



Игошин Фёдор Фёдорович

*Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей физики*

Московского физико-технического института (МФТИ).

Дифракция, зоркость орла, зоркость инспектора

Прямолинейное распространение света хорошо подтверждают наши жизненные наблюдения: скажем, тень и полутень или ход лучей в оптических приборах. Однако внимательное исследование световых явлений показывает, что так бывает не всегда: свет несколько огибает края непрозрачных препятствий. Это огибание и называется дифракцией. Впервые опыты по дифракции света были проведены ещё в середине XVII века ученым-иезуитом Франческо Гримальди. Но тогда результаты опытов объяснить не могли, потому что считали, что свет – это поток частиц.

Вспомним, как ведут себя волны воды, падающие на экран с узкой щелью. Они проходят через щель не только в прямом направлении, но и в стороны, будто щель сама стала источником волн. Но у волн, идущих прямо, амплитуда больше, чем у боковых. Чем уже щель, тем меньше различаются амплитуды – это означает, что «загибание» больше. Можно поставить на пути волн препятствие в виде прута. Если прут толстый, то за ним видна только «тень» от волн, а если он тонкий (его толщина соизмерима с длиной волны), то и позади него тоже будут волны. Можно проделать ряд опытов, подтверждающих, что и для света характерны явления, о которых мы только что рассказали.

Пусть на экран с круглым отверстием диаметром D падает пучок практически параллельных лучей от удалённого точечного источника света, например, от звезды (рис. 1). Поставив за отверстием линзу, получим в её фокальной плоскости на экране не изображение источника, а сложную дифракционную картину, состоящую из концентрических светлых и тёмных колец. Суммируя амплитуды световых волн, проходящих через различные участки отверстия, с учётом их фазы, получаем результат, что в центре должно быть яркое пятно, а первое тёмное кольцо получается при условии, что угол φ удовлетворяет соотношению

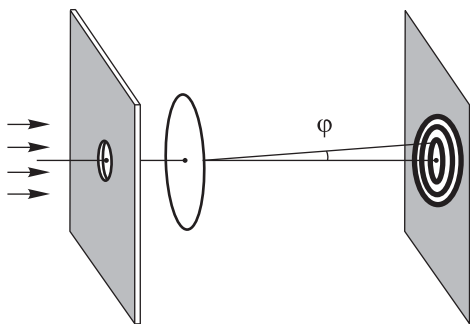


Рис. 1. Схема наблюдения дифракции от круглого отверстия в параллельных лучах

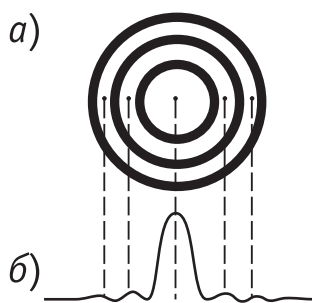


Рис. 2. Дифракция от круглого отверстия
а) Общий вид дифракционной картины
б) Кривая распределения освещённости

$\sin \varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D}$. Здесь λ – длина волны света. Если освещённость в центре картины принять равной единице, то освещённость в первом световом кольце равна 0,017, а во втором – 0,0041 (рис. 2). Около 84% общего количества энергии, проходящей через отверстие в экране, попадает в область центрального светлого пятна.

Следует заметить, что для получения на экране центрального светлого пятна диаметром 0,6 мм с помощью линзы с фокусным расстоянием 50 см требуется отверстие диаметром $D \approx 0,5$ мм. Поэтому можно считать, что $\varphi \approx \lambda/D$, поскольку φ очень мал. (Примечание редакции журнала.)

Поместим рядом с первым источником второй источник света так, чтобы свет от двух источников падал на отверстие под малым углом α (рис. 3). Его изображение также предстанет перед нами в виде дифракционной картины. Считается что, эти два изображения удаётся ещё различить, если середина изображения одного приходится на первое темное кольцо, образованное изображением другого источника. Это критерий разрешения Рэля.

Источники, расположенные ближе друг к другу, будут восприниматься как один. На рисунке 3 пунктиром показано, как распределяется освещённость дифракционных картин от двух источников в предельном случае – когда они ещё различимы. Сплошной линией изображена суммарная освещённость. В этом случае $\alpha = \varphi \approx \lambda/D$. (Примечание редакции журнала.) Для изображённых кривых провал составляет $\approx 20\%$. Таким образом, волновая природа света и связанное с ней явление дифракции ограничивают разрешающую способность оптических приборов и, в том числе, глаза.

В этом легко убедиться, проделав следующий опыт. Наш глаз представляет собой

своеобразный фотоаппарат, где роль фотопластины играет мозаично построенная сетчатка. Глазную линзу (хрусталик), фокусное расстояние которой $F \approx 23$ мм, ограничивает диафрагма (зрачок), диаметр которой при дневном освещении $D \approx 3$ мм. Длина волны дневного света в среднем равна $\lambda = 0,6 \text{ мкм} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$.

$$\text{Тогда } \varphi = \frac{\lambda}{D} = \frac{6 \cdot 10^{-4} \text{ мм}}{3 \text{ мм}} =$$

$= 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \approx 70'' \approx 1'$. Это значит, что наш глаз способен различать две близкие точки на бумаге, если они видны под углом $\approx 1'$ (одна угловая минута), что совпадает с биологическим разрешением глаза.

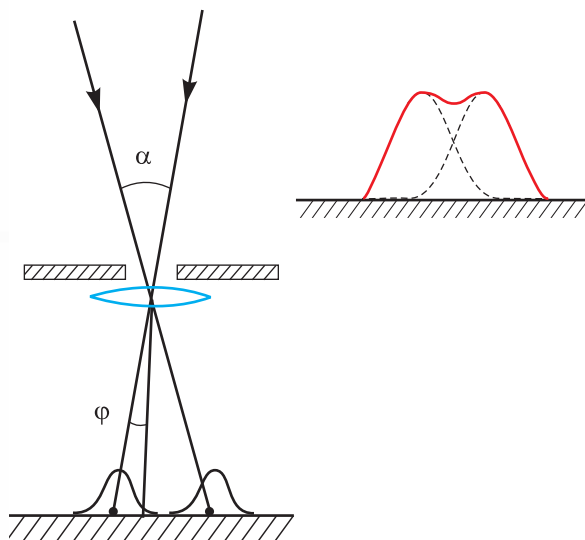


Рис. 3. Условие разрешения дифракционных максимумов



Приведённый расчёт можно проверить экспериментально. Нанесите на белый лист бумаги две точки на расстоянии 2 мм друг от друга. Отойдите от листа и замерьте расстояние, с которого Вы перестаете их различать по отдельности. Поделив 2 мм на это расстояние, Вы получите угол, под которым видны эти точки, он будет определён в радианах $\left(1 \text{ рад} = \frac{180^\circ}{\pi}\right)$.



Остановимся ещё на двух примерах. О зоркости хищных птиц ходят легенды. Попробуем узнать на основании дифракционных явлений, как видит орёл, летящий на высоте 1 км. Разглядит ли он мышонка размером 4 см или только сможет обнаружить его присутствие, увидев движущуюся точку?

Предположим, что диаметр зрачка орла равен 10 мм. Минимальный угол, под которым орёл может видеть в отдельности две точки предмета, равен $\varphi = \frac{\lambda}{D} = \frac{6 \cdot 10^{-4} \text{ мм}}{10 \text{ мм}} = 6 \cdot 10^{-5}$

рад. Мышонок виден под углом $\varphi = \frac{4 \text{ см}}{1 \text{ км}} = \frac{40 \text{ мм}}{10^6 \text{ мм}} = 4 \cdot 10^{-5}$ рад. Этот угол несколько мень-

ше, чем тот, при котором дифракция разрешает орлу воспринимать мышонка, как протяжённый объект. Орёл увидит его как одну точку и сможет обнаружить, что здесь кто-то есть (если мышонок движется).

Теперь о зоркости инспектора дорожной полиции. Оцените, на каком наибольшем расстоянии L инспектор может отличить ночью приближающуюся к нему автомашину с включёнными фарами (расстояние между фарами 1 метр) от мотоцикла с включённой одной фарой?

Как было отмечено, глаз человека различает две точки, когда они видны под углом $\varphi \approx 1' \approx 29 \cdot 10^{-5}$ рад. Фары автомашины наблюдаются под углом $\varphi' = \frac{1 \text{ м}}{L}$, где L – искомое расстояние.

Тогда $\varphi' = \frac{1 \text{ м}}{L} \approx \varphi \approx 1' \approx 29 \cdot 10^{-5}$ рад. Откуда $L \approx \frac{1 \text{ м}}{29 \cdot 10^{-5} \text{ рад}} \approx 3,5 \text{ км}$.

Итак, инспектор сможет отличить ночью автомашину от мотоцикла с расстояния не более 3,5 км.