Глава 8. Дифракция света

§ 8.1.Понятие о дифракции света

Опр. Дифракцией называется любое отклонение распространения света от прямолинейного, не связанное с отражением или преломлением

(определение предложено немецким физиком-теоретиком начала XX века Арнольдом Зоммерфельдом)

Такие отклонения от законов геометрической оптики обычно наблюдаются при распространении света в среде с резкими оптическими неоднородностями, т.е. когда оптические свойства изменяются на масштабах, сравнимых с длиной световой волны λ

Постановка задачи

Пусть на пути света встречается препятствие того или иного вида – отверстие в непрозрачной преграде любой формы, непрозрачное тело малых размеров, край непрозрачной плоскости и т.д.

Под задачей дифракции понимают расчёт распределения интенсивности света в области за препятствием либо как функции координат точек пространства, либо как функции угла, определяющего направление за этим препятствием

*В основе анализа всех дифракционных задач лежит применение **принципа Гюйгенса-Френеля** (сформулирован в первой четверти XIX в.)*

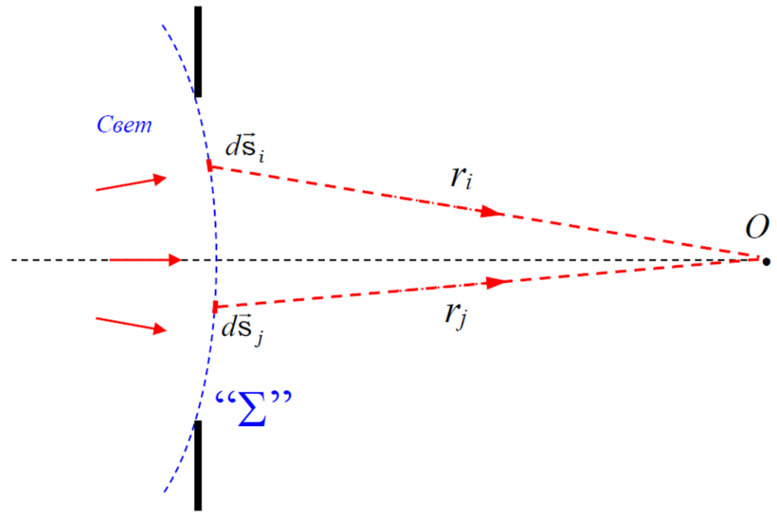
Принцип Гюйгенса-Френеля

1. *Каждый малый элемент волнового фронта, не закрытый препятствием, может рассматриваться как самостоятельный источник так называемых “**вторичных волн**”, распространяющихся за преградой*

2. *Интенсивность света в любой точке пространства за препятствием можно найти, **вычислив результат интерференции вторичных волн** в этой точке*

Принцип Гюйгенса-Френеля

На преграду с отверстием падает монохроматический свет



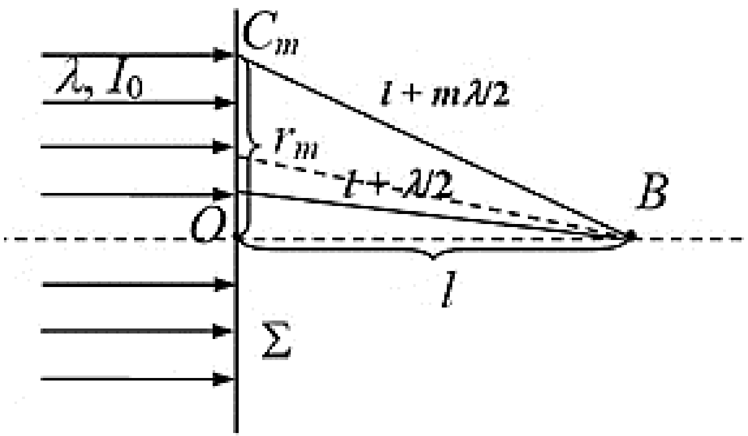
Поверхность “Σ” – положение волнового фронта, часть которого оказалась в пределах отверстия

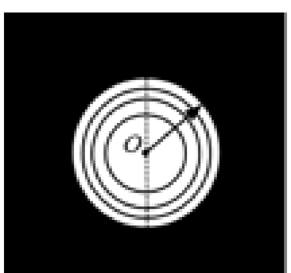
Для вычисления результирующего колебания электрического поля световой волны в точке O напротив центра отверстия за препятствием необходимо ***сложить колебания****, возбуждённые волнами от всех вторичных источников* $d\vec{S}_i$ *внутри отверстия*

$$\vec{\mathbf{E}}(t) = \sum_i \vec{\mathbf{E}}_i(t) = \sum_i E_{0i} \cdot \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}_i)$$

§ 8.2. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске

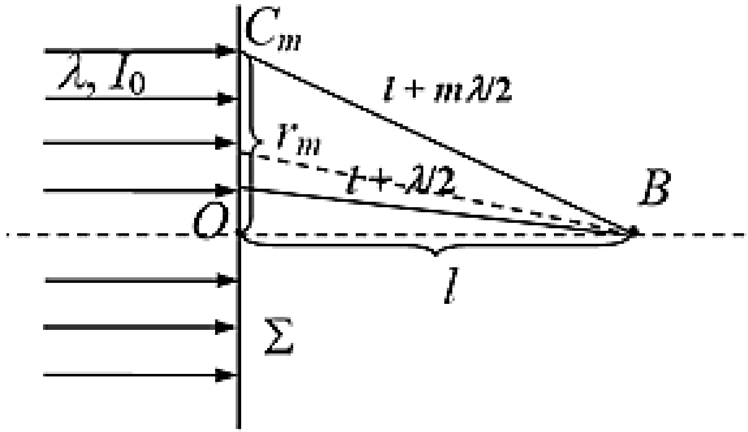
Пусть на преграду с круглым отверстием падает по нормали ***плоская монохроматическая волна***





Метод зон Френеля: часть волнового фронта, ограниченную краями препятствия (в рассматриваемом случае – круг, совпадающий с отверстием) разбивают на участки конечных размеров так, чтобы ***расстояния от границ соседних участков до точки наблюдения B отличались на $\lambda/2$***

Дифракция Френеля на круглом отверстии



Радиусы границ зон Френеля определяются из условия

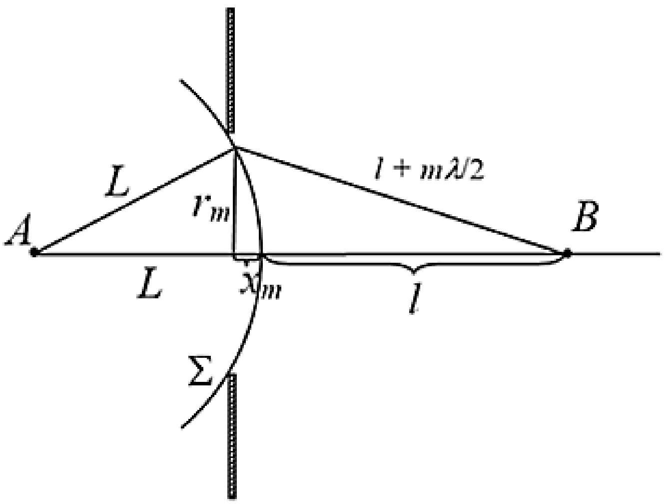
$$l^2 + r_m^2 = (l + m\lambda/2)^2$$

Если $l\lambda >> \lambda^2$ (точка В располагается на расстоянии $l >> \lambda$), то

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

Дифракция Френеля на круглом отверстии

Источник находится на конечном расстоянии от препятствия:



$$r_m^2 = L^2 - (L - x_m)^2 = \left(l + m\lambda/2\right)^2 - (l + x_m)^2$$

$$x_m = \frac{m\lambda l}{2(L+l)} \qquad (L,\, l >> \lambda\,)$$

Внешний радиус m-й зоны Френеля

$$r_m = \sqrt{m\lambda \frac{lL}{L+l}}$$

Удобно ввести вспомогательную величину $l^* = \dfrac{Ll}{L+l}$*, имеющую размерность длины, тогда*

$$r_m = \sqrt{m\lambda\, l^*}$$

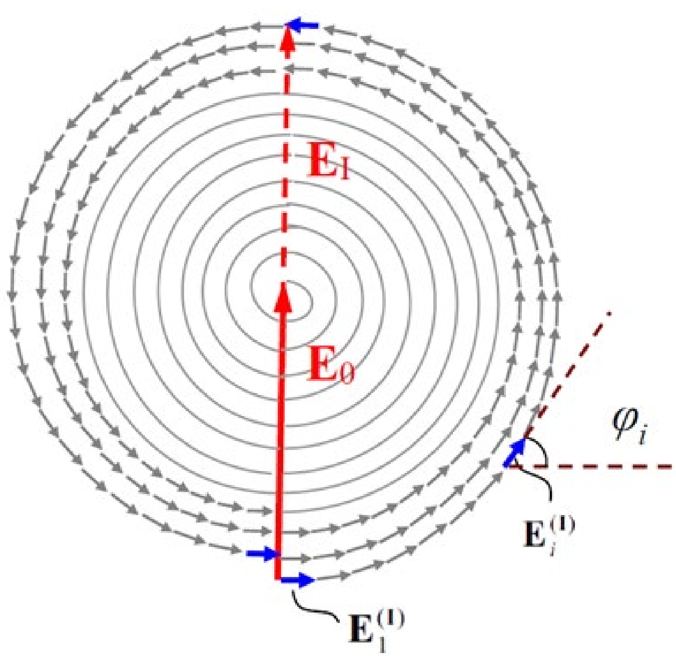
***Опр.* Зонами Френеля называются такие части волнового фронта, для которых расстояния от границ соседних зон до точки наблюдения отличаются на** $\lambda/2$

Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля

Радиус отверстия точно равен радиусу первой зоны Френеля

Разобьём первую зону на много кольцевых участков одинаковой площади столь малых, чтобы волны, приходящие в точку В от разных точек одного и того же кольцевого участка, имели одинаковую фазу

Амплитуду результирующего колебания определим, выполняя сложение ***графическим методом векторных диаграмм***



Колебания от каждого следующего участка приходят в точку В с некоторым запаздыванием по фазе φ_i

Запаздыванию по фазе соответствует поворот вектора на угол φ_i

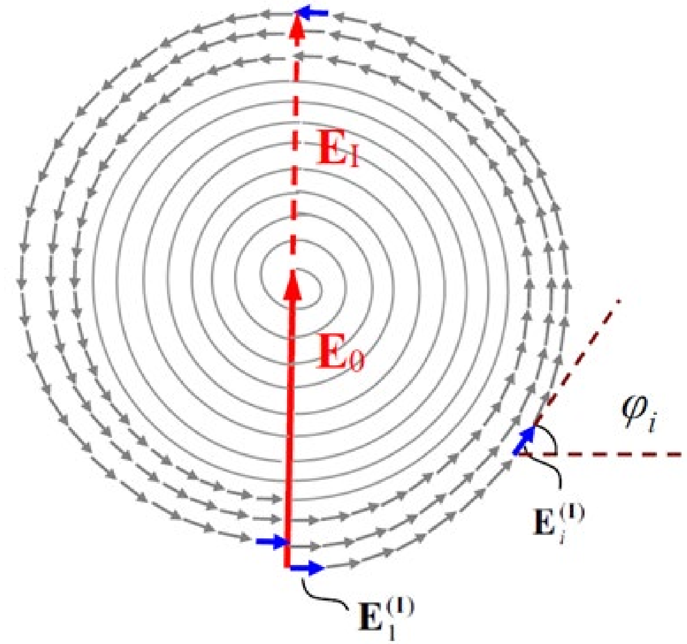
Длины векторов $\vec{E}_i^{(\mathrm{I})}$ *почти одинаковы*

Результирующее колебание может быть представлено результирующим вектором $\vec{E}_{\mathrm{I}}$

Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля

Определяя результирующие колебания в точке В от остальных зон Френеля, оказавшихся в пределах отверстия

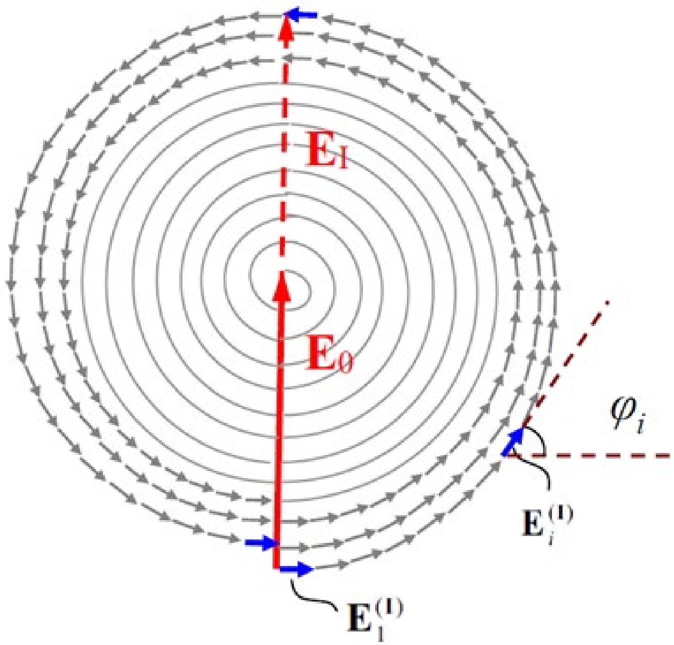
- *разбиваем каждую зону на n узких кольцевых участков*
- *первый вектор каждой последующей зоны* $\vec{E}_1^{(\mathbf{k}+1)}$ *"пришиваем", учитывая небольшой сдвиг по фазе, к последнему вектору предыдущей зоны* $\vec{E}_n^{(\mathbf{k})}$
- *суммируем все векторы* $\vec{E}_i$ *: вектор, соответствующий результирующему колебанию, соединяет на векторной диаграмме начало первого вектора с концом последнего*



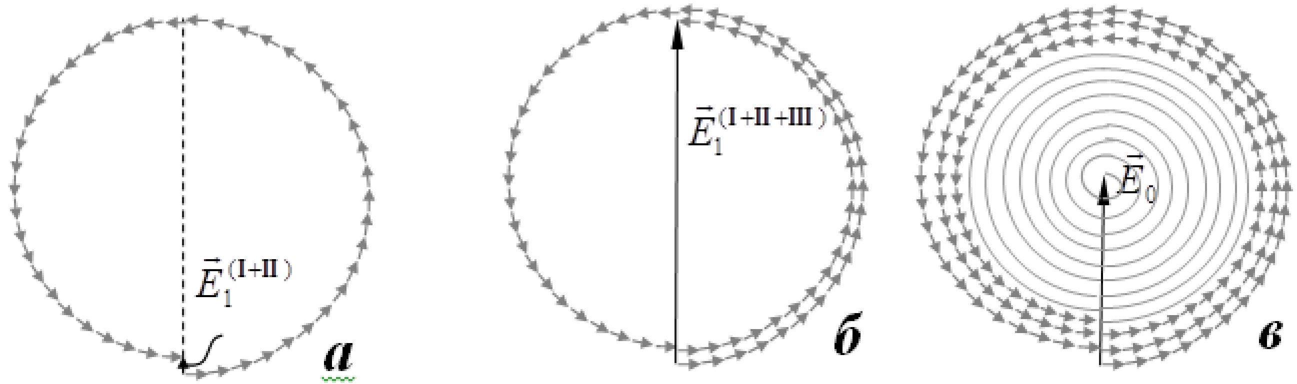
Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля

На диаграмме учтено, что с увеличением номера зоны длины векторов $\vec{E}_i^{(\mathbf{k})}$ постепенно уменьшаются, т.к. каждая последующая зона находится от точки В несколько дальше, чем предыдущая

Соответственно, уменьшается и “диаметр” полуокружностей



Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля



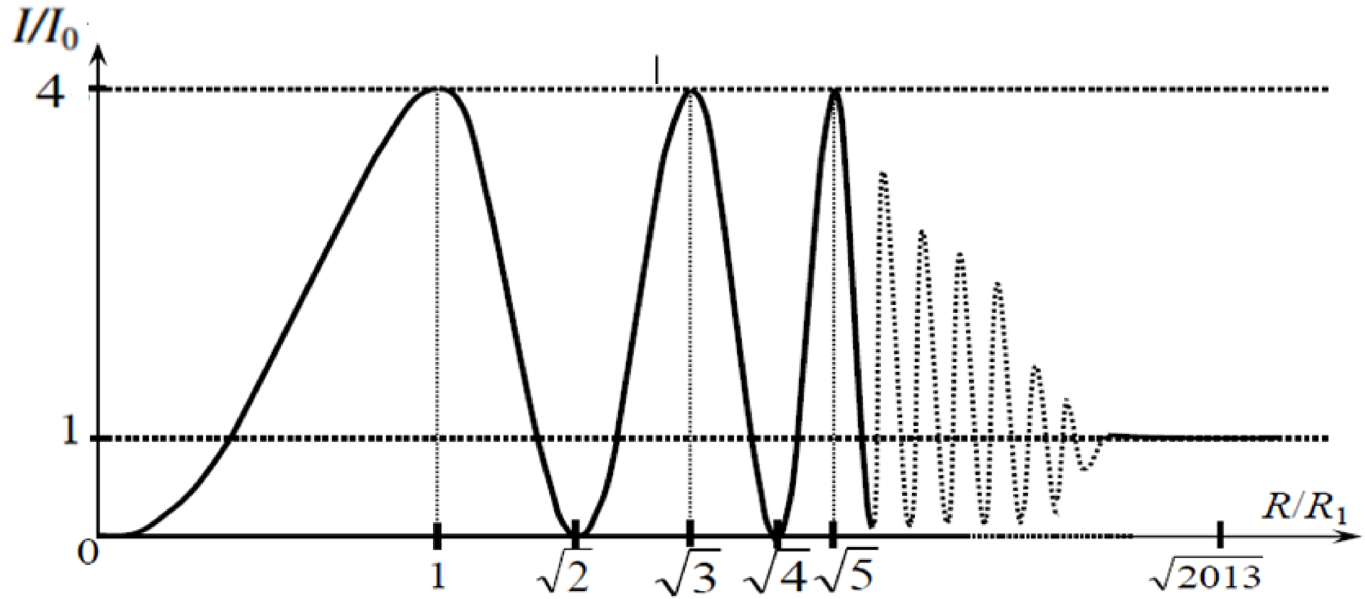
а) *для точки наблюдения открыты первая и вторая зоны Френеля*

б) *для точки наблюдения открыты первая, вторая и третья зоны Френеля*

в) *открыт весь волновой фронт (препятствия нет)*

Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля

Зависимость интенсивности в центре картины при дифракции на круглом отверстии от радиуса отверстия

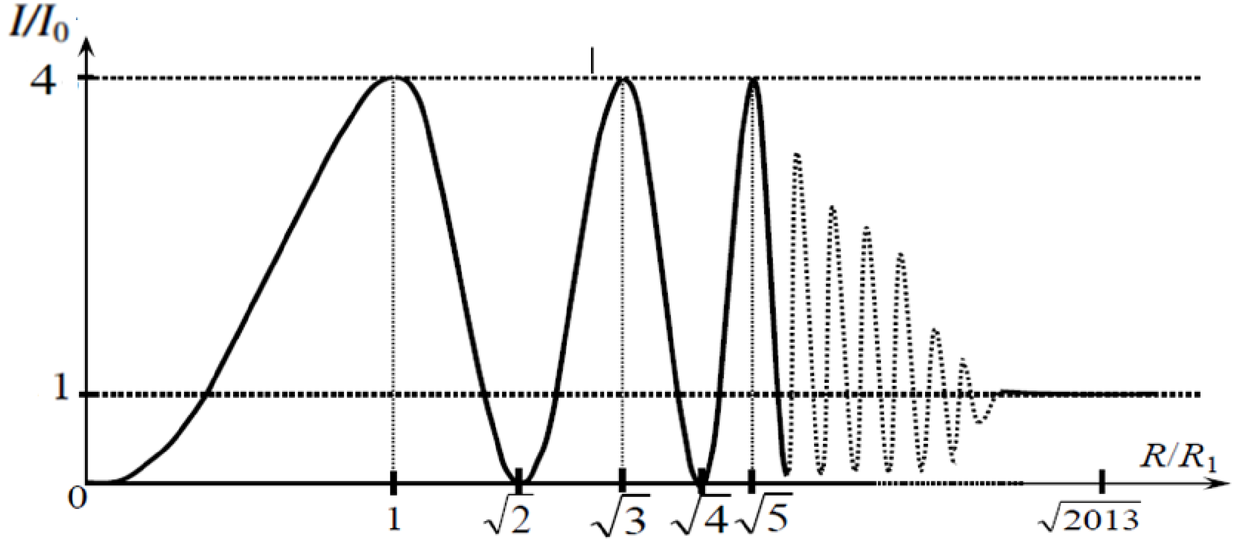


R_1 – радиус первой зоны Френеля,
I_0 – интенсивность, регистрируемая в отсутствие препятствия

Максимумы соответствуют случаю, когда открыто нечетное число зон Френеля, минимумы - когда четное. С ростом радиуса R расстояние между максимумами и минимумами уменьшается. Это связано с тем, что радиус m-ой зоны пропорционален квадратному корню из номера зоны m

Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля

Зависимость интенсивности в центре картины при дифракции на круглом отверстии от радиуса отверстия



R_1 – радиус первой зоны Френеля,

I_0 – интенсивность, регистрируемая в отсутствие препятствия

Если экран удалять от преграды, количество видимых из центра экрана зон Френеля будет уменьшаться

Интенсивность света в точке В также будет пульсировать до тех пор, пока не останется открытой только одна зона

При таком положении экрана будет зарегистрирован самый большой максимум интенсивности в центре экрана (примерно $4I_0$)

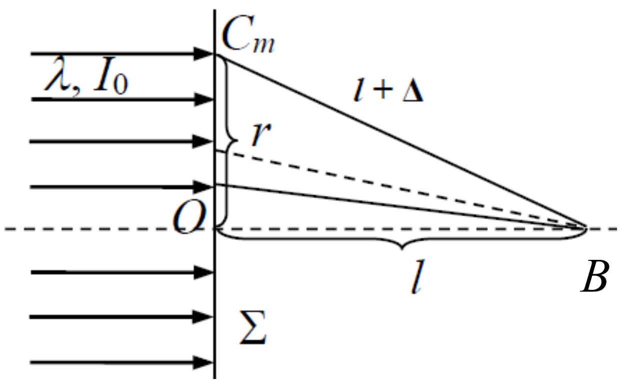
Дифракция Френеля на круглом отверстии. Спираль Френеля

Задача

На преграду с круглым отверстием радиуса $r = 1$ мм падает нормально монохроматический свет с интенсивностью I_0 и длиной волны $\lambda = 670$ нм (красный свет). Найдите интенсивность в центре дифракционной картины на экране, отстоящем на расстоянии $l = 1$ м от отверстия.

Рассчитаем разность хода для вторичных источников, располагающихся у края отверстия и в центре:

$$(l+\Delta)^2 = l^2 + r^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta = \frac{r^2}{2l}$$

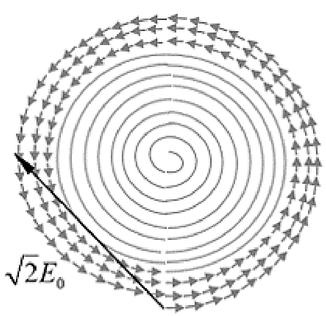


Оптическая разность хода равна

$$\Delta = \frac{r^2}{2l} = \frac{10^{-6}\ м^2}{2\ м} = 5\cdot 10^{-7}\ м \approx \frac{3}{4}\lambda \quad ,$$

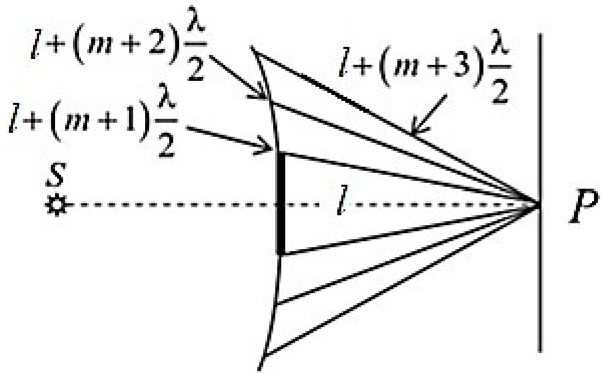
а разность фаз –

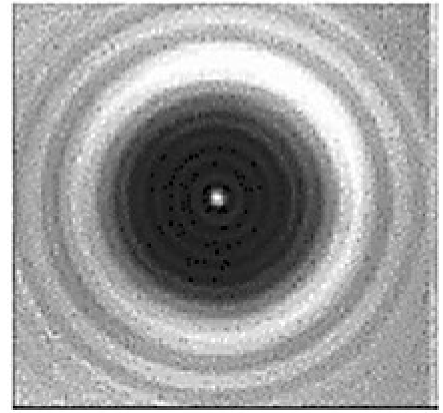
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\frac{r^2}{2l} = \frac{r^2}{l\lambda}\cdot\pi \cong \frac{3}{2}\pi.$$



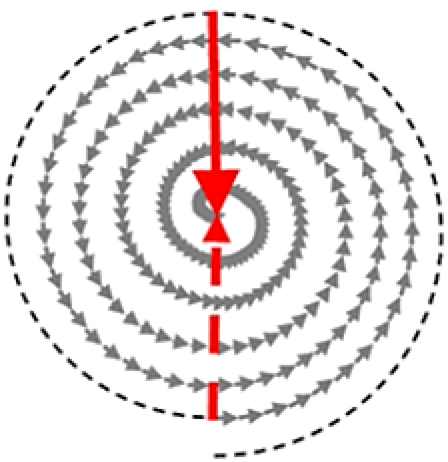
Соответствующий вектор $\vec{E}_i$ на диаграмме повёрнут по часовой стрелке на угол $3/2\pi$ относительно первого $\vec{E}_1^{(1)}$ и «смотрит» вертикально вниз. Длина результирующего вектора $\sqrt{2}E_0$, а значит, интенсивность равна **$2I_0$**

Дифракция Френеля на диске

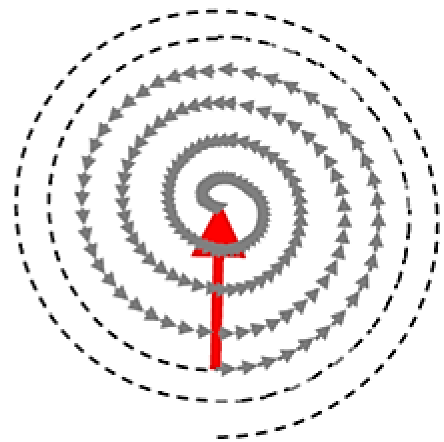




В точке P наблюдается максимум интенсивности – ***пятно Пуассона***



Диск закрывает первую (первую и вторую) зоны Френеля



Диск закрывает первые четыре зоны Френеля