

Лекция 3. Дифракция света

Принцип Гюйгенса–Френеля



1-е Определение

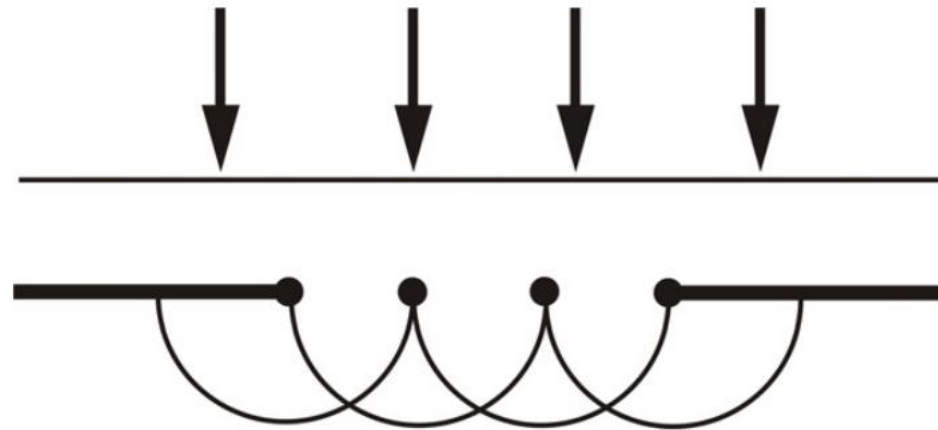
Дифракция – совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями, размеры которых сравнимы с длиной волны, и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

2-е Определение

Дифракция света – в узком, но наиболее употребительном смысле – огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов); проникновение света в область геометрической тени.

Принцип Гюйгенса–Френеля

Принципа Гюйгенса – каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени



Принцип Гюйгенса–Френеля



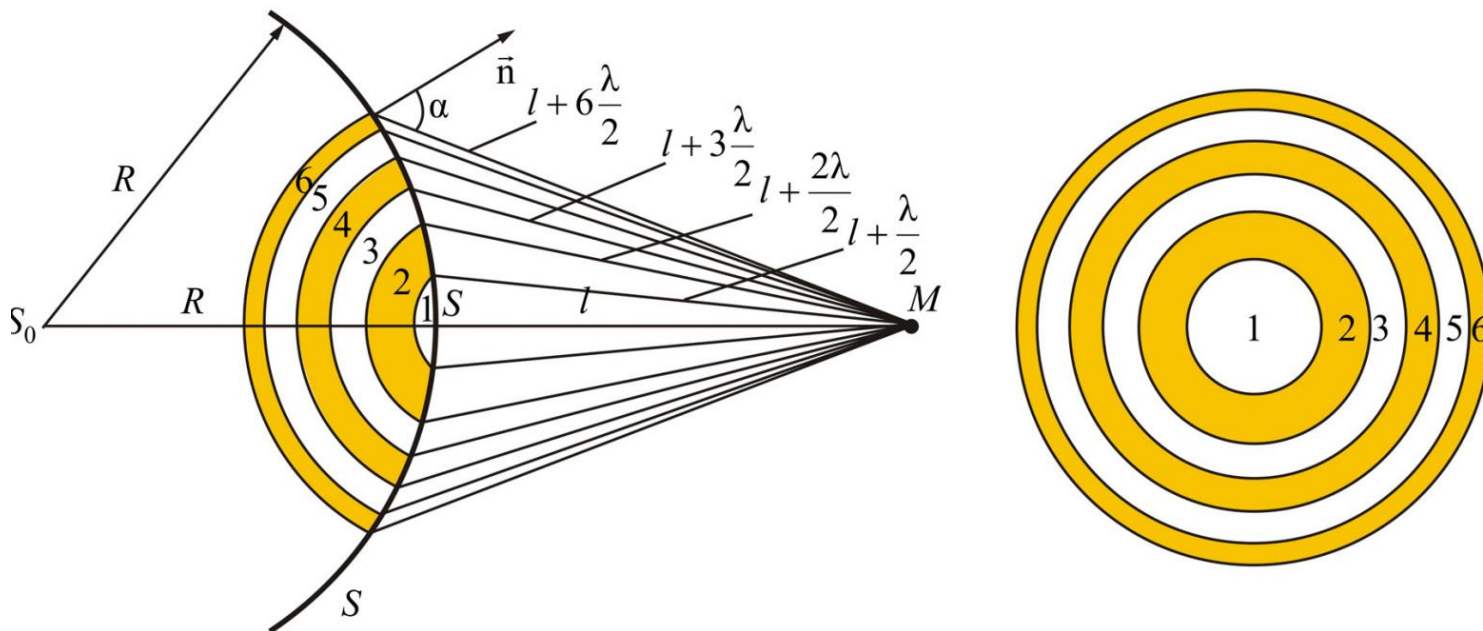
Дополнение О. Френеля:

- Все вторичные источники фронта волны, исходящей из одного источника, когерентны между собой.
- Равные по площади участки волновой поверхности излучают равные интенсивности (мощности).
- Каждый вторичный источник излучает свет преимущественно в направлении внешней нормали к волновой поверхности в этой точке. Амплитуда вторичных волн в направлении, составляющем угол α с нормалью, тем меньше, чем больше угол α , и равна нулю при $\alpha \geq \pi / 2$.
- Для вторичных источников справедлив принцип суперпозиции: излучение одних участков волновой поверхности не влияет на излучение других.

Метод зон Френеля

Метод зон Френеля – метод разбиения волновой поверхности S на зоны.

Границей первой (центральной) зоны служат точки поверхности S , находящиеся на расстоянии $l + \frac{\lambda}{2}$ от точки M . Точки сферы S , находящиеся на расстояниях $l + \frac{2\lambda}{2}$, $l + \frac{3\lambda}{2}$, и т.д. от точки M , образуют 2, 3 и т.д. зоны Френеля.



Метод зон Френеля

Колебания, возбуждаемые в точке М между двумя соседними зонами, противоположны по фазе, так как разность хода от этих зон до точки М $\Delta = \frac{\lambda}{2}$.

при сложении этих колебаний, они должны взаимно ослаблять друг друга:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots + A_i,$$

где A – амплитуда результирующего колебания,
 A_i – амплитуда колебаний, возбуждаемая i -й зоной Френеля

Величина A_i зависит от площади S_i зоны и угла α_i между нормалью к поверхности и прямой, направленной в точку М.

Площадь одной зоны

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} = \frac{\pi R l \lambda}{R + l} (i - i + 1) = \frac{\pi R l \lambda}{R + l}.$$

Метод зон Френеля

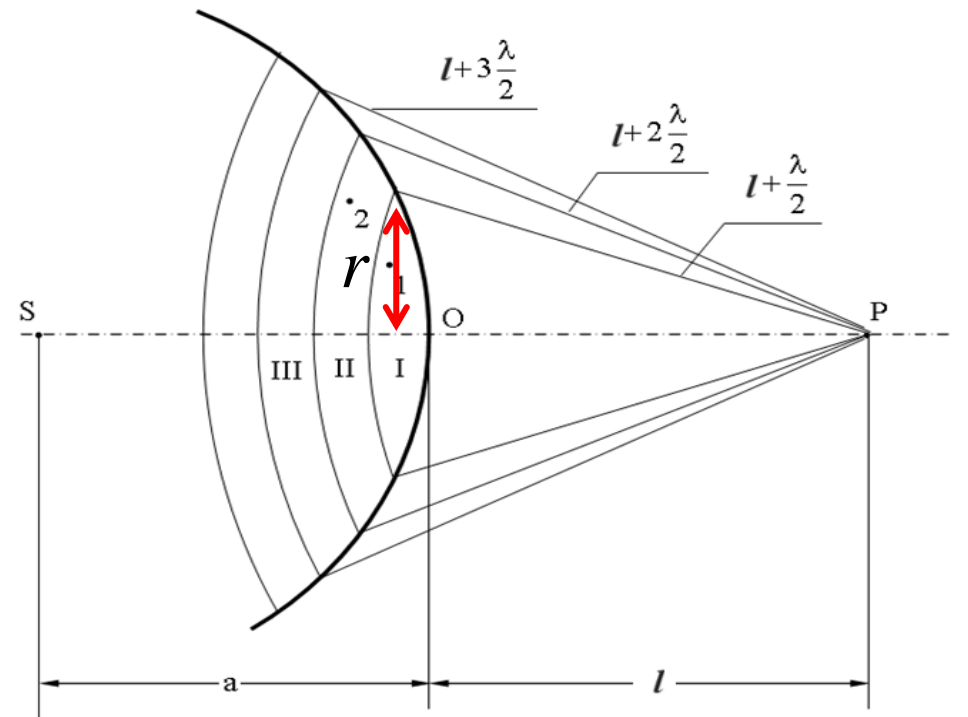
$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} = \frac{\pi R l \lambda}{R+l} (i - i + 1) = \frac{\pi R l \lambda}{R+l}.$$

площадь зоны Френеля не зависит от номера зоны i . Это значит, что при не слишком больших i площади соседних зон одинаковы.

Радиус m -й зоны Френеля

$$r_m = \sqrt{\frac{al}{a+l}} m \lambda,$$

где m – номер зоны Френеля.



Метод зон Френеля



С увеличением номера зоны возрастает угол α_i и, следовательно, уменьшается интенсивность излучения зоны в направлении точки М, т.е. уменьшается амплитуда A_i . Она уменьшается также из-за увеличения расстояния до точки М:

$$A_1 > A_2 > A_3 \dots A_i > \dots .$$

Общее число зон Френеля, уместяющихся на части сферы, обращенной в сторону точки М, очень велико: при $R = l = 0,1\text{ м}$, $\lambda = 5 \times 10^{-7}\text{ м}$, число зон $N \approx 3 \times 10^5$, а радиус первой зоны $r_1 \approx 0,16\text{ мм}$.

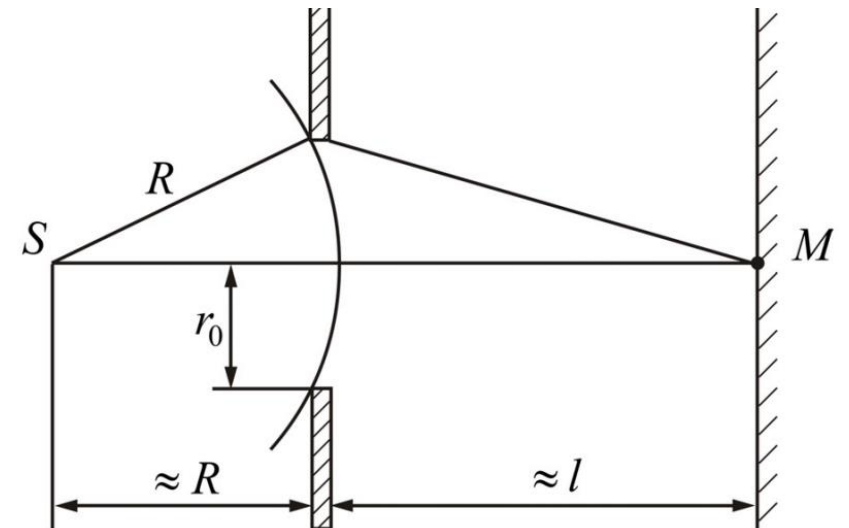
Амплитуды волн, приходящих в точку М от соседних зон, примерно равны.

Дифракция Френеля от простейших преград

Дифракция Френеля или дифракция в сходящихся лучах, осуществляется, когда дифракционная картина наблюдается на конечном расстоянии от препятствия, вызвавшего дифракцию.

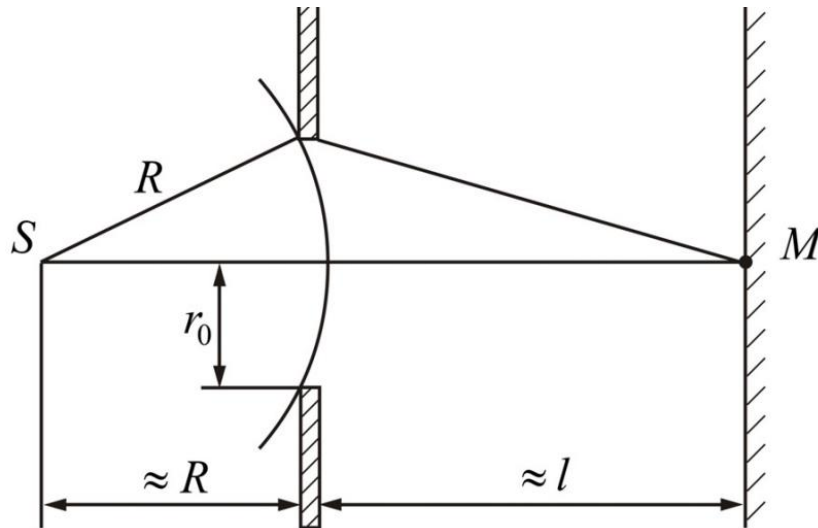
Дифракция от круглого отверстия

Поставим на пути сферической световой волны непрозрачный экран с круглым отверстием радиуса r_0 . Экран расположен так, что перпендикуляр, опущенный из S на непрозрачный экран, попадает точно в центр отверстия.



Дифракция Френеля от простейших преград

Дифракция от круглого отверстия



Разобьем открытую часть волновой поверхности на зоны Френеля. Вид дифракционной картины зависит от числа зон Френеля, открываемых отверстием.

Дифракция Френеля от простейших преград



Дифракция от круглого отверстия

Амплитуда результирующего колебания, возбуждаемого в точке М всеми зонами Френеля

$$A = \begin{cases} \frac{1}{2}(A_1 + A_m), & \text{где } m - \text{нечетное,} \\ \frac{1}{2}(A_1 - A_m), & \text{где } m - \text{четное.} \end{cases}$$

когда отверстие открывает

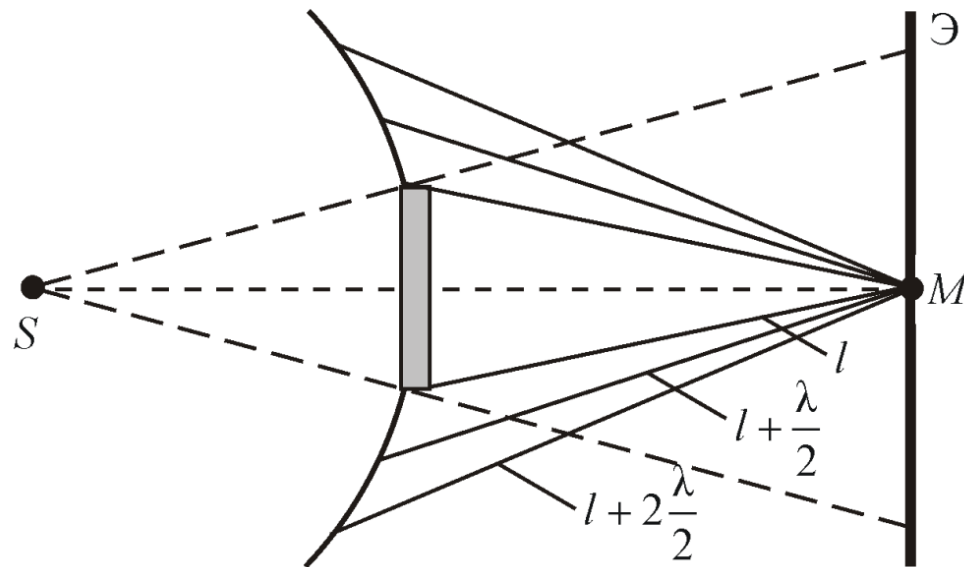
- нечетное число зон Френеля, то амплитуда (интенсивность) в точке М будет больше, чем при свободном распространении волны;
- четное, то амплитуда (интенсивность) будет равна нулю.

Если $r_0 \gg \lambda$, то дифракционной картины наблюдаться не будет.

Дифракция Френеля от простейших преград

Дифракция от диска

Сферическая волна, распространяющаяся от точечного источника S , встречает на своем пути диск. Точка M лежит на перпендикуляре к центру диска. Первая зона Френеля строится от края диска.



Амплитуда световых колебаний в точке M равна половине амплитуды, обусловленной первой открытой зоной.

Дифракция Френеля от простейших преград

Дифракция от диска

Вследствие симметрии центральная светлая точка будет окружена кольцами света и тени (вне границ геометрической тени).

В самом центре геометрической тени может находиться светлая точка, было выдвинуто Пуассоном в 1818 г. и впоследствии было названо его именем. **«Пятно Пуассона»** подтверждает правильность теории Френеля.



Дифракция в параллельных лучах (дифракция Фраунгофера)

До сих пор мы рассматривали дифракцию сферических волн, изучая дифракционную картину в точке наблюдения, лежащей на конечном расстоянии от препятствия (**дифракция Френеля**).

Тип дифракции, при котором дифракционная картина образуется параллельными пучками, называется дифракцией Фраунгофера.

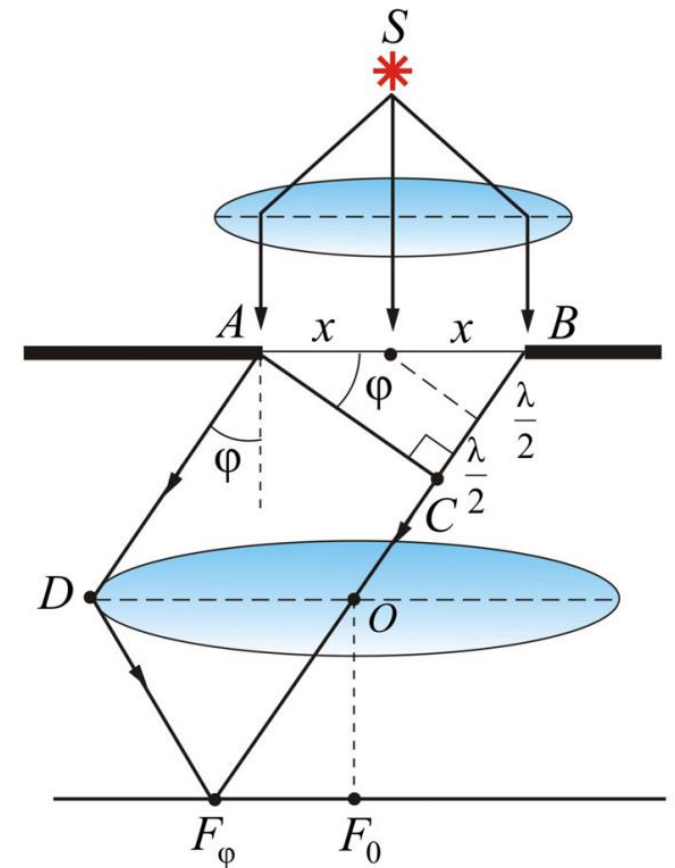
Параллельные лучи проявятся, если источник и экран находятся в бесконечности. Практически используется две линзы: в фокусе одной – источник света, а в фокусе другой – экран.

Дифракция света на одной щели

На экране есть щель: ширина щели $AB = b$, длина щели (перпендикулярно плоскости листа) $l \gg b$

На щель падают параллельные лучи света. Для облегчения расчета считаем, что в плоскости щели AB амплитуды и фазы падающих волн одинаковы.

Разобьем щель на зоны Френеля так, чтобы оптическая разность хода между лучами, идущими от соседних зон, была равна $\frac{\lambda}{2}$.



Дифракция света на одной щели

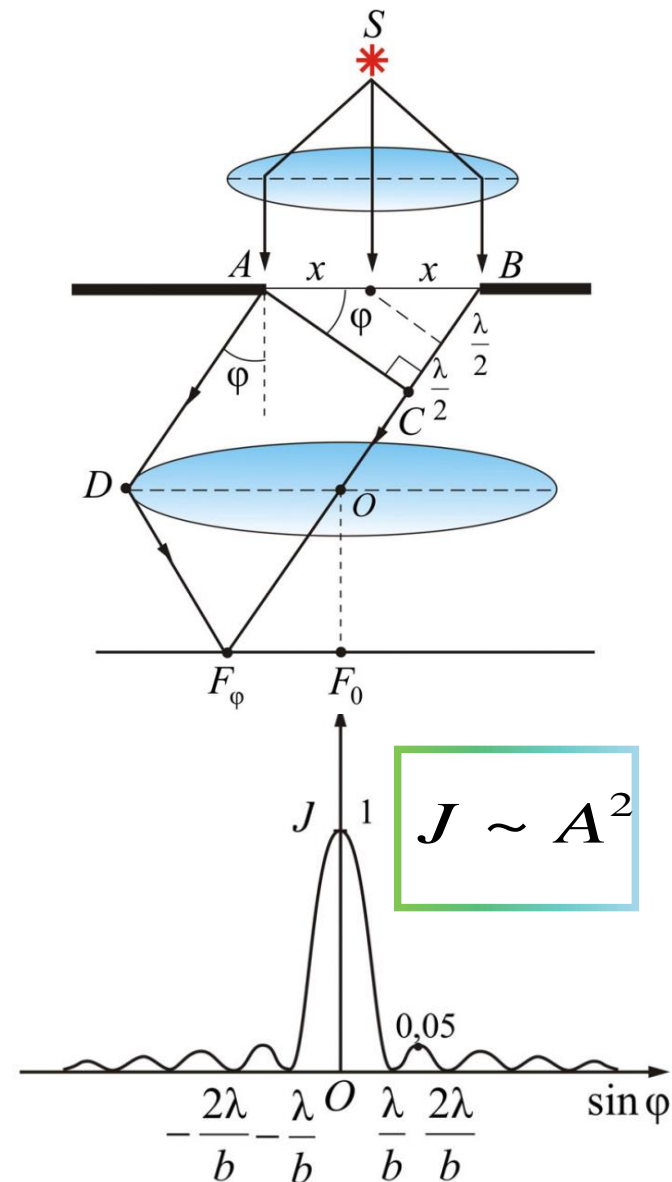
Если на ширине щели укладывается четное число таких зон, то в точке F_φ (побочный фокус линзы) будет наблюдаться минимум интенсивности, а если нечетное число зон, то максимум интенсивности:

$$b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} - \text{условие минимума интенсивности};$$

$$b \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} - \text{условие максимума интенсивности.}$$

Картина будет симметричной относительно главного фокуса точки F_0 .

Знак плюс и минус соответствует углам, отсчитанным в ту или иную сторону.



Дифракция света на одной щели



Т.к. условие минимума имеет вид: $b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}$, то $\sin \varphi = \frac{m\lambda}{b}$.

Следовательно:

С увеличением ширины щели b положения минимумов сдвигаются к центру, центральный максимум становится резче.

При уменьшении ширины щели b вся картина расширяется, центральная полоса тоже расширяется, захватывая все большую часть экрана, а интенсивность ее уменьшается.

Дифракция света на дифракционной решетке

Одномерная **дифракционная решетка** представляет собой систему из большого числа N одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей в экране, разделенных также одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками.

С помощью дифракционной решетки осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей.



Дифракция света на дифракционной решетке

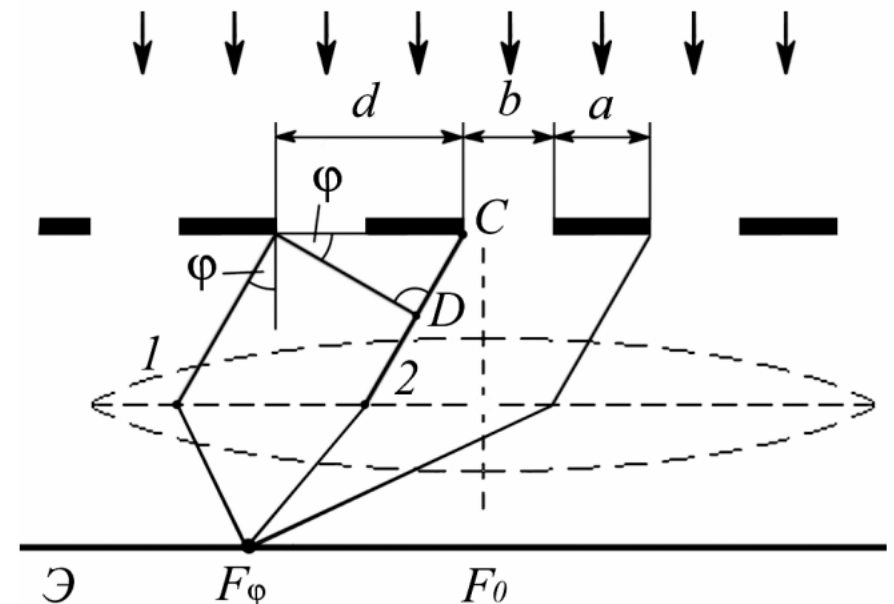
Пусть луч 1 падает на линзу под углом φ (**угол дифракции**). Световая волна, идущая под этим углом от щели, создает в точке F_φ максимум интенсивности. Второй луч, идущий от соседней щели под этим же углом φ , падает в ту же точку F_φ .

Если оптическая разность хода будет равна $m\lambda$:

$$\Delta = CD = d \sin \varphi,$$

Где d - постоянная дифракционной решетки $d = a + b$.

a – ширина щели, b – ширина непрозрачной части.



Дифракция света на дифракционной решетке

Если оптическая разность хода будет равна $m\lambda$:

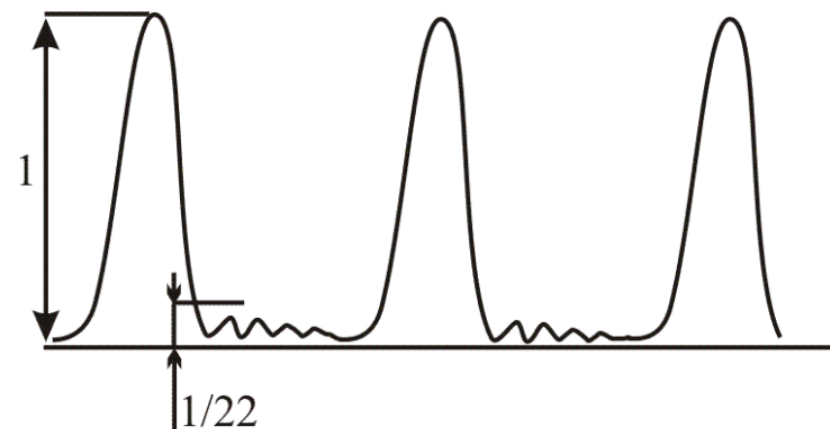
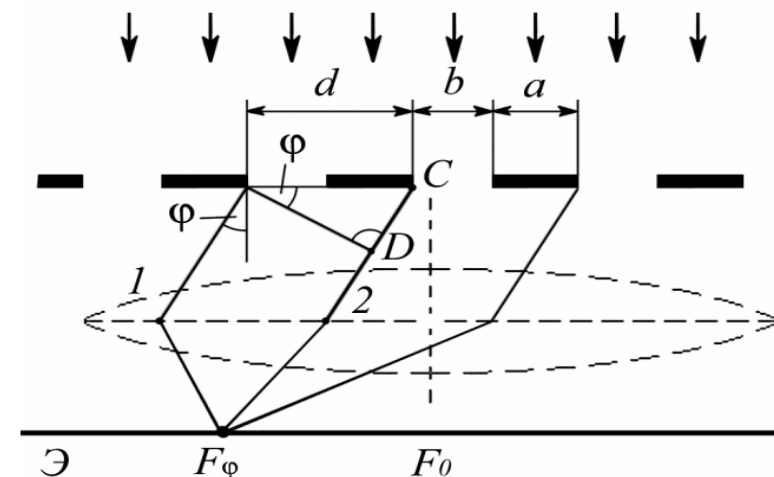
$$\Delta = CD = d \sin \varphi.$$

Условие максимума для дифракционной решетки будет иметь вид:

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad \text{где } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Максимумы, соответствующие этому условию, называются главными максимумами. Значение величины m , соответствующее тому или иному максимуму называется **порядком дифракционного максимума**.

В точке F_0 всегда будет наблюдаться нулевой или центральный дифракционный максимум.



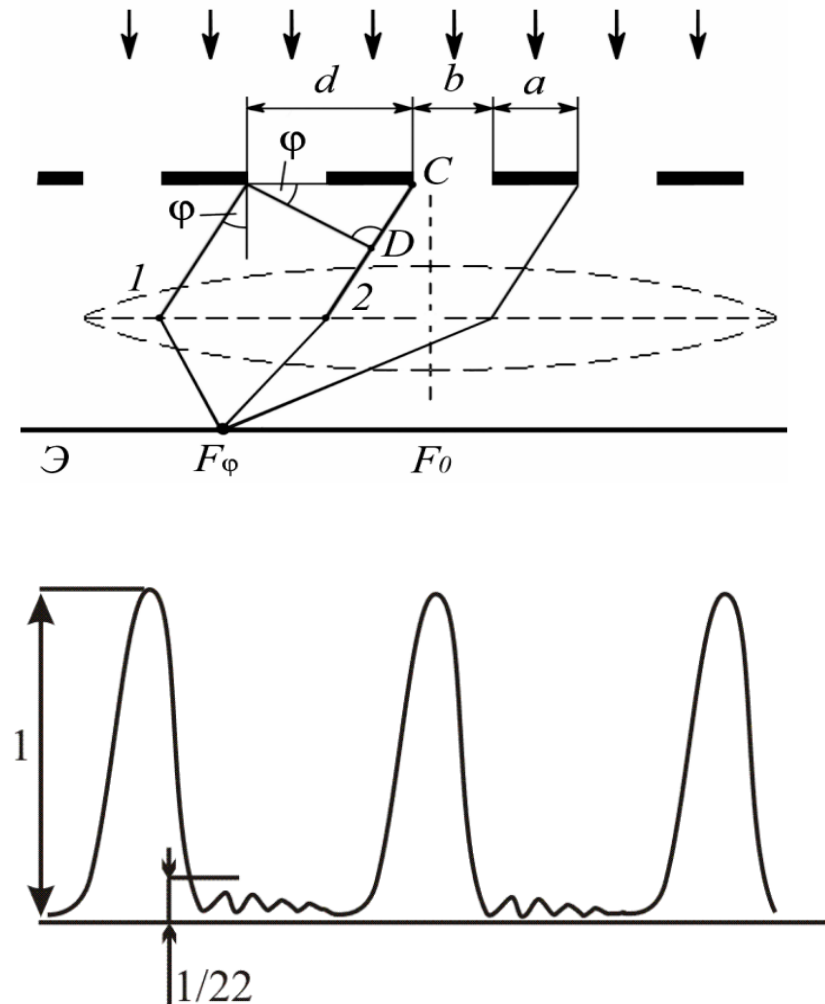
Дифракция света на дифракционной решетке

Условие минимума для щели и будет условием главного дифракционного минимума для решетки:

$$b \sin \varphi = \pm m \lambda, \text{ где } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

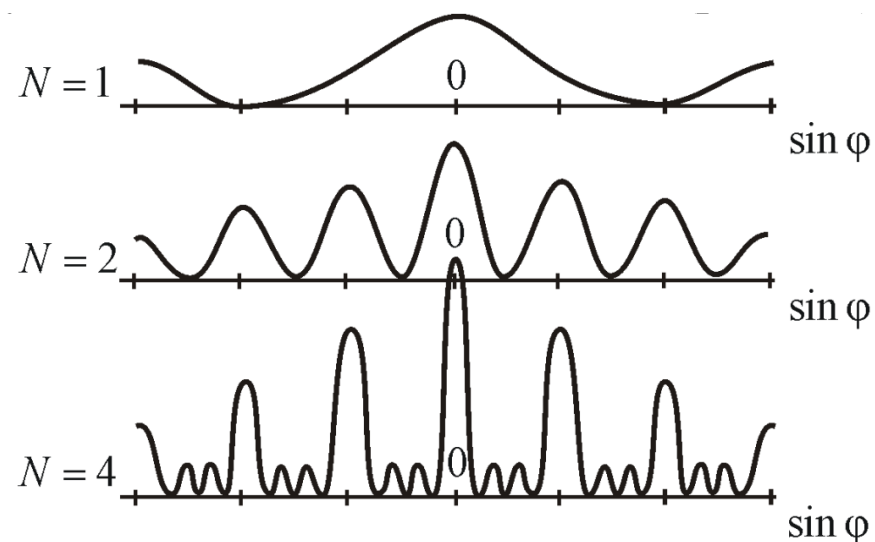
При $\Delta = d \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$,

волны, посылаемые каждой щелью, будут гаситься в результате интерференции и появятся дополнительные минимумы.



Дифракция света на дифракционной решетке

Чем больше число щелей, тем больше дополнительных минимумов помещается между соседними максимумами. Следовательно, максимумы будут более узкими и более интенсивными



Угол дифракции пропорционален длине волны λ . Значит, дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие, причем отклоняет свет с большей длиной волны (красный) на больший угол (в отличие от призмы, где все происходит наоборот).

Разрешающая способность дифракционной решетки

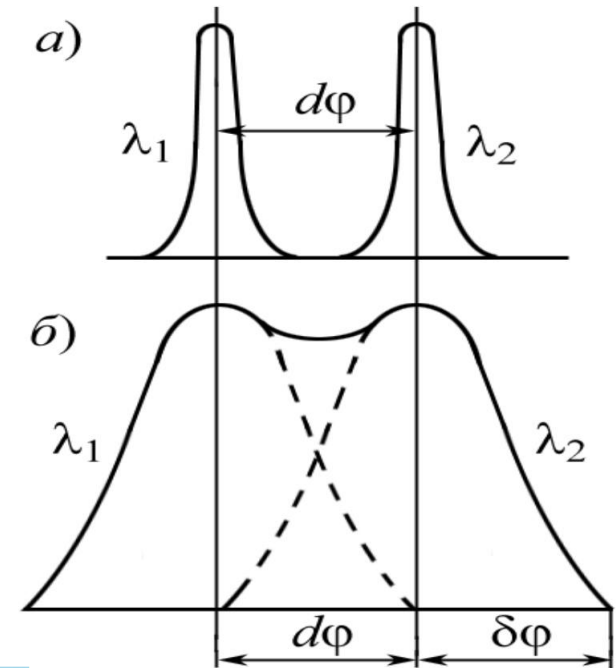
Разрешающая способность дифракционной решетки (прибора) :

Способность дифракционной решетки разделить две близко расположенные спектральные линии λ_1 и λ_2 .

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda},$$

Величину $d\lambda$ определяют из

Критерия Релея, согласно которому две близкие спектральные линии считаются разрешенными, если максимум одной из них совпадает с минимумом другой



$d\lambda$ – наименьшая разность длин волн двух еще видимых отдельно линий; λ – длина волны спектральной линии, вблизи которой производят измерение.

Количественный критерий определения вида дифракции:

Характер дифракции зависит от значения параметра

$$\frac{b^2}{l\lambda} = \begin{cases} \ll 1 - \text{дифракция Фраунгофера} \\ \sim 1 - \text{дифракция Френеля} \\ \gg 1 - \text{геометрическая оптика} \end{cases}$$

b – ширина щели;

l – расстояние от щели до экрана;

λ – длина волны.

Дифракция на пространственной решетке. Дифракция рентгеновских лучей.

Пространственной, или **трехмерной**, **дифракционной решеткой** называется такая оптически неоднородная среда, в которой неоднородности периодически повторяются при изменении всех трех пространственных координат.

Примером пространственной дифракционной решетки может служить кристаллическая решетка твердого тела. Частицы, находящиеся в узлах этой решетки, играют роль упорядоченно расположенных центров, когерентно рассеивающих падающий на них свет.

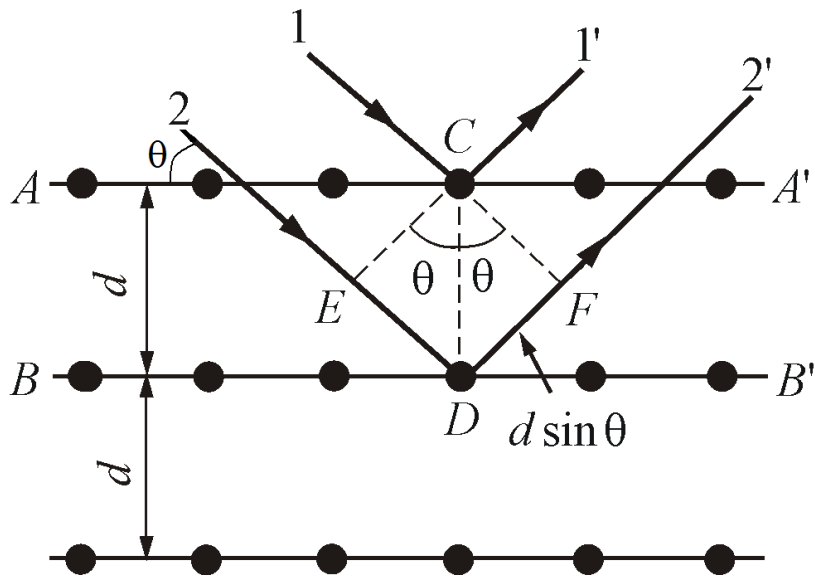
Дифракция на пространственной решетке. Дифракция рентгеновских лучей.

Для наблюдения дифракционной картины необходимо, чтобы постоянная решетки была бы того же порядка, что и длина волны λ падающего на них излучения.

Постоянная кристаллической решетки твердых тел много меньше длины волны видимого света ($d \sim 5 \cdot 10^{-10}$ м, λ видимого света $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м). Следовательно, для видимого света кристаллы являются оптически однородной средой, т.е. свет распространяется в них «не замечая» её неоднородности и не испытывает дифракции.

В то же время для рентгеновских лучей кристаллы представляют естественные дифракционные решетки. В кристаллах происходит интерференция рентгеновского излучения, зеркально отражающегося от системы параллельных плоскостей, которые проходят через узлы кристаллической решетки.

Дифракция на пространственной решетке. Дифракция рентгеновских лучей.



Разность хода лучей 1 и 2, отражающихся от двух соседних кристаллографических плоскостей

$$\Delta = ED + DF = 2d \sin \theta,$$

θ – угол между падающими и отраженными лучами и плоскостью кристалла (угол скольжения).

Интерференционные максимумы должны удовлетворять **условию Вульфа–Брэггов:**

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{где } m = 1, 2, 3, \dots$$

- дифракция будет наблюдаться лишь при $d > \lambda/2$.
- при условии $d \geq \lambda/2$ будут отсутствовать дифракционные максимумы.
- условие $d \geq \lambda/2$ называют **условием оптической однородности кристалла.**

Дифракция на пространственной решетке.



Дифракция света может происходить в так называемых мутных средах с явно выраженными оптическими неоднородностями.

К мутным средам относятся аэрозоли (облака, дым, туман), эмульсии, коллоидные растворы и т.д.

Свет, проходя через мутную среду, дифрагирует от беспорядочно расположенных микронеоднородностей, давая равномерное распределение интенсивностей по всем

направлениям, не создавая какой-либо определенной дифракционной картины. Происходит так называемое рассеяние света в мутной среде.

Рассеяние света можно наблюдать также, например, когда узкий пучок солнечных лучей, проходя через запыленный воздух, рассеивается на пылинках и становится тем самым видимым.