

Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры
ОФ ЕНМФ ТПУ

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 световых волн от их частоты.

ИЛИ

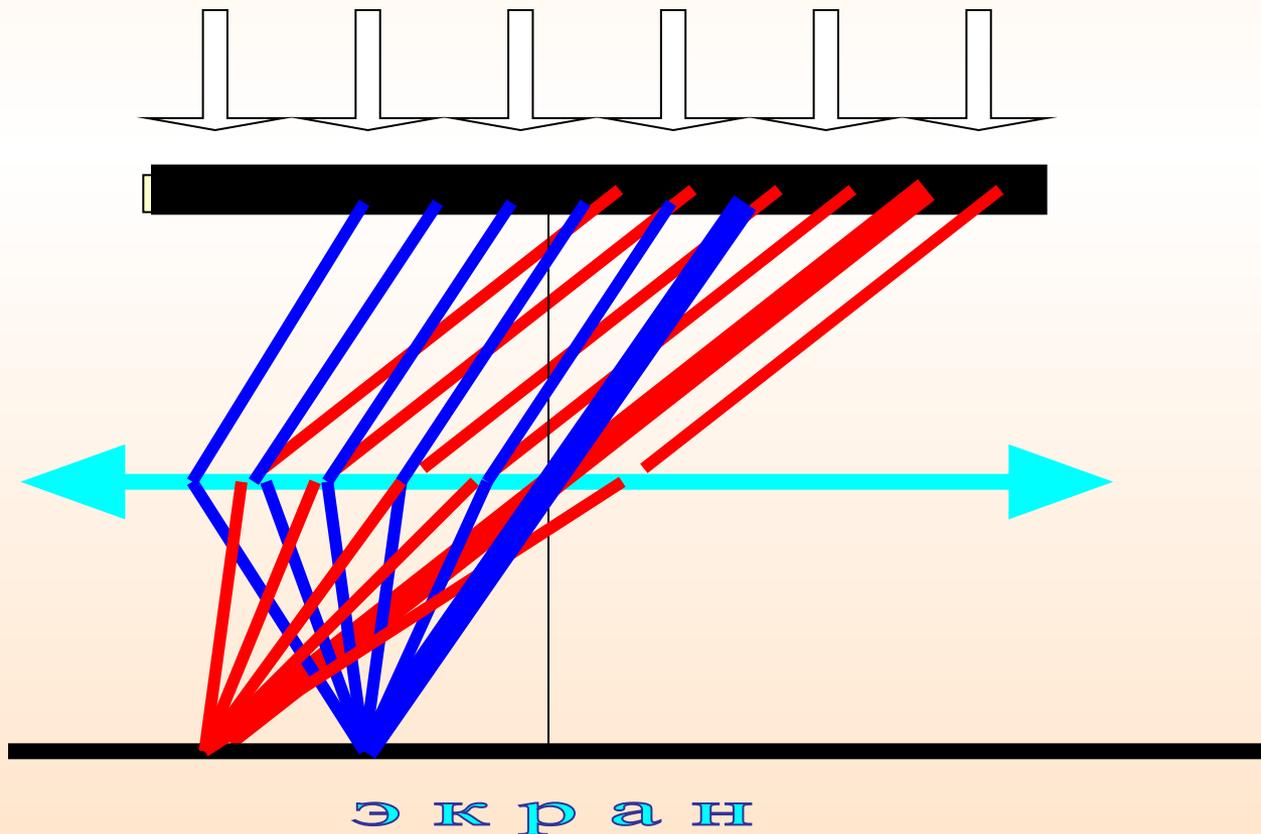
Угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше преломляющий угол призмы

*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

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

(в отличие от призмы, где все происходит наоборот)

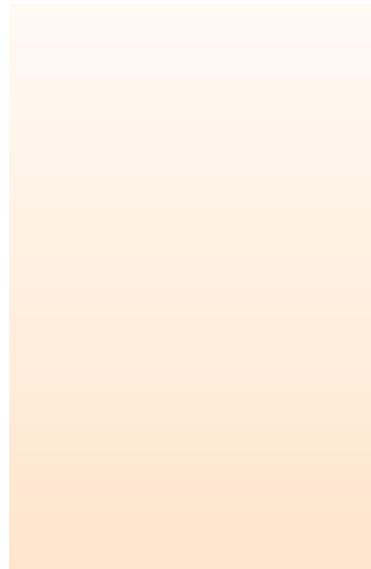


Различия в дифракционном и призматическом спектрах.

1) Дифракционная решетка разлагает свет непосредственно по длинам волн:



2) а призма – по показателям преломления:



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.**

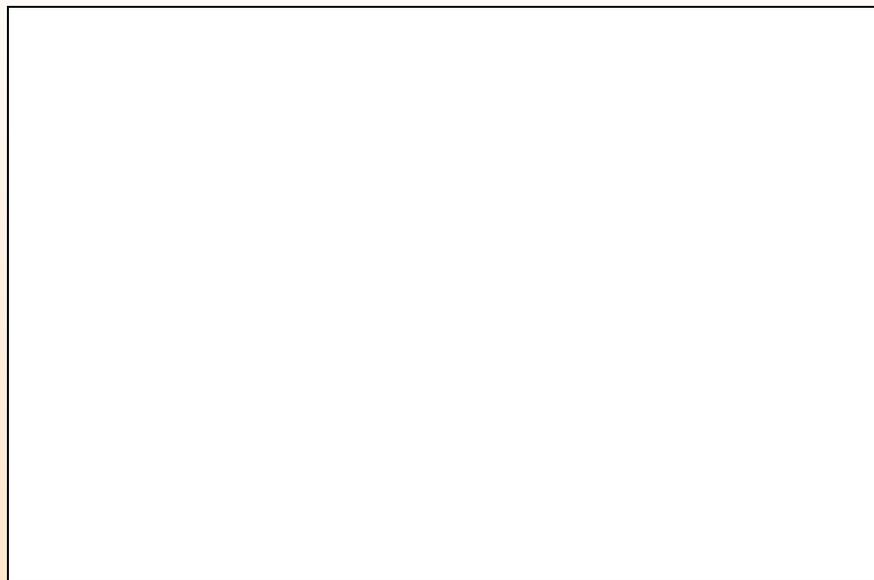
Величина



ИЛИ

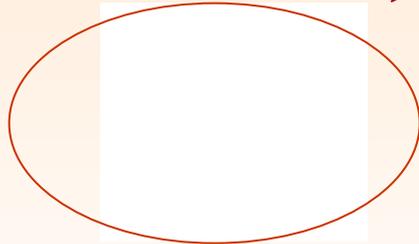


называемая *дисперсией вещества*, показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.



9.2. Нормальная и аномальная дисперсии

Области значения ν , в которых



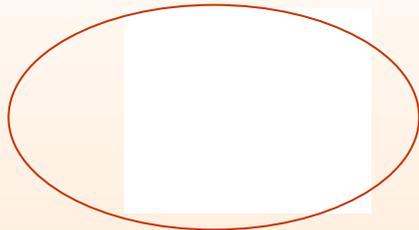
ИЛИ



(9.2.1)

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

Дисперсия называется аномальной, если



ИЛИ



(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 – групповая скорость, v – фазовая скорость

(9.2.3)

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

значит $u < c$ и

При *аномальной дисперсии*, т.к. то $u > v$

и, в частности, если

, то $u > c$

9.3. Классическая теория дисперсии

линейная оптика

Если $\omega \ll \omega_p$, то

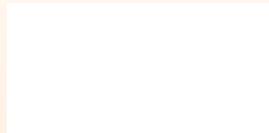
нелинейная оптика

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



и ϵ – тоже зависит от частоты.

Для видимого света 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
- силы сопротивления

Диф. уравнение колебаний электрона:

(9.3.3)

- его решение:

(9.3.4)



n – показатель преломления вещества;

n_0 – число молекул в единице объема;

ω_0 – собственная частота k -го электрона в молекуле.

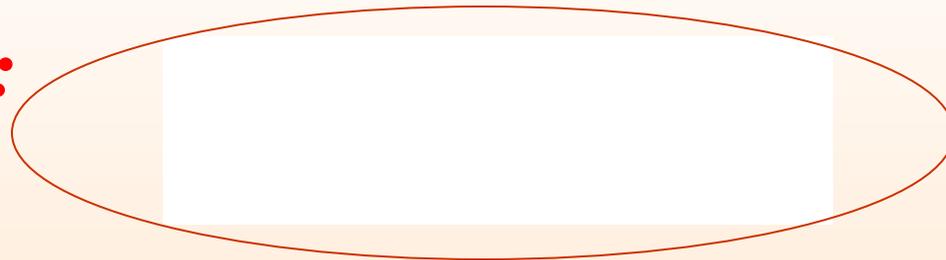
9.4. Поглощение (абсорбция света)

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

Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , имеем:

П. Бугер (1698 – 1758) – французский ученый

Закон Бугера:



– интенсивность волны на входе в среду,

α – коэффициент поглощения

При



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 м).

Коэффициент поглощения ***для диэлектриков*** невелик (примерно)

Коэффициент поглощения ***для металлов*** имеет большие значения (примерно)

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)

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:

«го Мускодэ на небе;

«еты лесов зеленых,

«олотные кувшинки,

«емле, 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:



α' – **коэффициент экстинкции.**

Интенсивность рассеянного света:



- *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:**



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

Призмный спектральный аппарат – спектрограф.

Ход лучей в спектрографе

1. Через узкую щель проходит пучок света.
2. Линза №1 делает пучок света параллельным.
3. Призма раскладывает белый свет по длинам волн на спектр.
4. Линза №2 собирает 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.

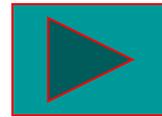
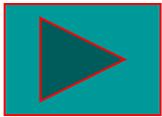
2. С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества. Благодаря универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии.

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».

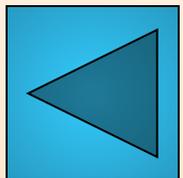
Предназначены для точного анализа металлов и сплавов, включая цветные, сплавы черных металлов и чугуны.



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

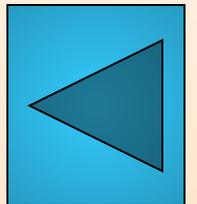


Линейчатые спектры.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии.

Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн.

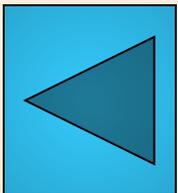
Примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре.



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 :*



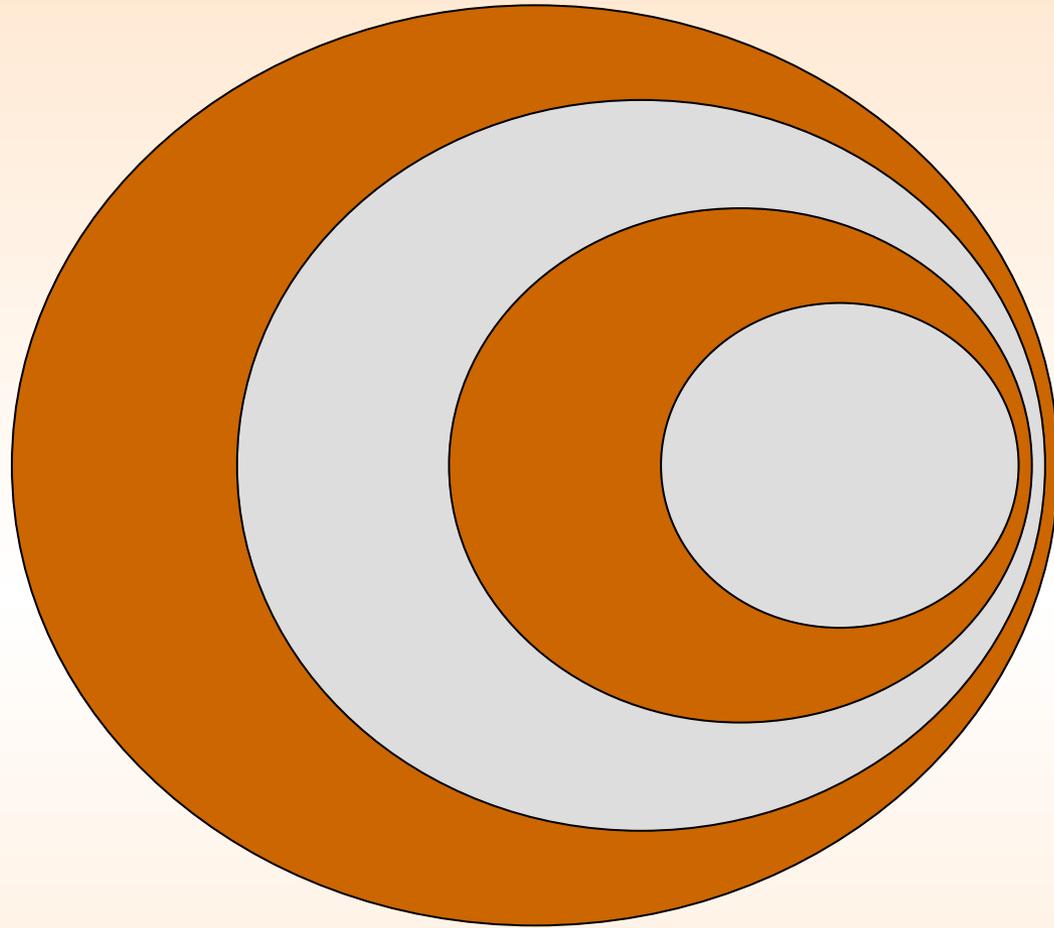
P.A.Cherenkov show picture of UR Pakhra, 1977



При движении заряженной частицы в изотропной среде со скоростью v элементарные волны будут представлять собой сферы, находящиеся одна в другой, распространяющиеся со скоростью c .

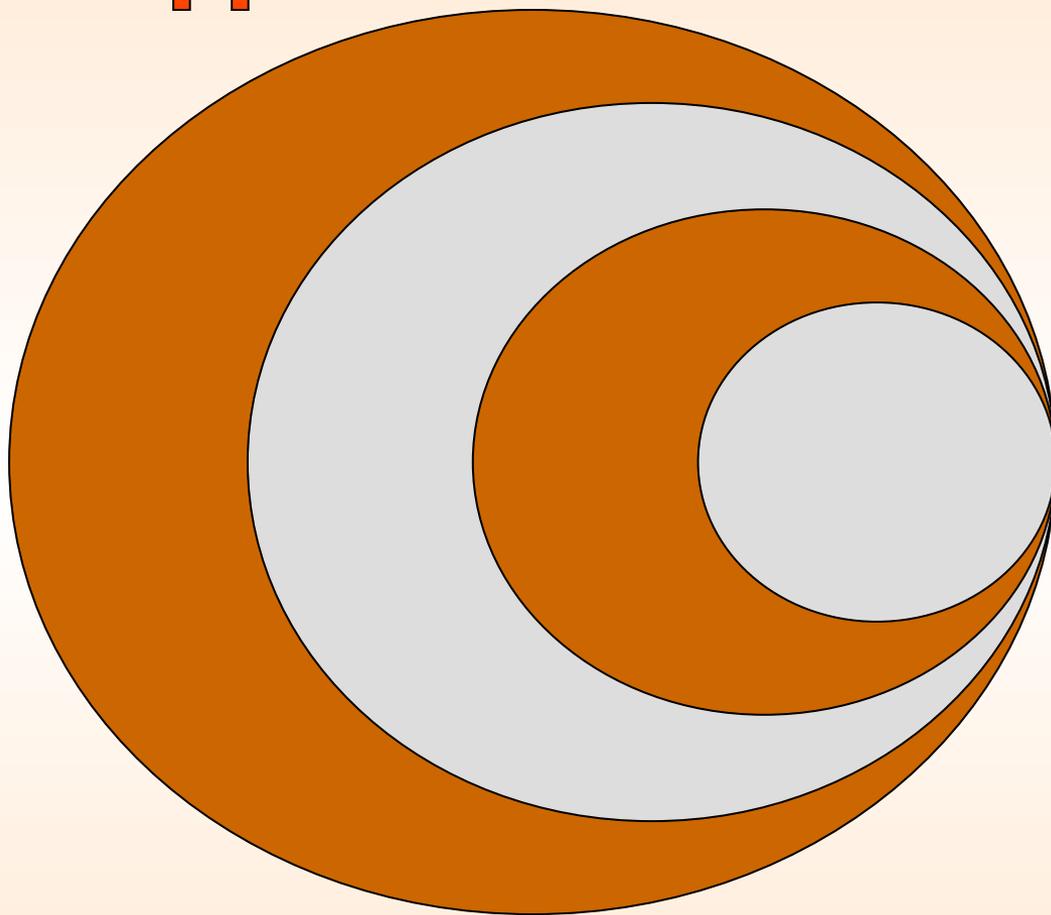


Рисунок 9.9



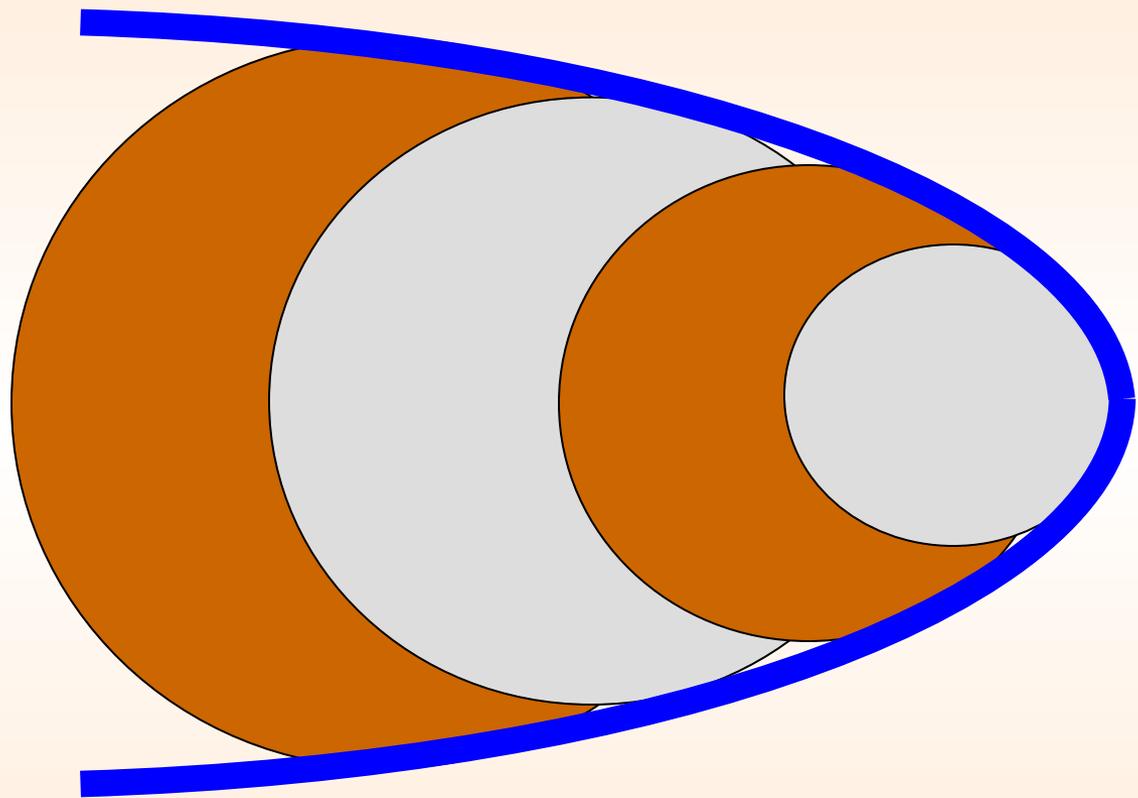
СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МЕНЬШЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА



равна фазовой скорости

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА



ВЫШЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ

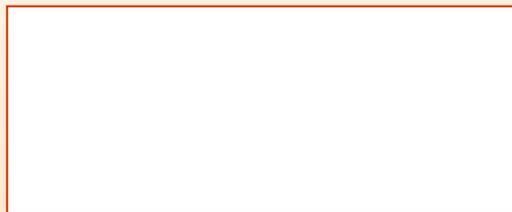
Эффект Вавилова-Черенкова

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





Частица движется быстрее, чем
распространяются волны в среде



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 , а угол при вершине равен θ



Эффект Вавилова-Черенкова

В жидкостях и твердых телах условие начинает выполняться для электронов при энергиях , а для протонов .

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 и по условию оценить скорость частицы и, зная массу, определить ее энергию.

ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА!