

## Лекция 3.2 ОПТИКА

Е.В. Феськова,  
канд. пед. наук, доцент кафедры «Инженерный бакалавриат CDIO»

Красноярск 2021

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

**Геометрическая оптика** – раздел оптики, в котором пренебрегают конечностью длин волн (в силу малости длин волн видимого диапазона можно не учитывать волновую природу света, и распространение света рассматривать с точки зрения геометрии)

**геометрическая  
оптика**

**закон прямолинейного распространения света**  
(в оптически однородной среде)

**закон независимости световых лучей**  
(справедлив только в линейной оптике)

**закон отражения**

**закон преломления света**

**закон обратимости светового луча**

# ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА



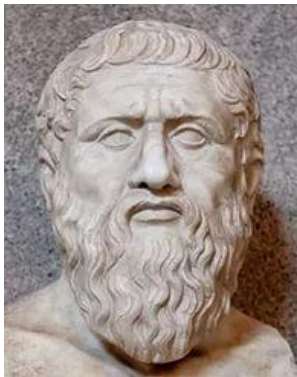
Евклид  
древнегреческий  
математик  
325-265 до н.э.

**Световой луч** – линия вдоль которой распространяется свет.

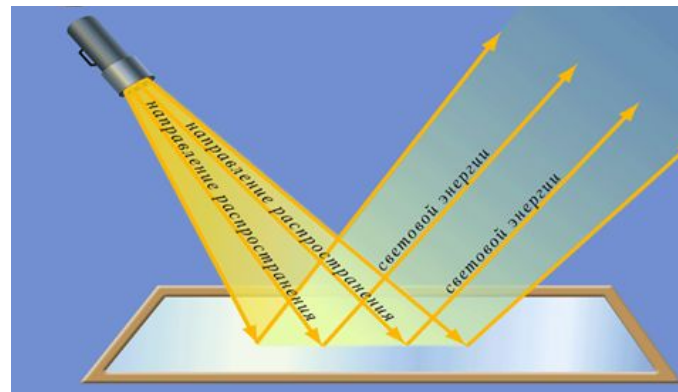
Световой луч можно рассматривать как ось светового пучка. Свет переносит энергию, световой луч указывает направление переноса энергии световым пучком.

Световые пучки конечной ширины

**Закон прямолинейного распространения света:** в прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно



Платон греческий  
философ  
428-348 до н.э.



# ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ

## Закон независимого распространения лучей —

световые лучи распространяются независимо друг от друга. Если через точку пространства проходит несколько лучей, то каждый луч ведет себя так, как если бы других лучей не было.

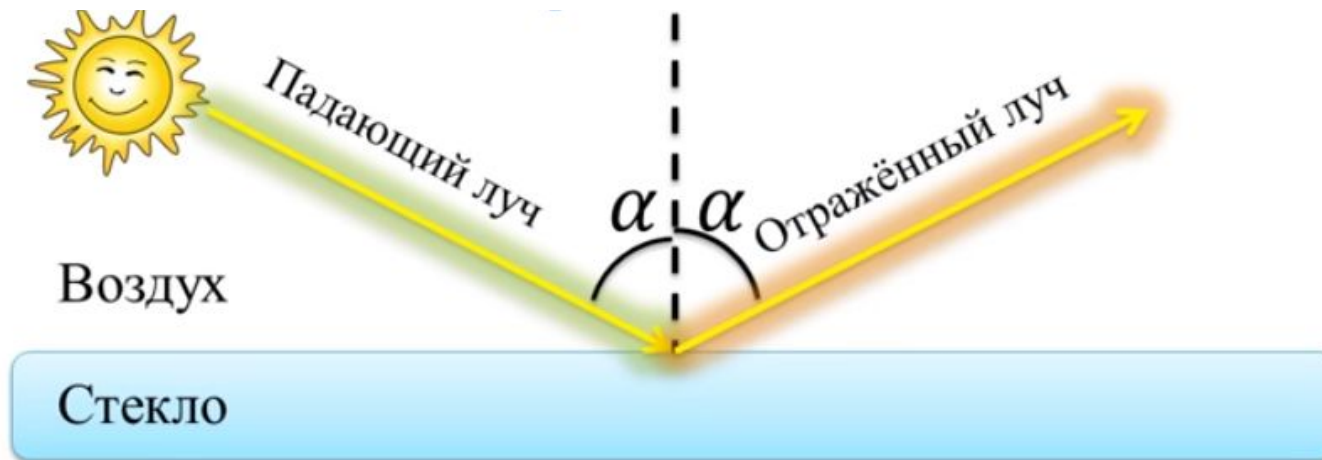
При установке непрозрачного экрана на пути пучка световых лучей экранируется (исключается) из состава пучка некоторая его часть.

**Закон справедлив для линейной оптики**, где показатель преломления не зависит от амплитуды и интенсивности проходящего света.



# ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

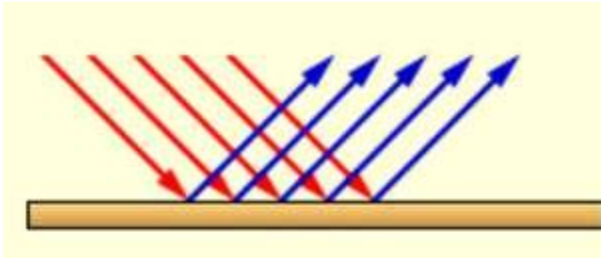
**Закон отражения света:** отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения (плоскость называется плоскостью падения); угол падения равен углу отражения.



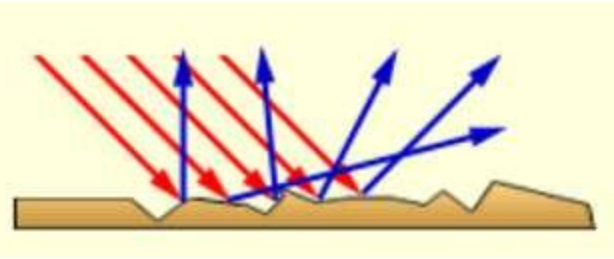
**Механизм отражения:** при попадании электромагнитной волны на проводящую поверхность возникает ток, электромагнитное поле которого стремится компенсировать это воздействие, что приводит к практически полному отражению света.

# ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Отражение света может быть **зеркальным** (наблюдается при использовании зеркал) или **диффузным** (не сохраняется путь лучей от объекта, а только энергетическая составляющая светового потока) в зависимости от природы поверхности

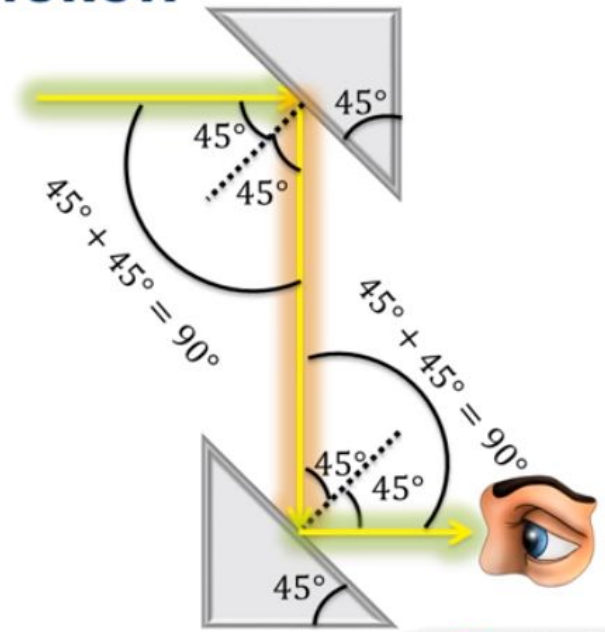


Зеркальное отражение



Диффузное отражение

## Перископ

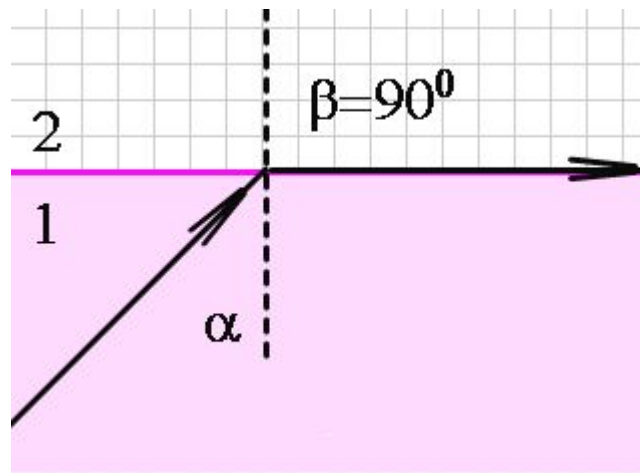


# ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

**Внутреннее отражение** — явление отражения световых волн от границы раздела двух сред при условии, что волна падает из среды, где скорость её распространения меньше (это соответствует большему показателю преломления).

**Неполное внутреннее отражение** — внутреннее отражение, при условии, что угол падения меньше критического угла. В этом случае луч раздваивается на преломлённый и отражённый.

**Полное внутреннее отражение** — внутреннее отражение, при условии, что угол падения превосходит некоторый критический угол. При этом падающая волна отражается полностью. Коэффициент отражения при полном внутреннем отражении не зависит от длины волны.



$$n_1 > n_2$$

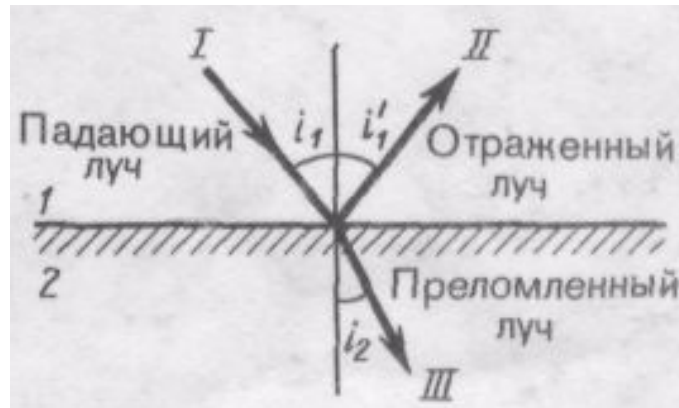
$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

# ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА



Виллеброрд Снелл  
(Снеллиус) голландский  
математик  
(1580-1626)

**Закон Снелла (Снеллиуса) преломления света:** описывает преломление света на границе двух сред. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред



$n_{21}$  показатель преломления второй среды относительно первой (относительный показатель преломления)

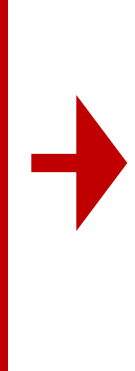
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

**отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для рассматриваемых сред зависит только от длины световой волны, но не зависит от угла падения**



# ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Отношение скорости световой волны в вакууме к фазовой скорости в некоторой среде называется **абсолютным показателем преломления среды**:

$$\frac{c}{v} = n$$
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$$

для большинства прозрачных сред ( $\mu \approx 1$ )

Значение  $n$  определяет **оптическую плотность среды**:  
оптически более плотная среда – среда с большим  $n$ ;  
оптически менее плотная среда – среда с меньшим  $n$ .

# ЗАКОН ОБРАТИМОСТИ СВЕТОВОГО ЛУЧА

**Закон обратимости светового луча:** луч света, распространившийся по определённой траектории в одном направлении, повторит свой ход в точности при распространении и в обратном направлении.

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

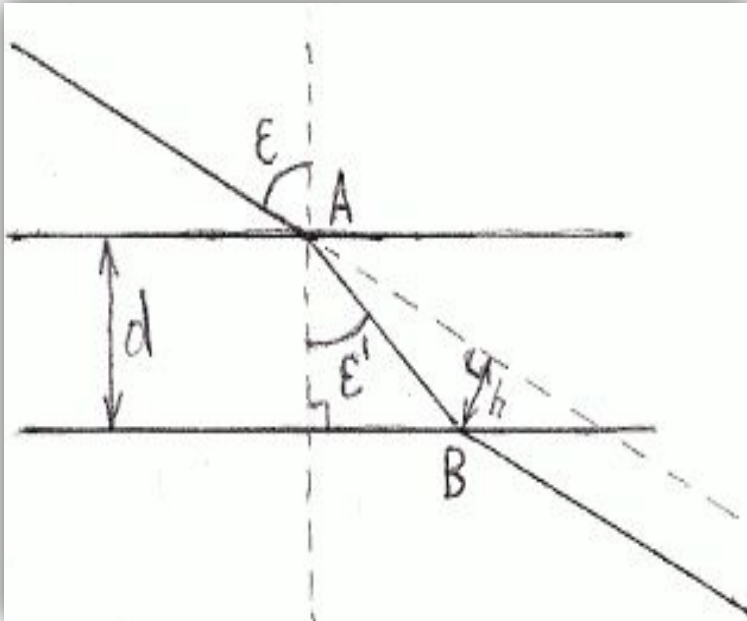
Закон преломления доказывает обратимость световых лучей

Геометрическая оптика не учитывает волновой природы света.

Действует постулат: в точке, где сходятся две (или большее количество) систем лучей, освещенность, создаваемая ими, складывается.

# ЗАДАЧА

Луч падает под углом  $\varepsilon=60^\circ$  на стеклянную пластинку толщиной  $d=30$  мм. Определить боковое смещение  $\Delta x$  луча после выхода из пластинки.



$$h = AB \cdot \sin(\varepsilon - \varepsilon')$$

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} = n \Rightarrow \frac{\sin 60^\circ}{\sin \varepsilon'} = 1,5$$

$$\sin \varepsilon' = \frac{\sin \varepsilon}{n} = \frac{\sin 60^\circ}{1.5} \approx 0.577$$

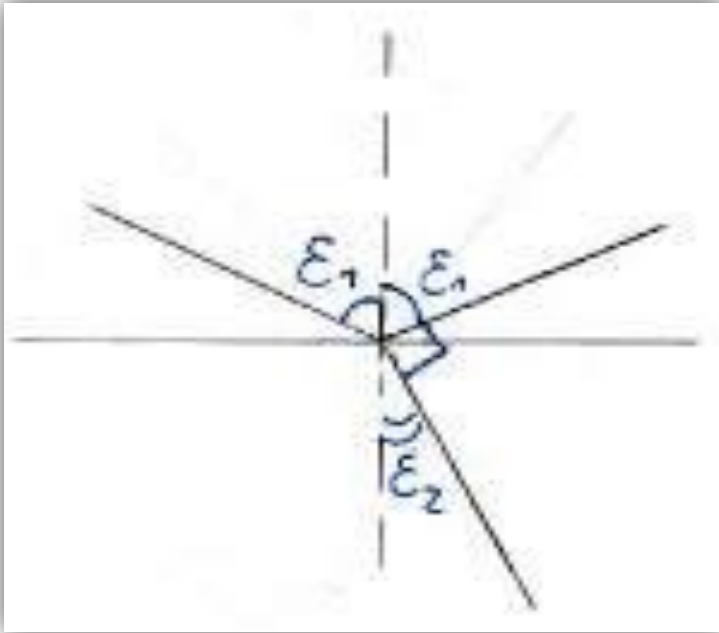
$$\varepsilon' \approx 35.3^\circ$$

$$AB = \frac{d}{\cos \varepsilon'} = \frac{0.03}{0.816} \approx 0.0367$$

$$h \approx 0.01536$$

# ЗАДАЧА

Луч света переходит из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$ . Показать, что если угол между отраженным и преломленным лучами равен  $\pi/2$ , то выполняется условие  $\operatorname{tg} \varepsilon_1 = n_2/n_1$  ( $\varepsilon_1$  — угол падения).



$$\frac{\sin \varepsilon_1}{\sin \varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\varepsilon_2 = \pi - \varepsilon_1 - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} - \varepsilon_1$$

$$\sin \varepsilon_2 = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_1\right) = \cos \varepsilon_1$$

$$\frac{\sin \varepsilon_1}{\cos \varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_1 = \frac{n_1}{n_2}$$

# ЗАДАЧИ 1

1.1 На горизонтальном дне бассейна глубиной  $h = 1,5$  м лежит плоское зеркало. Луч света входит в воду под углом  $\alpha_1 = 45^\circ$ . Определите расстояние  $s$  от места вхождения луча в воду до места выхода его на поверхность воды после отражения от зеркала. Показатель преломления воды  $n = 1,33$ .

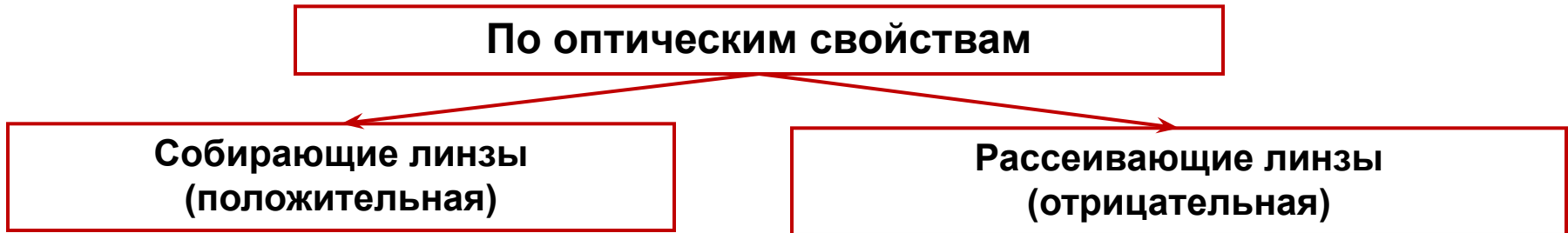
1.2 Луч света падает на плоскую границу раздела двух сред, частично отражается и частично преломляется. Определите угол падения, при котором отраженный луч перпендикулярен преломленному лучу.

1.3 Предельный угол полного отражения на границе стекло—жидкость  $\alpha_{\text{пр}} = 65^\circ$ . Определите показатель преломления жидкости, если показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

1.4 Зная скорость света в вакууме найти скорость света в алмазе

# ТОНКИЕ ЛИНЗЫ

**Линзы** представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая, иногда цилиндрическая, а вторая – сферическая или плоская), преломляющими световые лучи, способные формировать оптические изображения предметов

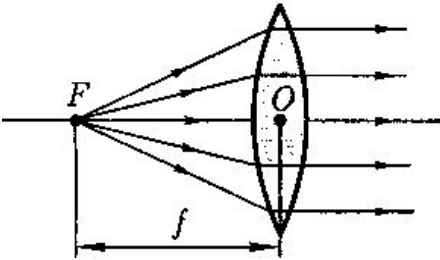
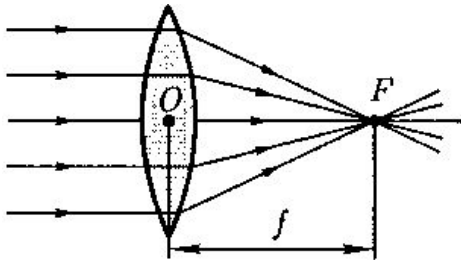


**Линза** называется **тонкой** если ее толщина (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше по сравнению с радиусами поверхностей, ограничивающих линзу

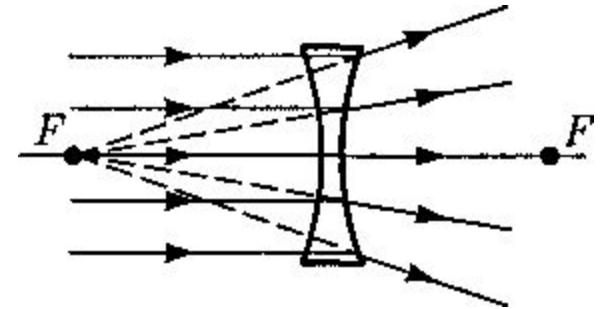
Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**

Точка, называемая **оптическим центром линзы**, находится на главной оптической оси, лучи проходящие через эту точку не преломляются

# ТОНКИЕ ЛИНЗЫ



$$\pm D = \pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}$$



Формула тонкой линзы

$D$  – оптическая сила линзы;

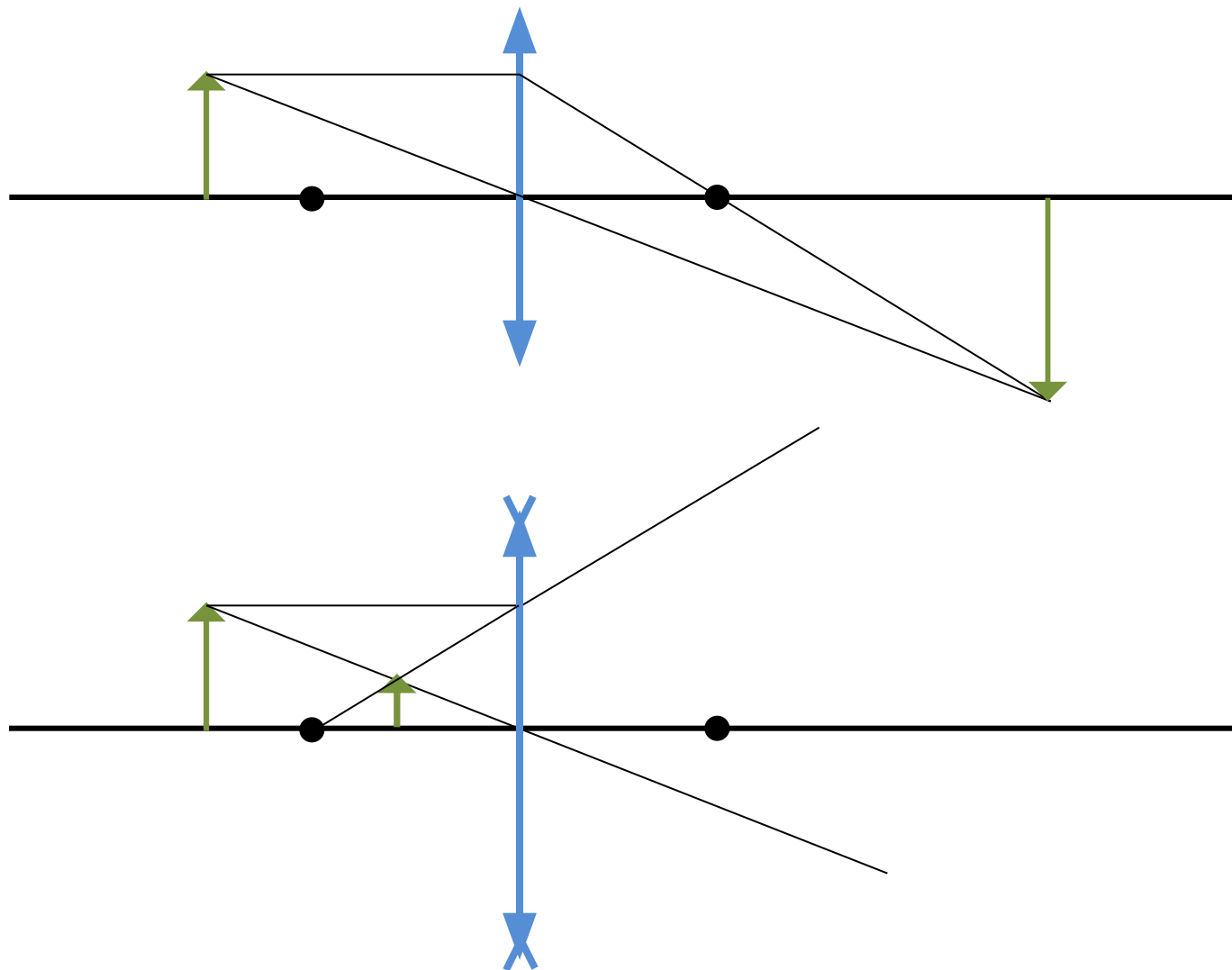
$F$  – фокусное расстояние линзы;

$d$  – расстояние от предмета до линзы;

$f$  – расстояние от линзы до изображения.

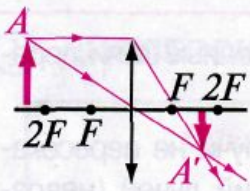
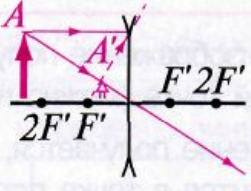
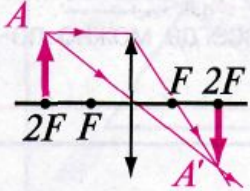
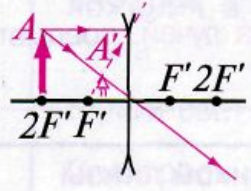
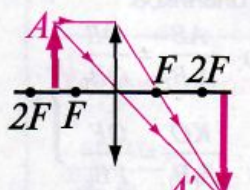
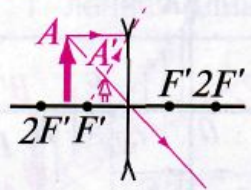
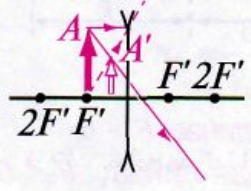

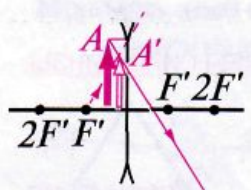
**Фокус** — это точка, в которой после преломления собираются все лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси.

# ТОНКИЕ ЛИНЗЫ





# ТОНКИЕ ЛИНЗЫ

 <p><b>изображение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- уменьшенное</li> <li>- действительное</li> <li>- перевернутое</li> </ul>	 <p><b>изображение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- уменьшенное</li> <li>- мнимое</li> <li>- прямое</li> </ul> <p>(во всех случаях)</p>
 <ul style="list-style-type: none"> <li>- равное</li> <li>- действительное</li> <li>- перевернутое</li> </ul>	
 <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличенное</li> <li>- действительное</li> <li>- перевернутое</li> </ul>	
 <p>изображения нет</p>	
 <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличенное</li> <li>- мнимое</li> <li>- прямое</li> </ul>	 <p>Чем ближе предмет к линзе, тем больше изображение</p>

## Условия построения изображения:

- параксиальные лучи (лежат бесконечно близко к оптической оси);
- показатель преломления линзы не зависит от длины волны падающего света;
- падающий свет – монохроматический (излучение в диапазоне частот, воспринимаемых человеческим глазом)

## ЗАДАЧИ 2

2.1 Свеча находится на расстоянии 12,5 см от собирающей линзы, оптическая сила которой 10 дптр. На каком расстоянии от линзы получится изображение и каким оно будет?

2.2 Рассматривая предмет в собирающую линзу, его располагают на 4 см от нее. При этом получают мнимое изображение в 5 раз больше самого предмета. Найти оптическую силу линзы.

2.3 На каком расстоянии перед рассеивающей линзой с оптической силой – 3 дптр надо поместить предмет, чтобы его мнимое изображение получилось посередине между линзой и ее мнимым фокусом?

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ОПТИКИ

В конце XVII века возникли две теории света – корпускулярная (Ньютон-Декарт) и волновая (Гук-Гюйгенс)

## ОПТИКА

**Корпускулярная теория света**, рассматривает его как поток частиц — квантов света или фотонов. В соответствии с идеей Планка любое излучение происходит дискретно.

Использование представлений о свете, как потоке частиц, объясняет явление фотоэффекта и закономерности теории излучения.

**Волновая теория света** рассматривает свет как совокупность поперечных монохроматических электромагнитных волн. Волновая теория электромагнитного излучения теоретически описана в работах Максвелла. Использование представления о свете, как о волне, позволяет объяснить явления, связанные с интерференцией и дифракцией и голографией.

### Корпускулярно-волновой дуализм:

свет в некоторых явлениях обладает свойствами, присущими **частицам** (корпускулярная теория), в других явлениях свойствами, присущими **волнам** (волновая теория)

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ОПТИКИ

**Двойственность природы света** – наличие у него одновременно характерных черт, присущих и волнам, и частицам, – является частным случаем **корпускулярно-волнового дуализма**.

В современной физической оптике квантовые представления не противоречат волновым, а сочетаются на основе квантовой механики и квантовой электродинамики

А. Эйнштейн: свет представляет собой единство противоположных видов движения — **корпускулярного (квантового) и волнового (электромагнитного)**



**свет представляет собой единство дискретности и непрерывности**

Далее будем рассматривать свет как **электромагнитные волны**

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

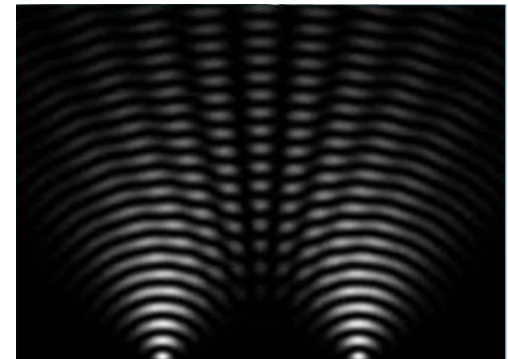
**Интерференция света** – пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.

**Интерференция волн** — взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга. Сопровождается чередованием максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) интенсивности в пространстве. Результат интерференции (интерференционная картина) зависит от разности фаз накладывающихся волн.

---

Условием интерференции волн является их **когерентность**, т.е. согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов

Этому условию удовлетворяют **монохроматические волны** — неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты



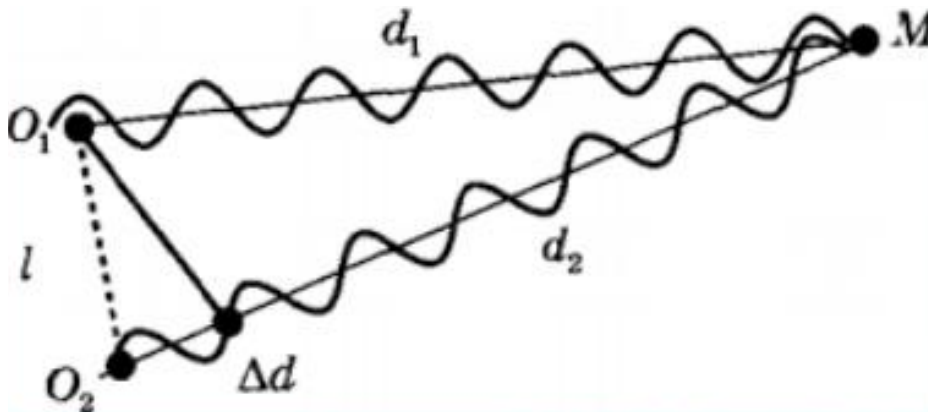
# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

**Условие максимума интерференции:** если оптическая разность хода равна целому числу длин волн

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

**Условие минимума интерференции:** Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$



# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$



амплитуда результирующего колебания

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если разность фаз  $\varphi_2 - \varphi_1$  колебаний возбужденных волнами в некоторой точке

пространства остается постоянной во времени (но свое для каждой точки пространства), то такие волны называются **когерентными**, поэтому **интенсивность**

результирующей волны  $I \propto A^2$

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Суммарная интенсивность  $J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

В случае когерентных волн  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{const}$

при наложении двух (или нескольких) когерентных световых волн происходит пространственное **перераспределение светового потока**, в результате чего в одних местах возникают **максимумы**, а в других — **минимумы** интенсивности

---

В точках пространства, где

$$J > J_1 + J_2$$

в максимуме

$$J = 4J_1$$

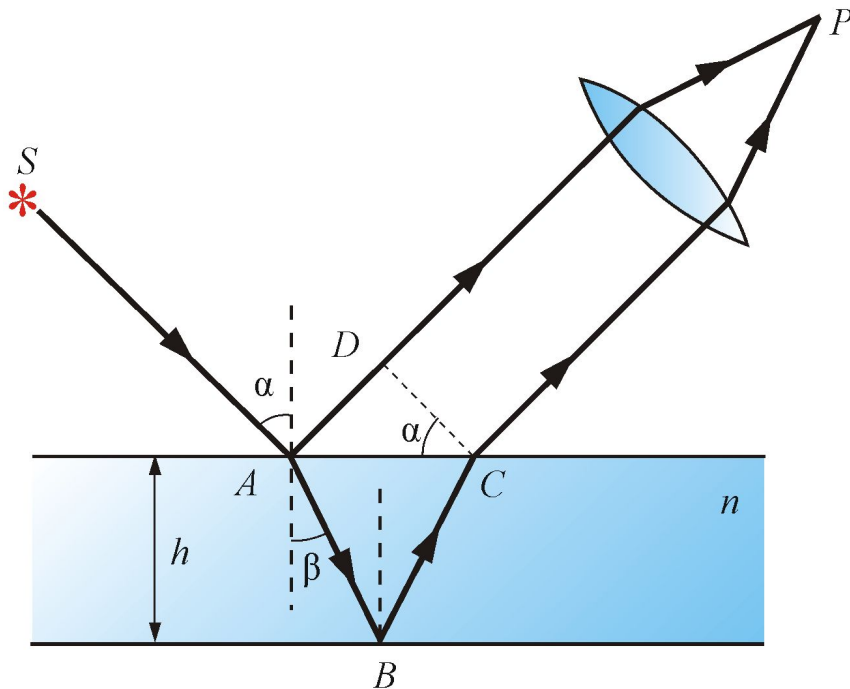
$$J < J_1 + J_2$$

в минимуме

$$J = 0$$



# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ



На пластинке происходит, деление амплитуды, фронт волн в ней сохраняются, меняя направление движения

Оптическая разность хода с учетом потери полуволны:

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$$

max интерференции

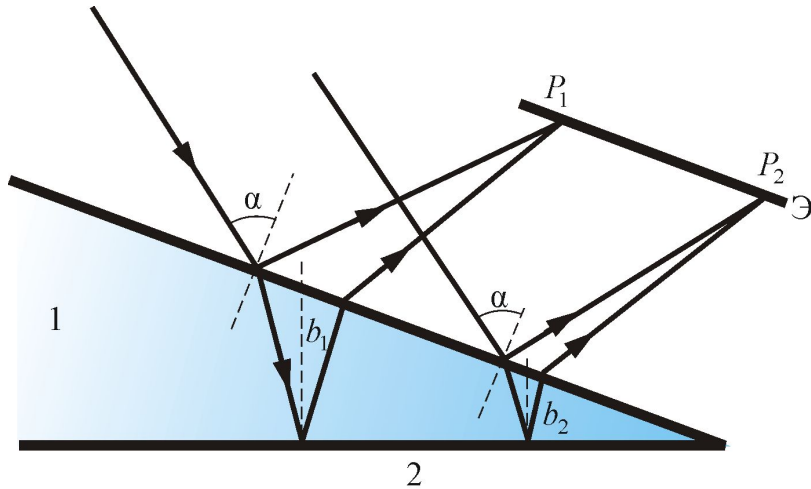
$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$$

min интерференции

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Интерференция наблюдается если удвоенная толщина пластинки меньше длины когерентности падающей волны

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

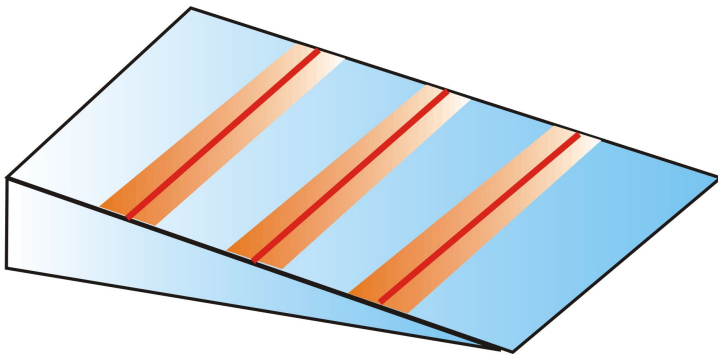


Оптическая разность хода с учетом потери полуволны

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$$

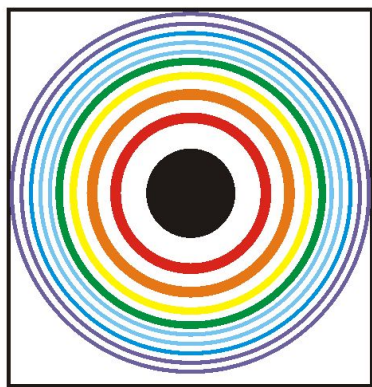
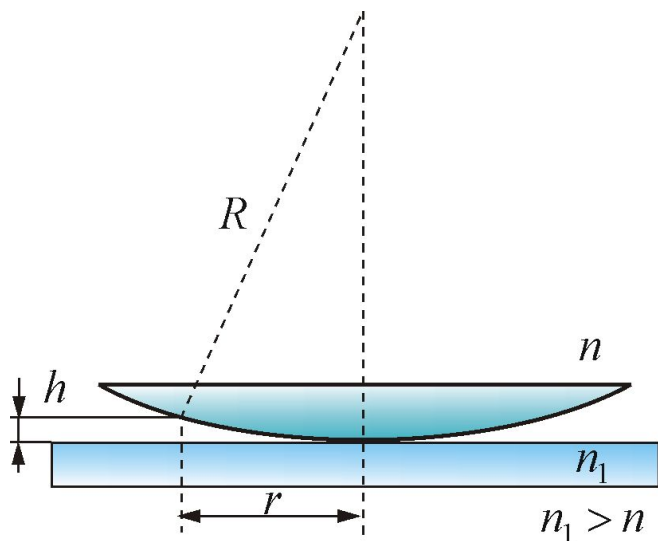
$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2} \quad \text{max интерференции}$$

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{min интерференции}$$



Полосы равной толщины локализованы вблизи поверхности клина. Если свет падает на пластинку нормально, то полосы равной толщины локализуются на верхней поверхности клина

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ



Кольцевые полосы равной толщины, наблюдаемые в воздушном зазоре между соприкасающимися выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны и плоской поверхностью стекла, называют **кольцами Ньютона**.

Система освещается параллельным пучком естественного или монохроматического света, со стороны линзы.

Оптическая разность хода с учетом потери полуволны

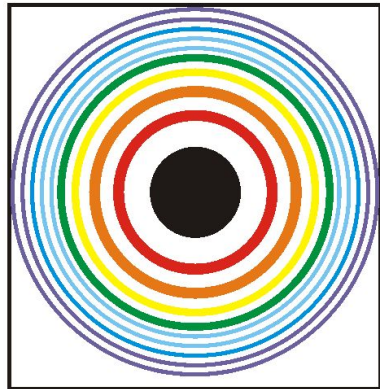
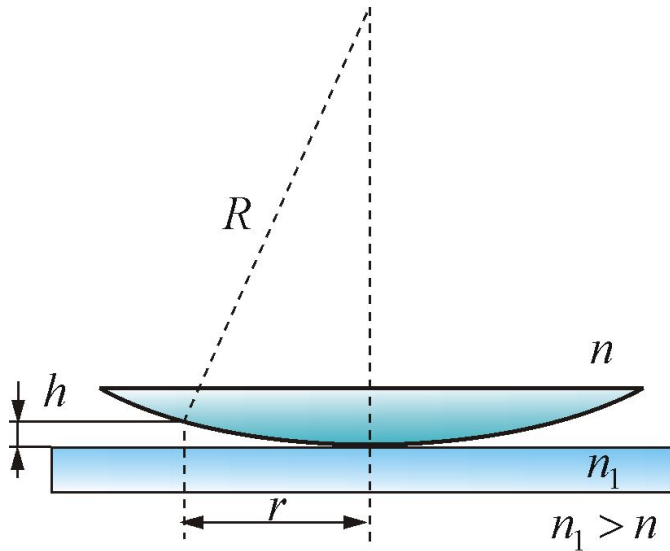
$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$$

$$\begin{matrix} n = 1 \\ \alpha = 0 \end{matrix} \rightarrow \Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$$

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

Толщина воздушного зазора

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ



Когда обе волны складываются синфазно, то есть дают в отраженном свете интерференционный максимум. Это соответствует условию:

$$\Delta = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

**Радиус  $m$ -го светлого кольца в отраженном свете (темного кольца в проходящем свете)**

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda R}$$

**Радиус  $m$ -го светлого кольца в проходящем свете (темного кольца в отраженном свете)**

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}$$

# ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Специальные приборы — **интерферометры**, действие которых основано на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: точное измерение длин световых волн, показателя преломления газов и других веществ.

**Проверка качества обработки поверхностей.** С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до  $1/10$  длины волны, т. е. с точностью до 1 мкм. Неровности поверхности вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности.

**Просветление оптики.** Объективы фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и различные другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стекол — линз, призм и др. Проходя через такие устройства, свет отражается от многих поверхностей. Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10, а в перископах подводных лодок доходит до 40. В результате качество полученного изображения улучшается.

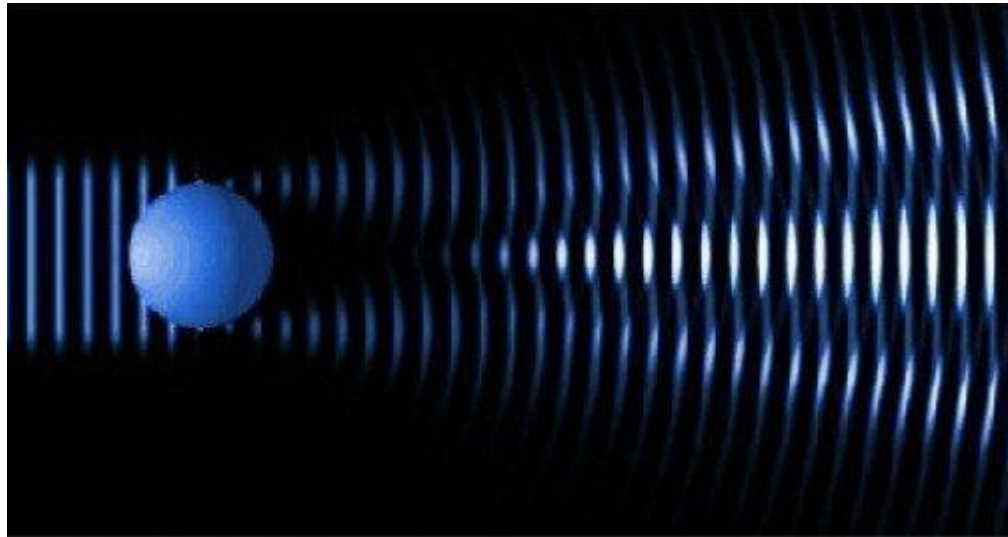
# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

**Дифракция** света – огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов); проникновение света в область геометрической тени.

---

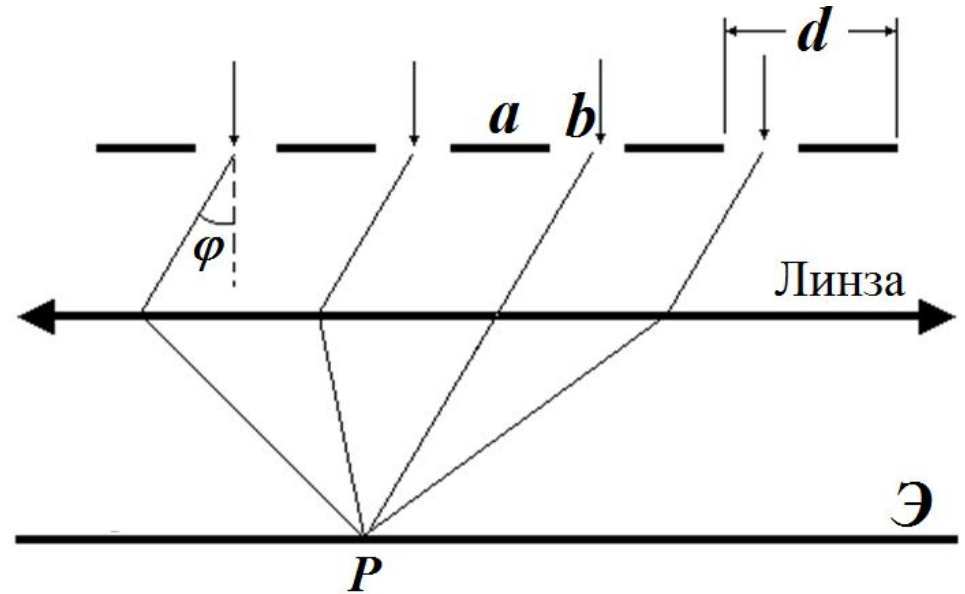
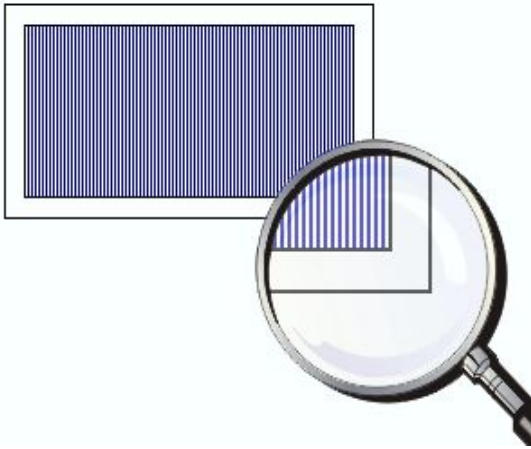
**Дифракция света** — это совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света сквозь малые отверстия, вблизи границ непрозрачных тел и т.д., обусловленных волновой природой света.

**Условие возникновения дифракции** – наличие препятствия и первоисточника света. Длина препятствия не должна быть больше длины волны.



# ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Правильная структура из большого числа щелей называется **дифракционной решеткой**



$d = a + b$  – параметр или постоянная дифракционной решетки

Дифракционный максимум

$$d \sin \varphi = k \lambda$$

# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

## Принцип Гюйгенса – Френеля:

Каждая точка любой воображаемой поверхности, окружающей один или несколько источников света, является центром **вторичных световых волн**, которые **когерентны**, и интенсивность света в любой точке пространства есть результат **интерференции** этих вторичных волн.





# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Френель вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции вторичных волн

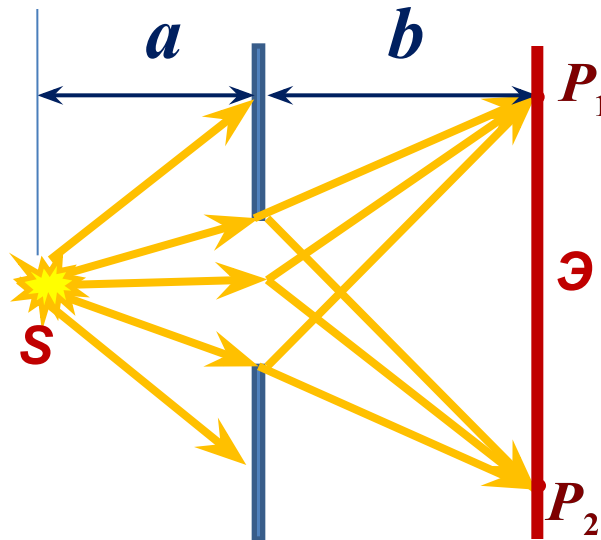
## Дополнения к принципу Гюйгенса

1. Все **вторичные** источники фронта волны, исходящей из одного источника, **когерентны** между собой.
2. Равные по площади участки волновой поверхности излучают **равные интенсивности** (мощности).
3. Каждый вторичный источник излучает свет преимущественно **в направлении внешней нормали** к волновой поверхности в этой точке.
4. Для вторичных источников справедлив принцип суперпозиции: **излучение одних участков** волновой поверхности **не влияет** на излучение других.

# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА



Френель Огюст Жан  
(1788 - 1827)  
французский физик

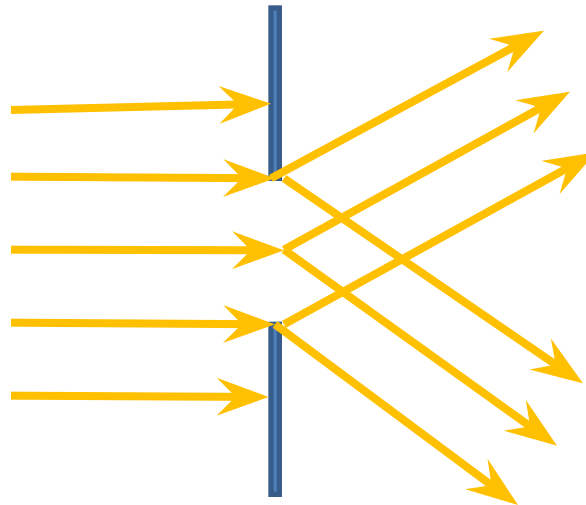


## Дифракция Френеля

сходящиеся и  
расходящиеся лучи  
(источник и точки  
наблюдения находятся  
близко к препятствию)



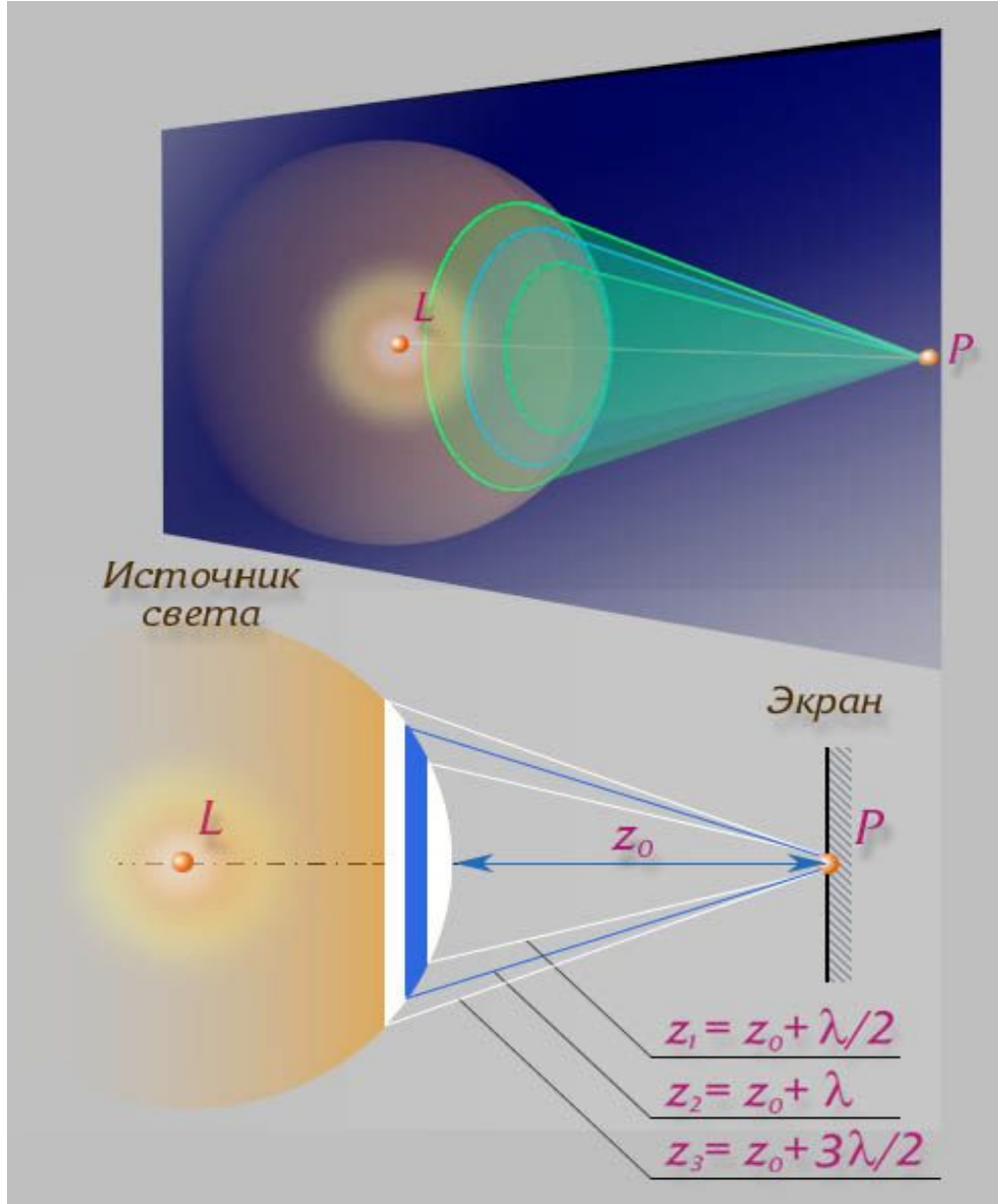
Фраунгофер Йозеф  
(1787- 1826)  
немецкий физик



## Дифракция Фраунгофера

параллельные лучи  
(источник и точки  
наблюдения находятся  
на бесконечности)

# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА



## Метод зон Френеля

Амплитуда результирующей волны в любой точке может быть найдена как результат интерференции всех вторичных волн с учетом их фаз и амплитуд.

Колебания, возбуждаемые в точке  $P$  двумя соседними зонами, **противоположны по фазе** из-за разности хода  $\lambda/2$ . Такие колебания гасят друг друга.

**Гашение неполное**, т.к. каждая следующая зона создает в т.  $P$  колебания меньшей амплитуды, чем предыдущая

$$A_1 > A_2 > A_3 > \dots$$

# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Амплитуды волн, приходящих в точку Р от соседних зон, примерно равны.

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}$$

Амплитуда колебания  $A_m$  от некоторой  $m$ -й зоны равна среднему арифметическому от амплитуд примыкающих к ней зон, т.е.

Таким образом

$$A = \frac{A_1}{2} + \left( \frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left( \frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2}$$

площади соседних зон одинаковы, то выражения в скобках равны нулю,

Результирующая амплитуда  $A = \frac{A_1}{2}$

---

Интенсивность излучения  $J \sim A^2$

**Результирующая амплитуда**, создаваемая в некоторой точке Р всей сферической поверхностью, **равна половине амплитуды, создаваемой одной лишь центральной зоной, а интенсивность**

$$J = \frac{J_1}{4}$$

# ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Дифракция света ограничивает разрешающую способность оптических систем, не позволяя получить четкое изображение сильно удаленных или мелких объектов.

Дифракция звука и ультразвука является помехой при работе гидроакустических приборов.

Для радиоволн это причина падения сигнала – «замирания» радиоволны вследствие дифракции на облаках – и сложности при радиопередаче или работе радаров.

Частотное разделение световых лучей используют в спектроскопии, где для этих целей создают специальные дифракционные решетки, дающие возможность исследовать особенности тонкой структуры спектров.

Дифракция рентгеновских лучей и электронов на кристаллах и молекулах стала основой рентгеноструктурного анализа и электронографии – методов изучения строения вещества, широко применяемых в науке, медицине, на производстве.

В электронных микроскопах используется дифракция электронных пучков на микрообъектах.

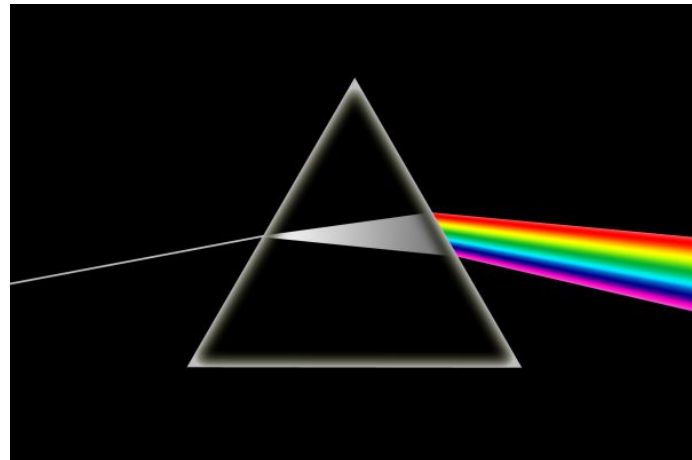
# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

**Дисперсия света** (разложение света) — это совокупность явлений, обусловленных зависимостью абсолютного показателя преломления вещества от частоты (или длины волны) света, или зависимостью фазовой скорости света в веществе от частоты (или длины волны).

**Чем меньше длина световой волны, тем больше показатель преломления среды для неё и тем меньше фазовая скорость волны в среде:**

у света красного цвета фазовая скорость распространения в среде максимальна, а степень преломления — минимальна,

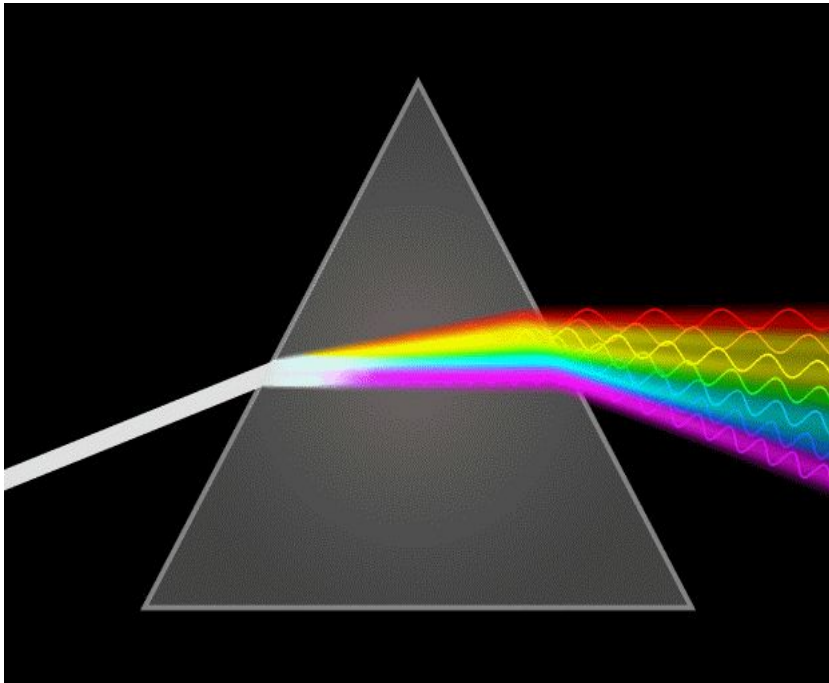
у света фиолетового цвета фазовая скорость распространения в среде минимальна, а степень преломления — максимальна.



# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Дисперсия приводит к разложению света в спектр

Разложение света в призме



Радуга – разложение света каплями воды



Стеклянная призма сильнее всего отклоняет фиолетовый луч, так как у него самая маленькая  $\lambda$  и самый большой  $n$

# ЗАДАЧИ 3

3.1 Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране, если зеленый светофильтр ( $\lambda_1 = 500$  нм) заменить красным ( $\lambda_2 = 650$  нм)?

3.2 Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Радиус кривизны линзы  $R = 5$  м. Наблюдение ведется в проходящем свете. Найти радиусы  $r_c$  и  $r_{кр}$  четвертого синего кольца ( $\lambda_c = 400$  нм) и третьего красного кольца ( $\lambda_{кр} = 630$  нм).

3.3 Дифракционная решетка содержит 120 штрихов на 1 мм. Найти длину волны монохроматического света, падающего на решетку, если угол между двумя спектрами первого порядка равен  $8^\circ$ .

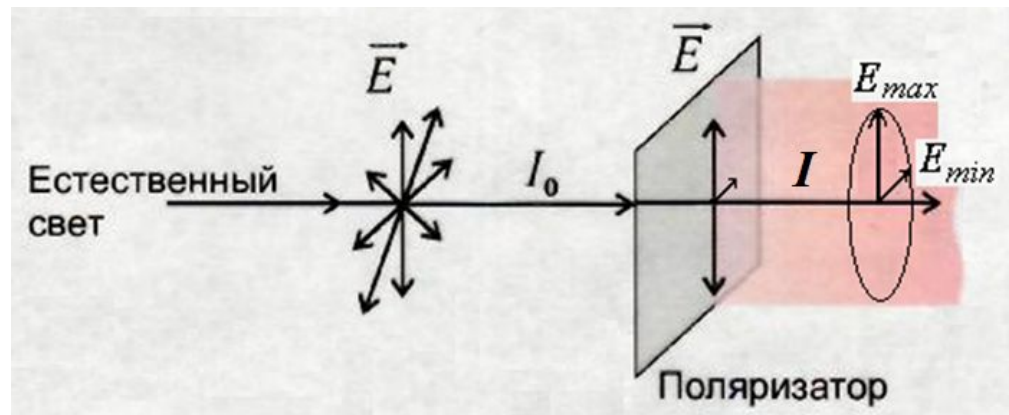
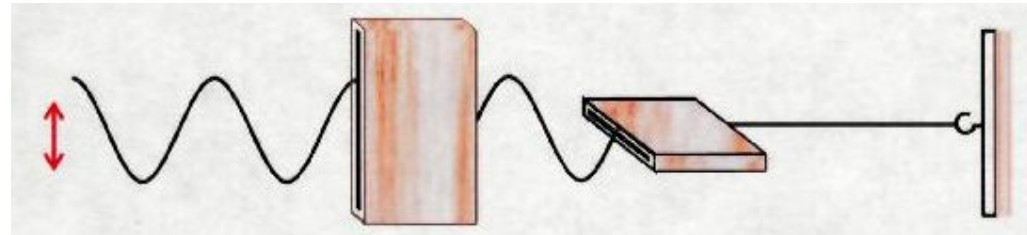
3.4 Определить угол отклонения лучей зеленого света ( $\lambda = 0,55$  мкм) в спектре первого порядка, полученном с помощью дифракционной решетки, период которой равен 0,02 мм



# ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

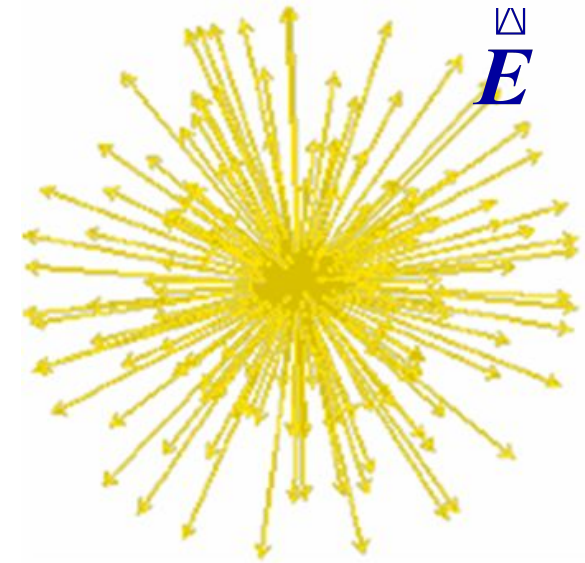
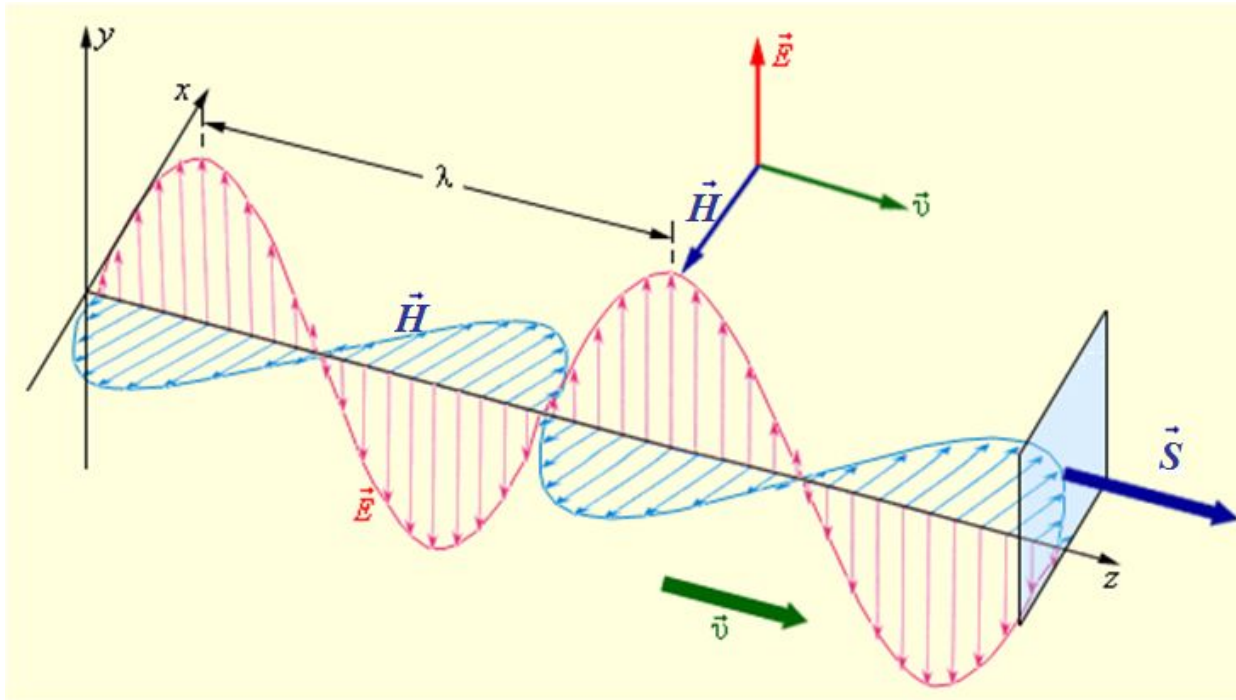
**Поляризация волн** — характеристика поперечных волн, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

**Поляризаторы** — это природные кристаллы или устройства, позволяющие получить линейно поляризованный свет из естественного. Они пропускают только одну компоненту светового вектора



# ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $E$  и  $H$  называется естественным.



Естественный свет

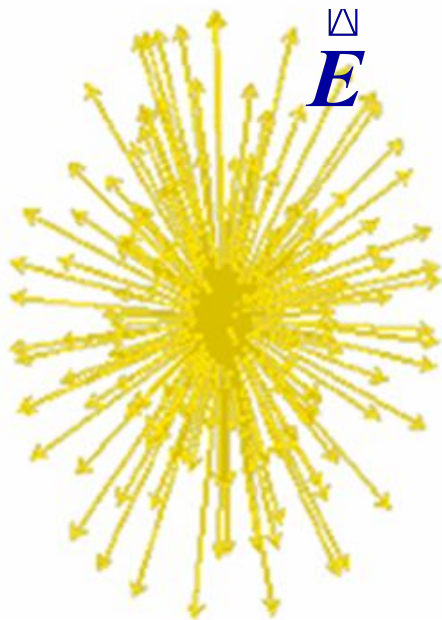
В естественном свете колебания светового вектора  $E$  неупорядочены

# ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Свет, в котором направления колебаний светового вектора упорядочены, называется **поляризованным**.

Есть несколько видов поляризации

**Частичная**  
(одно направление колебаний преобладает)

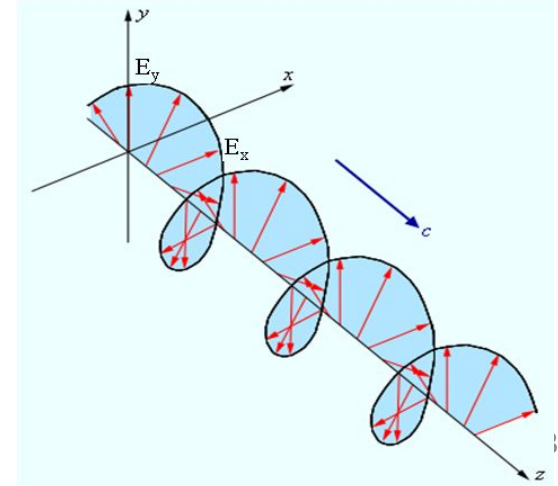


**Линейная (плоская)**  
(колебания происходят только в одном направлении)



**Эллиптическая**  
(световой вектор выписывает эллипс)

Поляризация может быть правовинтовой и левовинтовой.  
Круговая и линейная поляризации – частные случаи эллиптической поляризации



# ЗАКОН БРЮСТЕРА



**Сэр Дейвид Брюстер**  
шотландский физик  
(1781 – 1868)

**Закон Брюстера** – соотношение между показателем преломления  $n$  диэлектрика и таким углом падения на него неполяризованного света, при котором отражённый от поверхности диэлектрика свет полностью поляризован.

При этом отражается только параллельная поверхности раздела компонента  $E_s$  электрического вектора световой волны. Компонента  $E_p$ , лежащая в плоскости падения, не отражается, а преломляется.

Это происходит при условии

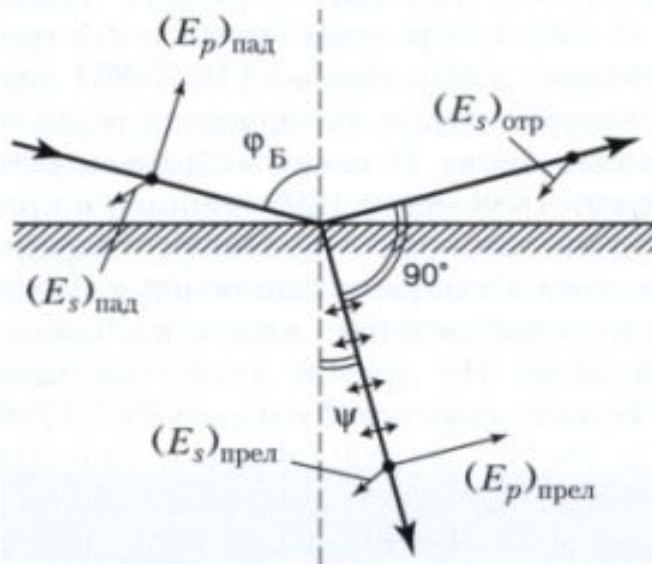
Угол  $\varphi_B$  называется

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n$$

$$\cos \varphi_B = \sin \psi$$

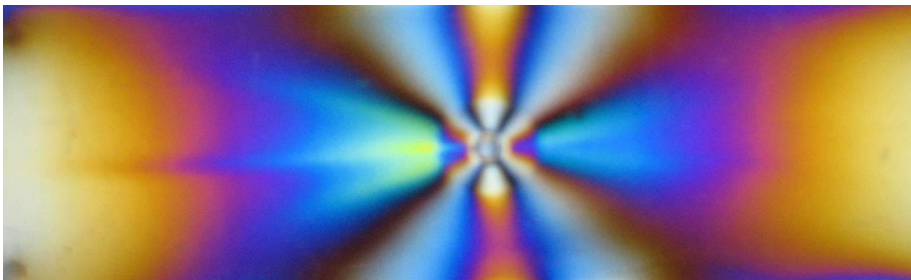
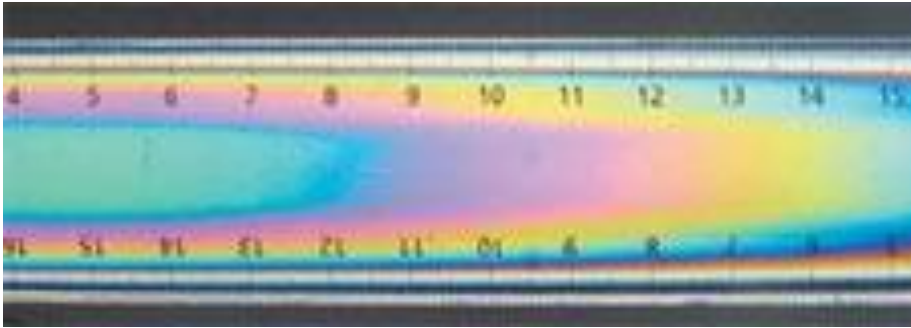
$$\varphi_B + \psi = 90^\circ$$

т. е. угол между отражённым и преломлённым лучами  $90^\circ$



**Закон Брюстера – условие полной поляризации отраженного луча на границе двух диэлектриков**

# ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА



В поляризованном свете изучают распределение механических напряжений в деталях машин и механизмов, строительных конструкциях, прозрачных изделиях.

Это явление используется для создания различных оптических эффектов, а также в 3D-кинематографе, где поляризация используется для разделения изображений, предназначенных правому и левому глазу.

Круговая поляризация применяется в антеннах космических линий связи, так как для приёма сигнала не важно положение плоскости поляризации передающей и приёмной антенн. То есть вращение космического аппарата не повлияет на возможность связи с ним.



Скрепку удерживает поверхностное натяжение. Прогиб поверхности можно увидеть, если поляризовать источник света



# ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА



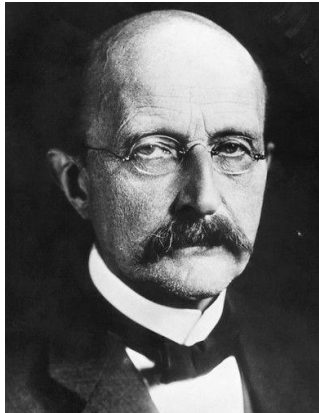
Без поляризационных линз



С поляризационными линзами



# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ОПТИКИ



**Макс Планк**  
немецкий физик  
(1858 – 1947)

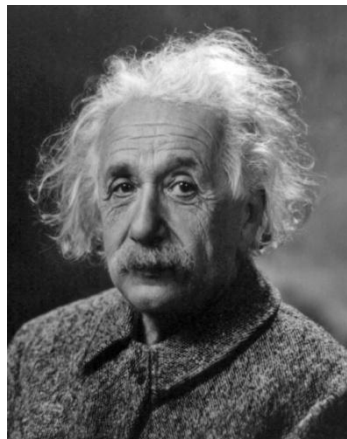
**Недостатки волновой теории:** явления интерференции, дифракции и поляризации объясняются при условии, что световые волны поперечные, но тогда их носитель эфир

М. Планк: энергия света принимает **дискретные** значения, пропорциональные частоте колебаний

В 1905 г. Альберт Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта на основе представления о световых частицах – «квантах» света, «фотонах», масса которых

$$m_{\text{ф}} = \frac{E_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$$

соотношение связывает корпускулярные характеристики излучения – **массу и энергию кванта** – с волновыми – **частотой и длиной волны**



**Альберт Эйнштейн**  
немецкий физик  
(1879 – 1955)

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ



**Генрих Рудольф Герц**  
немецкий физик  
(1857 – 1894)

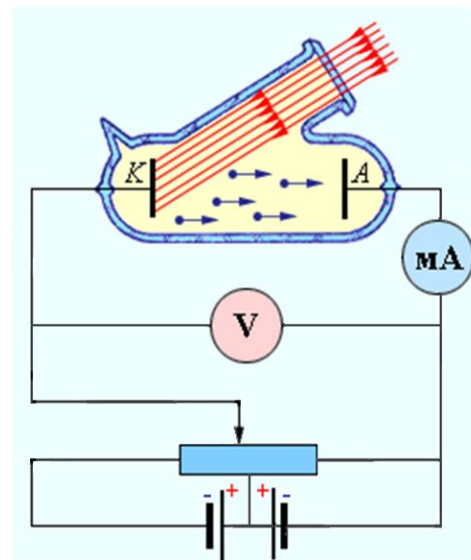
Открыт в 1887 году немецким физиком  
Г. Герцем  
в 1888–1890 годах экспериментально  
исследован российским физиком А.  
Г. Столетовым

Падая на поверхность металла и  
поглощаясь в нем, свет вызывает  
эмиссию (испускание) электронов  
веществом. Это явление называется  
**фотоэлектрическим эффектом**  
**(фотоэффектом)**

Вылетающие из вещества электроны  
называются **фотоэлектронами**,  
а образуемый ими электрический ток  
называется **фототоком**  
Внешний фотоэффект наблюдается в  
твердых телах (металлах,  
полупроводниках, диэлектриках), а также  
в газах на отдельных атомах и молекулах  
(фотоионизация)

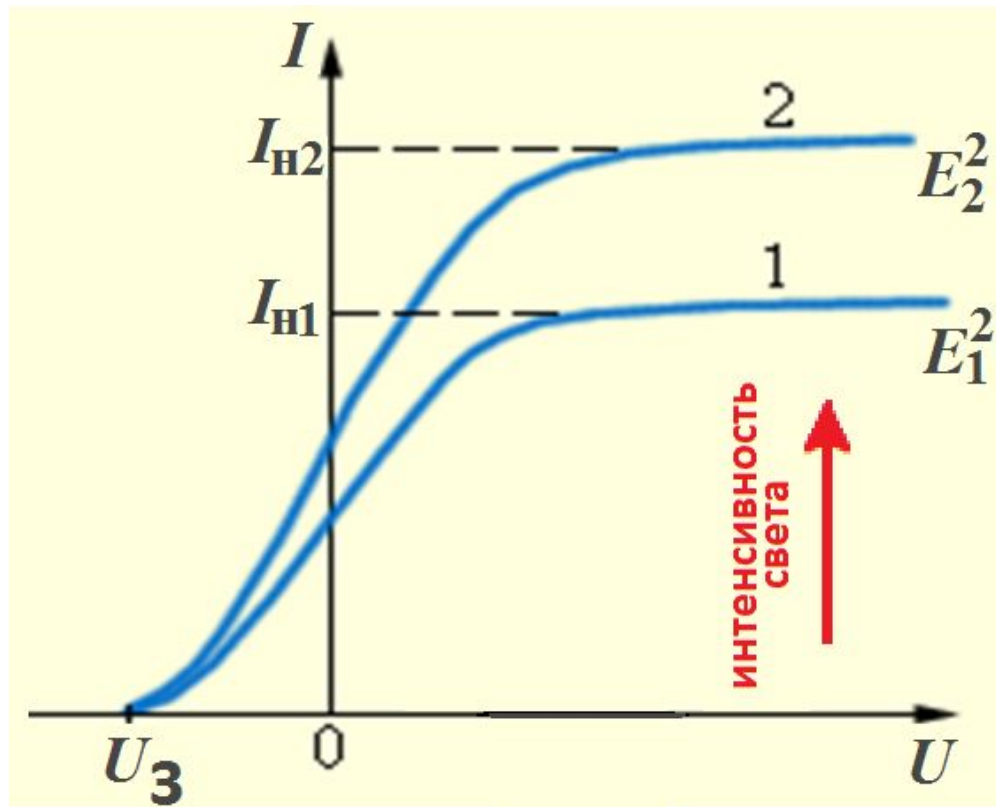


**Александр  
Григорьевич Столетов**  
русский физик  
(1839 - 1896)





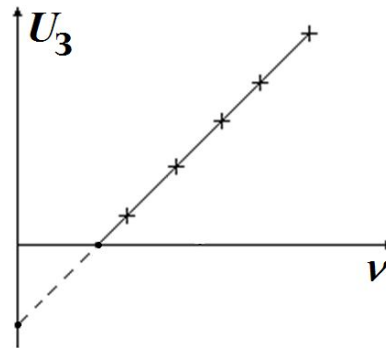
# ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФОТОЭФФЕКТА



$I_{H1}$  и  $I_{H2}$  – токи насыщения,  
 $U_3$  – запирающее напряжение

# ЗАКОНЫ СТОЛЕТОВА

1. **Фототок насыщения  $I_n$  пропорционален световому потоку, падающему на катод.** Этот ток равен суммарному заряду электронов, вырывааемых в единицу времени.
2. **Начальная скорость выбитых электронов тем больше, чем больше частота падающего света.** Это проявляется в зависимости  $U_3$  от частоты, зависимость – линейная!



Прямая П.И. Лукирского

3. **Фотоэффект наблюдается только при облучении светом с частотой, превышающей некоторую минимальную частоту.** Эта минимальная частота называется красной границей фотоэффекта.
4. **Фотоэффект безынерционен.**

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ



**Альберт Эйнштейн**  
немецкий физик  
(1879 – 1955)

Объяснение законов фотоэффекта в 1905 г. дал А. Эйнштейн на основе предложенной им гипотезы, что свет взаимодействует с веществом как поток частиц — квантов света или фотонов.

Энергия фотонов по гипотезе Планка  $E = h \cdot \nu$

**Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**

$$h \cdot \nu = A_{\text{вых}} + \frac{m\nu^2}{2}$$

Поглощенная электроном энергия кванта идет на совершение работы выхода  $A_{\text{вых}}$  электрона из металла и приобретение электроном кинетической энергии

Полагая в формуле Эйнштейна  $\frac{m\nu^2}{2} = 0$ , найдем красную границу фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \lambda_0 = \frac{h}{A_{\text{вых}}}$$

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Если энергия фотона превышает работу выхода, то разность между ними идет на кинетическую энергию электрона

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$$

По закону сохранения энергии

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3,$$



$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}$$

Получили формулу прямой П.И. Лукирского

**А. Г. Столетов:**

- 1) наиболее эффективное действие оказывает ультрафиолетовое излучение;
- 2) под действием света вещество теряет только отрицательные заряды;
- 3) сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Внутренний фотоэффект заключается в увеличении электропроводности полупроводников или диэлектриков под действием света. Это явление называют **фотопроводимостью**.

**Причиной фотопроводимости** является увеличение концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.

**Условие внутреннего фотоэффекта:** энергия фотона должна превышать энергию связи носителя заряда со своим атомом

# ЗАДАЧИ 4

4.1 При облучении алюминиевой пластины фотоэффект начинается при наименьшей частоте 1,03 ПГц. Найти работу выхода электронов из алюминия.

4.2 Какой длины волны свет надо направить на поверхность цезия, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была 2 Мм/с?

4.3 Найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, если запирающее напряжение равно 1,5 В.

4.4 К вакуумному фотоэлементу, у которого катод выполнен из цезия, приложено запирающее напряжение 2 В. При какой длине волны падающего на катод света появится фототок?

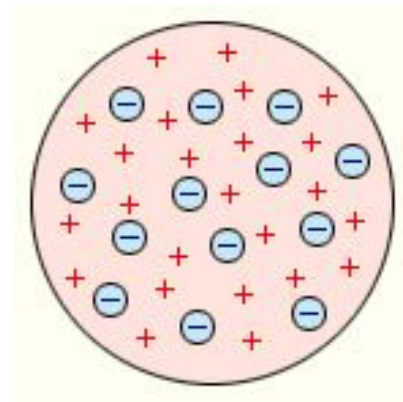
# МОДЕЛИ АТОМА

Гипотеза о том, что вещества состоят из атомов, впервые была высказана Левкидом и Демокритом примерно в IV веке до н. э.

## Модель Томсона – «модель кекса»

Томсон предложил рассматривать атом как положительно заряженное тело с заключёнными внутри него электронами.

Впоследствии модель была опровергнута опытами Резерфорда.

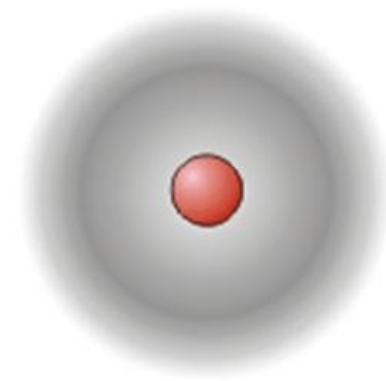


---

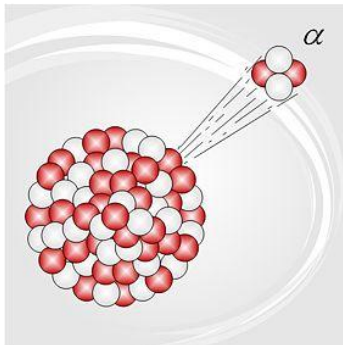
## Планетарная модель Нагаоки

В 1904 году Хантаро Нагаока предложил модель атома, построенную по аналогии с планетой Сатурн: вокруг маленького положительного ядра вращались электроны, объединённые в кольца.

Модель оказалась ошибочной, но послужила основой модели атома Резерфорда.



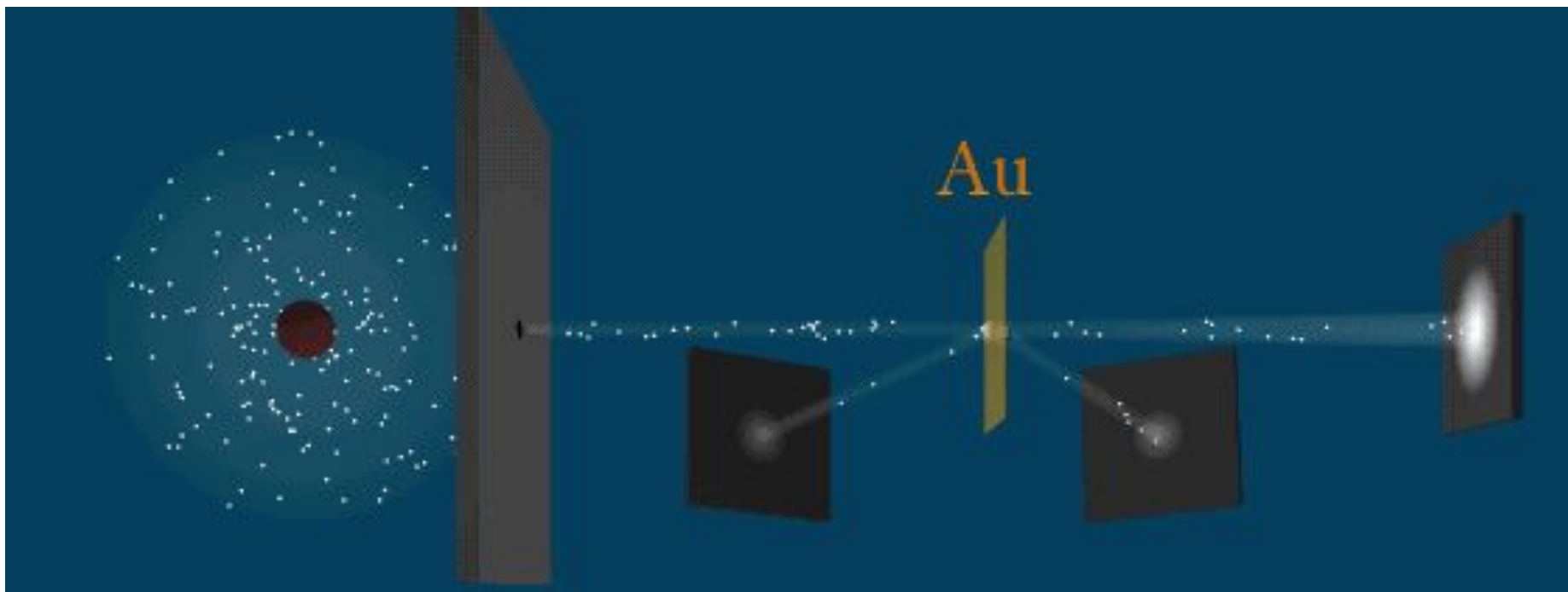
# МОДЕЛЬ АТОМА



Альфа-частица образована 2-мя протонами и 2-мя нейтронами, заряжена положительно. Идентична ядру атома гелия.

Образуется при  $\alpha$ -распаде ядер. При движении в веществе  $\alpha$ -частица создаёт сильную ионизацию и в результате быстро теряет энергию.

Резерфорд направил поток  $\alpha$ -частиц на золотую фольгу толщиной около 0,1 мкм. Большинство частиц пролетели сквозь фольгу, но некоторые отклонились на очень большие углы вплоть до 180 град.

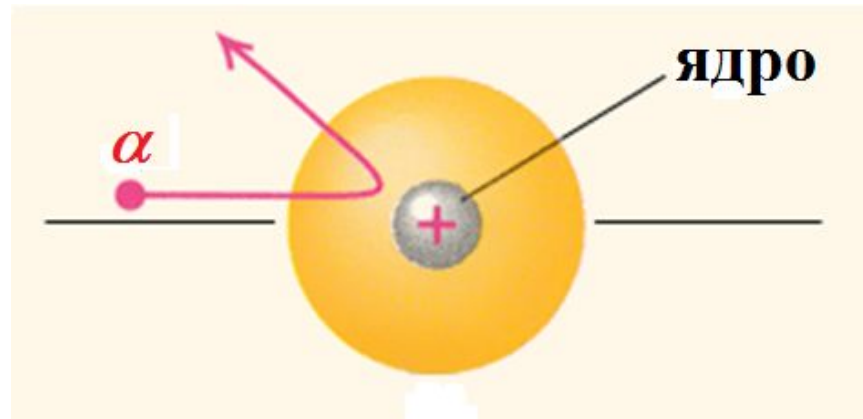




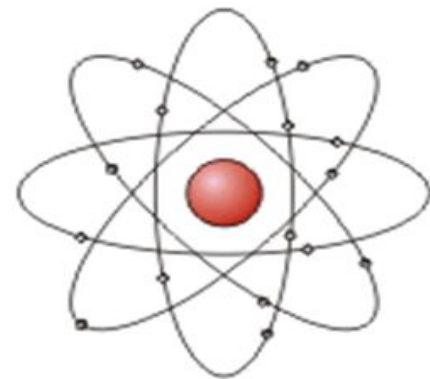
# МОДЕЛЬ АТОМА

**Резерфорд сделал вывод:** причиной рассеяния  $\alpha$ -частицы является ее электрическое взаимодействие с малой по размеру положительно заряженной частью атома - ядром.

В ядре сосредоточена почти вся масса атома и весь его положительный заряд.



**Планетарная модель атома Резерфорда:** атом представляет собой подобие планетной системы, в которой электроны движутся по орбитам вокруг тяжёлого положительно заряженного ядра.



Размеры: ядра  $\approx 10^{-15}$ , атома  $10^{-10}$  м.

# МОДЕЛЬ АТОМА

Согласно классической электродинамике электрон при движении с центростремительным ускорением должен излучать электромагнитные волны и терять энергию. В итоге он упадёт на ядро.

Для объяснения стабильности атомов Нильс Бор ввел постулаты. Постулаты Бора показали, что для атома классическая механика неприменима.

---

## Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)

Атом может находиться только в особых **стационарных** или **квантовых** состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $W_n$ . В стационарных состояниях атом **не излучает**.

## Второй постулат Бора (правило частот)

При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией  $W_n$  в другое с энергией  $W_m$  излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий этих состояний.

$$h\nu_{nm} = W_n - W_m$$

## Третий постулат (квантование орбит)

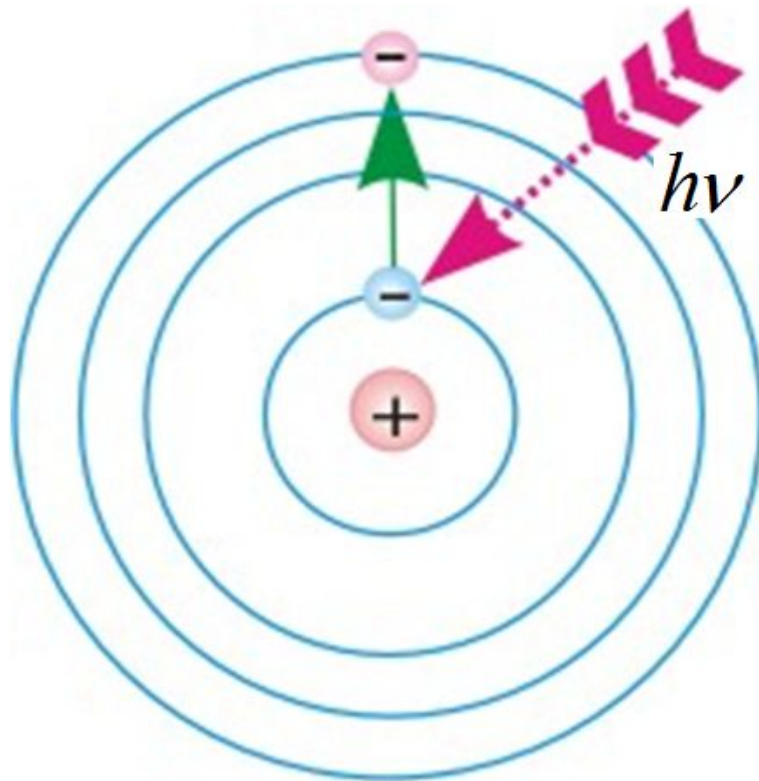
Момент импульса электрона в атоме принимает только дискретные значения, кратные постоянной Планка:

$$m v_n r_n = n \hbar$$

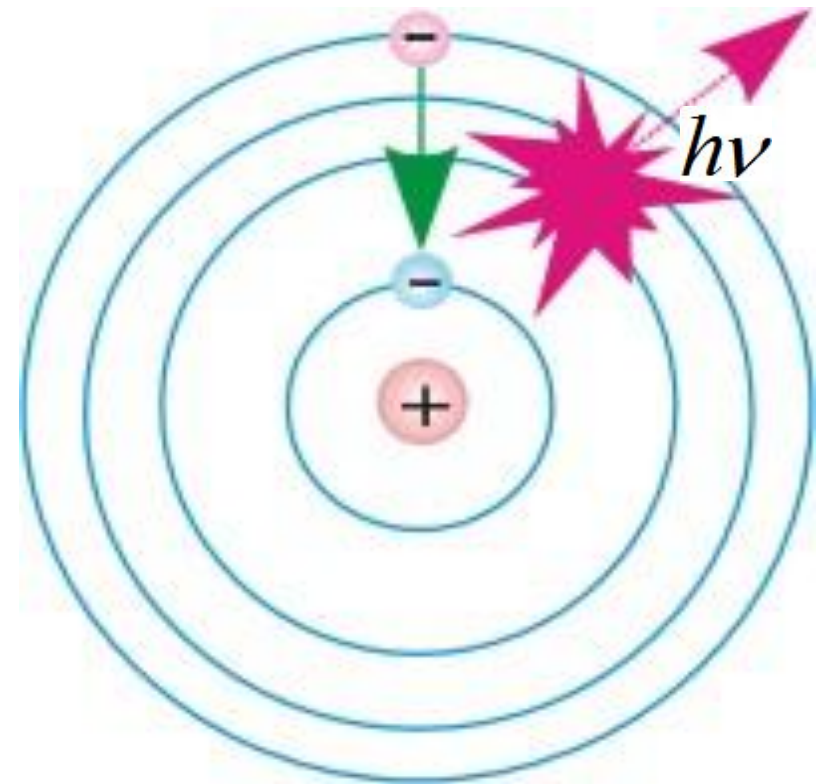
$m$  – масса электрона,  
 $v_n$  – его скорость на орбите  
радиуса  $r_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

# МОДЕЛЬ АТОМА

Квант света  
поглощается



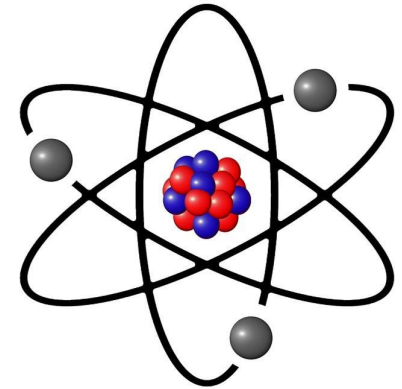
Квант света  
излучается



# ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА

В 1932 году русский физик Иваненко Д.Д. и немецкий физик Гейзенберг В. независимо друг от друга предложили протонно-нейтронную модель ядра.

Согласно этой модели, атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Ядерные частицы получили название **нуклоны**.



Каждое ядро содержит  **$Z$  протонов** и  **$N$  нейтронов**.  **$Z$  - зарядовое число** равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева. Суммарное число протонов и нейтронов в ядре – **массовое число  $A$ :  $A = Z + N$**

Обозначение ядер:  ${}^A_Z X$  или  ${}_Z X^A$

# ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Протоны в ядре отталкиваются кулоновскими силами. Это не приводит к разрушению ядер, так как между нуклонами в ядре действуют **ядерные силы** неэлектрической природы.

Взаимодействие нуклонов в ядре названо **сильным взаимодействием**.

---

## Свойства ядерных сил

- 1) не зависят от заряда нуклонов;
- 2) короткодействующие (действуют на расстояниях, не превышающих  $2 \cdot 10^{-15}$  м);
- 3) насыщенные (удерживают ограниченное число нуклонов);
- 4) нецентральные (действуют не по кратчайшей прямой).

# ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

Энергия, которую надо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется **энергией связи** атомного ядра. Энергия связи ядра в момент слияния нуклонов выделяется в виде излучения.

Из закона взаимосвязи массы и энергии  $W_{св} = \Delta m c^2$   
 $\Delta m$  – дефект массы ядра.

**Дефект массы ядра** - это разность между суммарной массой частиц, составляющих ядро, и массой целого ядра  $M_{я}$ :

$$\Delta m = Zm_{п} + (A - Z)m_{н} - M$$

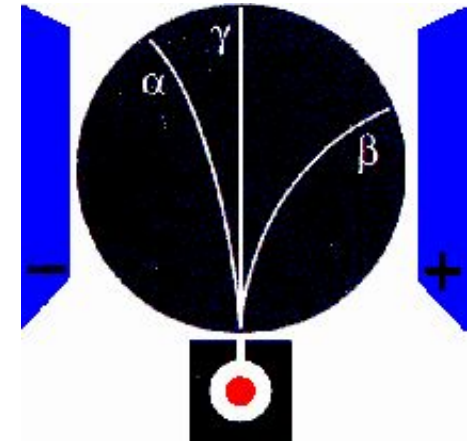
# РАДИОАКТИВНОСТЬ

Это явление самопроизвольного испускания химическими элементами излучения со значительной проникающей способностью и ионизирующими свойствами.

Радиоактивными являются все элементы с порядковым номером  $Z > 83$ .

Излучение радиоактивных веществ состоит из трех компонент:  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.

$\alpha$ - и  $\beta$ -лучи отклоняются магнитным полем в противоположные стороны, а  $\gamma$ -лучи не отклоняются совсем.



**Период полураспада  $T$**  - время, за которое распадается половина ядер. Характеризует скорость распада.

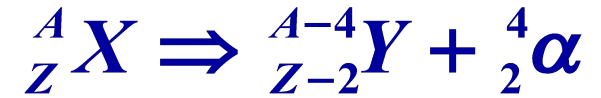
Например: радий  ${}_{88}\text{Ra}^{226}$  имеет период полу-распада 1600 лет; торий  ${}_{90}\text{Th}^{231}$  25.64 часа; полоний  ${}_{84}\text{Po}^{212}$  -  $3 \cdot 10^{-7}$  с.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

# РАДИОАКТИВНОСТЬ

## α-распад

Возникает в результате туннелирования α-частицы сквозь потенциальный барьер, создаваемый ядерными силами.



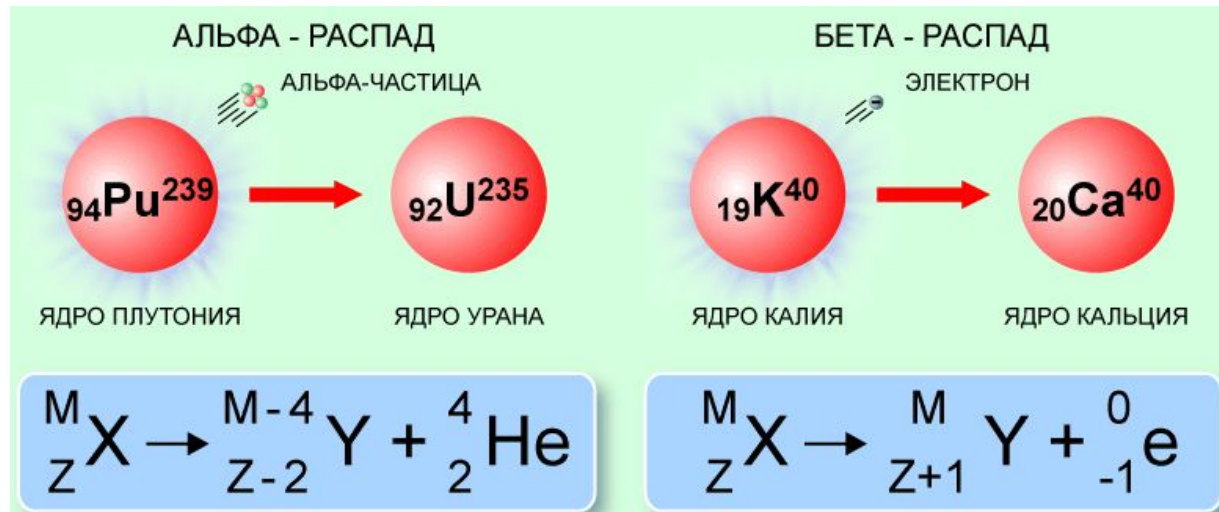
## β-распад

При β-распаде вместе с электроном испускается нейтральная частица – антинейтрино. Она имеет нулевой заряд



## γ-распад

γ - излучение - это коротковолновые фотоны.

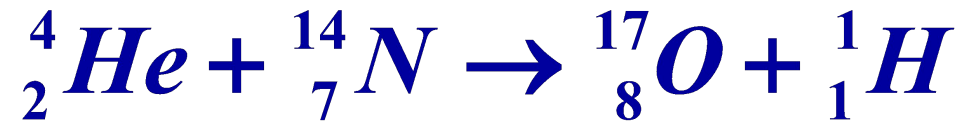




# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Взаимодействие атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, в результате которого ядро превращается в ядро другого элемента, называют **ядерной реакцией**.

Впервые ядерную реакцию осуществил Резерфорд в 1919 г.



## ЗАДАЧИ 5

5.1 Какой изотоп образуется из урана  ${}_{92}^{239}\text{U}$  после двух  $\beta$ -распадов и одного  $\alpha$ -распада?

5.2 В результате какого радиоактивного распада натрий  ${}_{11}^{22}\text{Na}$  превращается в магний  ${}_{12}^{22}\text{Mg}$  ?

5.3 Написать недостающие обозначения в следующих ядерных реакциях:

