



Дифракция света

Чужков Ю.П.

Доцент каф. физики

Канд. Физ.-мат. наук

Глория

Тема занятия

1. Явление дифракции света
2. Принцип Гюйгенса - Френеля
3. Дифракция Френеля. Зоны Френеля
4. Дифракция на круглом отверстии и диске.
5. Дифракция Фраунгофера на щели.
6. Дифракционная решетка.
7. Дифракция рентгеновских лучей
8. Понятие голографии

***Дифракция света** – явление,
наблюдаемое при распространении
света в средах с резкими
неоднородностями, с нарушением
законов геометрической оптики.*

*Суть дифракции света – попадание
света в область глубокой тени
(“**огибание**” светом препятствия.)*

Дифракция света

Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн.

*По историческим причинам перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых **конечным числом дискретных когерентных источников**, принято называть **интерференцией волн**.*

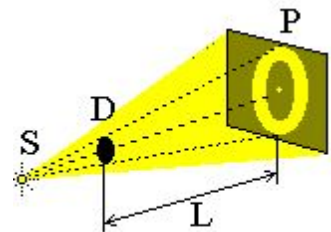
*Перераспределение интенсивности, возникающее вследствие суперпозиции волн, возбуждаемых когерентными источниками, расположенными **непрерывно**, принято называть **дифракцией волн**.*

Пятно Пуассона

В 1818 г. Знаменитый математик Пуассон на заседании парижской академии наук представил расчеты на основе предложенной теории Френеля. Цель: показать абсурдность теории Френеля, из которой следовало, что *за освещенным непрозрачным экраном должно существовать светлое пятно.*

Ученый Араго экспериментально доказал существование светлого пятна, что явилось подтверждением волновой теории света.

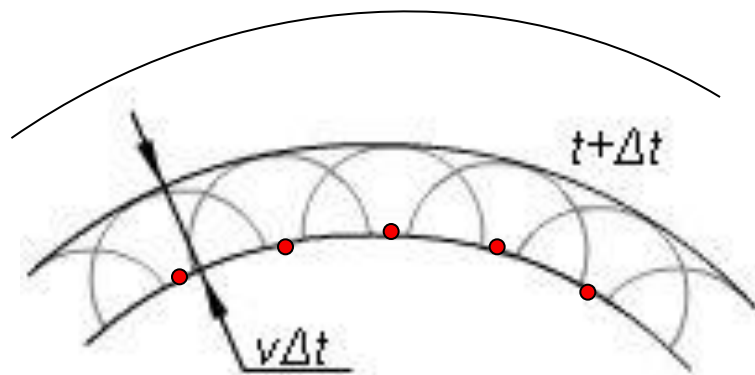
В истории это пятно получило название пятно Араго – Пуассона (пятно Пуассона)



Принцип Гюйгенса

Объяснение дифракции возможно с помощью принципа Гюйгенса:

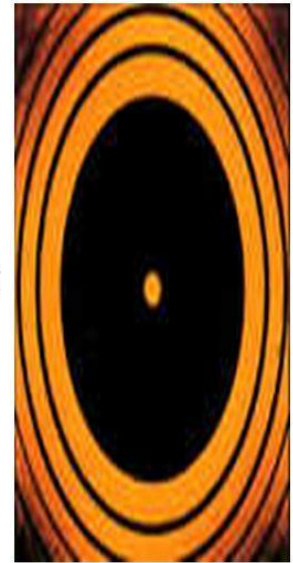
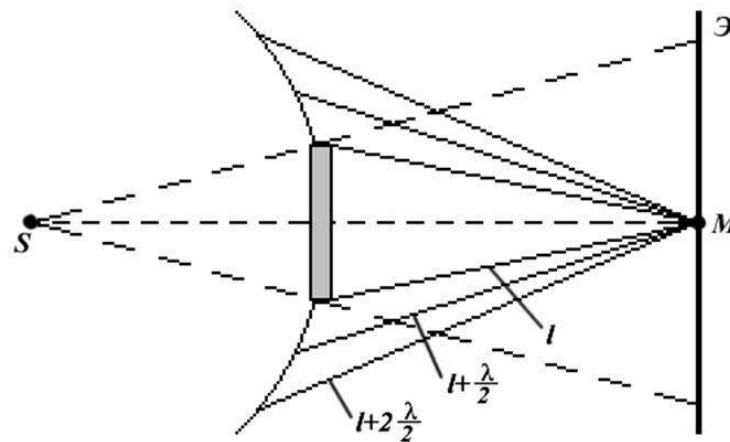
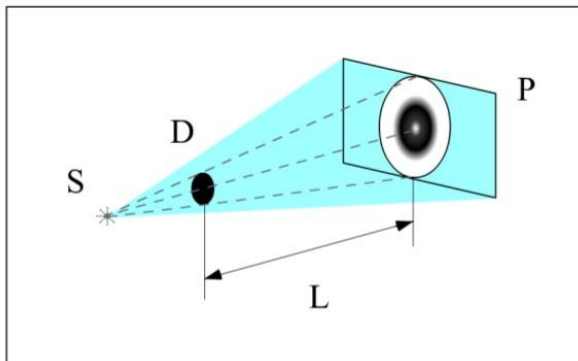
каждая точка волнового фронта является вторичным источником сферических волн



Принцип Гюйгенса - Френеля

Френель дополнил принцип Гюйгенса

Вторичные волны когерентны и интерферируют между собой.



Дифракция света

Различают два вида дифракции света

*Дифракция
Френеля*

*в расходящихся
лучах*

*Дифракция
Фраунгофера*

в параллельных лучах

Лучи проведенные в далекую точку наблюдения от различных элементов волнового фронта, практически можно считать параллельными.

Метод зон Френеля

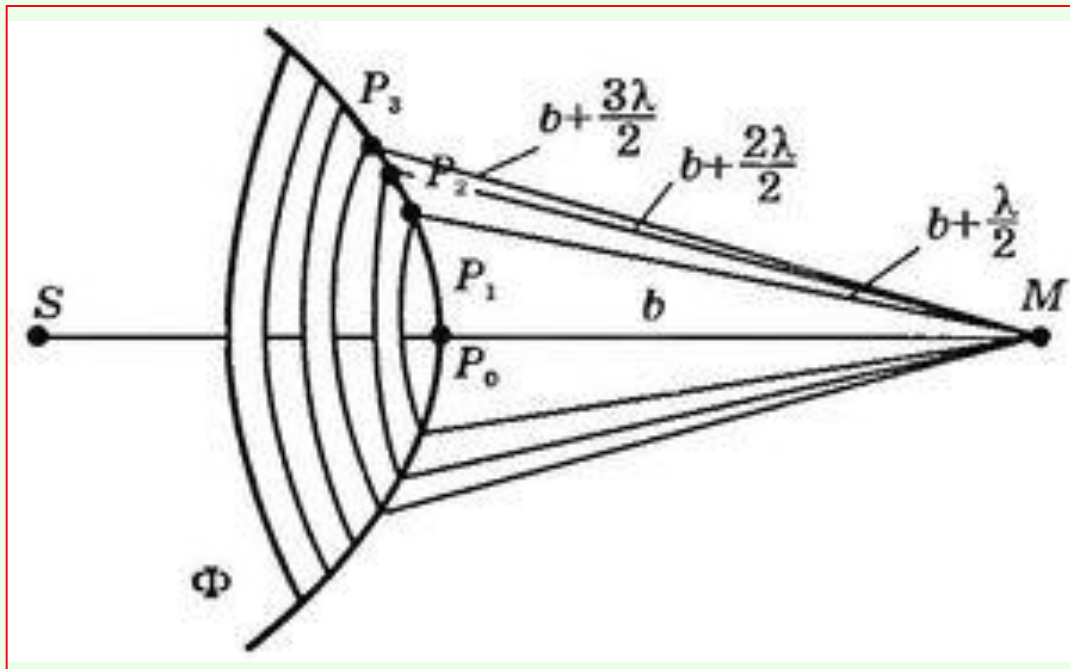
Метод Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об амплитуде (интенсивности) волн, распространяющихся по разным направлениям

Френель предложил метод расчета амплитуды (интенсивности) результирующей волны в любой точке пространства, рассмотрев взаимную интерференцию вторичных волн.

Этот метод получил название метод зон Френеля

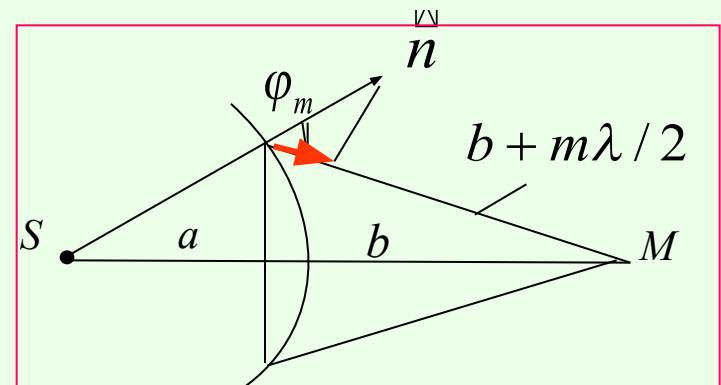
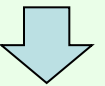
Метод зон Френеля

Френель предложил разбить волновую поверхность на кольцевые зоны такого размера, чтобы расстояния от краев соседних зон до точки наблюдения отличались на $\lambda/2$



площади зон Френеля
одинаковы, а вклад их в
интенсивность в т.М
различный

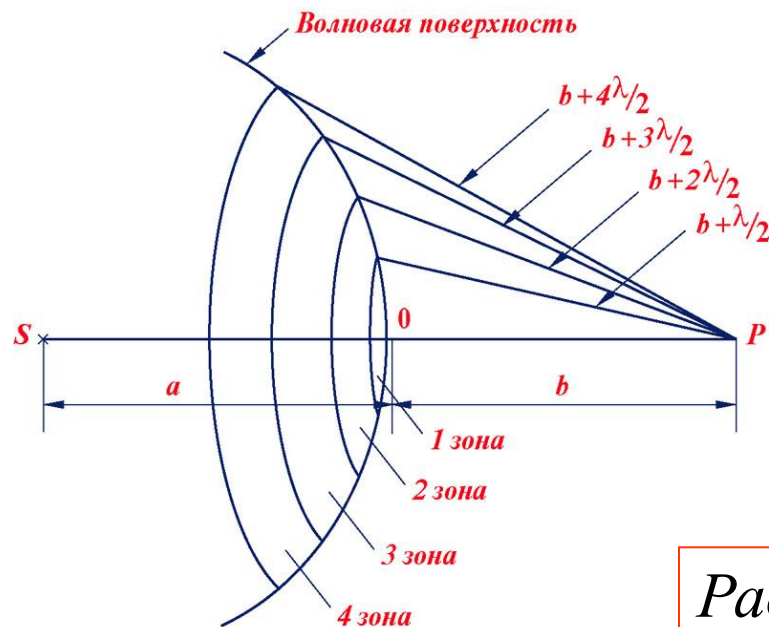
$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > \dots$$



Метод зон Френеля

Волны от соседних зон в точку M приходят в противофазе и при наложении будут взаимно ослаблять друг друга. Поэтому амплитуда результирующего светового колебания в точке M равна

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



$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m \lambda$$

m — номер зоны

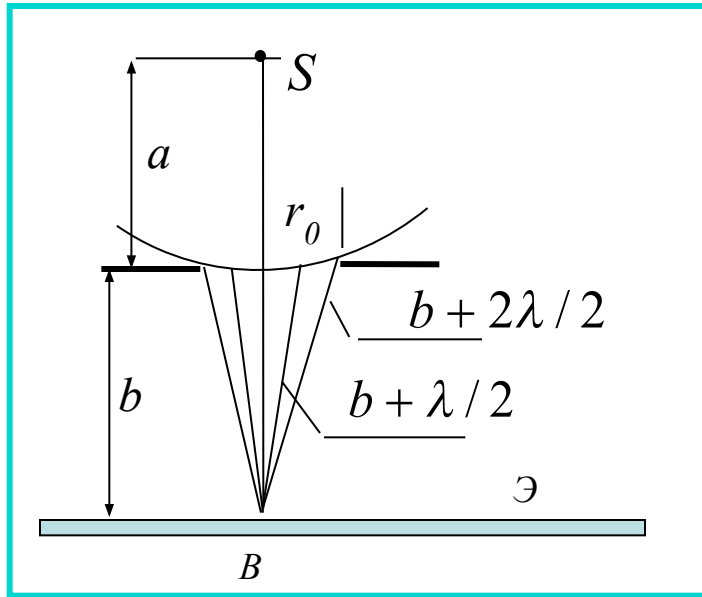
радиус внешней границы
 m -й зоны Френеля:

$$a = b = 1 \text{ м}$$

$$\lambda = 650 \text{ нм} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\text{Радиус первой зоны } r_0 \sim 0,6 \text{ мкм}$$

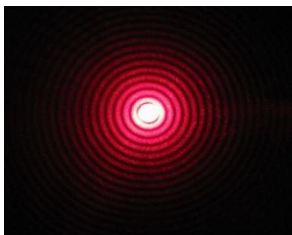
Дифракция на круглом отверстии



Согласно принципу Гюйгенса – Френеля, каждая точка в отверстии является источником вторичных волн. Эти волны когерентны и интерферируют между собой.

В результате на экране наблюдается интерференционная (дифференционная) картина.

Число открытых зон может быть рассчитано по формуле:

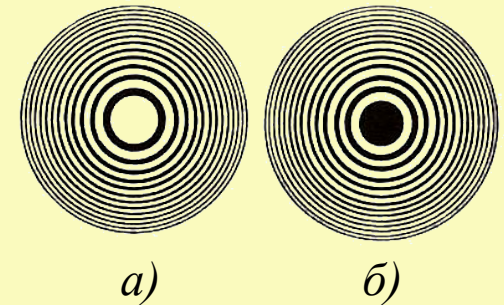
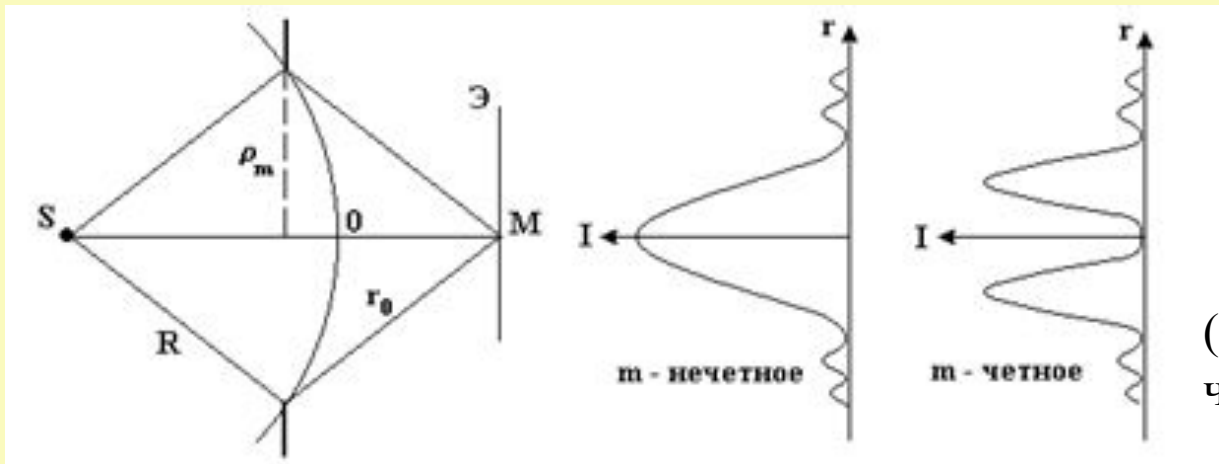


$$m = \frac{r_0^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

r_0 – радиус отверстия;
 λ – длина волны

Дифракция на круглом отверстии

Когда отверстие открывает *четное* число зон, в точке M будет *темное* пятно, когда *нечетное* – в центре будет *светлое* пятно



(а) – нечетное (б) - четное
число открытых зон

Если размеры отверстия не изменять, а точку наблюдения *перемещать вдоль линии*, то в т. M будет наблюдаться чередование *светлых* и *темных* пятен (изменяется число открытых зон - четное, нечетное)

Задача 1

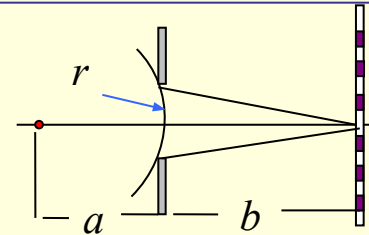
Сферическая волна, распространяющаяся от точечного монохроматического источника света ($\lambda = 500\text{ нм}$), встречает на своем пути экран с круглым отверстием радиусом $r = 0.4\text{ мм}$. Расстояние a от источника до экрана равно 1 м . Определить расстояние от отверстия до точки экрана, лежащей на линии, соединяющей источник с центром отверстия, где наблюдается максимум освещенности.

Дано: $\lambda = 500\text{ нм}$; $a = 1\text{ м}$; $r = 0.4\text{ мм}$; $m = 1$.

Максимум освещенности

$m = 1$

Найти: b



Радиус внешней границы m -й зоны Френеля для сферической волны

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda} \quad \Rightarrow \quad b = \frac{r^2 a}{am \lambda - r^2}$$

Вычисления

$$b = \frac{(0,4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-7} - (0,4 \cdot 10^{-3})^2} = 47,1\text{ см}$$

Ответ: $b = 47,1\text{ см}$

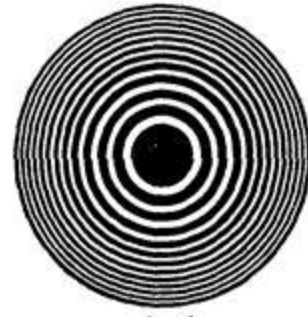
Зонная пластинка

Зонная пластинка – устройство, позволяющее для светового потока определенной длины волны увеличить освещенность в точке приема.

Зонная пластинка в простейшем случае представляет собой стеклянные пластинки, состоящие из системы чередующихся прозрачных и непрозрачных концентрических колец, построенных по принципу расположения зон Френеля.

Зонная пластинка, помещенная в определенной точке, оставляет свободными либо только нечетные, либо только четные зоны.

В результате этого **результатирующая амплитуда** $A = A_1 + A_3 + A_5 \dots$ либо $(A = A_2 + A_4 + A_6)$ **оказывается больше, чем при полностью открытом волновом фронте.**



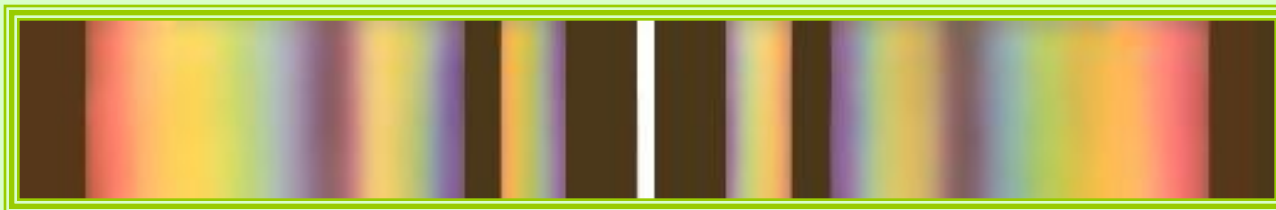
Дифракция на круглом отверстии

Число зон Френеля, укладывающихся в отверстие, зависит от его диаметра.

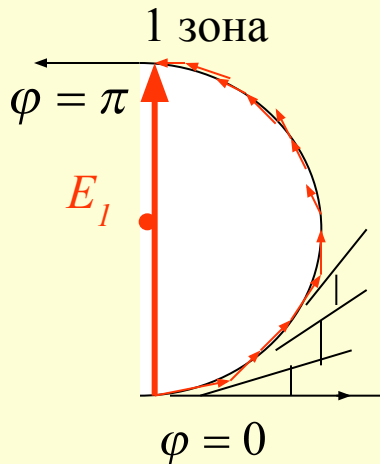
Если диаметр отверстия большой, то $A_m \ll A_1$ результирующая амплитуда $A = A_1/2$, т.е. такая же, как при полностью открытом волновом фронте.

Никакой дифракции не наблюдается

Если отверстие освещается белым, а не монохроматическим светом, то кольца окрашены



Метод графического вычисления результатирующей амплитуды



Волновая поверхность разбивается на кольцевые зоны, аналогичные зонам Френеля, но гораздо меньшие по ширине (разность хода от краев зоны до т. М составляет одинаковую для всех зон малую долю λ).

Колебание, создаваемое в т.М каждой из зон, изобразим в виде вектора, длина которого равна амплитуде колебания, а угол, образуемый вектором с направлением, принятым за начало отсчета, дает начальную фазу колебания. Каждое следующее колебание отстает от предыдущего по фазе на одну и ту же величину. Векторная диаграмма, получающаяся при сложении колебаний, возбуждаемых отдельными зонами, имеет вид, показанный на рис. (для 1-ой, 2-ой, 3-ей и m зон Френеля (m)).

Метод графического вычисления резльтирующей амплитуды

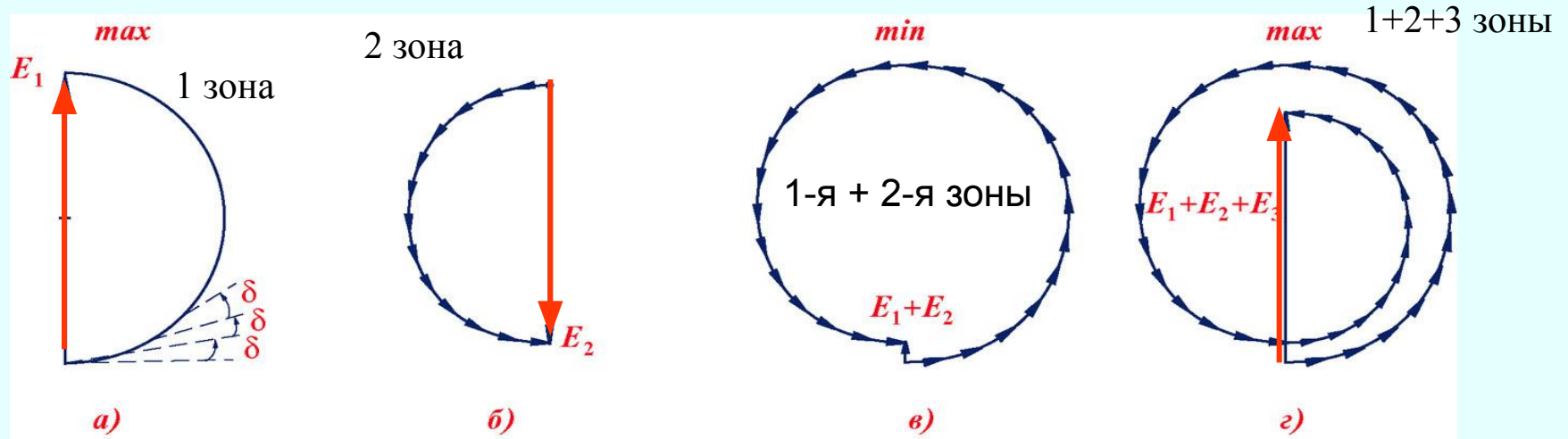


Рисунок позволяет проследить, как изменяется амплитуда светового потока при прохождении через круглое отверстие в зависимости от того, сколько зон Френеля остаются открытыми. Рис.(в) соответствует случаю, когда открыты 1 и 2 зоны. Результирующая амплитуда практически равна нулю, поскольку колебания от этих зон находятся в противофазе.

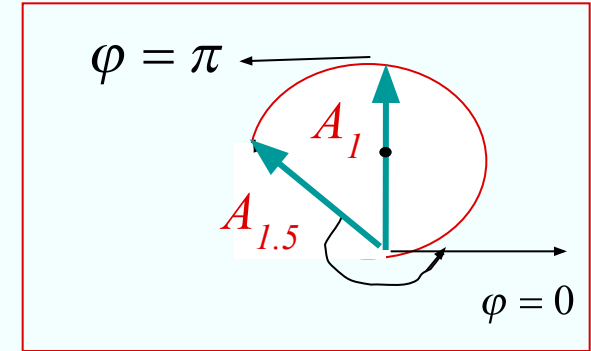
Задача 2

Тонкая пленка с показателем преломления 1,25 закрывает первую и половину второй зоны Френеля. При какой толщине пленки d освещенность в точке наблюдения будет наибольшей? Источник света – монохроматический с длиной волны $\lambda = 560$ нм.

Дано: $\lambda = 560$ нм; $n = 1,25$; $m = 1,5$.

Найти: d_{min}

В отсутствии пленки вектор результирующей амплитуды $A_{1.5}$ показан на рисунке.



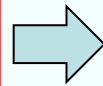
При внесении пленки появляется дополнительная разность фаз, определяемая толщиной пленки и коэффициентом преломления пленки

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1)$$

Для того, чтобы получить наибольшую освещенность (с пленкой) необходимо

повернуть результирующий вектор на

$$\frac{5}{4}\pi = \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1)$$



$$d = \frac{5\lambda}{8(n-1)}$$

$$\Delta\varphi = 45^\circ + 180^\circ = \frac{5}{4}\pi$$

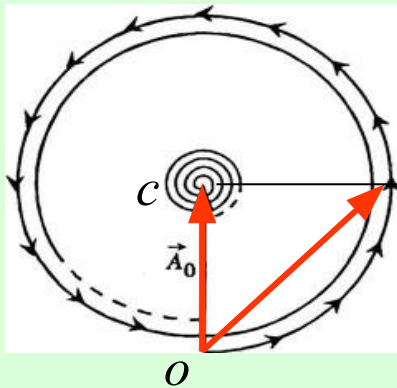
Ответ: $d = 1,4$ мкм.

Вычисления:

$$d = \frac{5 \cdot 5,6 \cdot 10^{-7}}{8(1,25 - 1)} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,4 \text{ мкм}$$

Метод графического вычисления результатирующей амплитуды

Колебание, возбуждаемое в т. М *всей волновой поверхностью*, изображается вектором ОС. *Амплитуда в этом случае равна половине амплитуды, создаваемой 1-й зоной.*

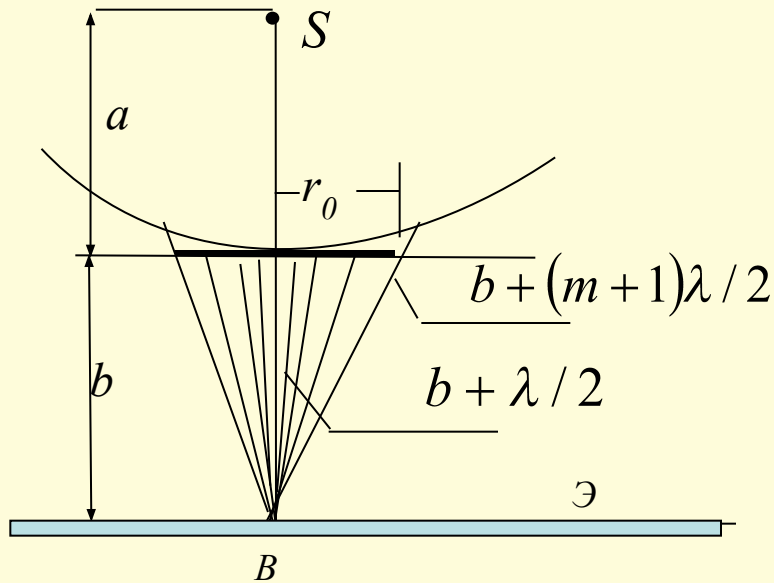


Таким образом, если открыта только первая зона Френеля, **интенсивность** света в точке приема будет **в 4 раза больше**, чем от всех открытых зон.

Интенсивность света, создаваемая внутренней половиной первой зоны Френеля, в 2 раза превышает интенсивность, создаваемую всей волновой поверхностью.

(интенсивность $I \sim A^2$)

Дифракция на круглом диске



Закрытый диском участок волнового фронта надо исключить из рассмотрения и зоны Френеля строить, начиная с краев диска.

Если диск закрывает m зон, то амплитуда результирующего колебания в т.В равна



$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots = \frac{A_{m+1}}{2} + \left(\frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots$$

$$A = \frac{A_{m+1}}{2}.$$

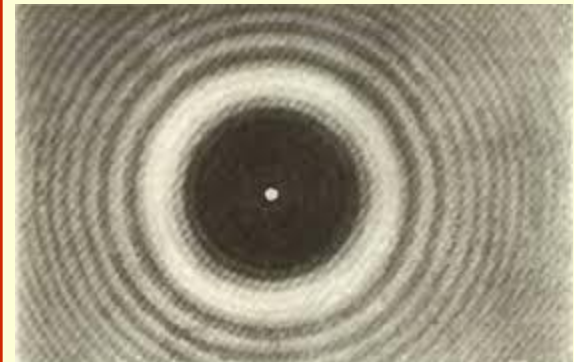
В центре всегда наблюдается светлое пятно

Дифракция на круглом диске

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

*Если размер **диска невелик** (охватывает небольшое число зон), освещенность в точке M будет такой же, как и в отсутствие экрана.*

Центральная светлая точка будет окружена кольцами света и тени (вне границ геометрической тени).



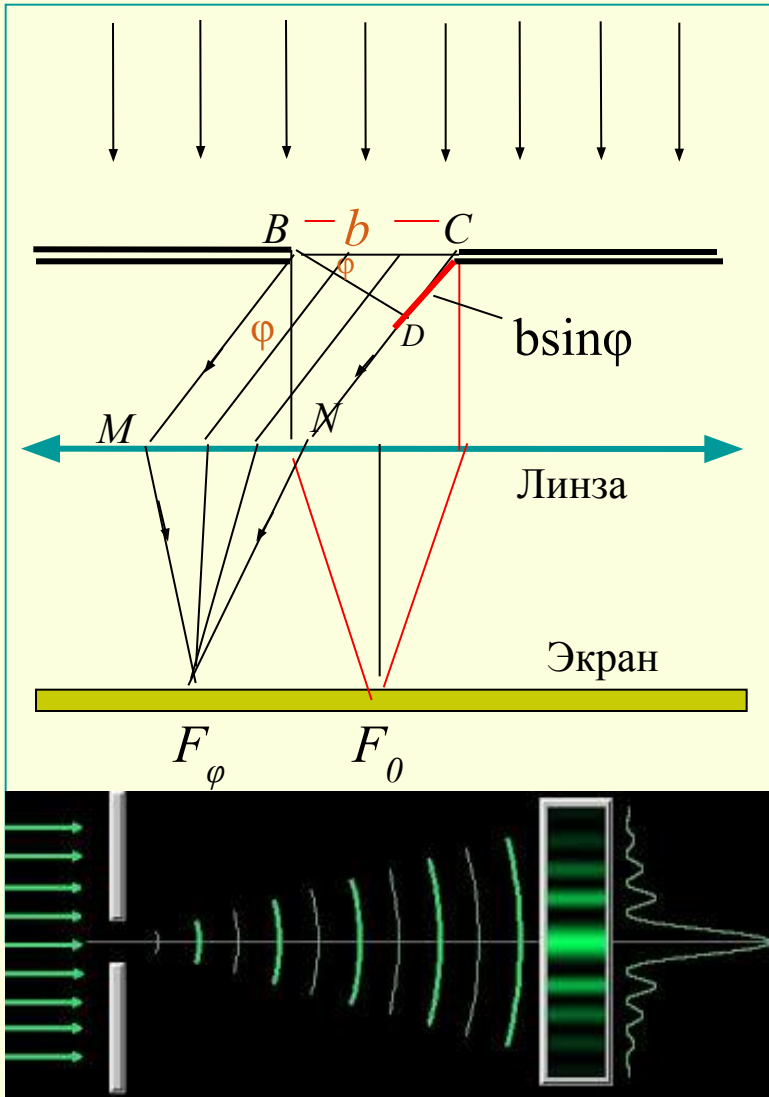
Дифракция на круглом диске

С увеличением диаметра диска интенсивность центрального максимума уменьшается.

При больших размерах диска закрывается много зон Френеля, чередование светлых и темных колец наблюдается только в узкой области на границе геометрической тени. *Светлое пятно в центре отсутствует*, и освещенность в области геометрической тени практически всюду равна нулю.

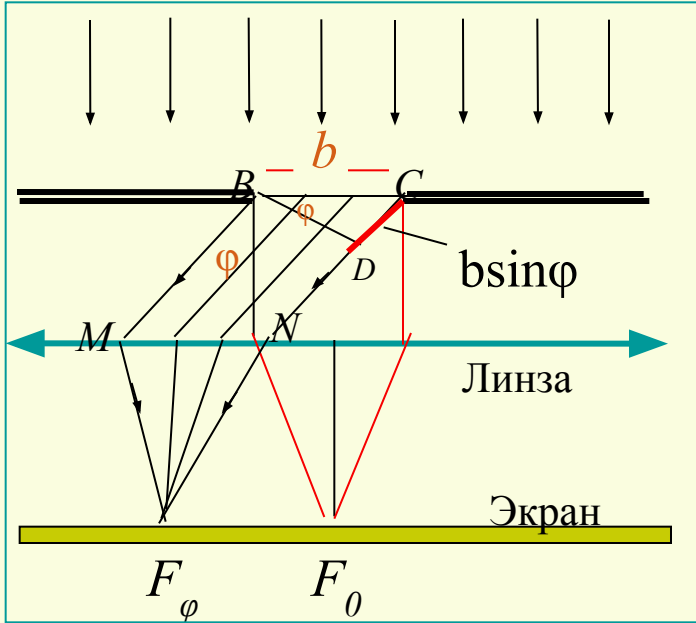
Дифракция Фраунгофера на щели

(дифракция в параллельных лучах)



Согласно принципу Гюйгенса – Френеля, каждая точка щели является источником вторичных волн. Каждый такой источник излучает во всех направлениях (этим объясняется появление света в области геометрической тени).

Дифракция Фраунгофера на щели



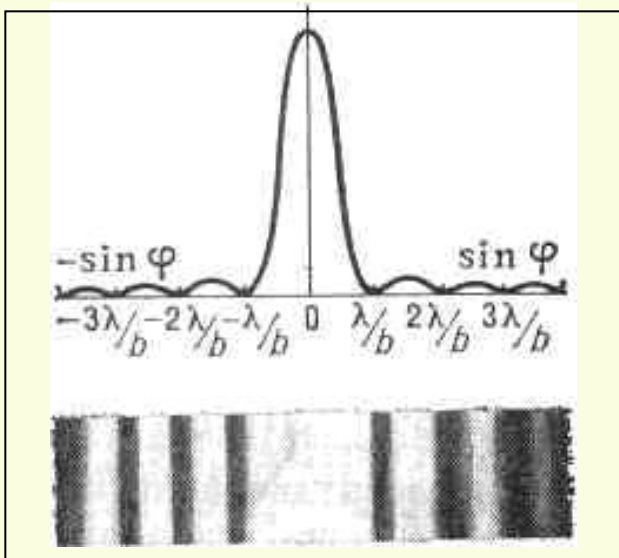
Открытую часть волновой поверхности в плоскости щели разобьем на зоны Френеля, Ширина каждой зоны выбирается так, чтобы разность хода от краев этих зон была равна $\lambda/2$.

$$b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

Дифракционный минимум

$$b \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

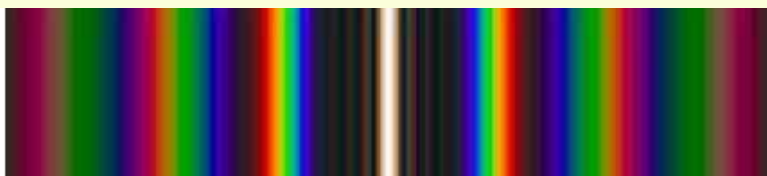
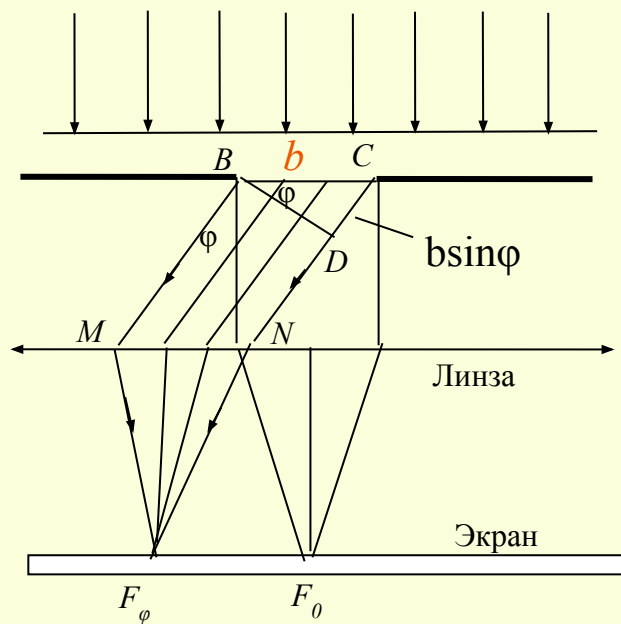
Дифракционный максимум



Дифракция Фраунгофера на одной щели

(дифракция в белом свете)

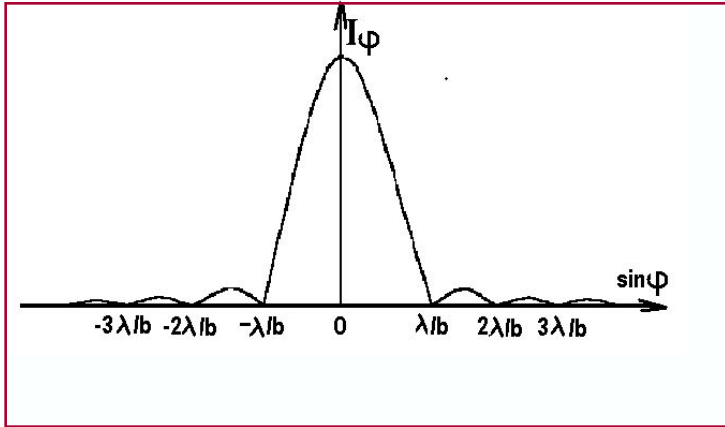
При освещении щели белым светом центральный максимум наблюдается в виде белой полоски; он общий для всех длин волн (разность хода равна нулю для всех λ).



Справа и слева от центрального максимума наблюдаются максимумы первого ($m = 1$), второго ($m = 2$), и других порядков, обращенные фиолетовым краем к центру дифракционной картины.

На практике можно наблюдать не более 2-3 порядков, т.к. происходит их наложение

Дифракция Фраунгофера на щели



Интенсивности в центральном и последующих максимумах относятся как $1: 0.047: 0.017$, т.е. основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме.

Влияние ширины щели

Если b/λ невелико, т.е. щель очень узкая, то все максимумы широки и дифракционная картина малоконтрастна.

Если b/λ велико (щель широкая), то центральный максимум очень узкий и яркий. Он представляет собой не что иное, как изображение источника света. Все максимумы сливаются в одно пятно.

Задача 3

На щель шириной $b = 0,24$ мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Дифракционная картина проецируется на экран, параллельный плоскости щели, с помощью линзы, расположенной вблизи щели. Определить расстояние от экрана до линзы, если расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума, равно 1 см.

Дано: $b = 0,24$ мм; $\lambda = 600$ нм; $m = 1$; $A = 1$ см.

Найти: l Условие минимума

$$\boxed{\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi}$$

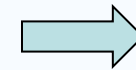
$$A = 2l \sin \varphi$$

$$\boxed{b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}}$$

($m = 1.2.3 \dots$)

$$\boxed{\sin \varphi = \frac{A}{2l}}$$

$$\boxed{b \frac{A}{2} = m \lambda}$$

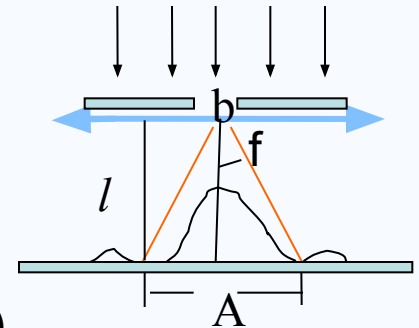


$$\boxed{l = \frac{bA}{2\lambda}}$$

Вычисления

$$\boxed{l = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-7}} = 2 \text{ м}}$$

Ответ: $l = 2$ м.



Задача 4

Щель шириной 2 мм прикрыта двумя плоскопараллельными прозрачными пластинками (показатели преломления 1,63 и 1,82) равной толщины, примыкающие друг к другу так, что линия контакта проходит по оси щели. На щель нормально падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 620 \text{ нм}$).

При какой минимальной толщине пластинок центр дифракционной картины темный?

Дано: $b = 2 \text{ мм}$; $n_1 = 1,63$; $n_2 = 1,82$; $\lambda = 620 \text{ нм}$

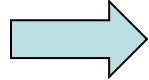
Найти: $d_{\min}$

До перекрытия щели пластинками центр всегда освещен. Пластинки вносят дополнительную оптическую разность хода

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_2 - n_1)$$

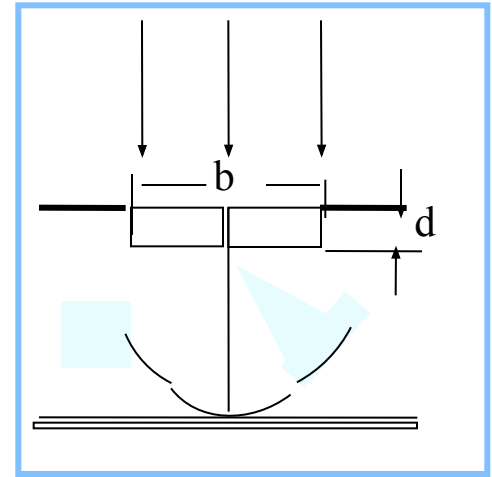
Чтобы в центре был минимум, разность фаз

$$\frac{2\pi}{\lambda} d(n_2 - n_1) = \pi$$



$$d_{\min} = \frac{\lambda}{2(n_2 - n_1)}$$

Ответ: $d_{\min} = 1,63 \text{ мкм}$



$$\Delta\varphi = \pi$$

$$d_{\min} = \frac{6,2 \cdot 10^{-7}}{2(1,82 - 1,63)} = 1,63 \text{ мкм}$$

Дифракционная решетка

(одномерная решетка)

$$d = a + b$$

d - период решетки

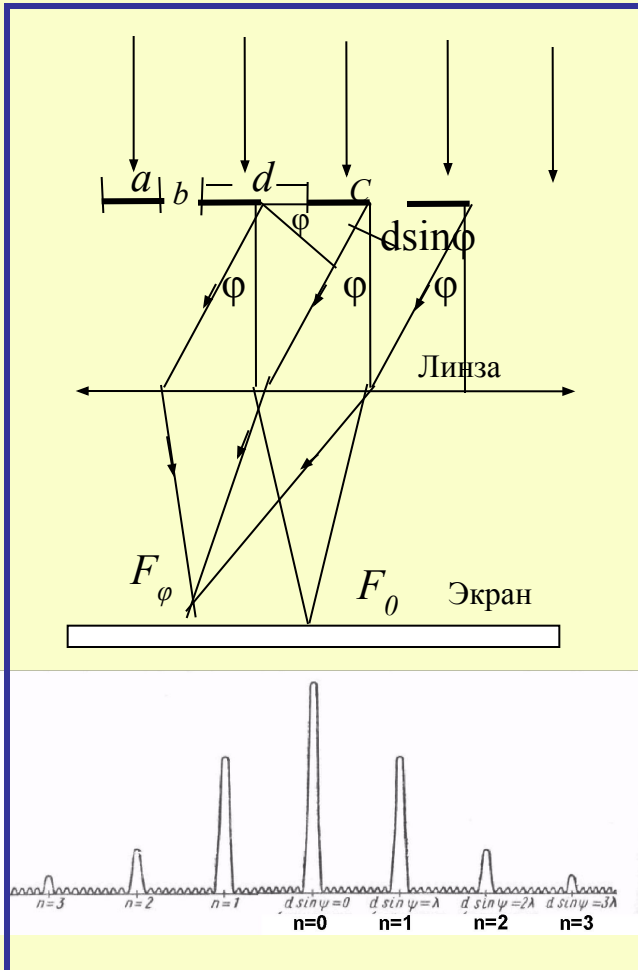
$$d \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Условие главных максимумов

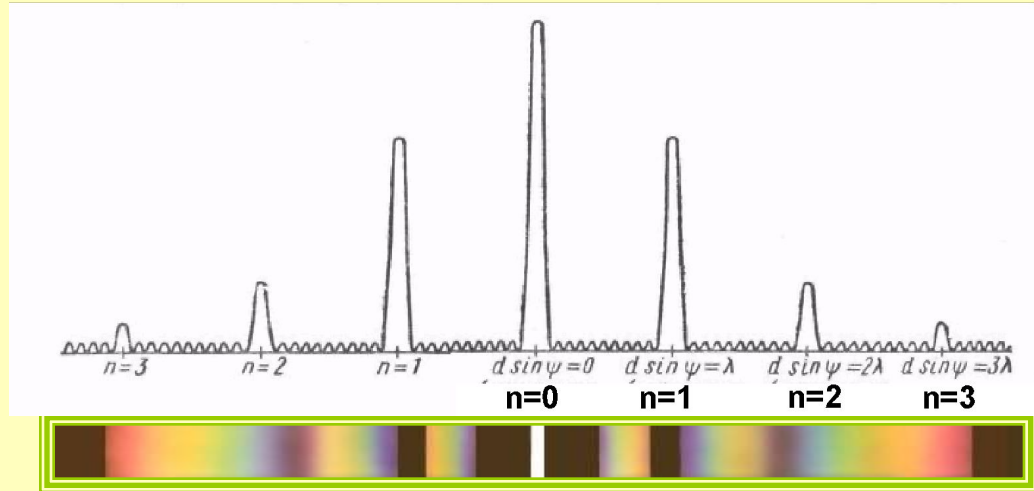
$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Условие дополнительных минимумов

В случае N щелей между двумя главными максимумами располагается $(N - 1)$ дополнительных минимумов, разделенных вторичными максимумами, создающими весьма слабый фон



Дифракционная решетка



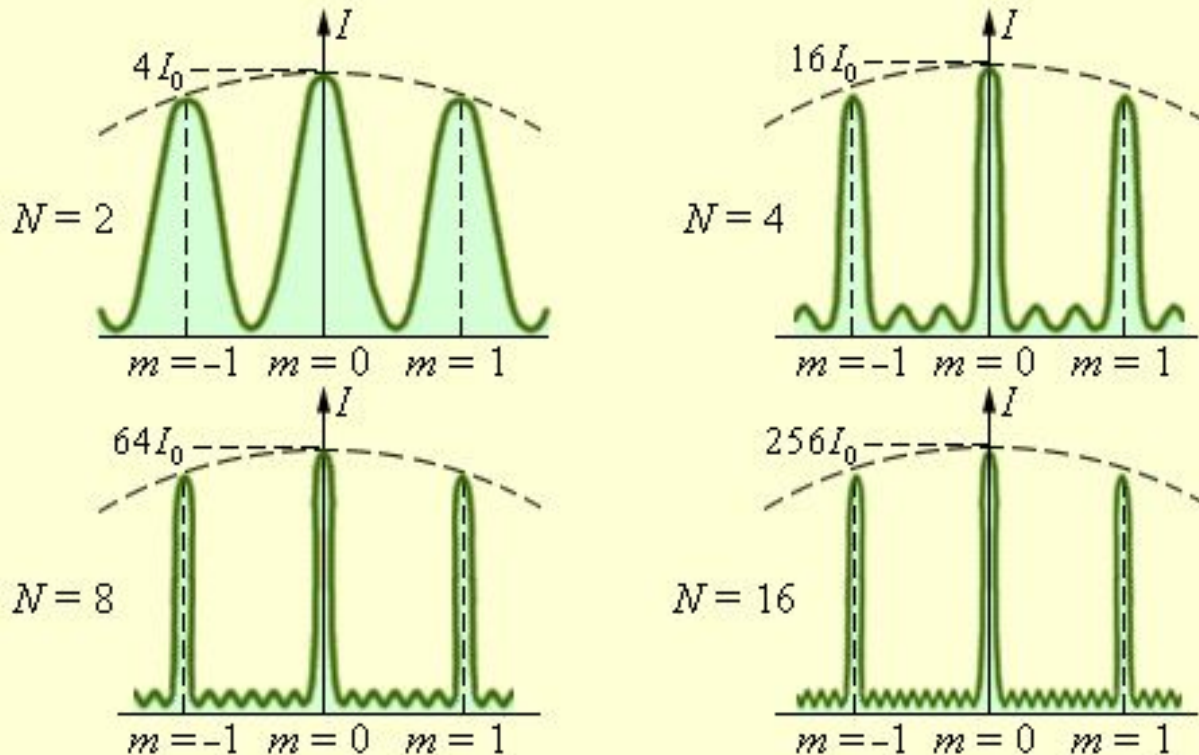
Положение главных максимумов зависит от длины волны согласно. Поэтому при пропускании через решетку белого света все максимумы, кроме центрального ($m = 0$), разложатся в спектр, фиолетовая область которого будет обращена к центру дифракционной картины, красная — наружу.

Число главных максимумов определяется отношением:

$$m \leq \frac{d}{\lambda}$$

Дифракционная решетка

Чем больше щелей N , тем больше количество световой энергии пройдет через решетку, тем больше минимумов образуется между соседними главными максимумами, а следовательно более интенсивными и более острыми будут максимумы



I_0 – интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели

Задача 5

При помощи дифракционной решетки с периодом 0,02 мм получено первое дифракционное изображение на расстоянии $x = 3.6\text{ см}$ от центрального максимума и на расстоянии $L = 1.8\text{ м}$ от решетки. Найти длину световой волны.

Дано: $m = 1$; $d = 0.02\text{ мм}$; $x = 3,6\text{ см}$; $L = 1,8\text{ м}$.

Найти: λ

Решение

Условие главных максимумов

$$d \sin \varphi = m\lambda \quad m = 1, 2, 3 \dots$$

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{L}$$

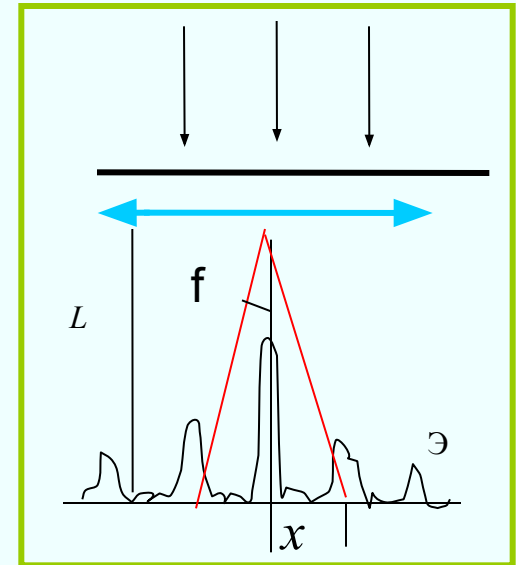
$$d \frac{x}{L} = m\lambda$$

$$\lambda = \frac{dx}{mL}$$

Вычисления

$$\lambda = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 3,6 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 1,8} = 0,4 \text{ мкм}$$

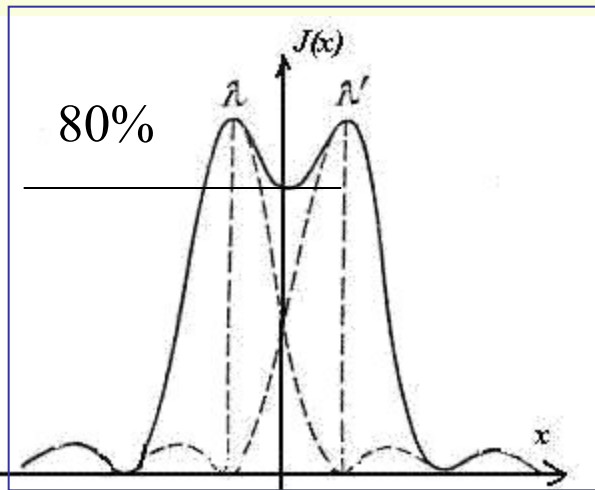
Ответ: $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$



Разрешающая способность оптических приборов

Используя даже *идеальную* оптическую систему, невозможно получить стигматическое изображение точечного источника, что объясняется волновой природой света.

Согласно *критерию Рэля*, изображения двух близлежащих одинаковых точечных источников или двух близлежащих спектральных линий разрешимы (разделены для восприятия), если центральный максимум



дифракционной картины от одного источника (линии) совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого

критерий Рэля

Разрешающая способность дифракционной решетки

Дифракционная решетка может быть использована как спектральный прибор, предназначенный для разложения света в спектр и измерения длин волн.

Разрешающей способностью спектрального прибора называют безразмерную величину

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

где $\Delta\lambda$ – абсолютное значение минимальной разности длин волн двух соседних спектральных линий, при которой эти линии регистрируются отдельно

Разрешающая способность дифракционной решетки равна произведению порядка спектра m на число щелей N

$$R = mN$$

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$$

Задача 6

Определить разрешающую способность дифракционной решетки, содержащей 200 штрихов на 1 мм, если ее общая длина равна 10 мм. На решетку падает монохроматическое излучение с длиной волны 720 нм.

Дано: $N = 200/1\text{мм}$; $l = 10\text{ мм}$; $\lambda = 720\text{ нм}$.

Найти: R . Разрешающая способность решетки

$$R = mN$$

$d \sin \varphi = m\lambda$ Максимальный порядок будет при $\sin \varphi = 1$

$$m_{\max} = \frac{d}{\lambda}$$

Период решетки - из условия задачи

$$d = \frac{1\text{мм}}{N} = \frac{10^{-3}}{200} = 5 \cdot 10^{-6}\text{ м}$$

$$m = \frac{d}{\lambda} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{720 \cdot 10^{-9}} = 6,6\langle 7 = 6$$

$$N = \frac{l}{d} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-6}} = 2000$$

$$R = mN = 6 \cdot 2000 = 12000$$

Ответ: $R = 12000$

Задача 7

Какова должна быть общая длина дифракционной решетки имеющей 500 штрихов на 1 мм, чтобы с ее помощью разрешить две линии спектра с длинами волн 600 нм и 600, 05 нм?

Дано: $N = 500/1\text{мм}$; $\lambda_1 = 600\text{нм}$ $\lambda_2 = 600,05\text{нм}$

Найти: l

Длина решетки может быть найдена по формуле:

Решение

$$l = d \cdot N$$

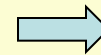
Период решетки - из условия задачи

$$d = \frac{1\text{мм}}{N} = \frac{10^{-3}}{500} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Разрешающая способность решетки

$$N = \frac{600 \cdot 10^{-9}}{0.05 \cdot 10^{-9}} = 4000$$

$$\frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} = mN$$



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



$$l = d \cdot N = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 4000 = 8 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ мм}$$

$$m = \frac{d}{\lambda} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{600 \cdot 10^{-9}} = 3$$

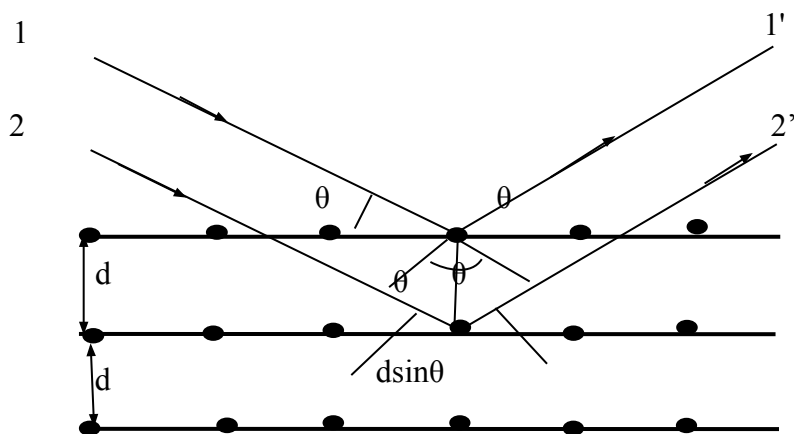
Ответ: $l = 8 \text{ мм}$

Дифракция рентгеновских лучей

Так как дифракционные явления наблюдаются лишь в тех случаях, когда длина волны падающего излучения меньше постоянной дифракционной решетки, то видимый свет для наблюдения дифракции от кристаллических решеток непригоден, длина волны видимого света (3,8 – 7,6) · 10⁻⁷ м слишком большая. Для дифракции от твердых тел необходимо излучение, длина волны которого 10⁻¹¹ – 10⁻¹⁰ м (рентгеновское излучение).

Дифракция рентгеновских лучей

В 1913 г. независимо друг от друга русским ученым Г.В. Вульфом и английскими физиками Г. и Л. Брэггами (отец и сын) был предложен метод расчета дифракции рентгеновского излучения от кристаллической решетки.



$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

Формула Вульфа - Брэггов

θ - угол скольжения

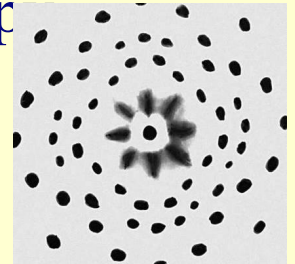
Дифракция рентгеновского излучения является результатом его отражения от системы параллельных *кристаллографических плоскостей* (плоскостей, в которых лежат узлы (атомы) кристаллической решетки).

Дифракция рентгеновских лучей

Формула Вульфа – Брэггов используется при решении двух важных задач:

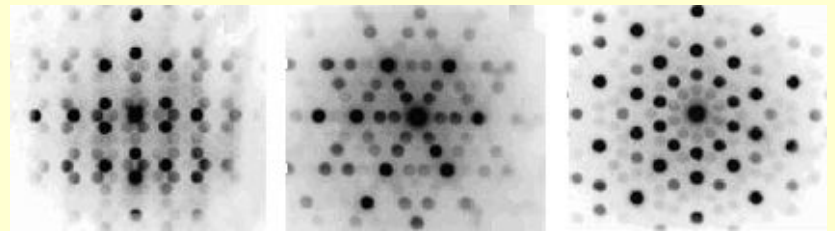
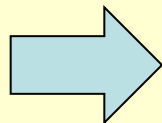
1. Наблюдая дифракцию рентгеновского излучения известной длины волны на кристаллической структуре неизвестного строения и измеряя θ и m , можно найти межплоскостное расстояние d , т.е. определить структуру вещества. Этот метод лежит в основе

рентгеноструктурного анализа.



2. Наблюдая дифракцию рентгеновского излучения неизвестной длины волны на кристаллической структуре при известном d и измеряя θ и m , можно найти длину волны падающего рентгеновского излучения. Этот метод лежит в основе *рентгеновской спектроскопии.*

Рентгенограммы



Принципы голографии

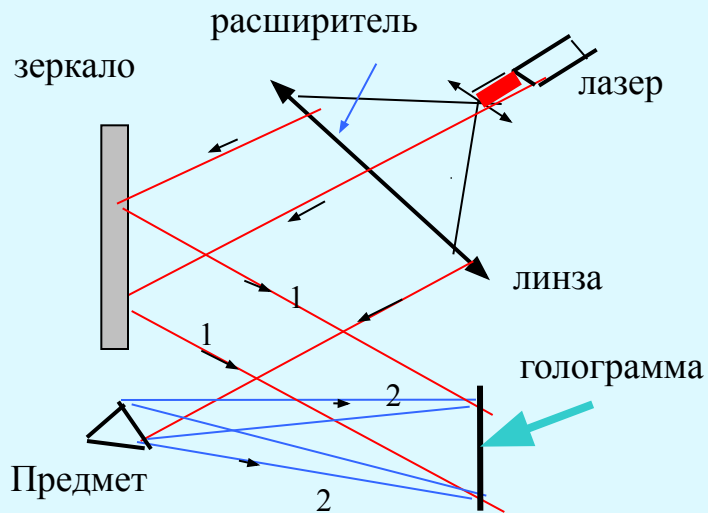
Английский физик Денис Габор в 1947 г высказал идею принципиально нового метода получения объемных изображений объектов. Он предложил регистрировать с помощью фотопластинки **не только амплитуды** или их квадраты, т.е. интенсивности, как при обычном фотографировании), **но и фазы** рассеянных объектами волн, воспользовавшись для этого явлением **интерференции волн**. Таким способом можно получить и зарегистрировать на фотопластинке значительно более полную информацию об объекте, нежели путем обычного фотографирования.

Свой метод Габор назвал **голографией** (от греческого *Holos* – весь, полный и *grapho* – пишу, рисую) (**полная запись**).

Принципы голографии

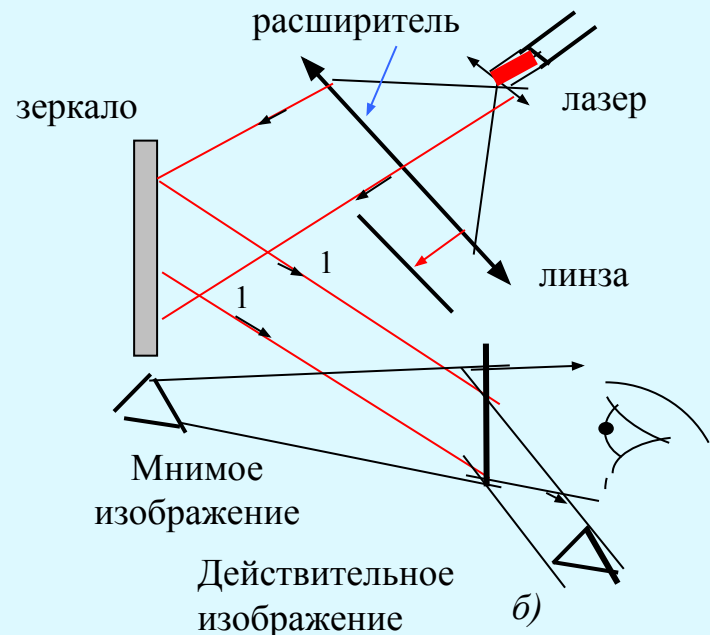
Осуществление идеи Габора стало возможным только после появления в 1960 г. источников света высокой степени когерентности – лазеров.

Запись



интерференция

Восстановление



дифракция

Спасибо за внимание