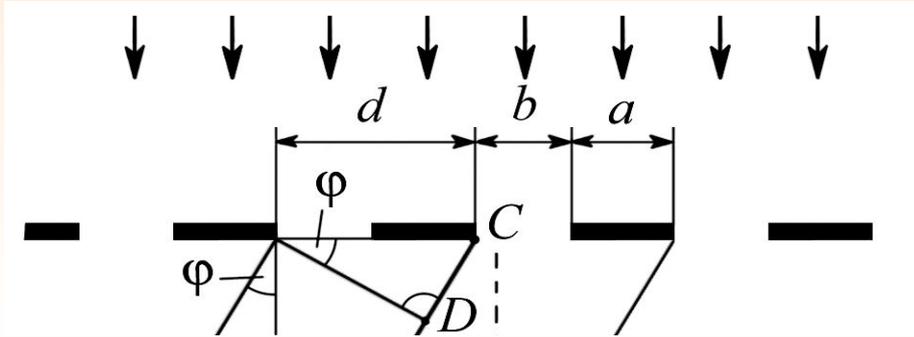
видно, что свет с большей длиной волны (красный) отклоняется на больший угол

(в отличие от призмы, где все происходит наоборот)



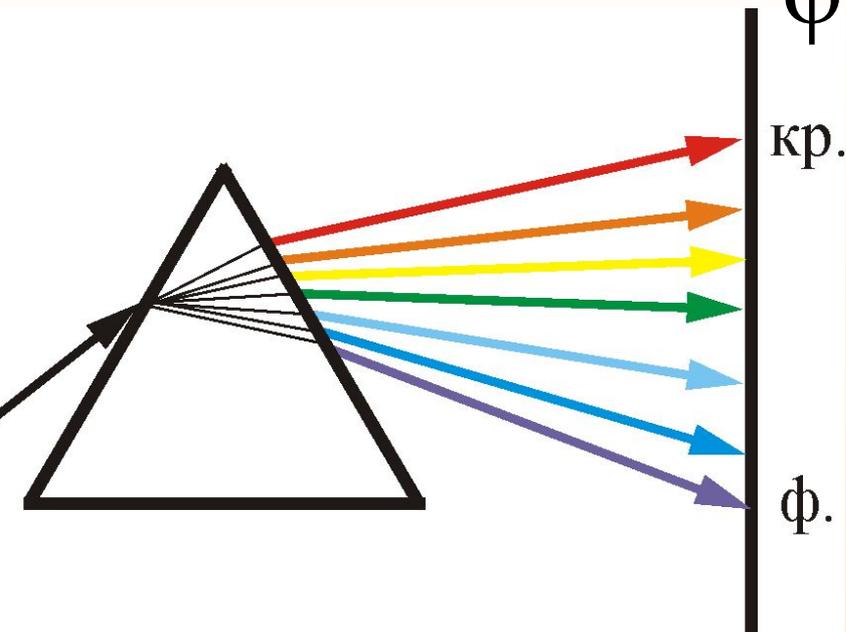
Различия в дифракционном и призматическом спектрах.

1) Дифракционная решетка разлагает свет непосредственно по длинам волн:

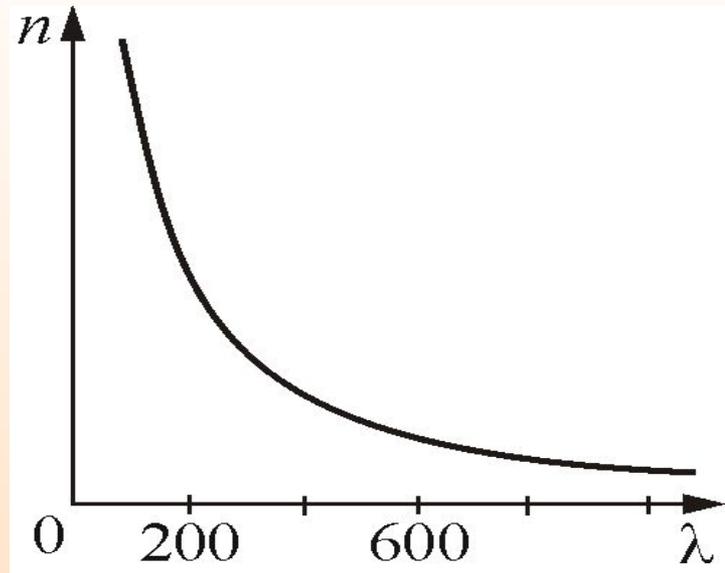


$$\sin \phi = \frac{m\lambda}{b}$$

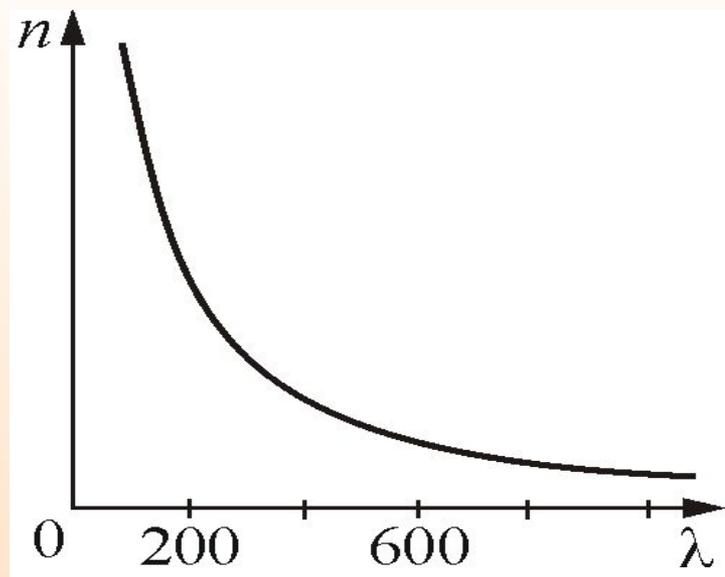
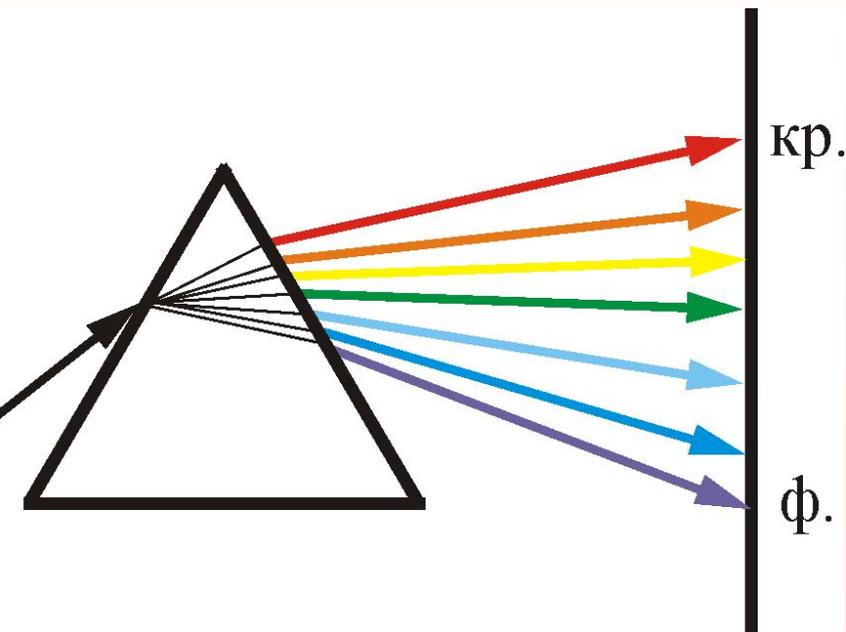
2) а призма – по показателям преломления:



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



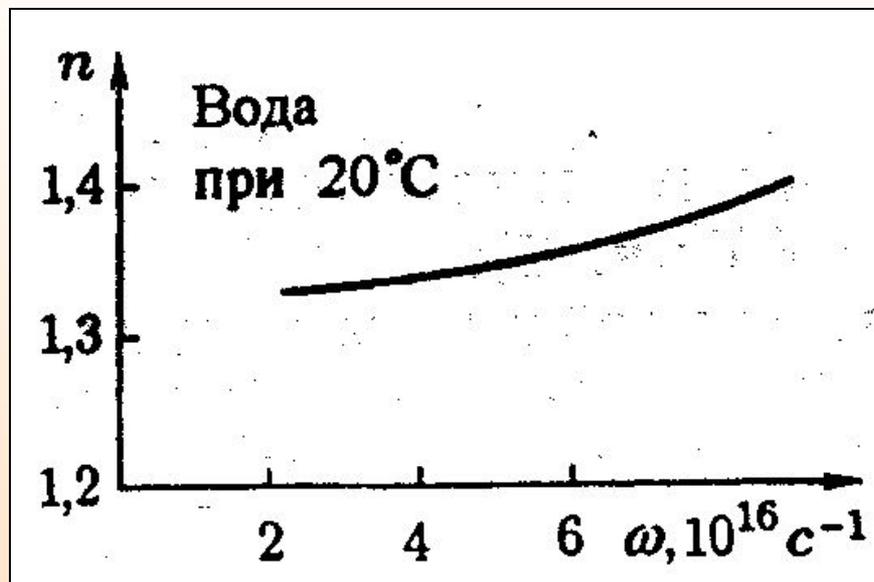
2) Составные цвета в дифракционном и призматическом спектрах располагаются различно: **красные лучи, имеющие большую длину волны, чем фиолетовые, отклоняются диф - решеткой сильнее, а в призме наоборот.**



Величина

$$D = \frac{dn}{d\lambda} \quad \text{или} \quad D = \frac{dn}{d\nu}$$

называемая **дисперсией вещества**, показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.



9.2. Нормальная и аномальная дисперсии

Области значения ν , в которых

$$\frac{dn}{d\nu} > 0 \quad \text{или} \quad \frac{dn}{d\lambda} < 0 \quad (9.2.1)$$

соответствует **нормальной дисперсии света** (с ростом частоты ν , показатель преломления n увеличивается).

Дисперсия называется аномальной, если

$$\frac{dn}{d\nu} < 0 \quad \text{или} \quad \frac{dn}{d\lambda} > 0 \quad (9.2.2)$$

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

Зависимости n от ν и λ

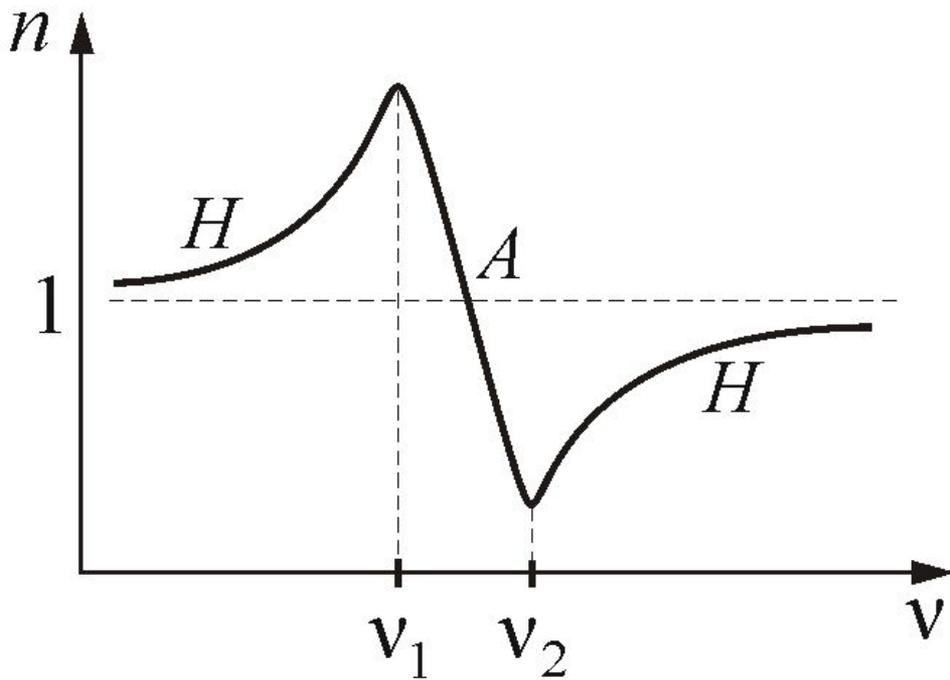


Рисунок 9.4.

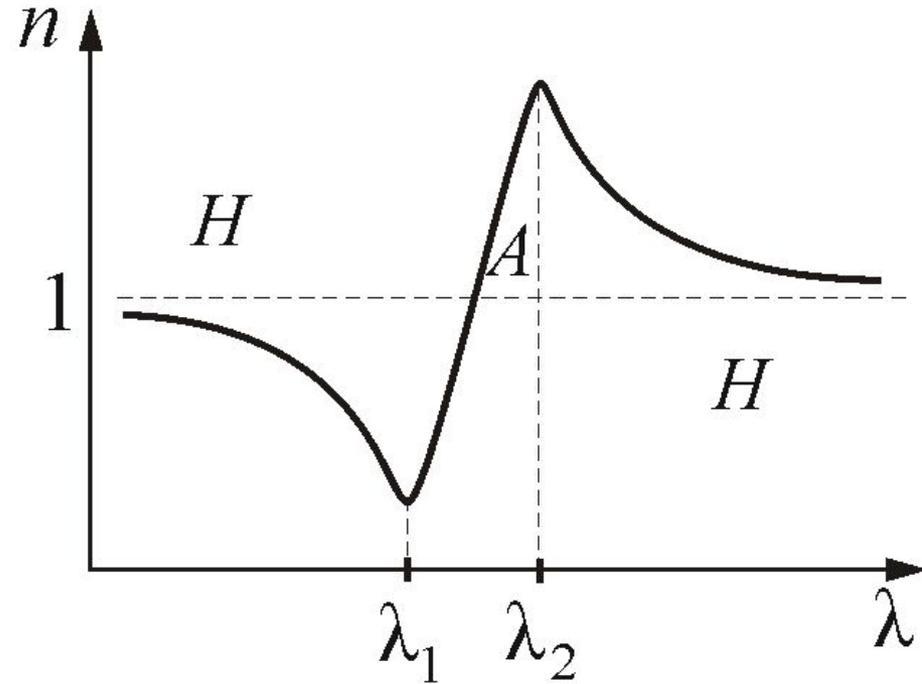


Рисунок 9.5

В *недиспергирующей среде* $u = v$

u – групповая скорость, v – фазовая скорость

$$u = \frac{d\omega}{dk}$$

$$u = \frac{v}{1 + \frac{v}{n} \frac{dn}{dv}} \quad (9.2.3)$$

Т.о., *при нормальной дисперсии* $u < v$, а

значит $u < c$ и $\frac{dn}{dv} > 0$

При *аномальной дисперсии*, т.к. $\frac{dn}{dv} < 0$ то $u > v$
и, в частности, если

$$n + v \frac{dn}{dv} < 1 \quad , \quad \text{то } \underline{u > c}$$

9.3. Классическая теория дисперсии

$E_m \ll E_A$ *линейная оптика* $E_m = 10 - 10^3$ В/м

Если $10^9 - 10^{11}$ В/м , то $E_m \geq E_A$

нелинейная оптика

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.

Он показал, что

$$n = \sqrt{\varepsilon}$$

и ε — тоже зависит от частоты.

Для видимого света $\nu \approx 10^{15}$ Гц существует

поляризация электрически упругого смещения.

Смещаются в основном валентные электроны.

В процессе *вынужденных* (под действием падающей световой волны) колебаний электронов с частотой ν (частота вынуждающей силы), *периодически изменяются* дипольные электрические моменты атомов, частота которых тоже равна ν .

Среднее расстояние между атомами вещества много меньше протяженности одного цуга волн. Следовательно, *вторичные волны, излучаемые большим числом соседних атомов, когерентны как между собой, так и с первичной волной.*

При сложении этих волн они интерферируют, в результате этой интерференции и получаются все наблюдаемые оптические явления, связанные со взаимодействием света с веществом.

Оптический электрон совершает вынужденные колебания под действием следующих сил:

- возвращающей квазиупругой силы $F_{\hat{a}} = -m\omega_0^2 r$
- силы сопротивления $F_{\text{тр}} = -2\beta m \frac{dr}{dt}$

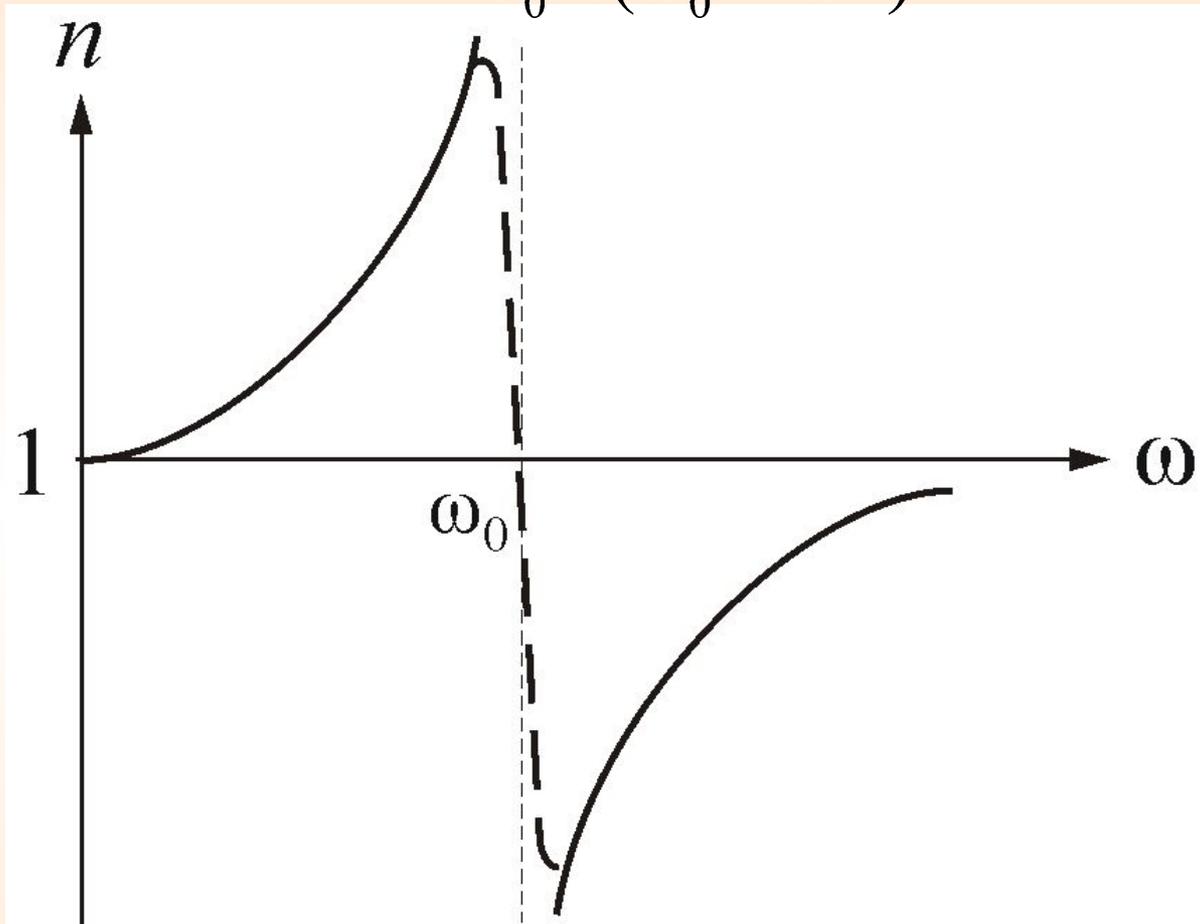
$$F = -eE$$

Диф. уравнение колебаний электрона:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + 2\beta \frac{dr}{dt} + \omega_0^2 r = -\frac{eE}{m} \quad (9.3.3)$$

- его решение: $r(t) = -\frac{(e/m)E(t)}{\omega_0^2 - \omega^2}$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (9.3.4)$$



n – показатель преломления вещества;

n_0 – число молекул в единице объема;

ω_0 – собственная частота k -го электрона в молекуле.

9.4. Поглощение (абсорбция света)

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

Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , имеем:

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

П. Бугер (1698 – 1758) – французский ученый

Закон Бугера:

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

J_0 – интенсивность волны на входе в среду,
 α – коэффициент поглощения

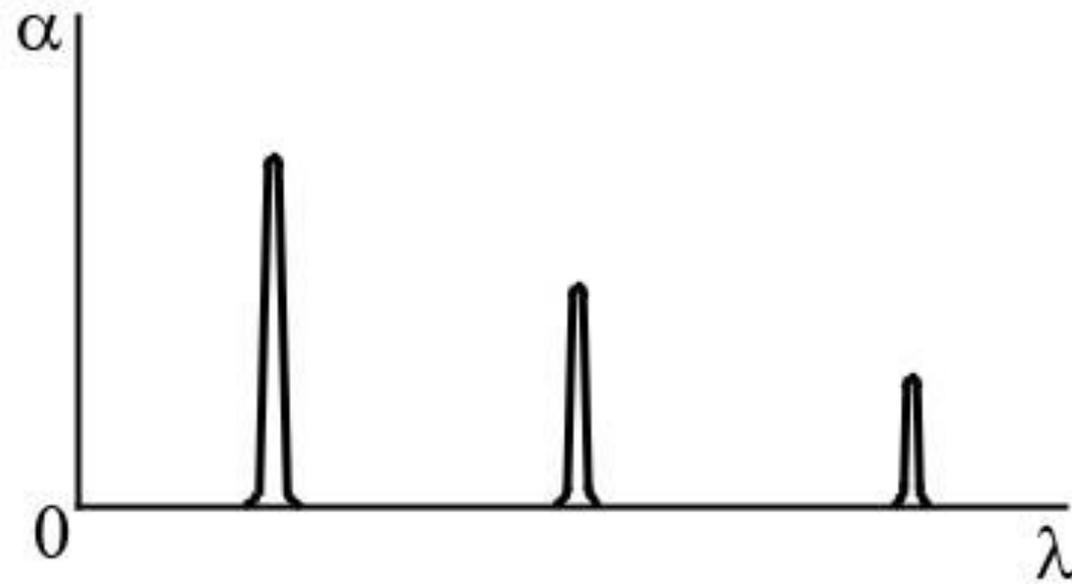
При $\alpha = 1/x$ $J = J_0 / e$

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

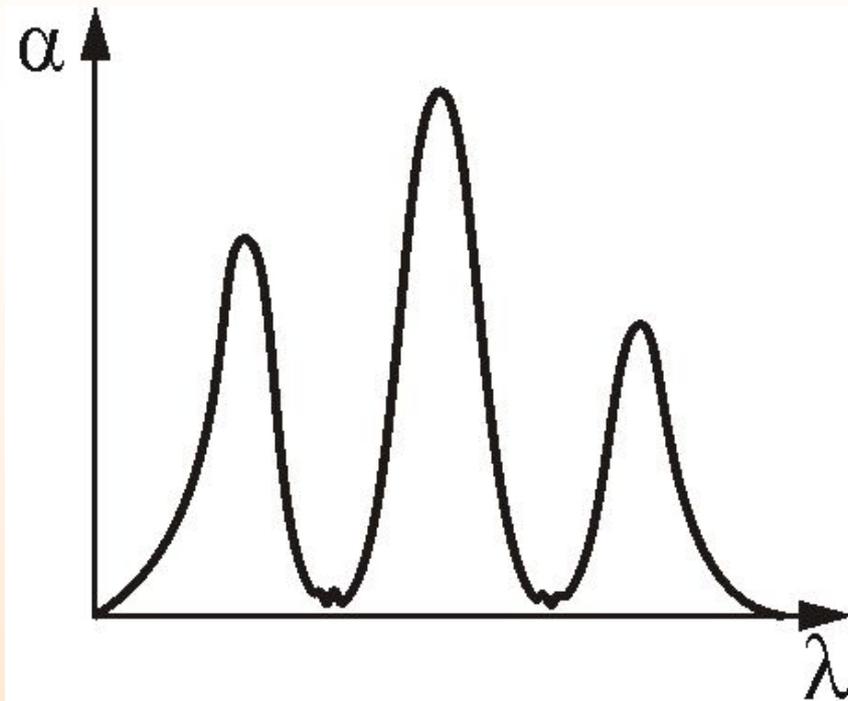


У веществ, атомы (молекулы) которых слабо взаимодействуют друг с другом (газы, пары металлов): $\alpha \neq 0$ в узком интервале длин волн (шириной $\sim 10^{-2}$ Å) — резкие максимумы, соответствующие резонансным частотам колебаний электронов внутри атомов.

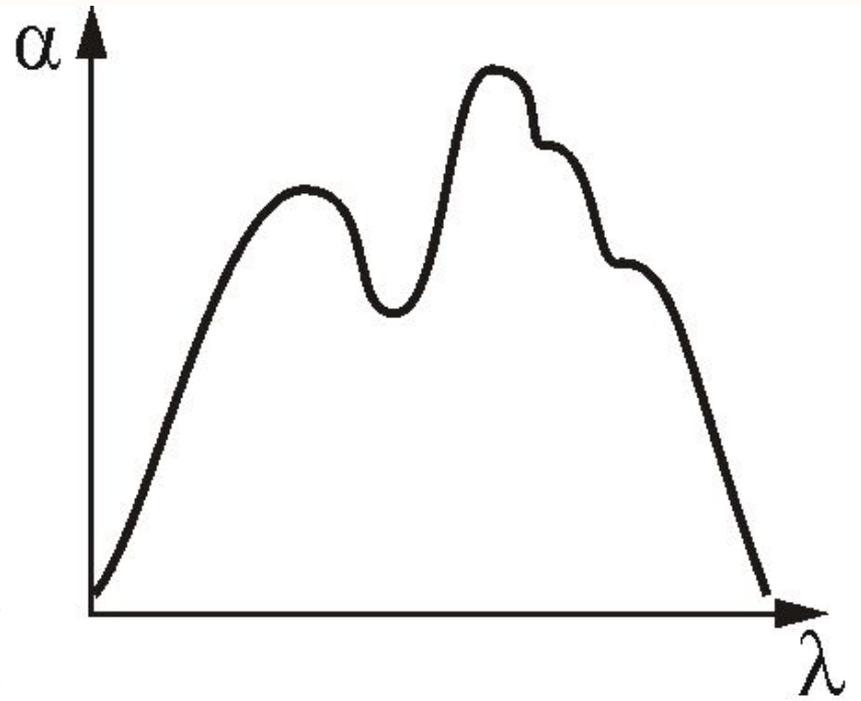
При увеличении давления газа полосы поглощения уширяются (рис. а).

В жидком состоянии они сливаются, и спектр поглощения принимает вид, показанный на рис.б.

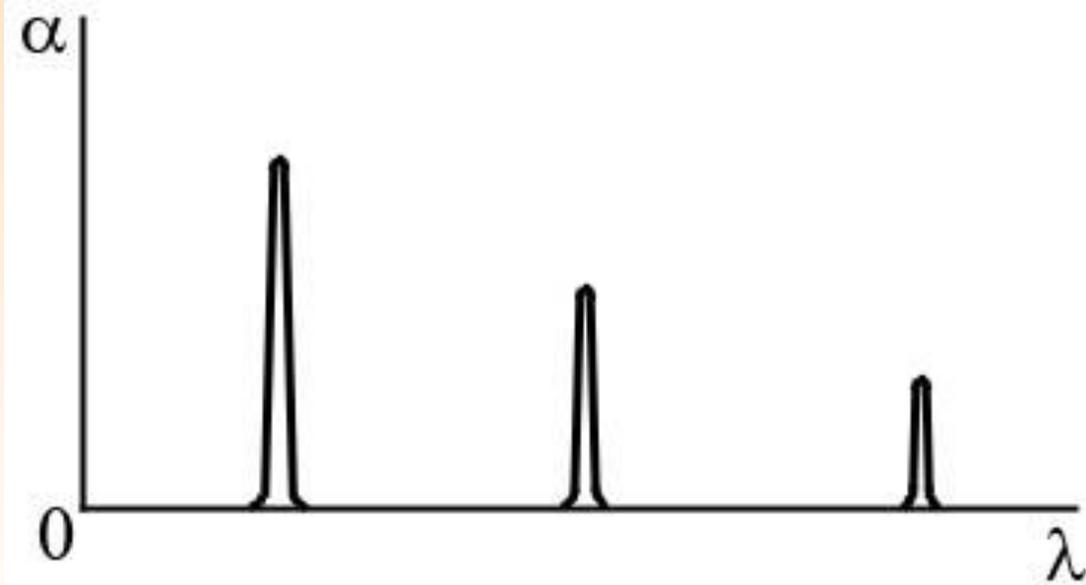
Причиной уширения является усиление связи атомов (молекул) в среде.



а



б



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 $^{-1}$)

Коэффициент поглощения ***для металлов*** имеет большие значения (примерно $10^3 - 10^4$ см $^{-1}$)

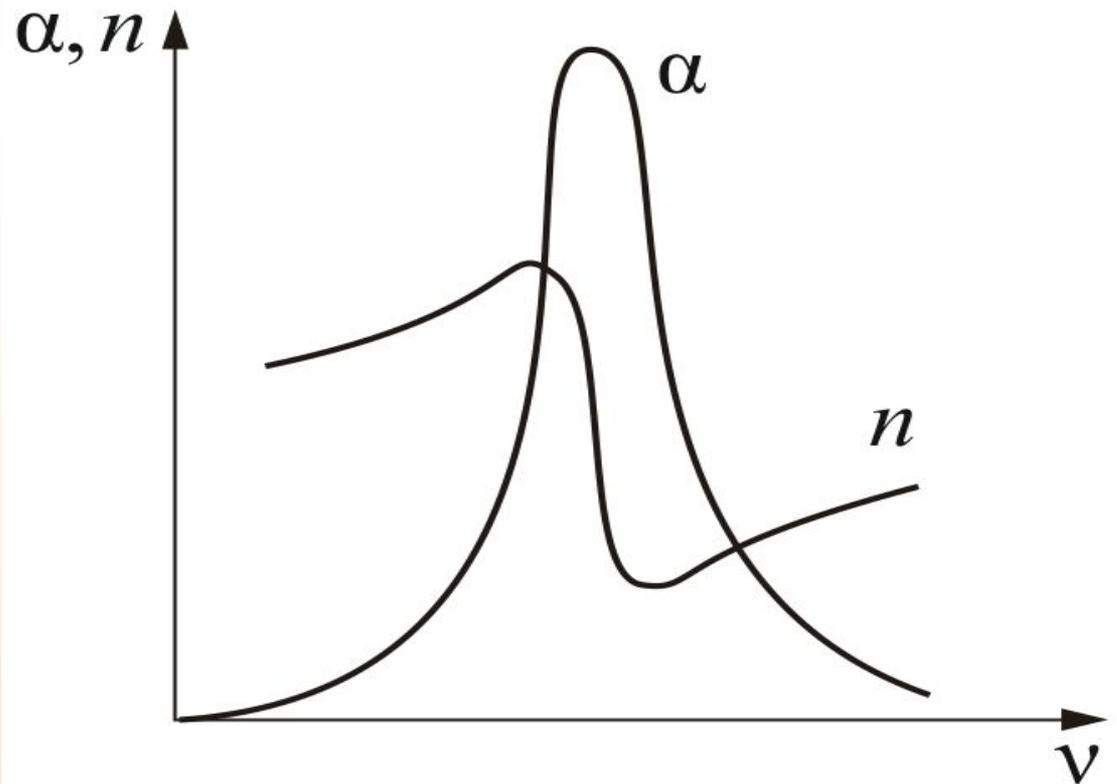
Металлы практически непрозрачны для света из-за наличия свободных электронов:

При падении света

- свободные электроны приходят в движение,
- возникают быстропеременные токи,
- выделяется тепло Джоуля – Ленца,
- энергия световой волны переходит во внутреннюю энергию металла.

На рис. представлена типичная зависимость коэффициента поглощения α от частоты света ν и зависимость показателя преломления n от ν в области полосы поглощения.

Из рис. следует, что *внутри полосы поглощения наблюдается аномальная дисперсия* (n убывает с увеличением ν):



Или по другому: внутри полосы поглощения наблюдается аномальная дисперсия (n убывает с уменьшением λ)

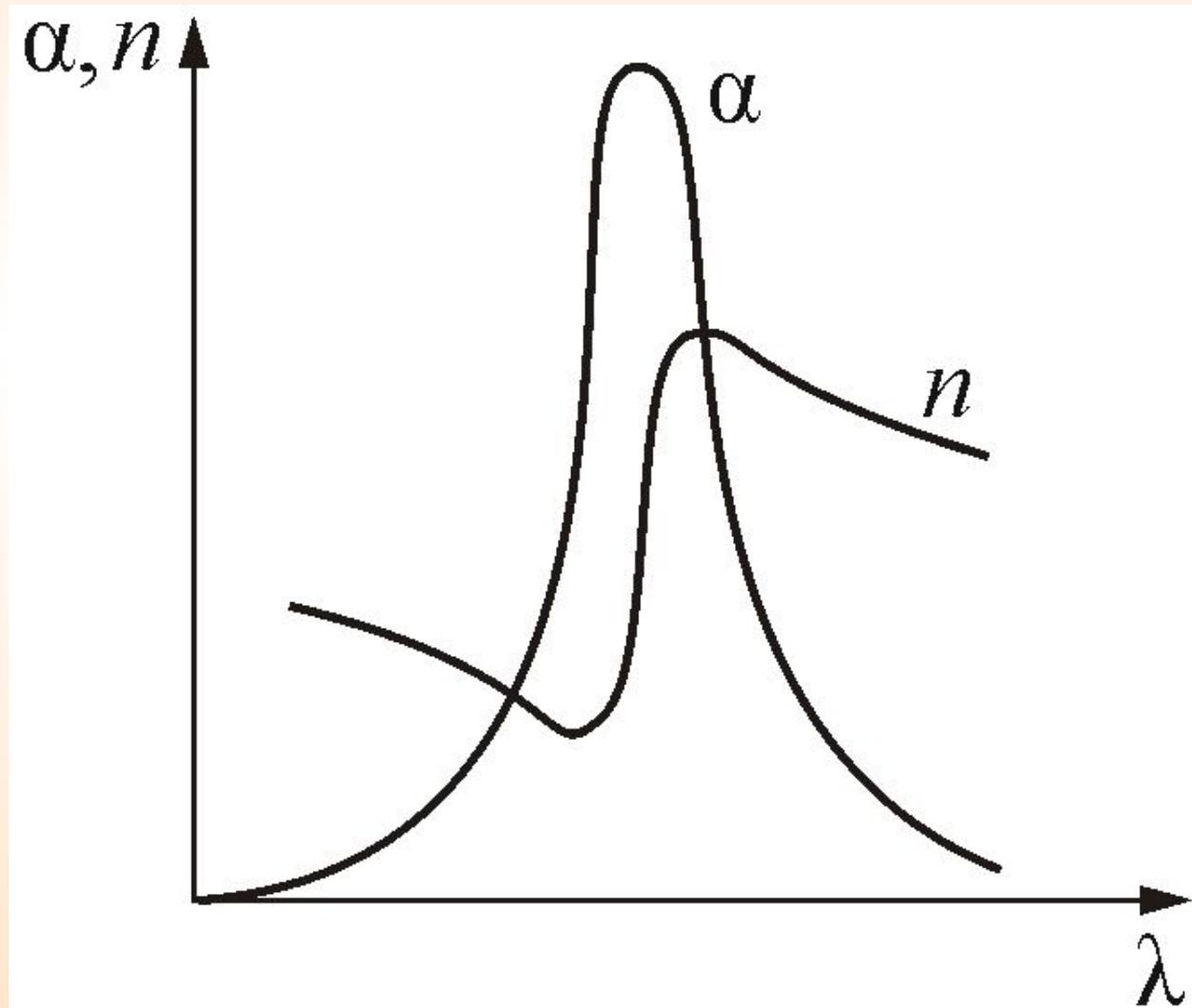
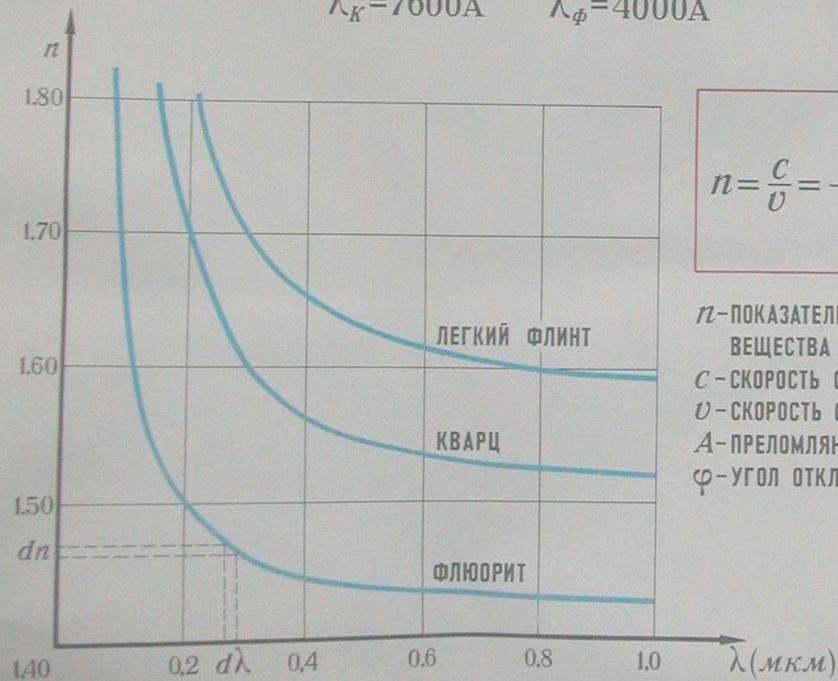
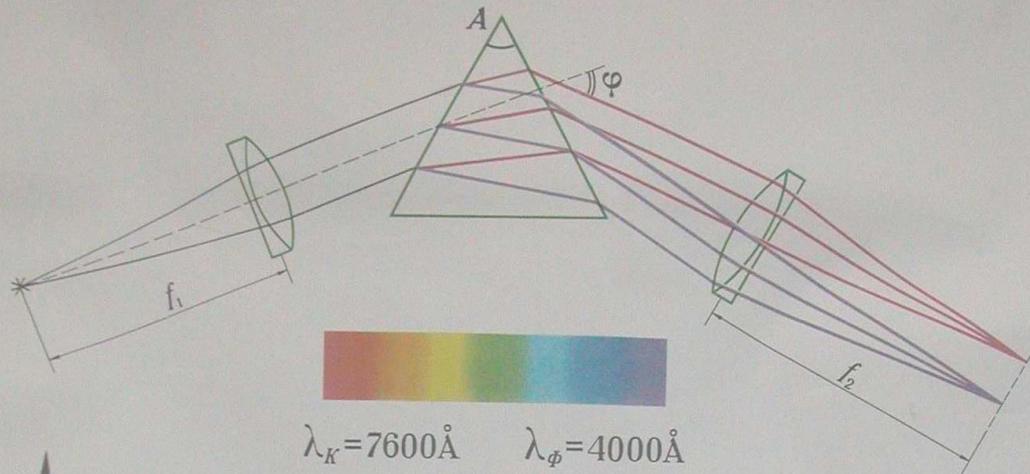


Рисунок 9.8

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА



$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sin \frac{A + \varphi}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

n - ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
ВЕЩЕСТВА ПРИЗМЫ;
 c - СКОРОСТЬ СВЕТА В ВАКУУМЕ;
 v - СКОРОСТЬ СВЕТА В ВЕЩЕСТВЕ;
 A - ПРЕЛОМЛЯЮЩИЙ УГОЛ ПРИЗМЫ;
 φ - УГОЛ ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧА

ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ n ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ λ :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad \frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3}$$

$\frac{dn}{d\lambda}$ - ДИСПЕРСИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА;
 A, B - КОНСТАНТЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ВЕЩЕСТВО

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.



**дел радугу на небе,
востоке, и тихонько**

Говорил:

«Что там, Нокомис?»»

Нокомис отвечала:

«То Мускодэ на небе;

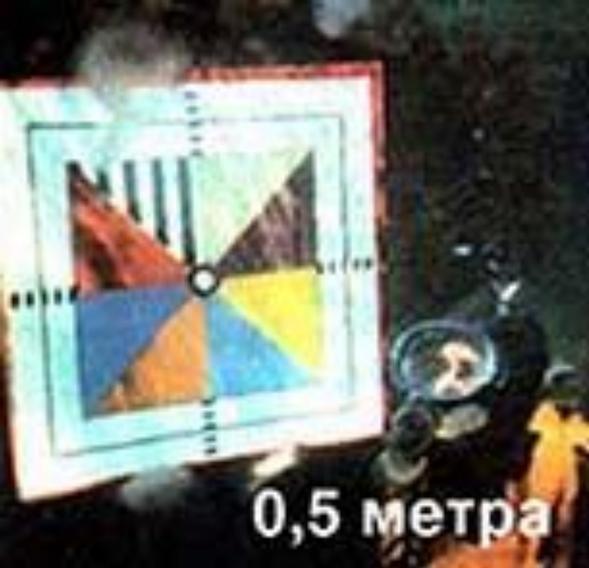
цветы лесов зеленых,

золотные кувшинки,

земле, когда увянут,

Расцветают снова в небе.»»

По мотивам легенды
североамериканских индейцев.



Чем меньшей энергией обладает свет, тем быстрее он поглощается:

Длинноволновые части спектра, красный и оранжевый цвета, поглощаются почти полностью уже на глубине 5-8 метров.

Затем исчезают желтые цвета.

Гораздо дольше проникают синий и зеленый.

Рассеяние света

В неоднородной среде световые волны дифрагируют на неоднородностях среды – рассеиваются.

*Среды с ярко выраженной оптической неоднородностью называют **мутными**:*

1. **Дымы** – взвеси в газах мельчайших твердых частиц;
2. **Туманы** - взвеси в газах мельчайших капель жидкости;
3. **Взвеси (суспензии)** – жидкости с плавающими в них твердыми частицами;
4. **Эмульсии** – взвеси частиц одной жидкости в другой, не растворяющие первую;
5. **Некоторые твердые тела** (опал, перламутр...)

- **Если размеры неоднородностей малы по сравнению с длиной волны:**

В результате рассеяния света интенсивность в направлении распространения убывает быстрее, чем в случае только поглощения:

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

α' – **коэффициент экстинкции.**

Интенсивность рассеянного света:

$$J \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad - \text{закон Рэлея.}$$

Рассеянный свет является частично поляризованным.

- **Если размеры неоднородностей сравнимы с длиной волны:**

Электроны, находящиеся в различных местах неоднородности, колеблются с заметным сдвигом по фазе.

В результате **интенсивность рассеянного света:**

$$J \sim \omega^2 \sim \frac{1}{\lambda^2}$$

Молекулярное рассеяние – рассеяние, обусловленное флуктуациями плотности жидкости или газа.

Флуктуации вызваны хаотическим движением молекул вещества.



Рассеянный свет (туман)

Рассеянный свет (раннее утро)



Голубые и синие лучи рассеиваются сильнее, чем желтые и красные (закон Рэлея), обуславливая голубой цвет неба

Рассеяние света под водой



Рассеяние света, как правило, значительно интенсивнее поглощения,

Т.о. с увеличением глубины преобладает уже не направленный, а рассеянный свет, идущий со всех сторон.

Поэтому на достаточно больших глубинах, вне видимости дна и поверхности, можно стать жертвой эффекта так называемой «голубой пелены» и потерять представление о том, где верх, а где низ.

Спектральный анализ

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

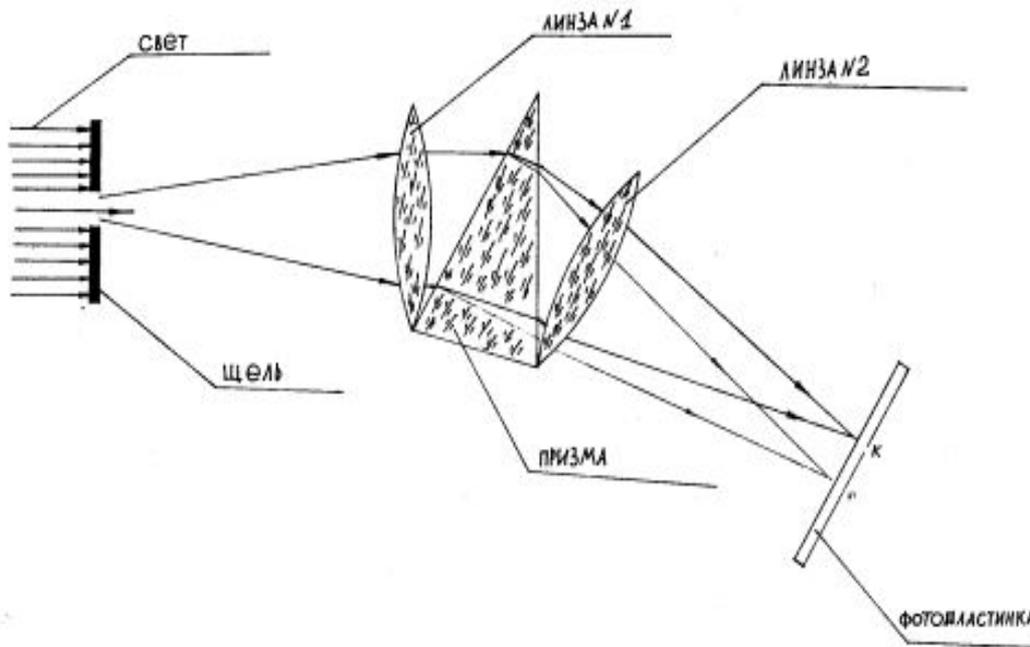
Структура спектров поглощения определяется составом и строением молекул, поэтому *изучение спектров поглощения является одним из основных методов количественного и качественного исследования веществ.*



Спектральные аппараты

Призменный спектральный аппарат – спектрограф.

СХЕМА СПЕКТРОГРАФА (призменного)



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 разошедший пучок излучения по длинам волн в разные концы экрана.
5. Фотопластинка фиксирует спектр и получается спектограмма.

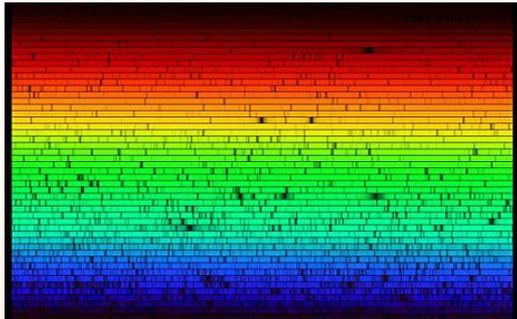
Спектральный



анализ
Метод определения химического состава по его спектру.

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

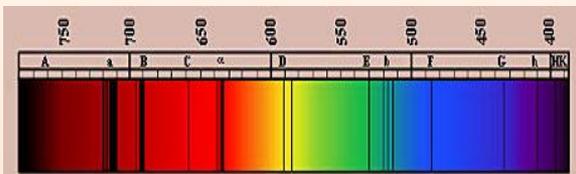
1.



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.



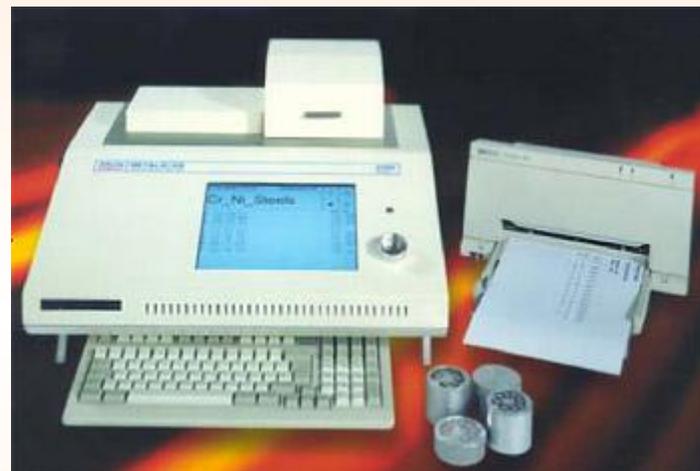
Фраунгоферовы линии в спектре солнечного излучения

2. 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.

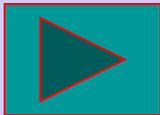


Стационарно – искровые оптико - эмиссионные спектрометры «МЕТАЛСКАН –2500».

Предназначены для точного анализа металлов и сплавов, включая цветные, сплавы черных металлов и чугуны.

Виды спектров

Непрерывные



Линейчатые

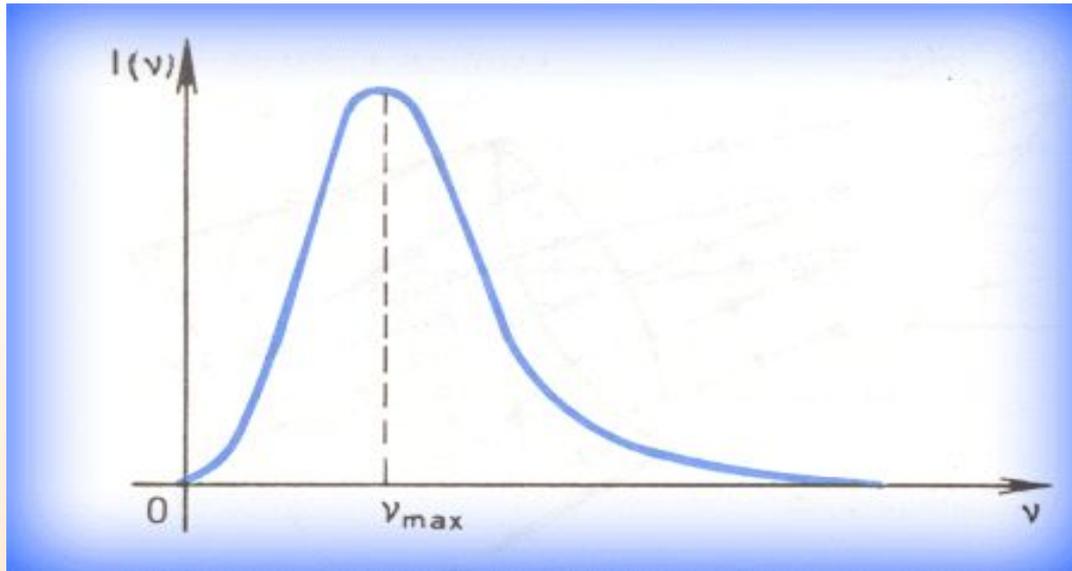


Полосатые

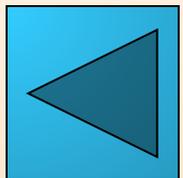


Непрерывные спектры.

Непрерывные спектры дают тела, находящиеся в твердом , жидком состоянии, а также сильно сжатые газы.



Распределение энергии по частотам в видимой части непрерывного спектра

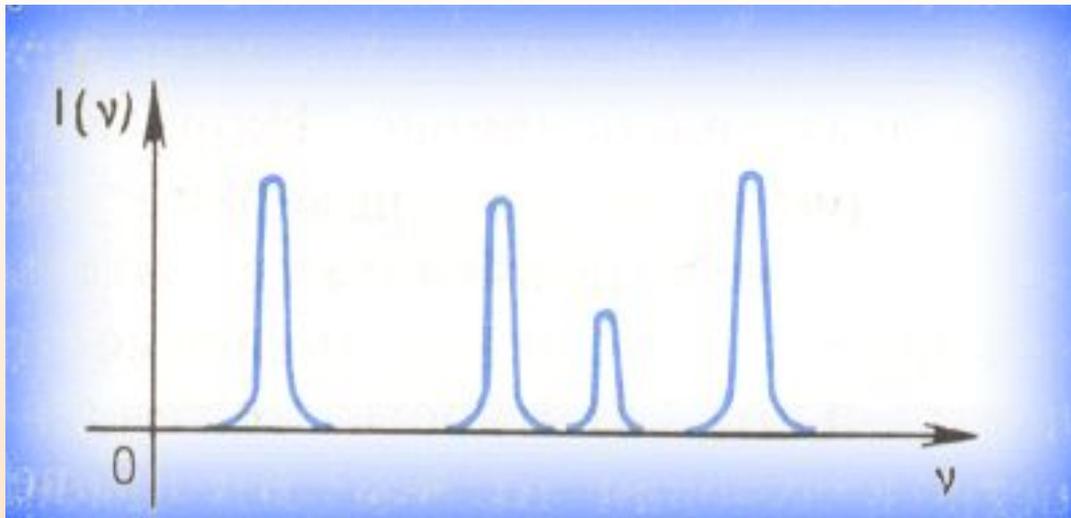
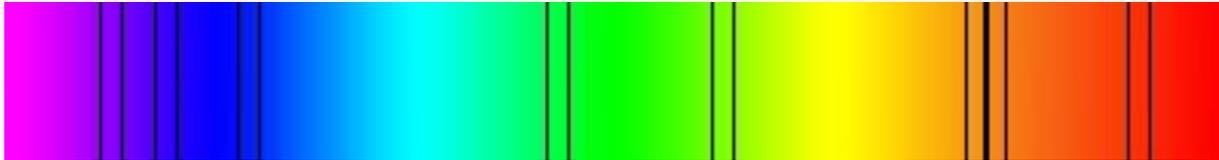


Линейчатые

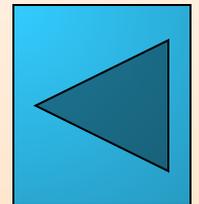


Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии.

Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн.



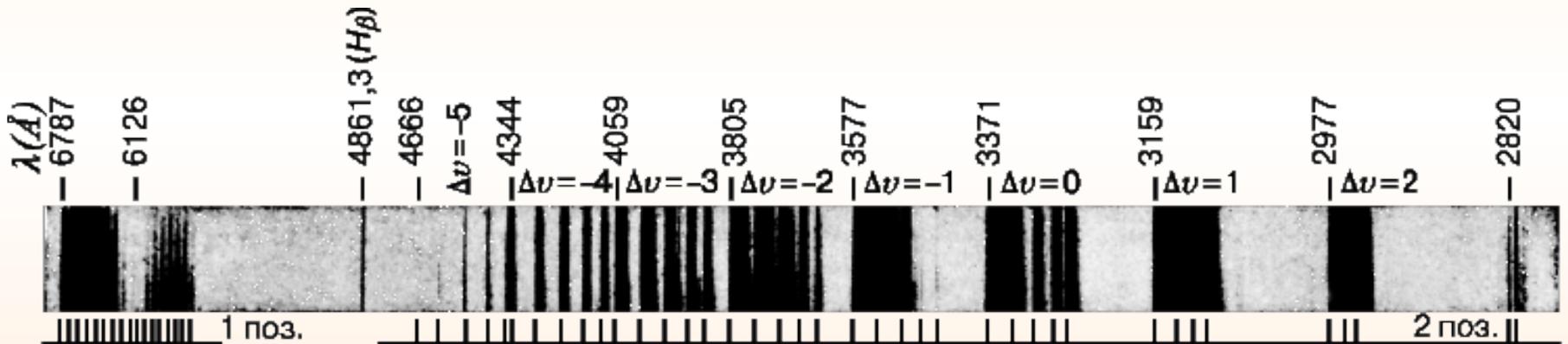
Примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре.



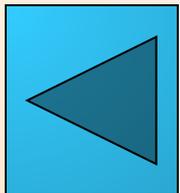


Полосатый спектр

Полосатые спектры в отличие от линейчатых спектров создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

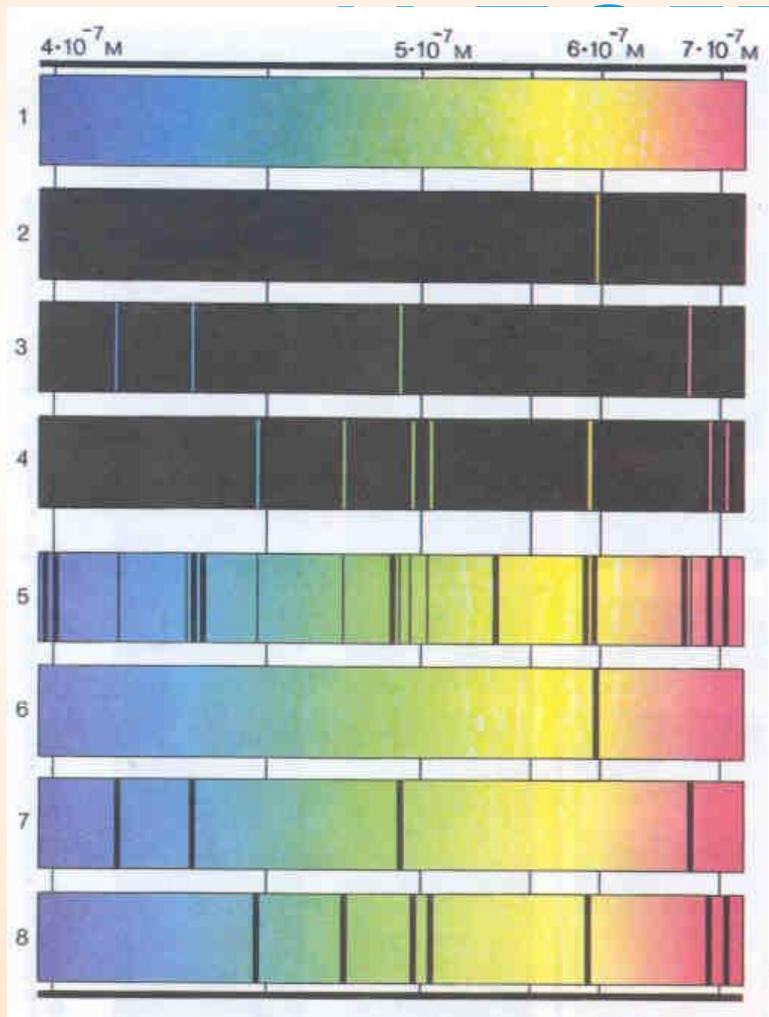


Электронный полосатый спектр азота N_2





Спектры испускания



ПОЩЕНИЯ

Спектры испускания:

- 1- сплошной;
- 2- натрия;
- 3- водорода;
- 4- гелия.

Спектры поглощения:

- 5- солнечный;
- 6- натрия;
- 7- водорода;
- 8- гелия.

9.5. Излучение Вавилова-Черенкова

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

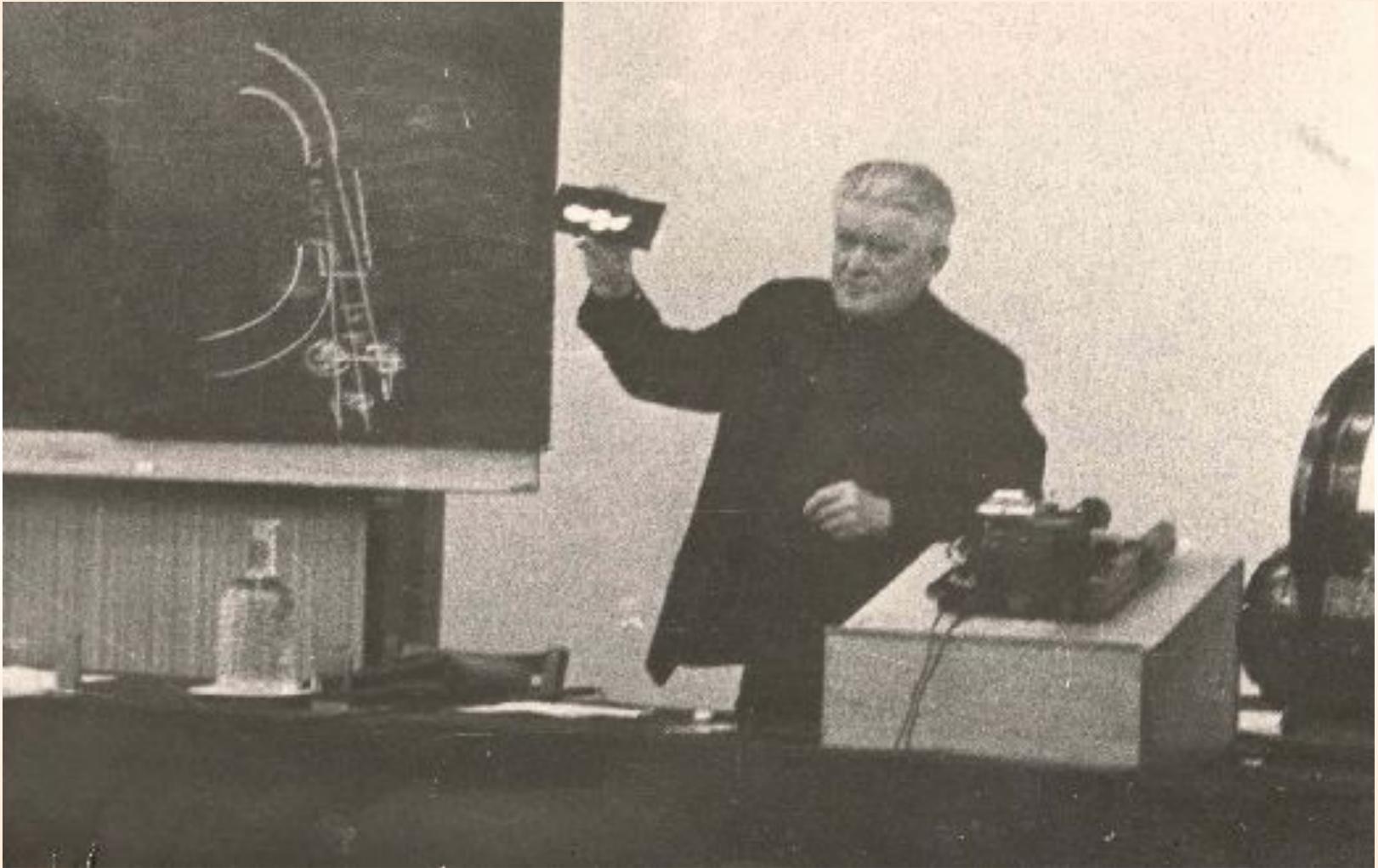
В 1937 году И.Е. Тамм и И.М. Франк объяснили механизм свечения

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 :*

$$c/n < u < c$$

P.A.Cherenkov show picture of UR Pakhra, 1977



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

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

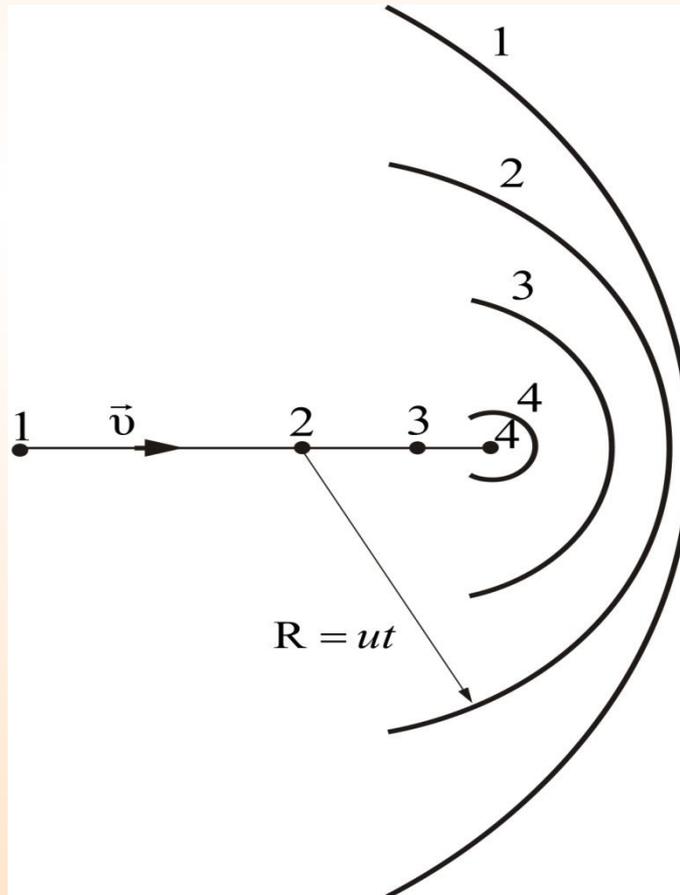
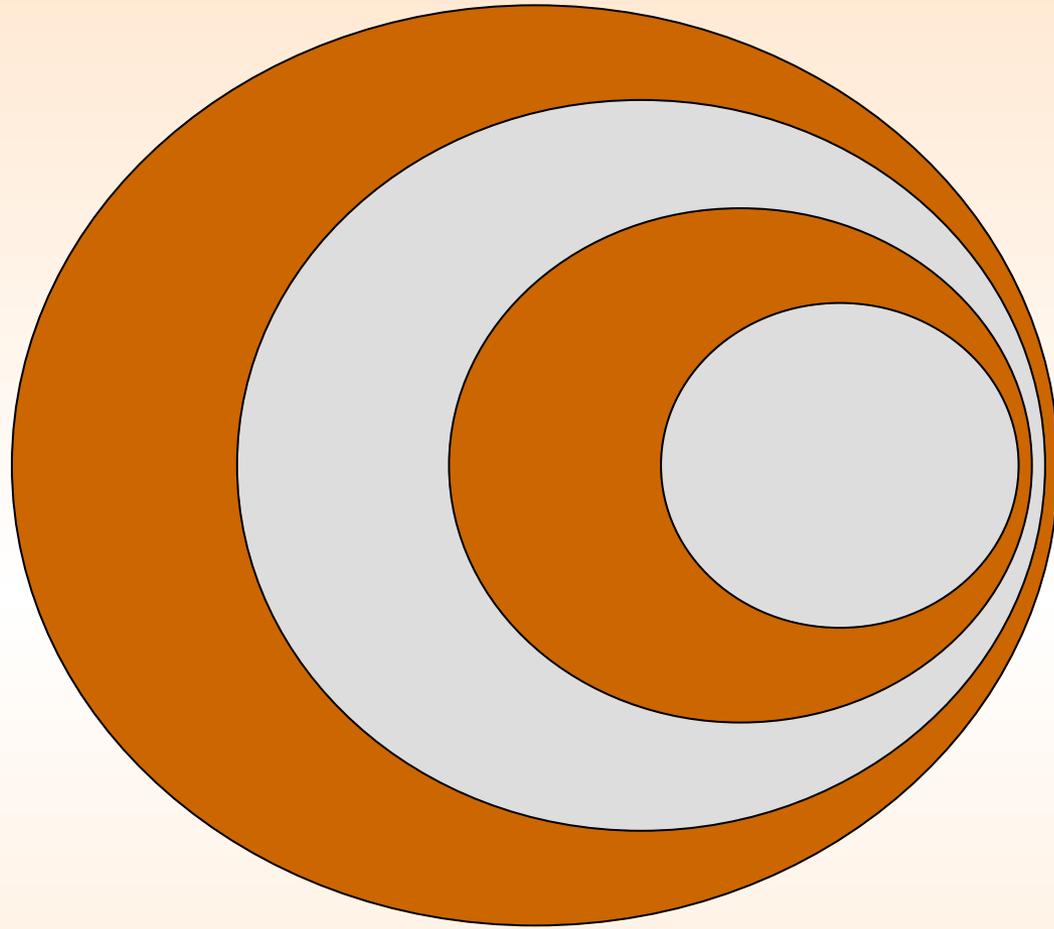
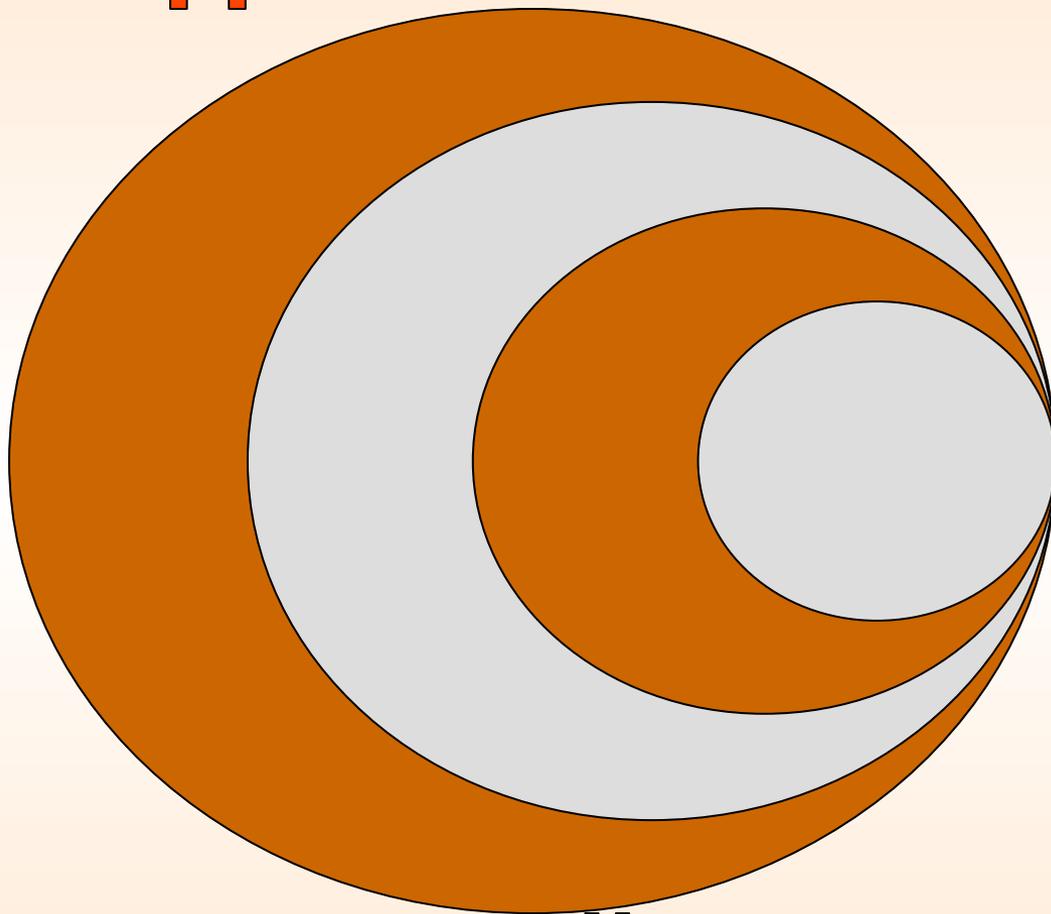


Рисунок 9.9



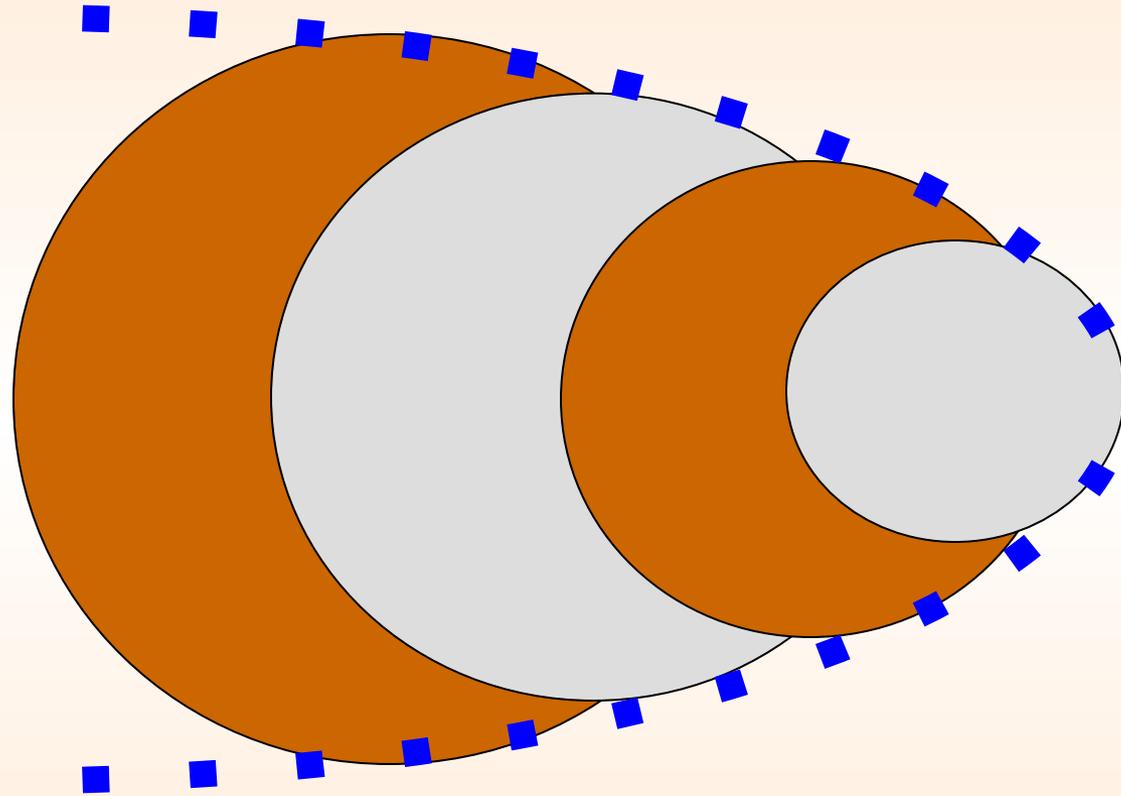
СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МЕНЬШЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

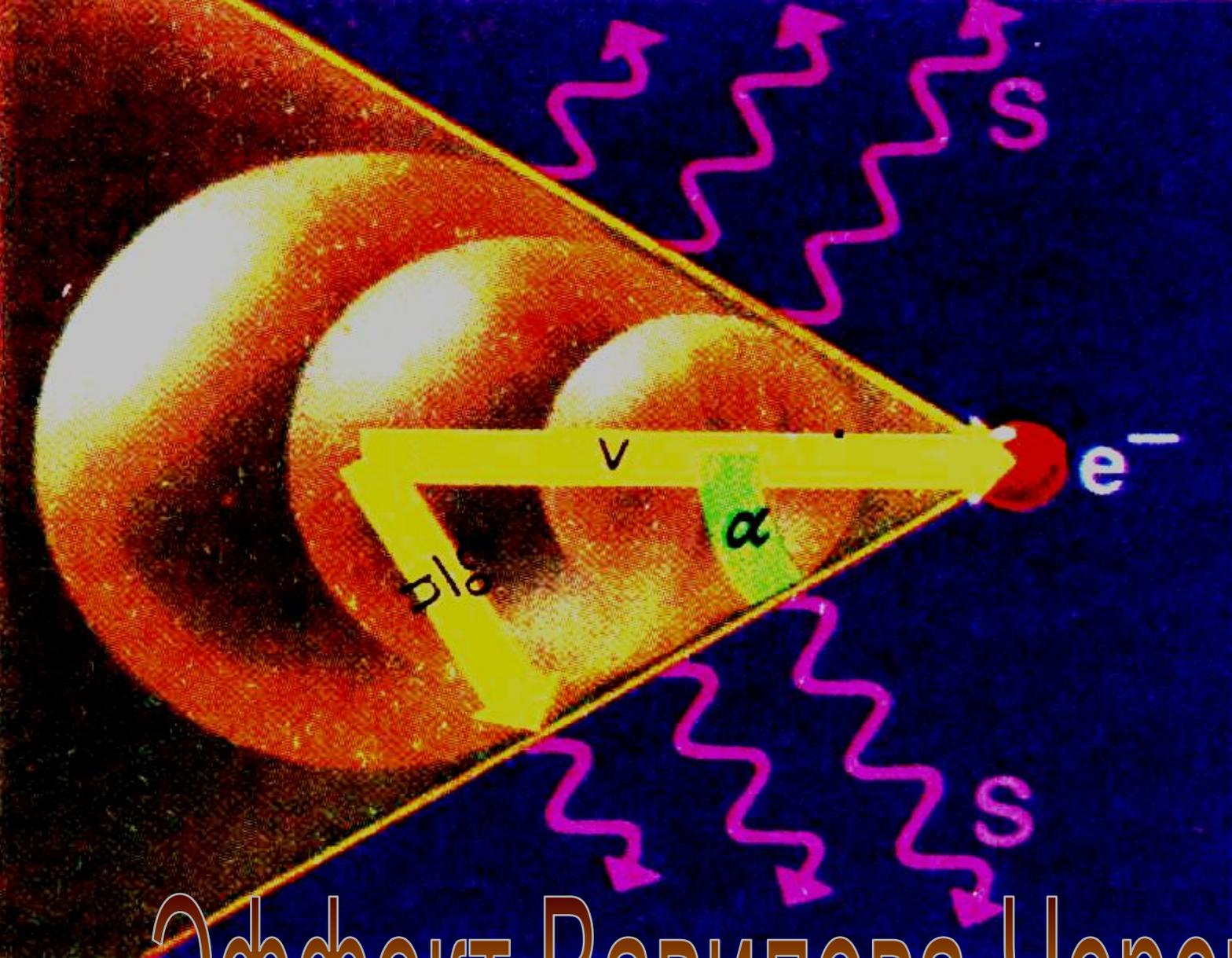


равна фазовой скорости

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА



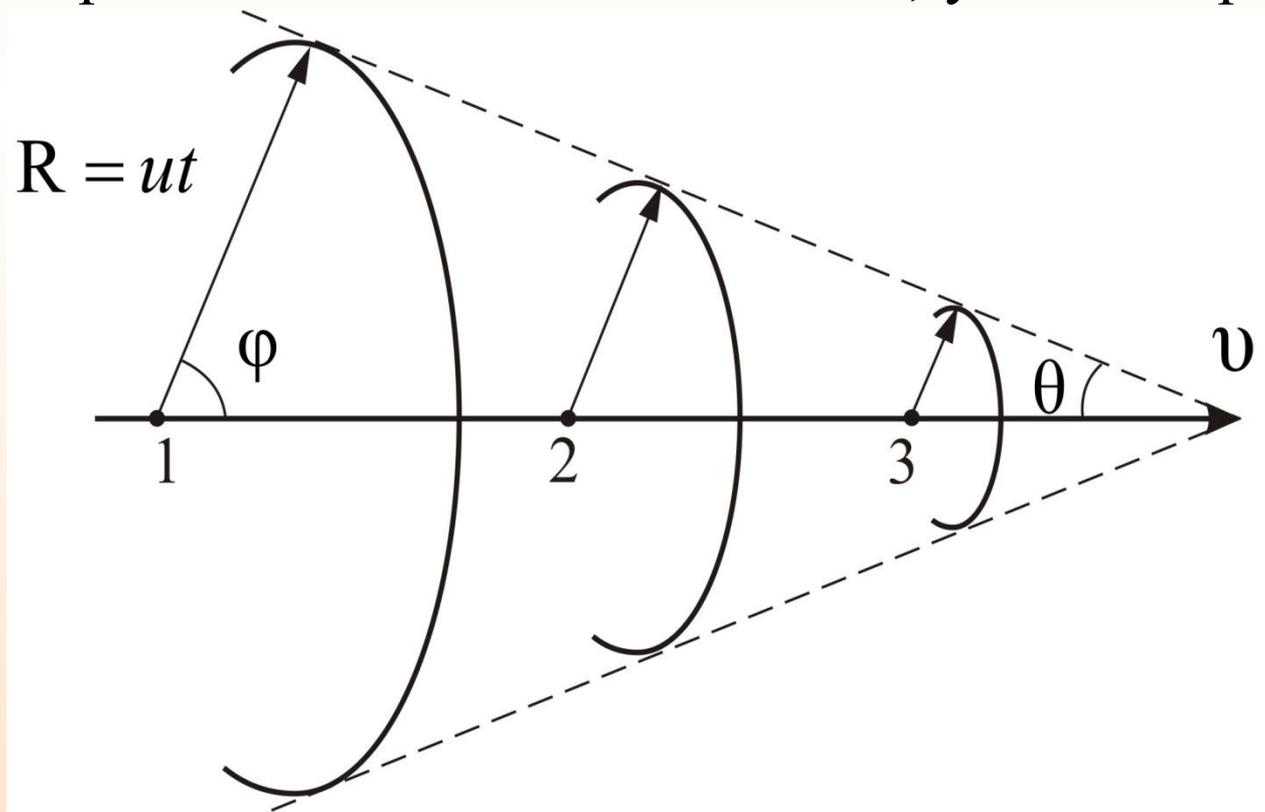
ВЫШЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ

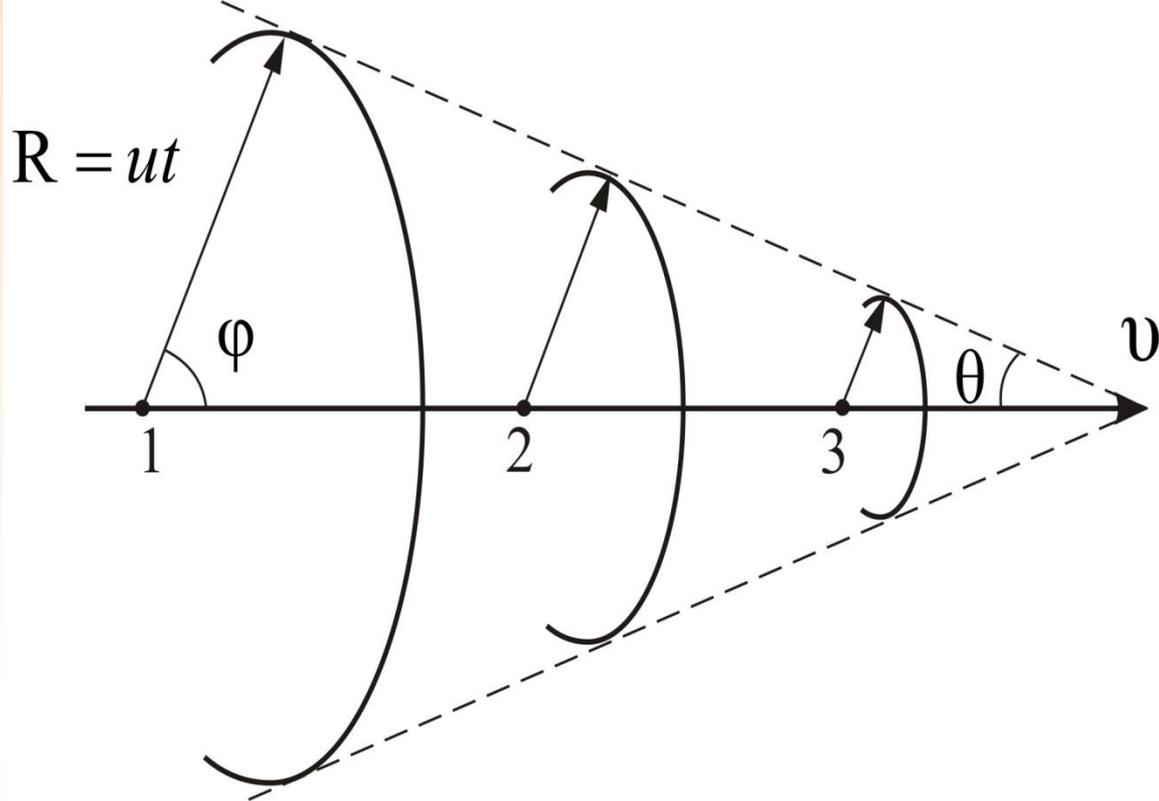


Эффект Вавилова-Черенкова

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, ϕ который составляет волновой вектор с направлением движения частицы, удовлетворяет соотношению:

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

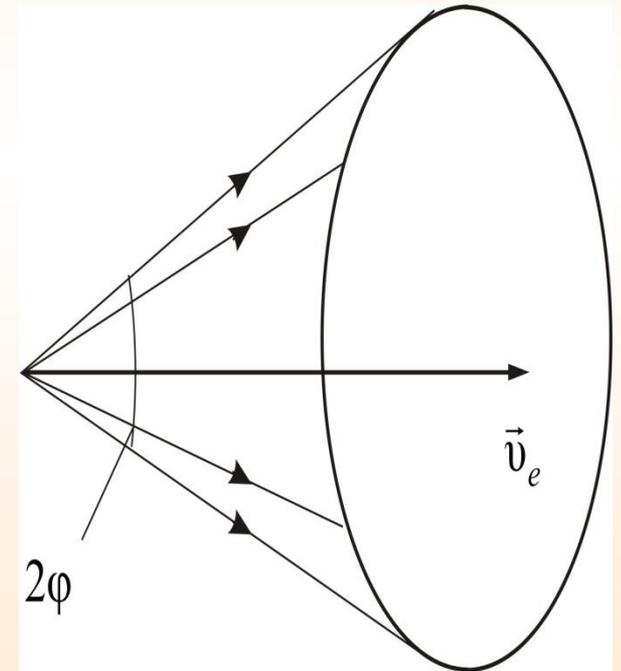
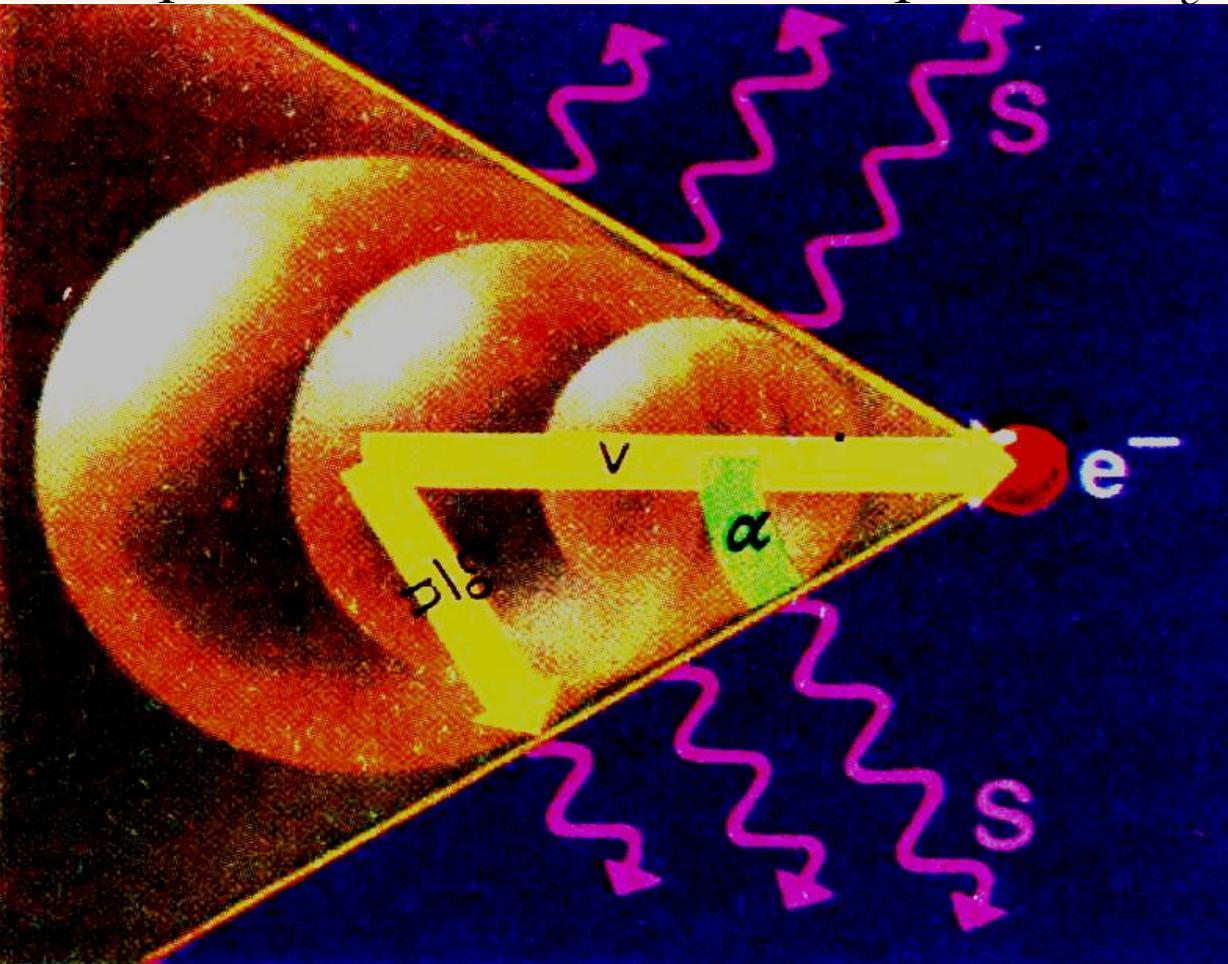


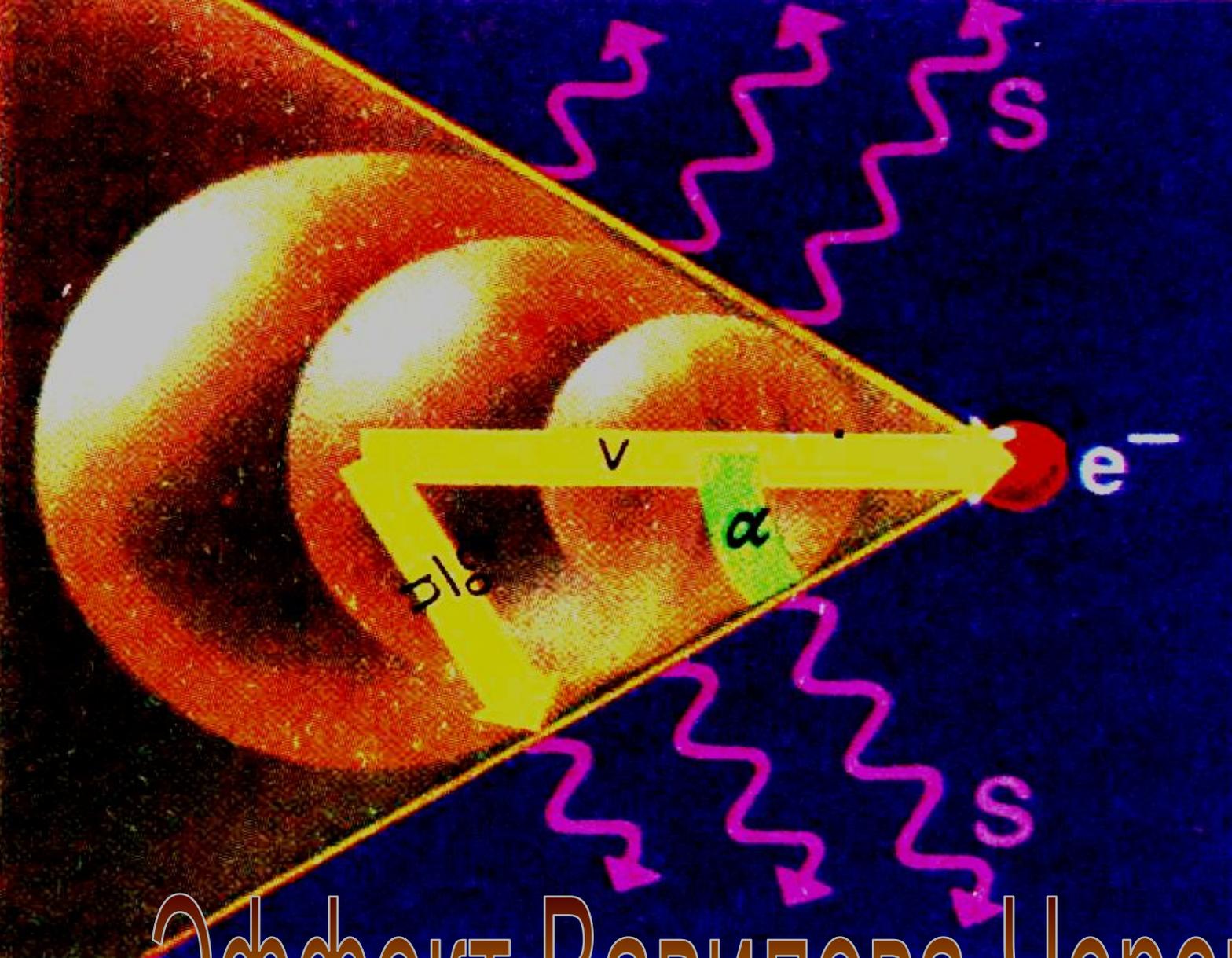


Частица движется быстрее, чем распространяются волны в среде

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

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 2φ





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

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}$$

Эффект Вавилова-Черенкова

В жидкостях и твердых телах условие $v > c/n$

начинает выполняться для электронов при энергиях $W > 10^5$ 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 ϕ и по условию $\cos \phi = c/(nv_e)$ оценить скорость частицы v , зная массу, определить ее энергию.

ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА!

