ЛЕКЦИЯ 8

25 марта 2020 г.

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. **Принцип Гюйгенса-Френеля.**
2. **Метод зон Френеля.**
3. **Зонная пластинка.**

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракция - совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями (края экранов, малые отверстия) и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Интерференция и дифракция - явления одной физической природы. Оба заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн.

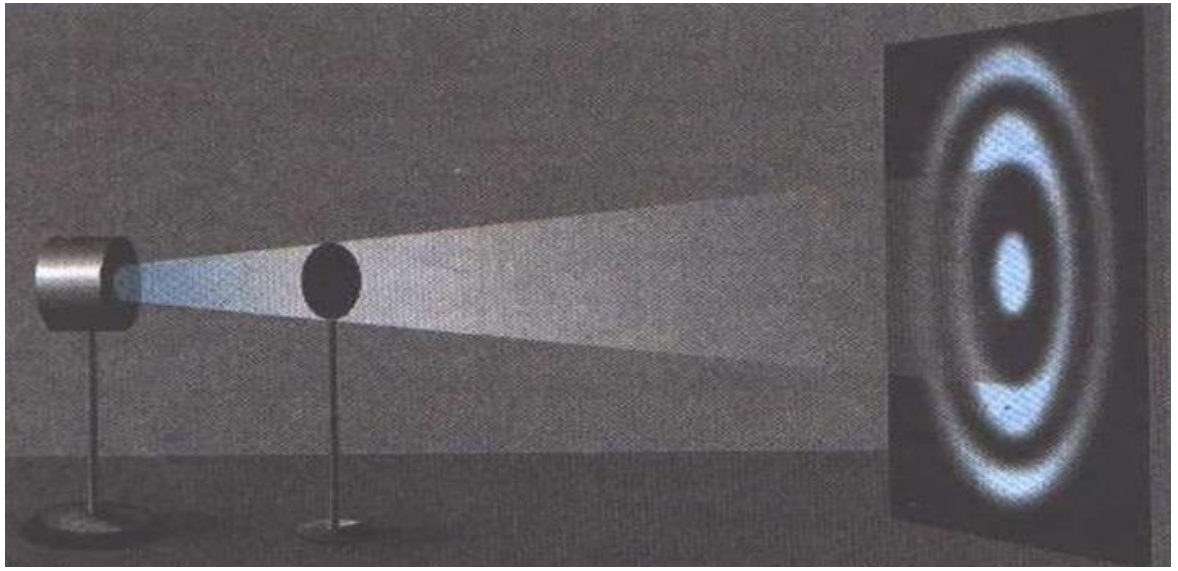
Принято *интерференцией* называть перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн от ***конечного числа дискретных когерентных источников***. Если же складываются волны ***от непрерывно распределенных когерентных источников*** – это *дифракция*.

Наблюдение дифракции: на пути световой волны помещают непрозрачную преграду, поглощающую часть волны. На экране за преградой при определенных условиях возникает дифракционная картина.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракция - совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями (края экранов, малые отверстия) и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

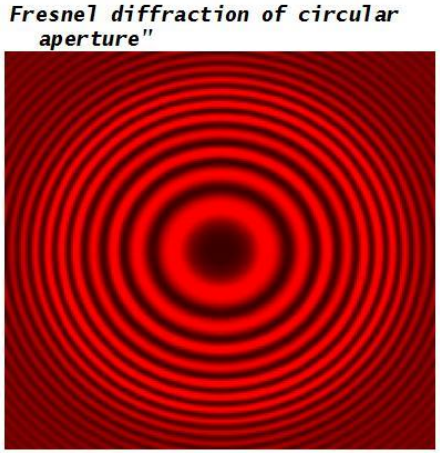


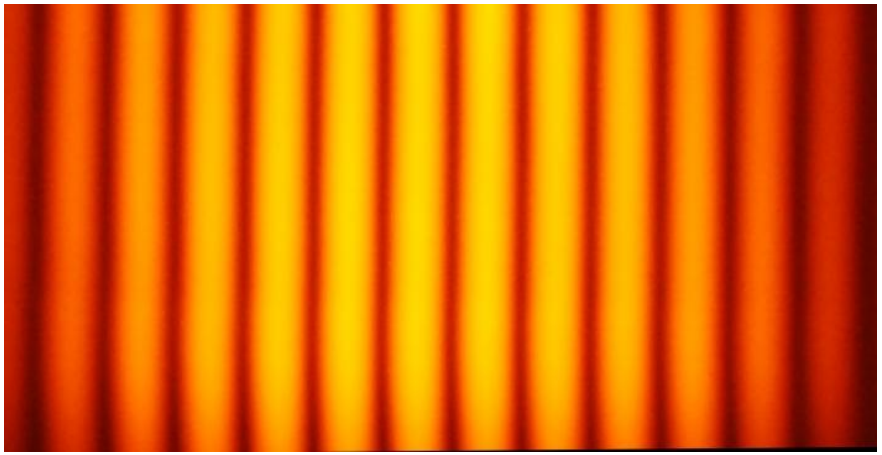
Наблюдение дифракции: на пути световой волны помещают непрозрачную преграду, поглощающую часть волны. На экране за преградой при определенных условиях возникает дифракционная картина.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Задача изучения дифракции: исследование распределения интенсивности света на экране с целью получения информации о свойствах световой волны.

- *дифракция Френеля* – дифракция в сходящихся лучах





- *дифракция Фраунгофера* (дифракция в параллельных лучах) - источник света и точка наблюдения расположены от препятствия далеко, падающие на препятствие и идущие в точку наблюдения лучи образуют практически параллельные пучки.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Задача изучения дифракции: исследование распределения интенсивности света на экране с целью получения информации о свойствах световой волны.

Различают два вида дифракции:

- *дифракция Френеля* – дифракция в сходящихся лучах;

- *дифракция Фраунгофера* (дифракция в параллельных лучах) - источник света и точка наблюдения расположены от препятствия далеко, падающие на препятствие и идущие в точку наблюдения лучи образуют практически параллельные пучки.

Первое объяснение дифракции света принадлежит французскому физику Френелю (1818 г.). Он показал, что количественное описание дифракции возможно на основе построений Гюйгенса, (нидерландский ученый, 17 век), если их дополнить принципом интерференции вторичных волн.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

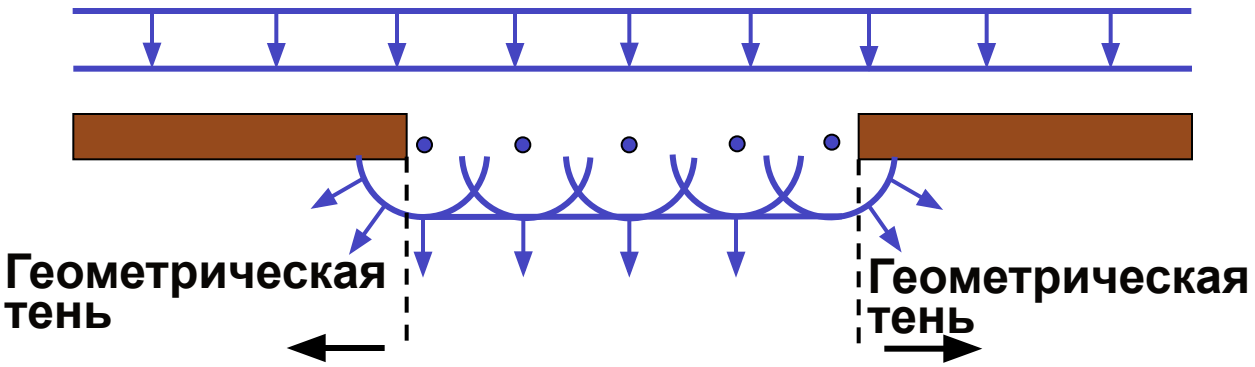
Принцип Гюйгенса-Френеля.

Проникновение световых волн в область геометрической тени объясняется с помощью принципа Гюйгенса.

В соответствии с этим принципом каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит центром *вторичных* волн; огибающая этих волн дает положение фронта волны в следующий момент.

Пусть на плоскую преграду с отверстием падает параллельный ей фронт волны.

По Гюйгенсу каждая точка выделяемого отверстием участка волнового фронта служит центром вторичных волн, которые в однородной изотропной среде будут сферическими.



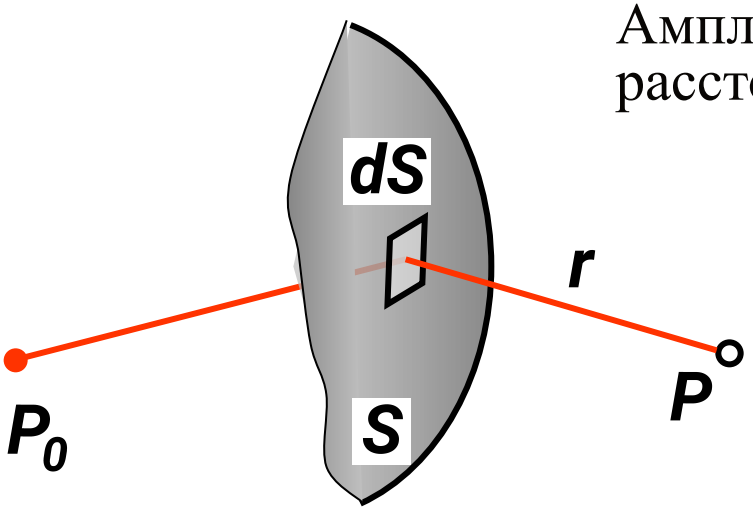
За отверстием волна, огибая края преграды, проникает в область геометрической тени.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Принцип Гюйгенса-Френеля

Принцип Гюйгенса позволяет решать задачу о направлении распространения волнового фронта. Вопрос об интенсивности световой волны за преградой не затрагивается. Этот недостаток был устранен Френелем.

В соответствии с *принципом Гюйгенса–Френеля* каждый элемент dS волновой поверхности S служит источником вторичной сферической волны, амплитуда которой пропорциональна величине элемента dS.



Амплитуда сферической волны убывает с расстоянием r от источника по закону $1/r$

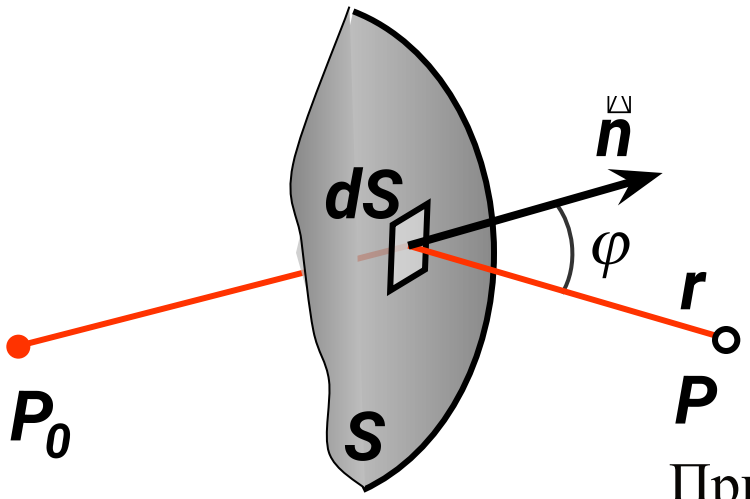
Следовательно, от каждого участка dS волновой поверхности в точку P, лежащую перед этой поверхностью, приходит колебание

$$dE = Ka_0 dS \frac{1}{r} \cos(\omega t - kr)$$

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Принцип Гюйгенса-Френеля

$$dE = Ka_0 dS \frac{1}{r} cos(\omega t - kr)$$



a_0 - множитель, зависящий от амплитуды световой волны в месте нахождения элемента dS, k- волновое число ($k = 2\pi/\lambda$).

Коэффициент K зависит от угла φ между нормалью $\vec{n}$ к элементу dS и направлением от dS к точке P.

Коэффициент K монотонно убывает с ростом φ.

При $\varphi = 0$ этот коэффициент максимален.

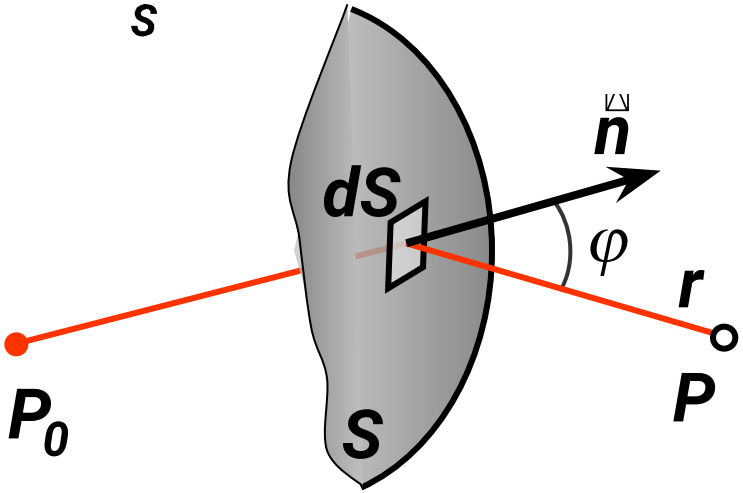
Результирующее колебание в точке P определяется суперпозицией колебаний dE от всех элементов dS волновой поверхности S:

$$E = \int_S K(\varphi) a_0 \frac{1}{r} cos(\omega t - kr) dS$$

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Принцип Гюйгенса-Френеля

$$E = \int_S K(\varphi) a_0 \frac{1}{r} \cos(\omega t - kr)\, dS$$



Этот интеграл представляет собой математическую формулировку принципа Гюйгенса – Френеля.

Для определения колебания в точке ***P****, лежащей перед некоторой поверхностью* ***S*** *, надо найти колебания, приходящие в эту точку от всех элементов* ***dS*** *поверхности* ***S*** *и затем сложить их с учетом амплитуд и фаз.*

Источниками (фиктивными) вторичных волн служат бесконечно малые элементы одной волновой поверхности, следовательно, все фиктивные источники действуют синфазно.

Тогда возбуждаемая световая волна может быть представлена как результат суперпозиции *когерентных* вторичных волн, излучаемых фиктивными источниками.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Принцип Гюйгенса-Френеля.

Таким образом, для определения в некоторой точке пространства результирующей интенсивности, надо учесть *интерференцию* всех вторичных волн.

Принцип Гюйгенса-Френеля является основным постулатом волновой теории, описывающим и объясняющим механизм распространения волн, в частности, световых.

Суммировать (интегрировать) амплитуды элементарных колебаний, приходящих в точку P, в общем случае сложно.

Однако, как показал Френель, в простейших случаях, при наличии симметрии, амплитуды результирующих колебаний могут быть найдены простым алгебраическим или арифметическим суммированием.

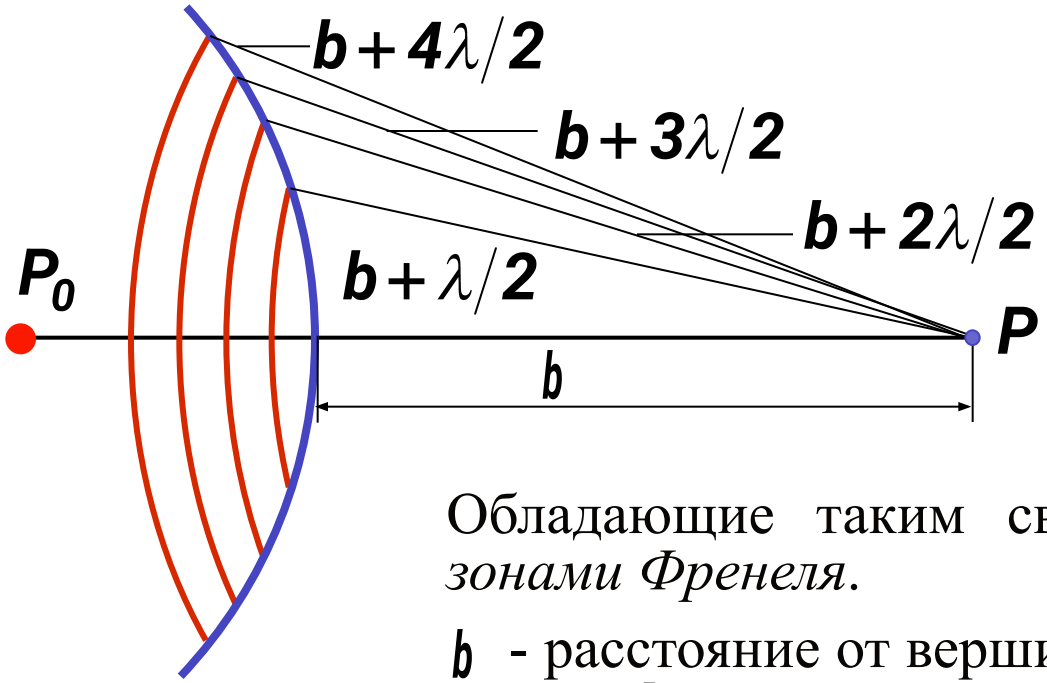
Суммирование амплитуд колебаний, приходящих от различных элементов волновой поверхности S, Френель предложил делать с помощью разбиения поверхности на зоны, конфигурация которых зависит от симметрии рассматриваемой задачи.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля

Определим амплитуду светового колебания, возбуждаемого в точке P сферической волной, распространяющейся в изотропной однородной среде из точечного источника P_0.

Волновые поверхности такой волны симметричны относительно прямой P_0P.



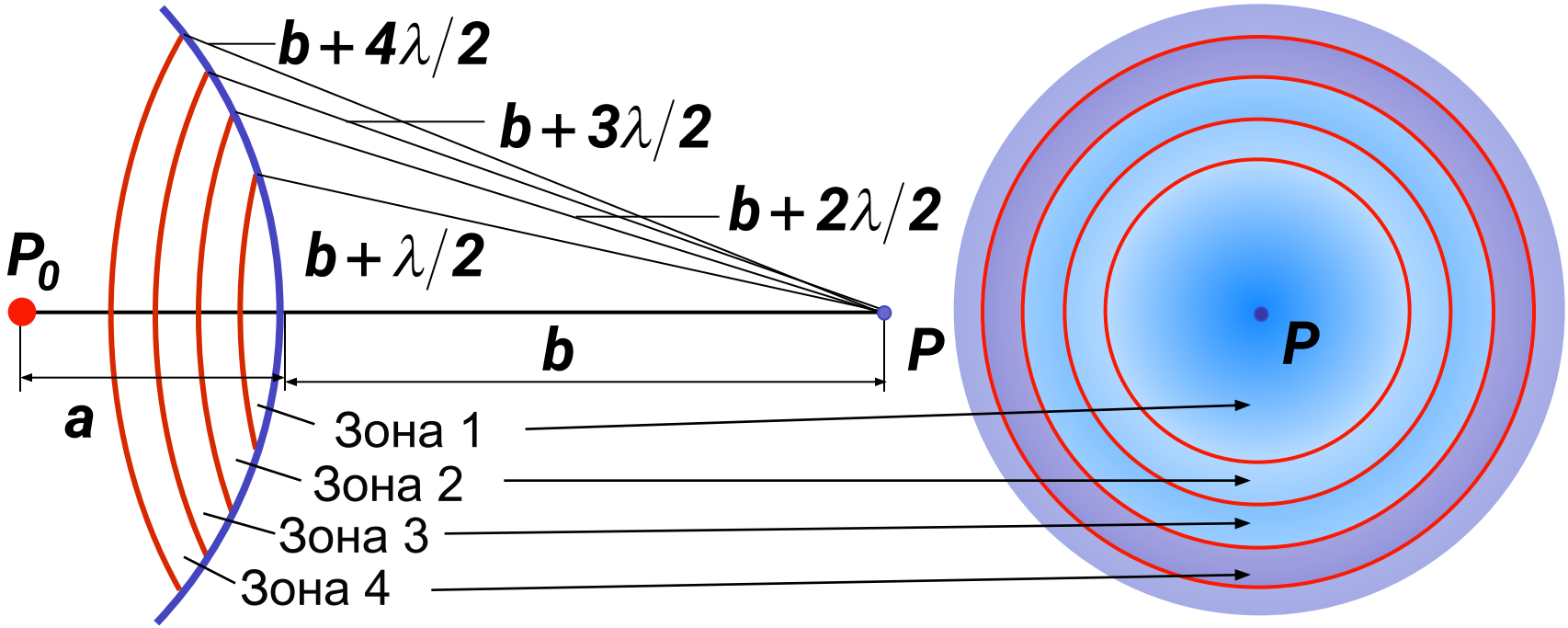
Разобьем волновую поверхность на кольцевые зоны так, чтобы расстояния от краев каждой зоны до точки P отличались друг от друга на половину длины волны $\lambda/2$.

Обладающие таким свойством зоны называются *зонами Френеля*.

b - расстояние от вершины волновой поверхности до точки P.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля



a - расстояние от источника P_0 до вершины рассматриваемой волновой поверхности;

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля

Вычислим площади зон.

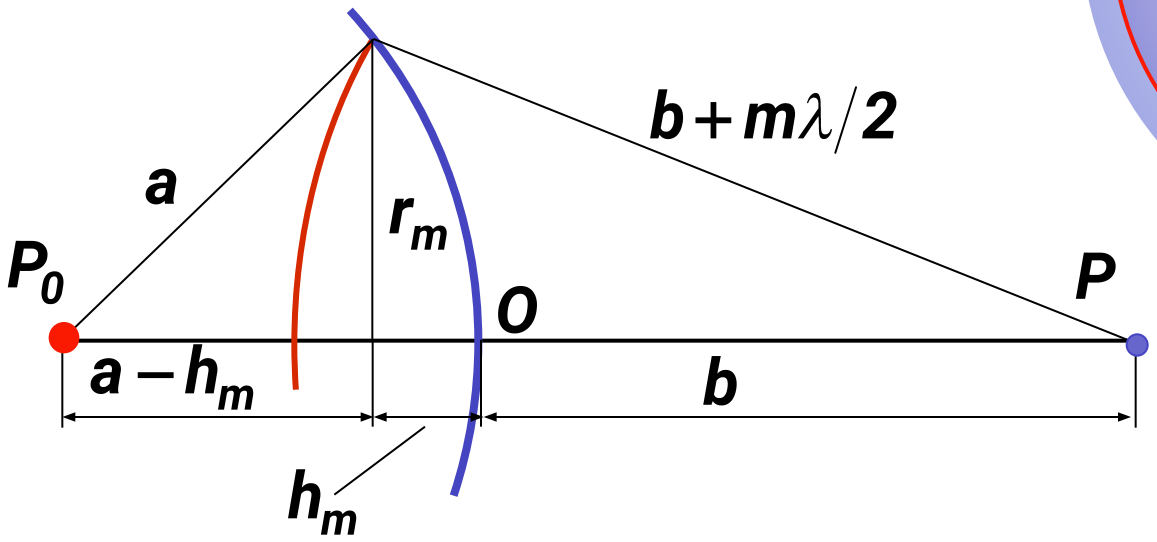
При достаточно малых m площадь ΔS_m m - ой зоны можно вычислить как

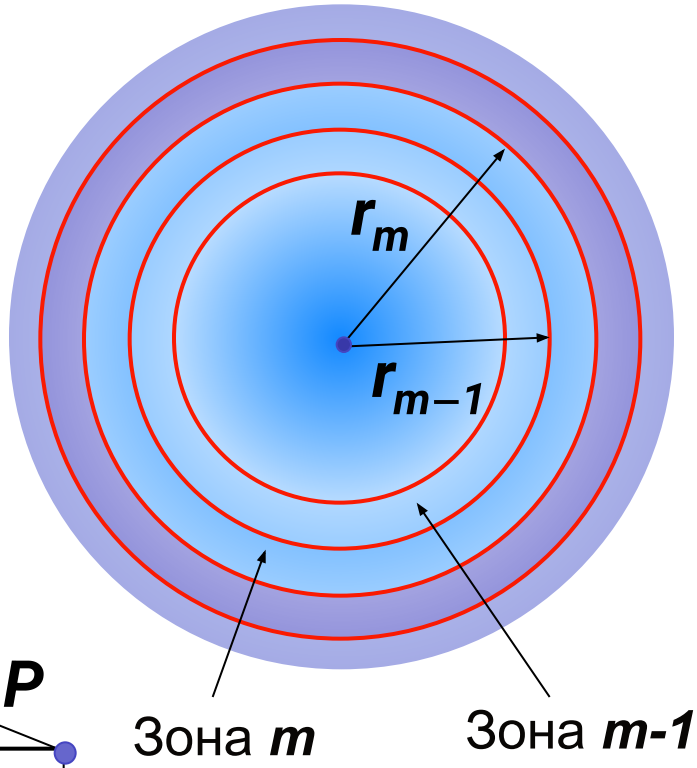
$$\Delta S_m = \pi r_m^2 - \pi r_{m-1}^2$$

r_m - внешний радиус m- ой зоны Френеля;

r_{m-1} - внешний радиус $m-1$ - ой зоны

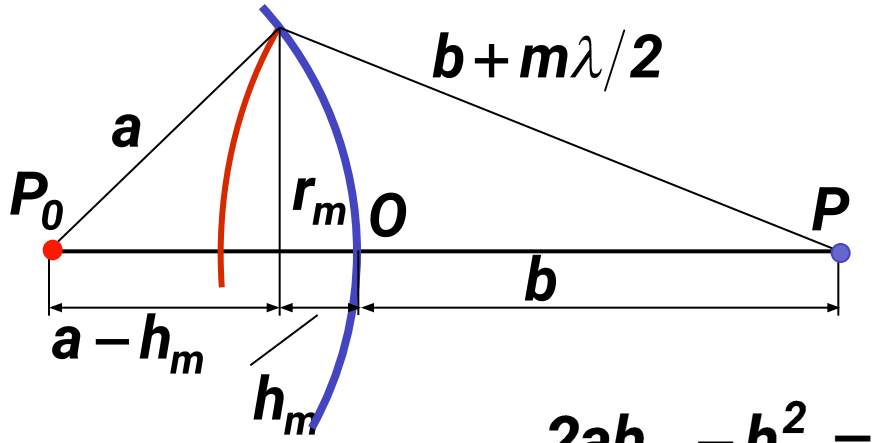
Для расчета ΔS_m найдем r_m.





ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля $r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2$, $r_m^2 = (b + m\lambda/2)^2 - (b + h_m)^2$



a - радиус волновой поверхности.

Объединим два выражения и возведем скобки в квадрат:

$$2ah_m - h_m^2 = 2bm\lambda/2 + m^2(\lambda/2)^2 - 2bh_m - h_m^2$$

Из этого выражения получим: $$h_m = \frac{bm\lambda + m^2(\lambda/2)^2}{2(a+b)}$$

Поскольку мы ограничились рассмотрением малых m, то можно пренебречь слагаемым с m^2 и упростить полученное выражение:

$$h_m = \frac{bm\lambda}{2(a+b)}$$

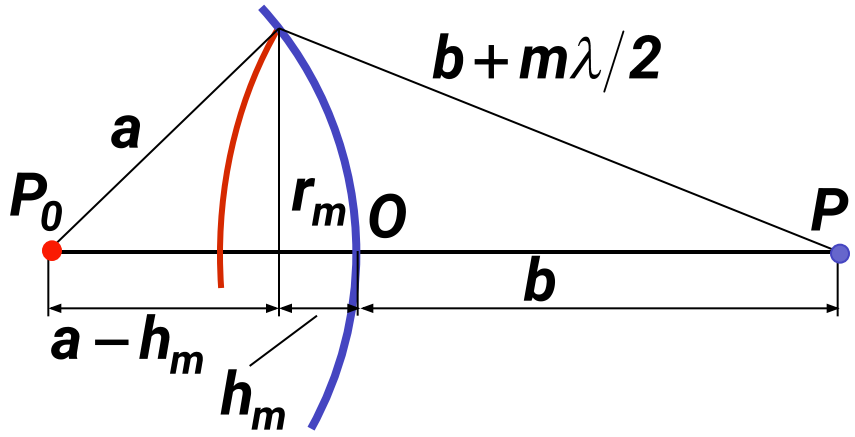
Теперь можно определить r_m:

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = 2ah_m - h_m^2$$

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля

$$r_m^2 = 2ah_m - h_m^2$$



При малых m высота сегмента $h_m << a$, тогда $r_m^2 = 2ah_m$, или

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

Площадь m - ой зоны равна:

$$\Delta S_m = \pi r_m^2 - \pi r_{m-1}^2 = \pi\left[\frac{ab}{(a+b)} m\lambda - \frac{ab}{(a+b)}(m-1)\lambda\right] = \frac{\pi ab}{a+b}\lambda$$

Полученное выражение не зависит от m. Это значит, что при малых m площади зон Френеля примерно одинаковы.

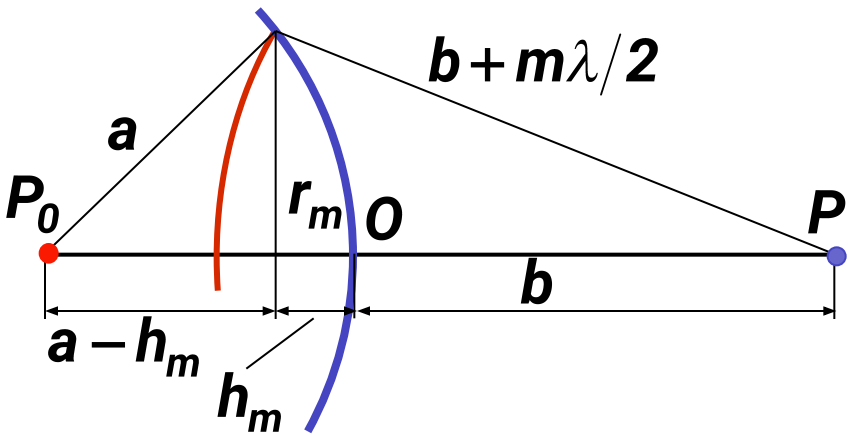
Расстояние b_m от внешнего края m-ой зоны до точки P равно $b_m = b + m\lambda/2$ и медленно растет с номером зоны.

Поскольку волна сферическая, то ее амплитуда зависит от b_m

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля

Следовательно, амплитуда A_m колебания, возбуждаемого m-ой зоной в точке P, монотонно убывает с ростом m.



Итак, амплитуды колебаний, возбуждаемых зонами Френеля в точке P, образуют монотонно убывающую последовательность

$$A_1 > A_2 > A_3 > \ldots \quad A_{m-1} > A_m > A_{m+1} > \ldots$$

Фазы колебаний, возбуждаемых соседними зонами, различаются на π.

Следовательно, амплитуда результирующего колебания в точке P может быть представлена в виде:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \ldots = A_1/2 + A_1/2 - A_2 + A_3/2 + A_3/2 - A_4 + A_5/2 \ldots.$$

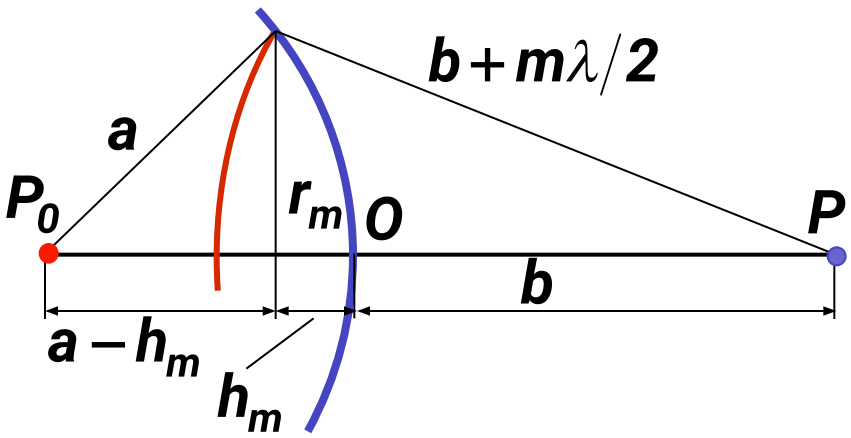
Все амплитуды от нечетных зон входят в это выражение с одним знаком, от четных – с другим.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля

Общее число зон Френеля, умещающихся на полусфере, очень велико.

Например, при $a = b$=10 см и λ =0.5 мкм радиус центральной зоны будет около 0.16 мм, а число зон составляет величину порядка 10^5.



Поэтому допустимо приближение о том, что амплитуда колебания от m-ой зоны Френеля равно среднему арифметическому от амплитуд примыкающих к ней зон:

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

С учетом этого допущения амплитуда результирующего колебания в точке P определяется выражением:

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

Таким образом, действие всей волновой поверхности на точку P сводится к действию ее участка, меньшего центральной зоны.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Метод зон Френеля

Оценки показывают, что радиус первой зоны Френеля очень мал.

Это означает, что световой поток распространяется от P_0 к P как будто внутри очень узкого канала , т.е. прямолинейно.

Таким образом, принцип Гюйгенса – Френеля объясняет прямолинейное распространение света в однородной среде.

Некоторые дополнительные выводы из принципа Гюйгенса – Френеля:

1. Если закрыть все зоны, кроме первой, то амплитуда в точке P увеличится по сравнению с полностью открытым волновым фронтом в два раза $\left(A = A_1\right)$, а интенсивность в *четыре* раза $\left(I \sim A^2\right)$

2. Если отверстие в преграде открывает для точки P две зоны Френеля, интенсивность в этой точке падает практически до нуля $\left(A = A_1 - A_2\right)$, хотя световой поток оказывается в два раза больше.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Зонная пластинка.

Интенсивность света в точке наблюдения можно увеличить с помощью *зонной пластинки*.

В простейшем случае это стеклянная пластинка, на поверхность которой нанесены по принципу расположения зон Френеля чередующиеся прозрачные и непрозрачные кольца.

Если установить пластинку в строго определенном месте, то она перекроет все четные или нечетные зоны.

В результате этого интенсивность света в точке наблюдения будет значительно больше, чем при полностью открытом волновом фронте.

Таким образом, зонная пластинка действует подобно собирающей линзе.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Зонная пластинка.

Интенсивность света в точке наблюдения можно увеличить с помощью *зонной пластинки*.

Опыты с *зонными пластинками* можно посмотреть:

https://www.youtube.com/watch?v=MoUTQ0D9gDQ

https://www.youtube.com/watch?v=gAqBvCxp8y0