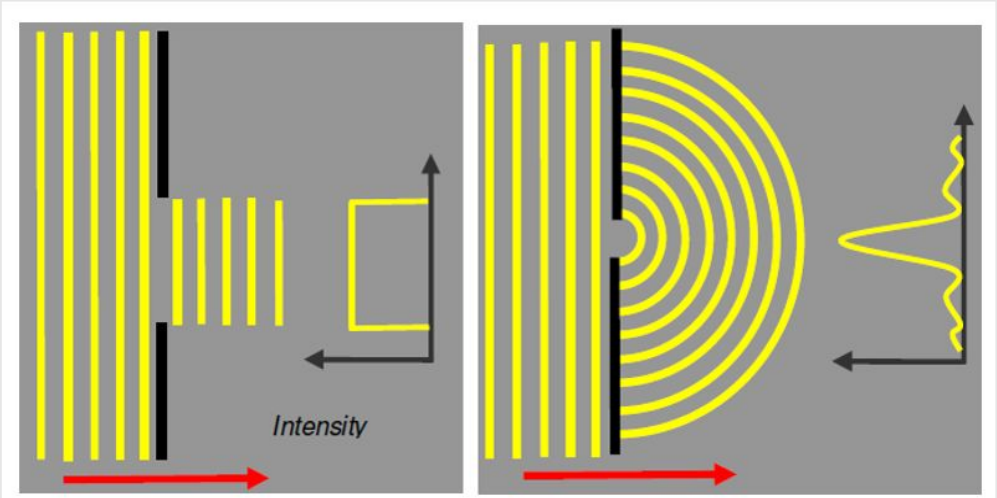
Лекция 3. Дифракция
Дифракция Френеля

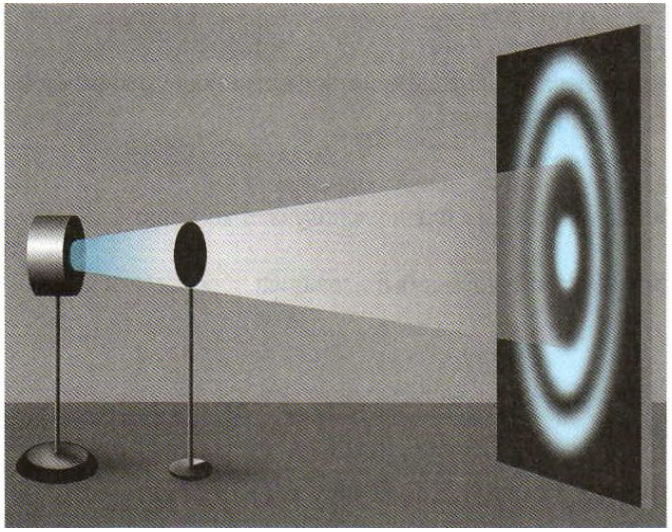


Дифракция – отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики

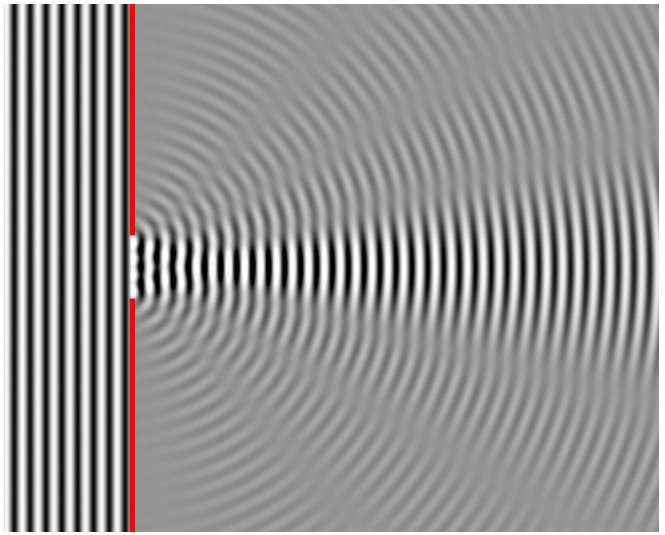
Дифракция — отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики.

Дифракция сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями среды.

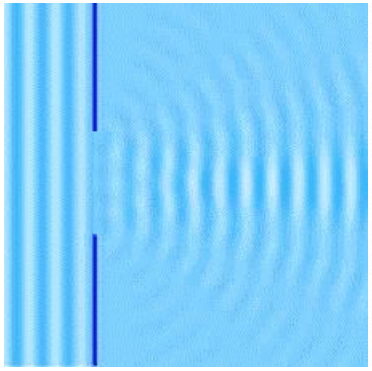
Это явление свойственно всем волновым процессам. Дифракция проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибании волнами препятствий, например в проникновении света в область геометрической тени. Пространственное распределение интенсивности света за неоднородностью среды (например, в плоскости экрана) характеризует дифракционную картину. Внешне дифракционная картина напоминает интерференционную. И это не случайно.

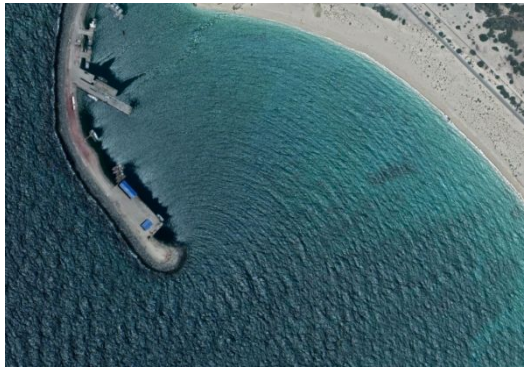


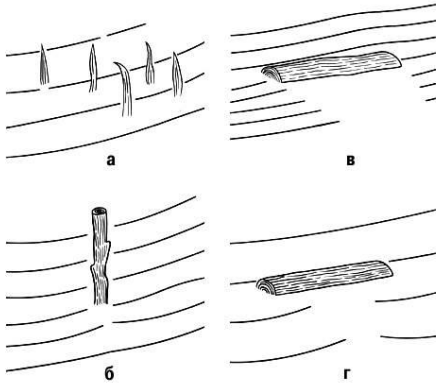
Поскольку длина волны света очень мала по сравнению с размерами большинства предметов, использующихся в «обычной» жизни, то волновые свойства света во многих экспериментах не проявляются (или проявляются слабо). В этом случае о свете можно говорить как о совокупности лучей, распространяющихся в однородной среде прямолинейно. Такое рассмотрение света принято называть геометрической оптикой.



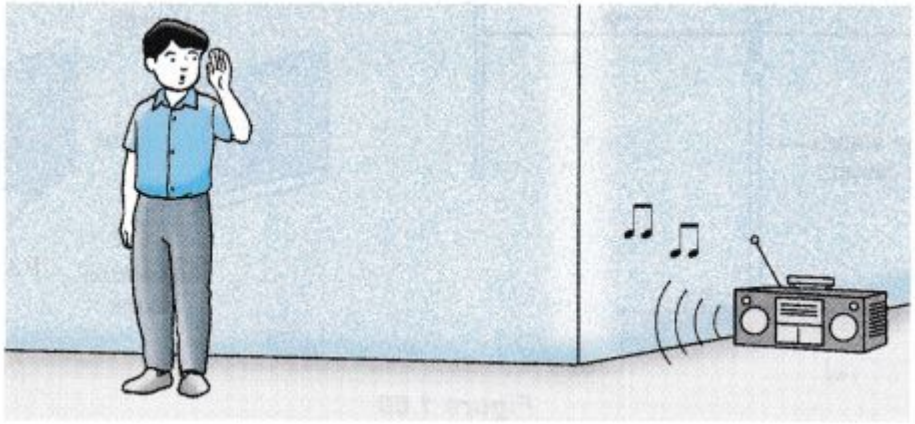
Дифракция волн различной природы



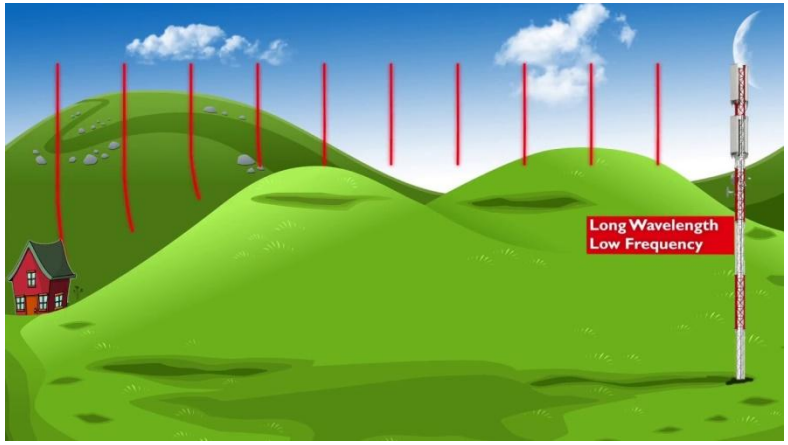




Дифракция волн на воде. От размера препятствия зависит характер дифракции

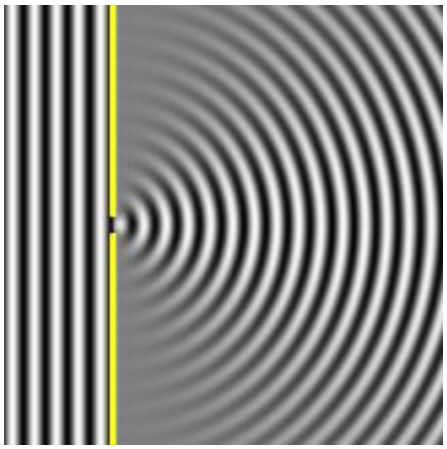


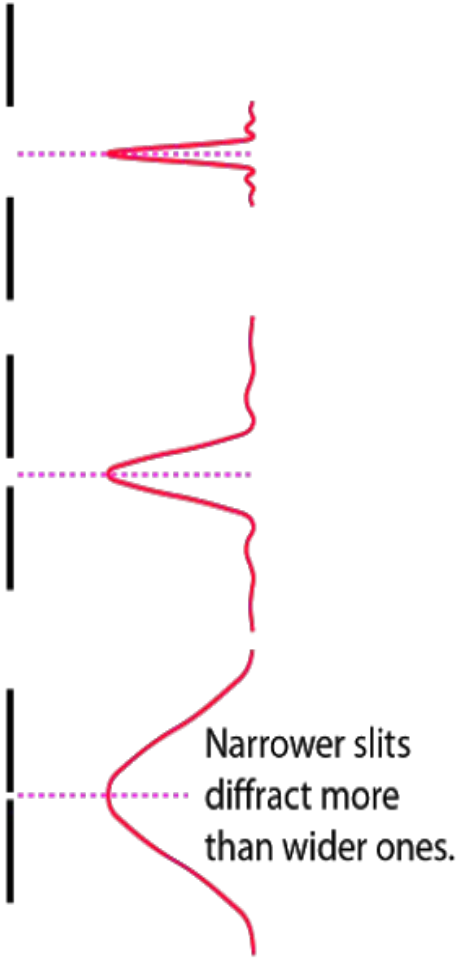
Дифракция звука

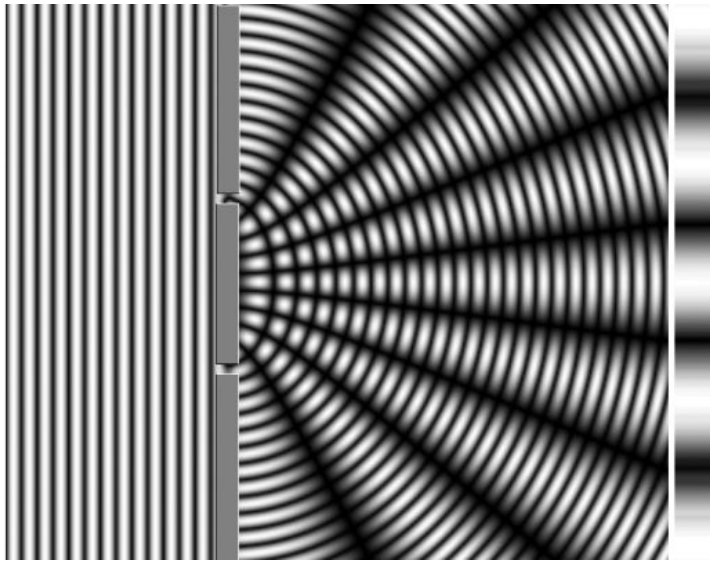


Дифракция радиоволн. Благодаря дифракции мы можем пользоваться телефоном за пределами прямой видимости вышки

Дифракция на щели
и опыт Юнга-интерференция на 2 щелях







Принцип Гюйгенса-Френеля

7.1. Принцип Гюйгенса—Френеля

Для объяснения большинства дифракционных картин достаточно, не прибегая к интегральным преобразованиям волнового уравнения, применить *принцип Гюйгенса—Френеля*.

Согласно построениям Гюйгенса, каждую точку волнового фронта можно считать центром *вторичного возмущения*, которое вызывает элементарные сферические волны, а волновой фронт в любой более поздний момент времени является огибающей этих волн (рис. 7.1). Френель дополнил этот принцип положениями о *когерентности* вторичных источников и *интерференции* испускаемых ими вторичных волн.

С помощью принципа Гюйгенса удается легко пояснить, например, преломление света на границе раздела двух сред с $n_1 < n_2$ (рис. 7.2). За время, пока световое

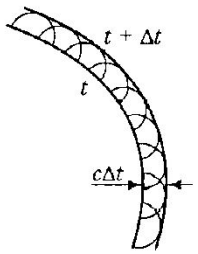


Рис. 7.1. Вторичные волны и перемещение волнового фронта

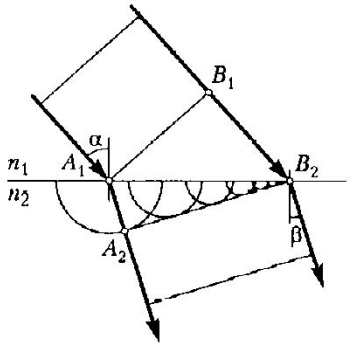
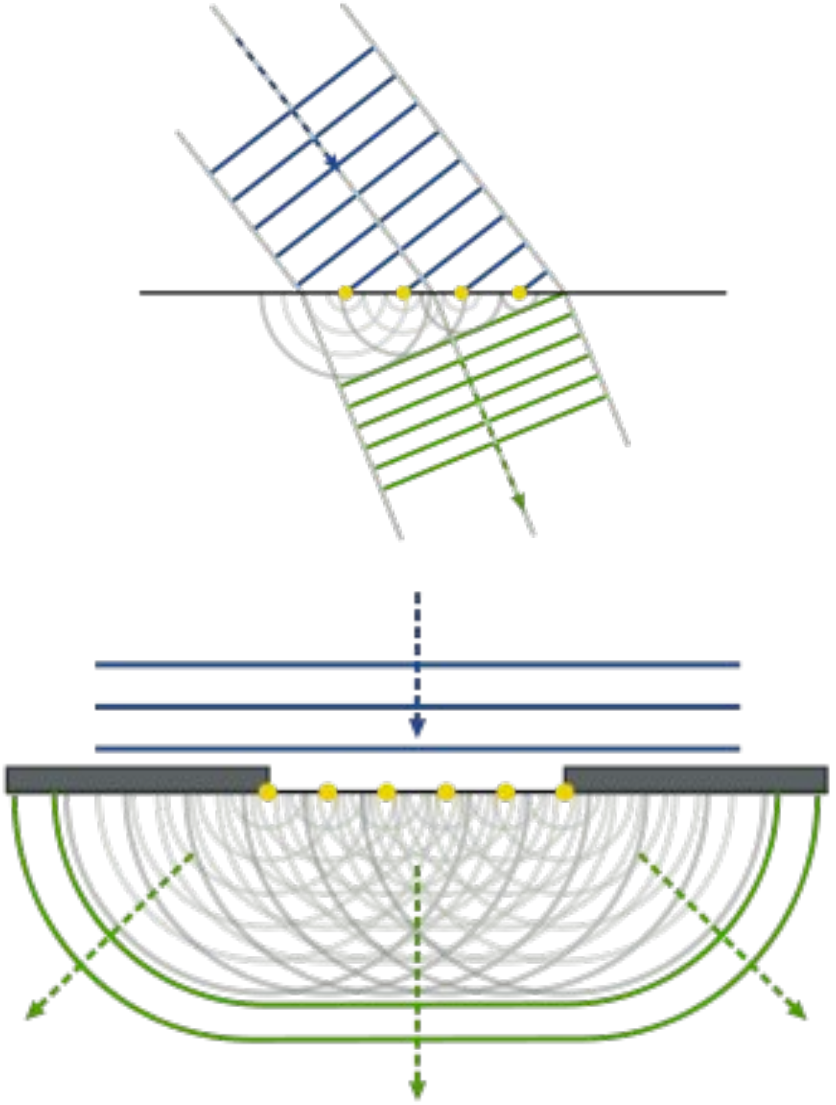


Рис. 7.2. Принцип Гюйгенса и преломление света

возмущение в первой среде проходит путь B_1B_2, вторичные волны во второй среде успевают пройти меньшее расстояние A_1A_2, так как скорость света во второй среде меньше. Световые лучи перпендикулярны волновым фронтам. Поскольку

стафеев



Фронтом волны точечного источника в однородном изотропном пространстве является сфера.
Амплитуда возмущения во всех точках сферического фронта волны, распространяющейся от точечного источника, одинакова.

Дифракция на границах непрозрачного экрана

Принцип Гюйгенса позволяет также продемонстрировать такое чисто дифракционное явление, как проникновение световых лучей в область геометрической тени у границ непрозрачного экрана P (рис. 7.3).

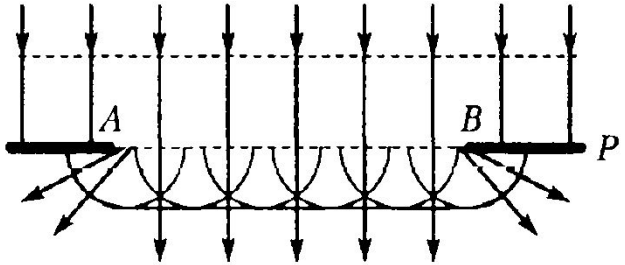


Рис. 7.3. Проникновение световых лучей в область геометрической тени

Ограничение бесконечного плоского фронта исходной волны отверстием AB приводит к искривлению огибающей вторичных волн, а следовательно, к отклонению от прямолинейного распространения света.

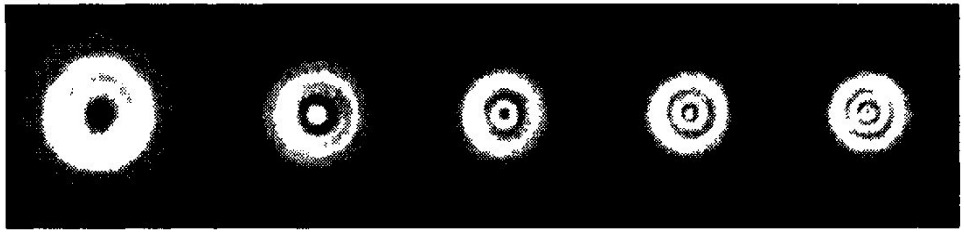
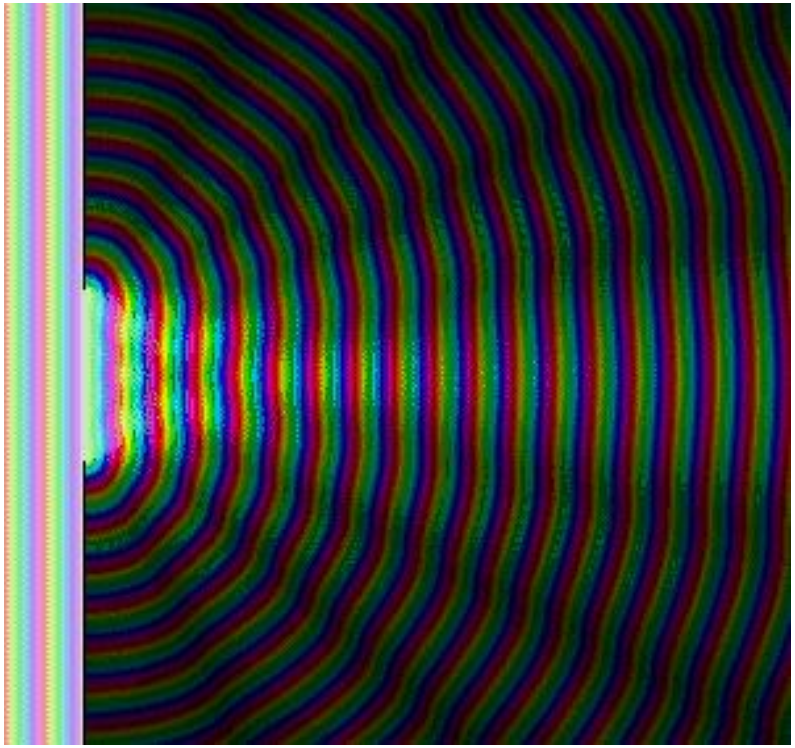
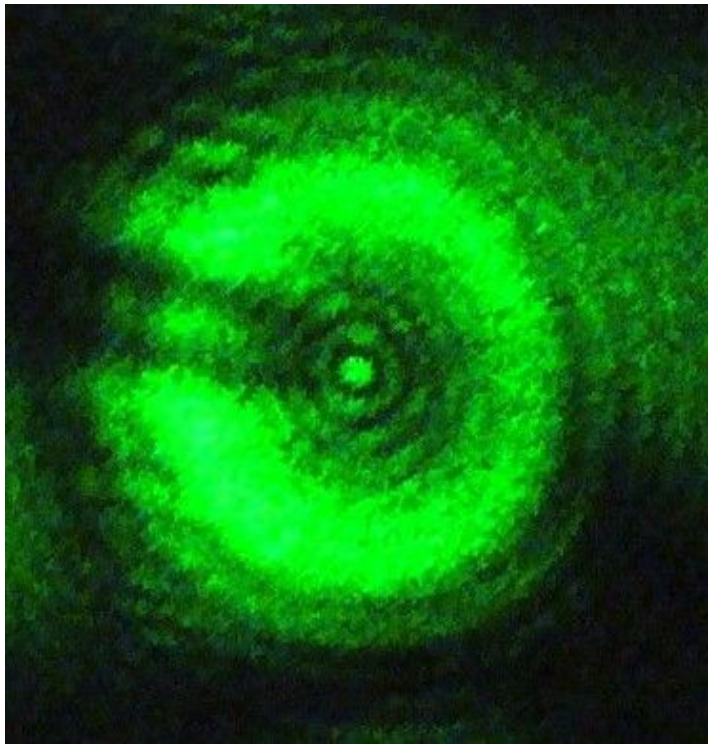


Рис. 7.6. Дифракционные картины от круглого отверстия при освещении лазерным излучением

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

Дифракция Френеля





Дифракция на щели, на круглом отверстии

Зоны Френеля (полуволновые зоны)

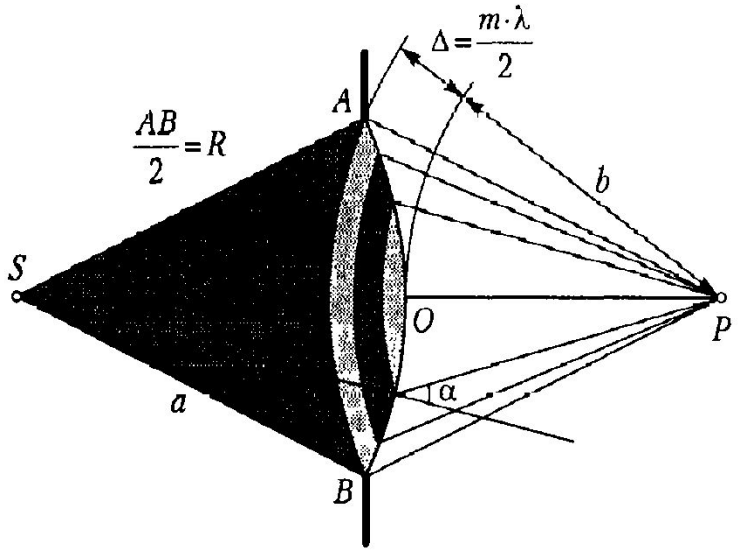
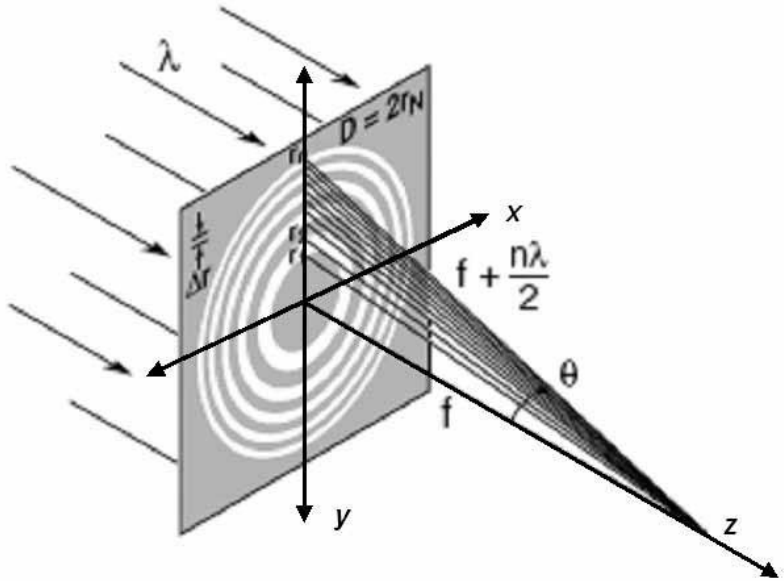


Рис. 7.4. Зоны Френеля



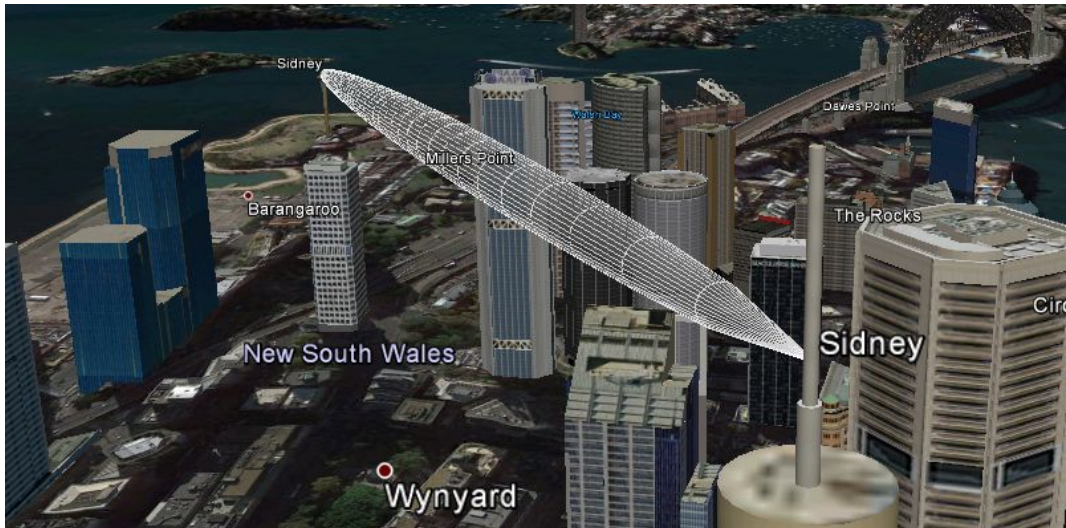
Зоны Френеля - участки, на которые можно разбить поверхность световой (или звуковой) волны для вычисления результатов дифракции света(или звука). Впервые этот метод применил О. Френель в 1815. Суть метода такова:
Пусть от светящейся точки Q распространяется сферическая волна и требуется определить характеристики волнового процесса, вызванного ею в точке *P.*
Разделим поверхность волны S на кольцевые зоны; для этого проведём из точки *P* сферы радиусами *PO, Pa = PO +* $\lambda/2$; *Pb = Pa +* $\lambda/2$, *Pc = Pb +* $\lambda/2$, (O — точка пересечения поверхности волны с линией PQ; λ — длина световой волны). Кольцеобразные участки поверхности волны, «вырезаемые» из неё этими сферами, и называется З. Ф.
Волновой процесс в точке *P* можно рассматривать как результат сложения колебаний, вызываемых в этой точке каждой З. Ф. в отдельности.
Амплитуда таких колебаний медленно убывает с возрастанием номера зоны (отсчитываемого от точки O), а фазы колебаний, вызываемых в *P* смежными зонами, противоположны.

Учет зон Френеля при распространении радиоволн

В радиофизике:
Зона Френеля - это цилиндрический эллипс, проведенный между передатчиком и приемником. Размер эллипса определяется частотой работы и расстоянием между двумя участками.
Когда радиосигнал проходит между передатчиком и приемником, он может распространяться несколькими путями.

Радиоволна в процессе распространения в пространстве формирует эллипсоид вращения, в фокусах которого находятся передатчик и приемник. Этот эллипсоид вокруг прямой линии (LoS/Line of Sight), и называется Зоной Френеля. Не менее 60% зоны Френеля должно оставаться чистой от каких-либо препятствий, т.к. иначе начинаются существенные потери сигнала в канале.

Generate 3D fresnel zone as Google Earth.
http://www.radiofresnel.com/

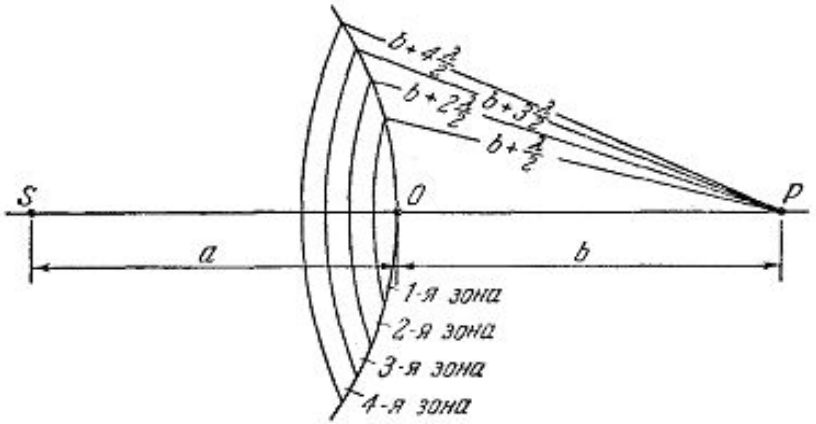


§ 22. Зоны Френеля

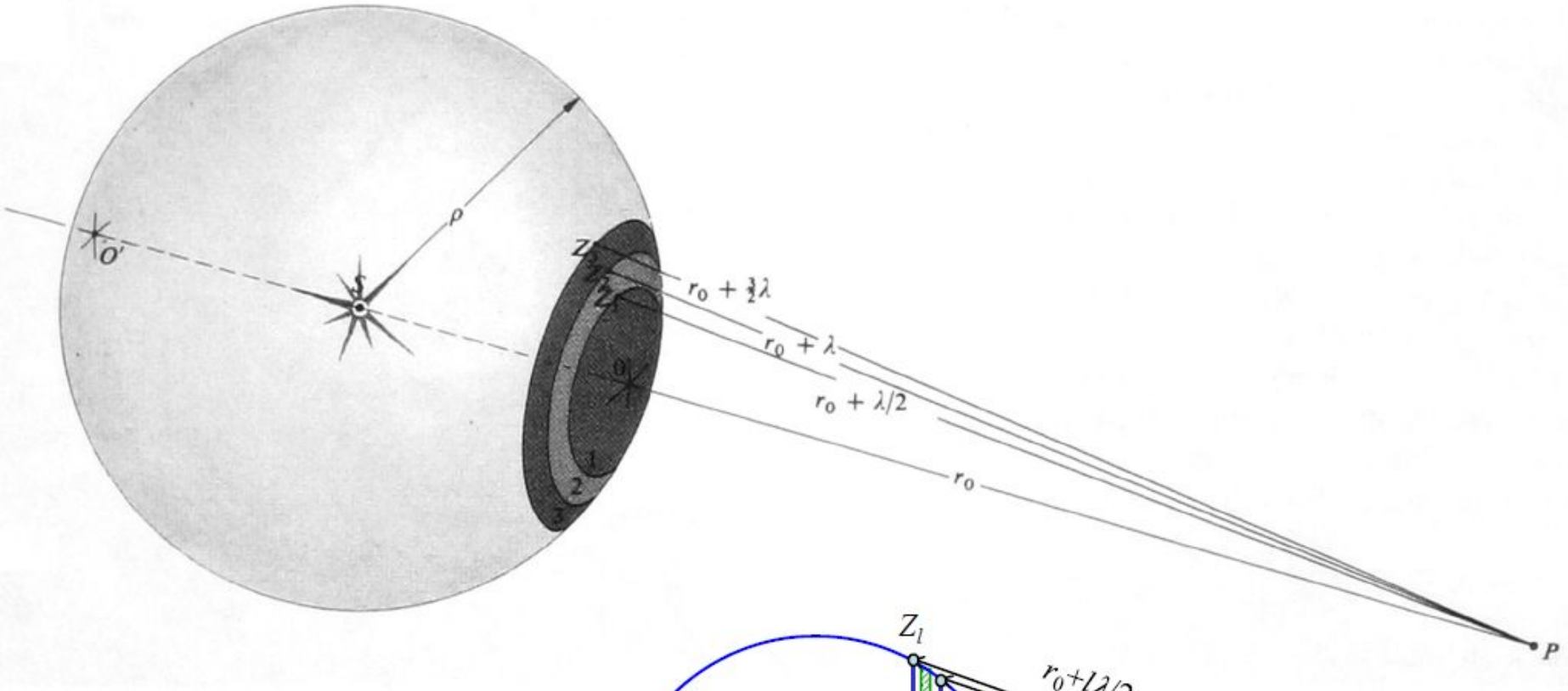
Применим принцип Гюйгенса — Френеля для нахождения амплитуды светового колебания, возбуждаемого в точке P сферической волной, распространяющейся в однородной среде из точечного источника S (рис. 60). Волновая поверхность такой волны симметрична относительно прямой SP. Воспользовавшись этим, Френель разбил волновую поверхность на кольцевые зоны, построенные так, что расстояния от краев каждой зоны до точки P отличаются на $\lambda/2$ (λ — длина волны в той среде, в которой распространяется волна). Легко видеть, что расстояние b_m от внешнего края m-й зоны до точки P можно представить следующим образом:

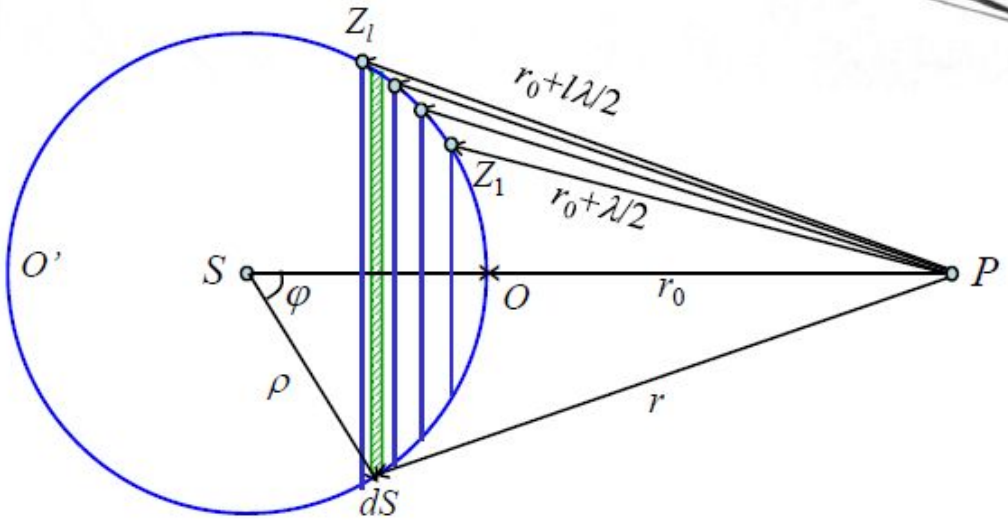
$$b_m = b + m\frac{\lambda}{2}, \qquad (22.1)$$

где b — расстояние от вершины волновой поверхности O до точки P.



Simple spherical wave: Fresnel half-period zones





Векторная диаграмма сложения волн

Выражаясь математически, нам необходимо сложить две волны: $R = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$. Как это сделать?

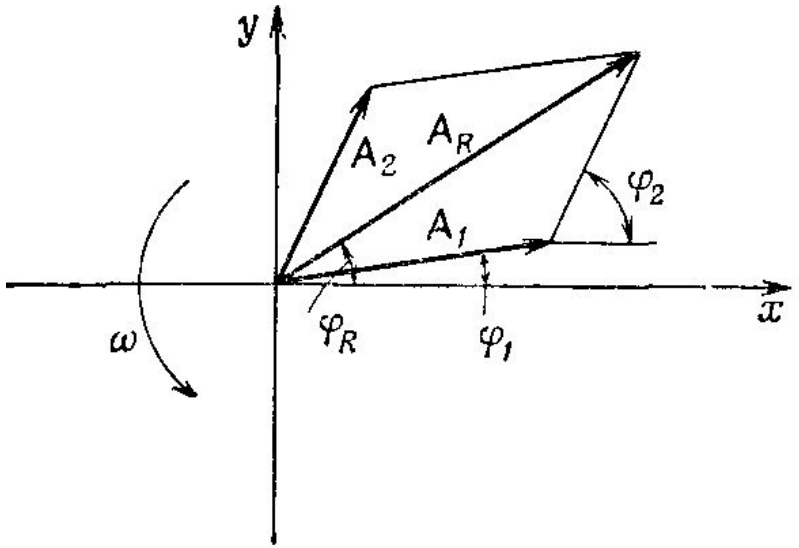
$$R = A\,[\cos(\omega t + \varphi_1) + \cos(\omega t + \varphi_2)]. \qquad (29.9)$$

На уроках тригонометрии вы, вероятно, доказывали равенство

$$\cos A + \cos B = 2\cos\frac{1}{2}(A + B)\cos\frac{1}{2}(A - B). \qquad (29.10)$$

Если это нам известно, то мы немедленно получаем R:

$$R = 2A\cos\frac{1}{2}(\varphi_1 - \varphi_2)\cos\left(\omega t + \frac{1}{2}\varphi_1 + \frac{1}{2}\varphi_2\right). \qquad (29.11)$$



Фиг. 29.9. Геометрический способ сложения двух косинусоидальных волн.

Чертеж вращается со скоростью ω *против часовой стрелки.*

Сложение амплитуд большого числа колебаний с разными фазами

Рис. 62.

Теперь решим задачу о распространении света от источника S к точке P методом графического сложения амплитуд. Разобьем волновую поверхность на равные по площади кольцевые зоны, аналогичные зонам Френеля, но гораздо меньшие по ширине. Колебание, создаваемое в точке P каждой такой зоной, можно изобразить в виде вектора, длина которого равна амплитуде колебания, а угол, образуемый вектором с направлением, принятым за начало отсчета, дает начальную фазу колебания

Каждая синусоида представлена вектором, цепочка которых при суммировании способом ломаной оказывается вписана в окружность, а в непрерывном пределе (к которому здесь необходимо перейти) — представляет собой дугу окружности. Вектор суммы — замыкающий ломаную — есть тогда хорда этой дуги, и его длина рассчитывается из элементарных геометрических соображений.

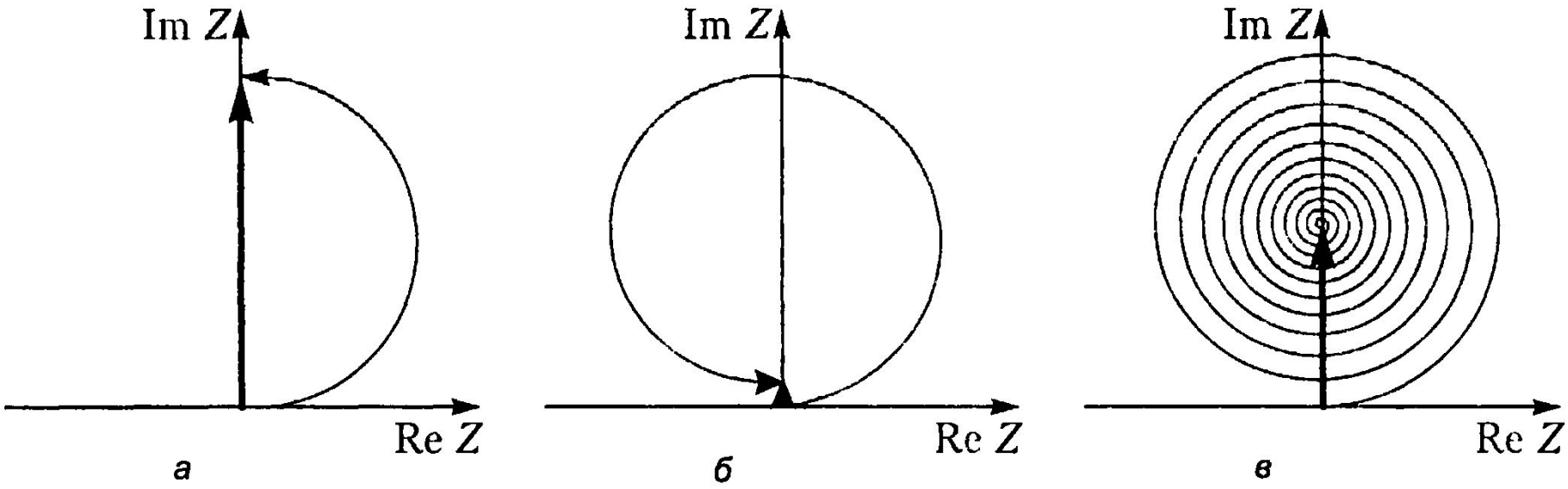
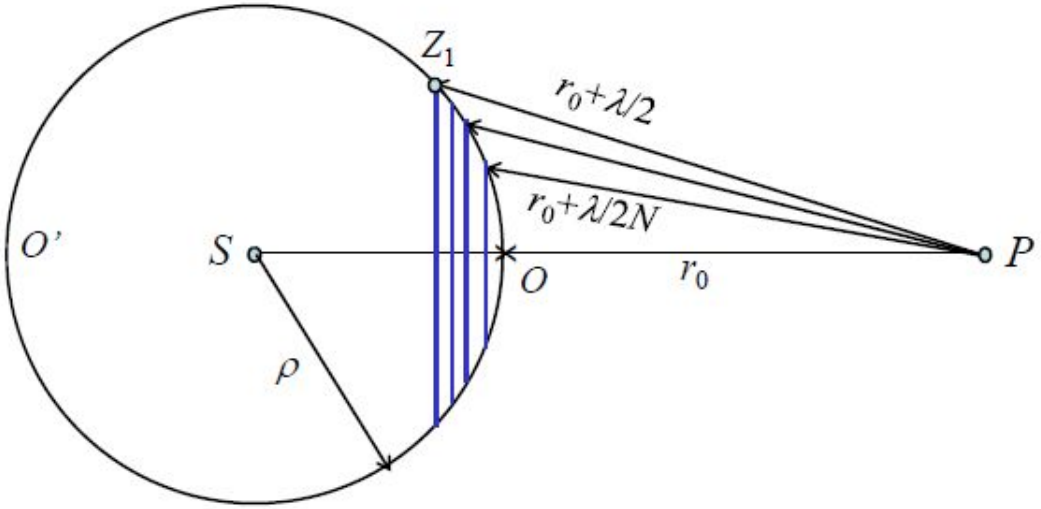


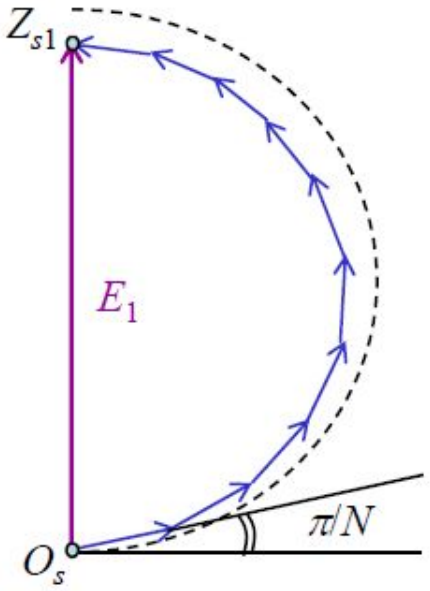
Рис. 7.5. Векторные диаграммы для круглого отверстия, открывающего одну зону (*а*), две зоны (*б*) и весь волновой фронт (*в*)

The vibration curve (phasor representation)

Graphic method for qualitatively analyzing diffraction problems with circular symmetry.



The first zone

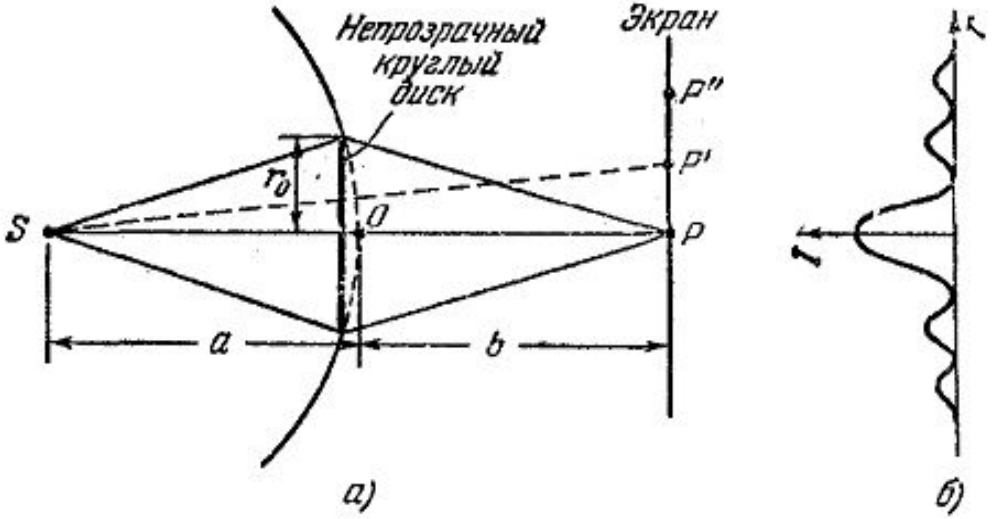


For the first zone:

- Divide the zone into N subzones.
- Each subzone has a phase shift of π/N.
- The phasor chain deviates from a circle due to the inclination factor.
- When $N \rightarrow \infty$, the phasor train composes a smooth spiral called a *vibration curve*.

Дифракция на круглом диске. Пятно Пуассона

Дифракция от круглого диска. Поместим между точечным источником света S и точкой наблюдения P непрозрачный круглый диск радиуса r_0 (рис. 69, *а*) так,



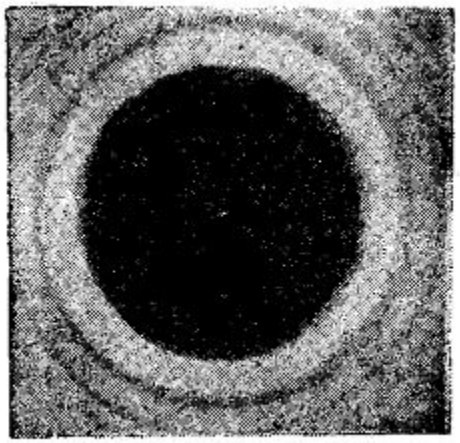
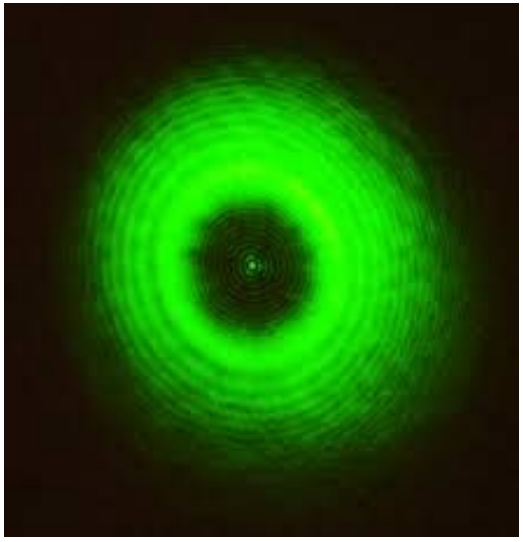
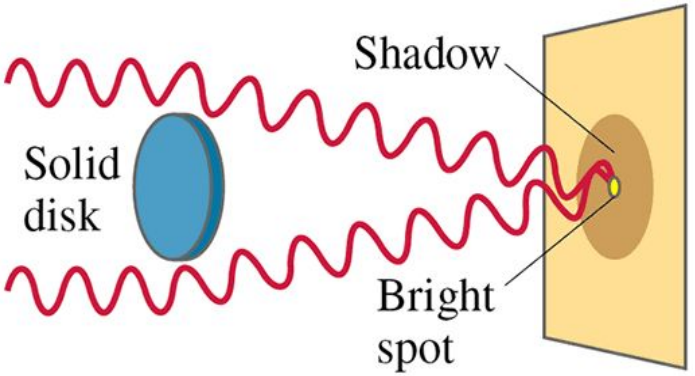


Рис. 70.





Зонная пластинка

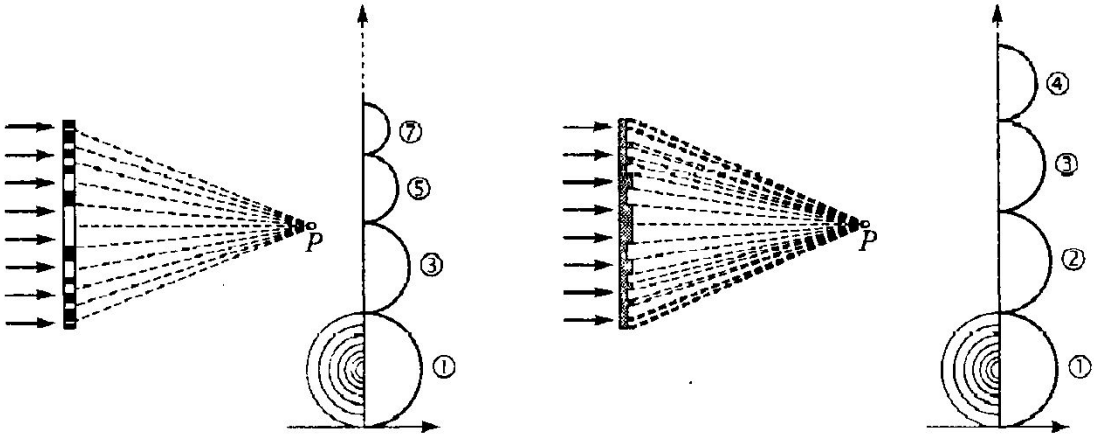
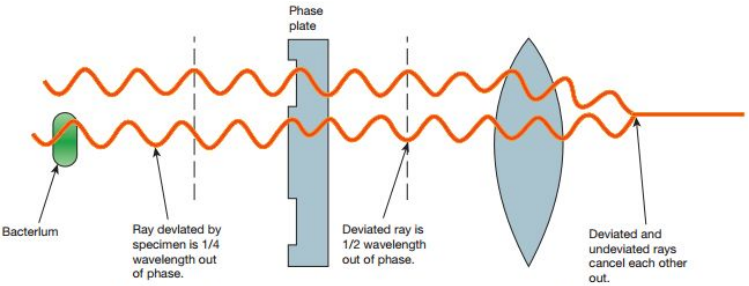
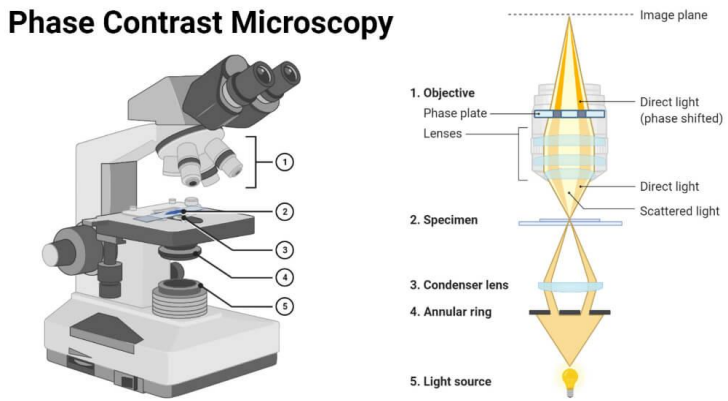
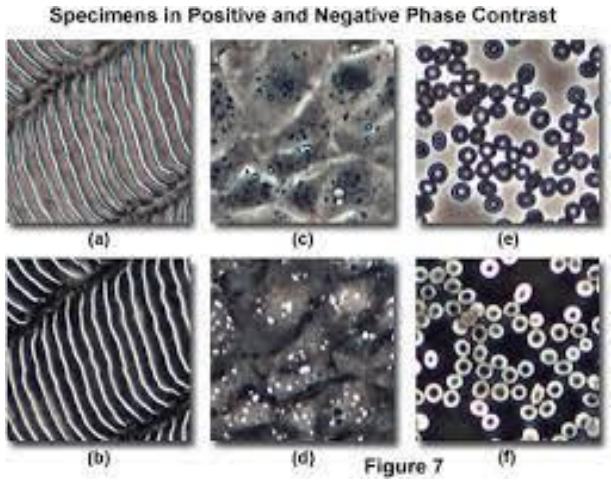


Рис. 7.12. Амплитудная (*а*) и фазовая (*б*) зонные пластинки

Зонная пластинка — плоскопараллельная стеклянная пластинка с выгравированными концентрическими окружностями, радиус которых совпадает с радиусами зон Френеля. Зонная пластинка «выключает» чётные либо нечётные зоны Френеля, чем исключает взаимную интерференцию (погашение) от соседних зон, что приводит к увеличению освещённости точки наблюдения. Таким образом, зонная пластинка действует как собирающая линза

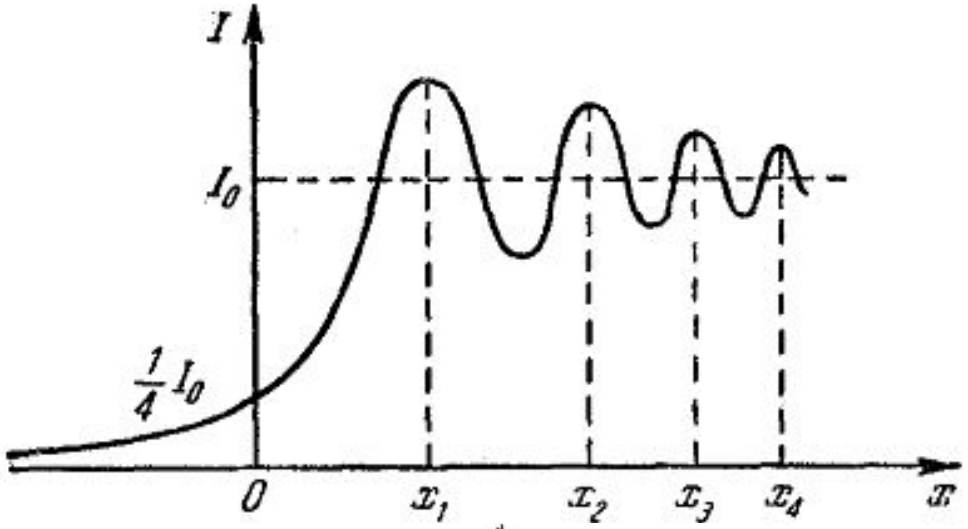


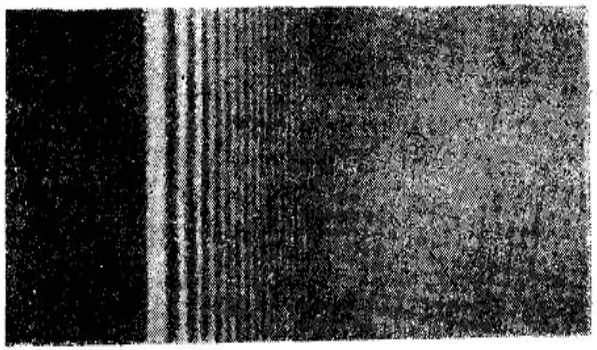


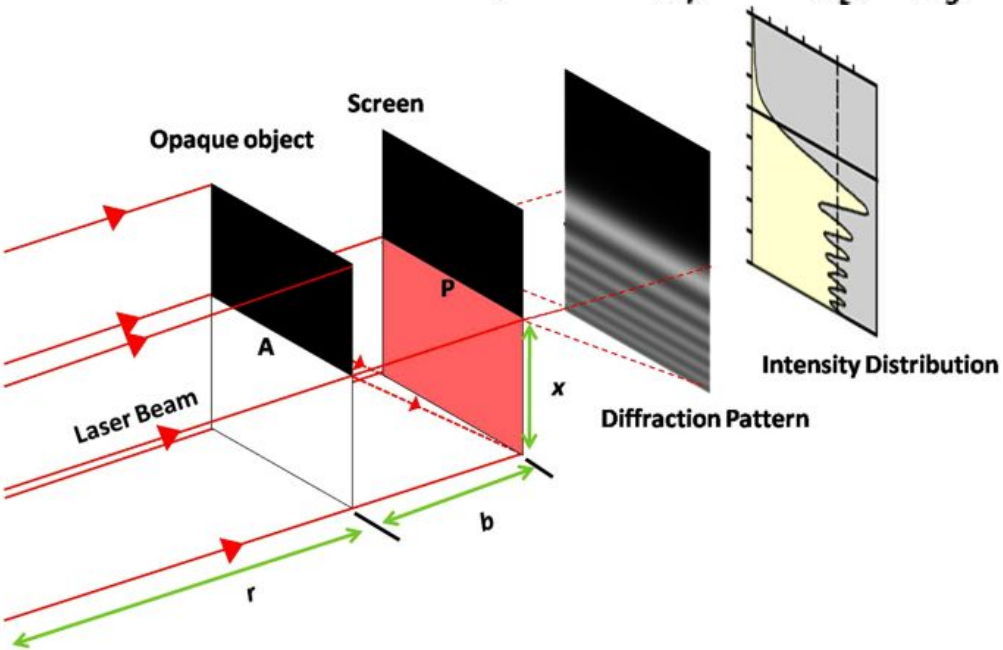


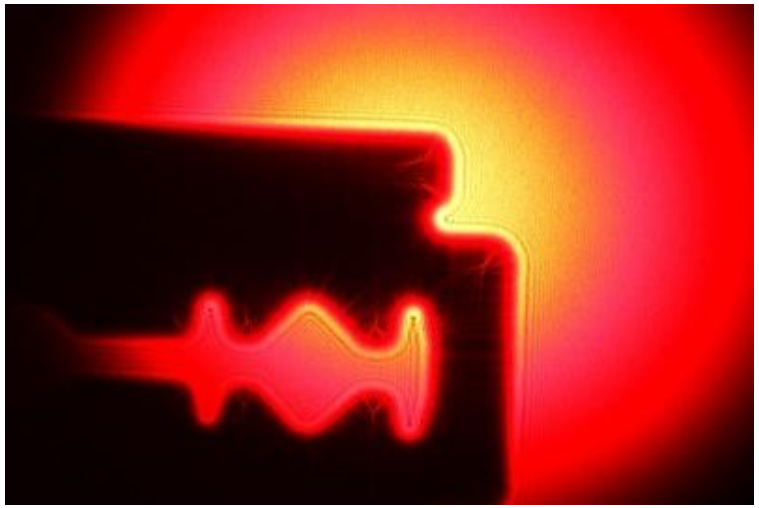
Дифракция от прямолинейного края полуплоскости.

: Фотография дифракционной картины при дифракции Френеля на прямолинейном крае экрана.





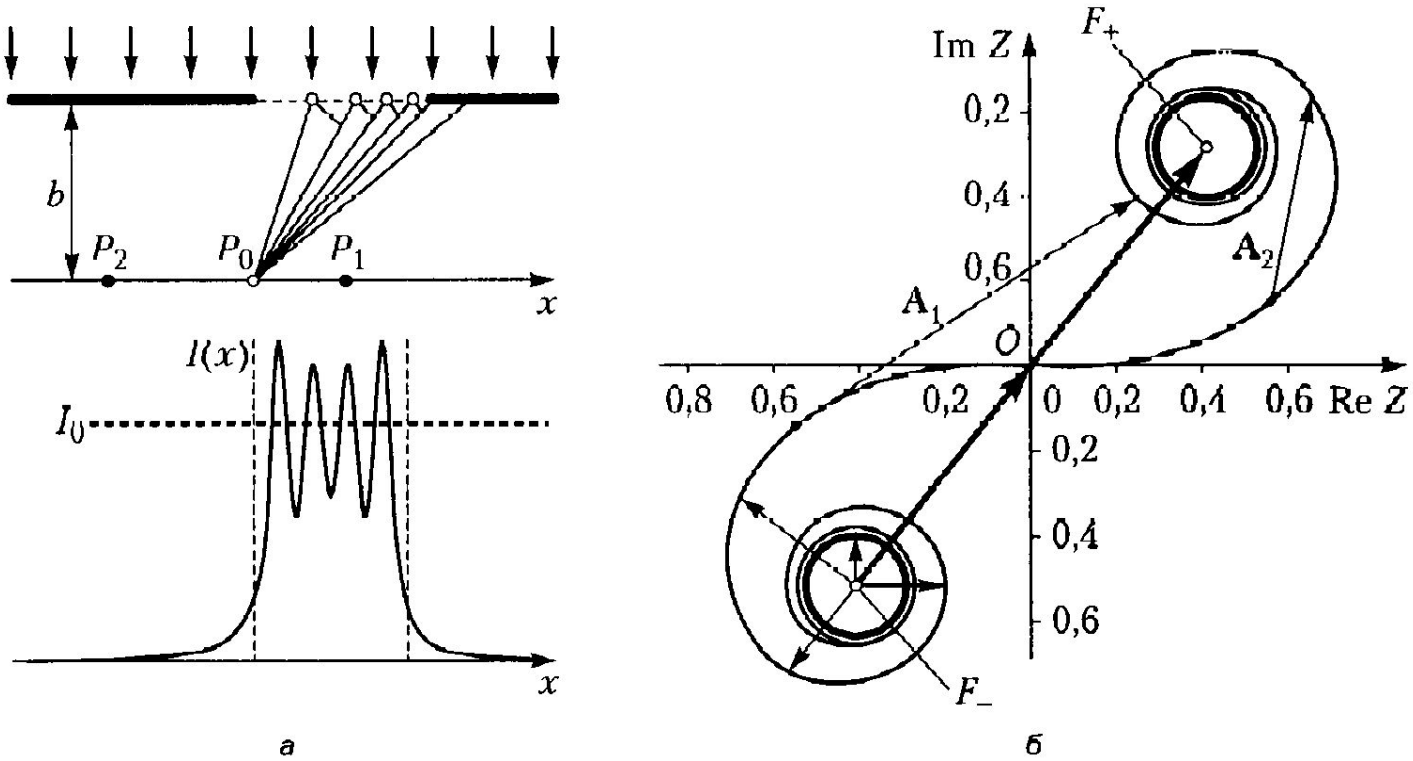




Edge diffraction

Дифракция Френеля на бесконечной щели

Задача о дифракции Френеля на щели сводится к предыдущей (дифракции на двух резких краях) с учетом конечного числа m открытых полуволновых зон Шустера.



а б

Рис. 7.15. Зоны Шустера (*а*) и спираль Корню (*б*) для дифракции на бесконечной щели

7.5. Границы дифракционных приближений

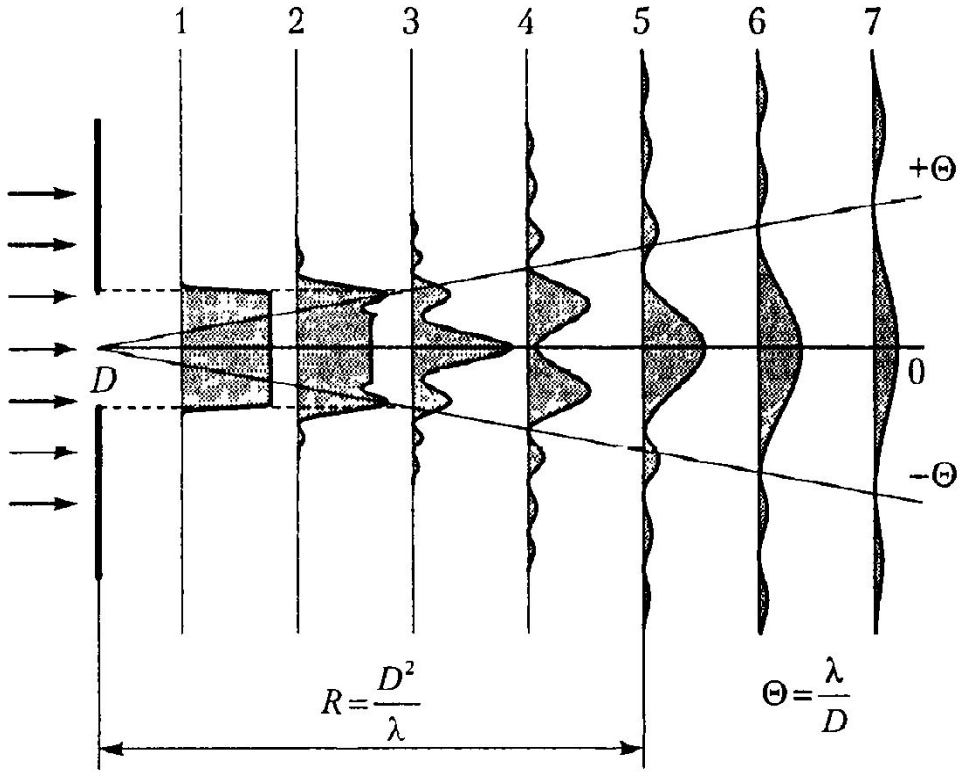


Рис. 7.19. Дифракционные распределения на различных расстояниях от отверстия

Дифракция в дальней зоне
(это уже дифракция не Френеля, а Фраунгофера)

Особенности дифракции в дальней зоне

Если отверстие в экране освещается плоской монохроматической волной, а точка наблюдения P находится так далеко от экрана, что дуга окружности с центром в точке P может быть заменена отрезком прямой, то оптическая разность хода Δ и фазовый сдвиг δ линейно зависят от координаты волнового фронта в пределах размера отверстия b (рис. 8.1).

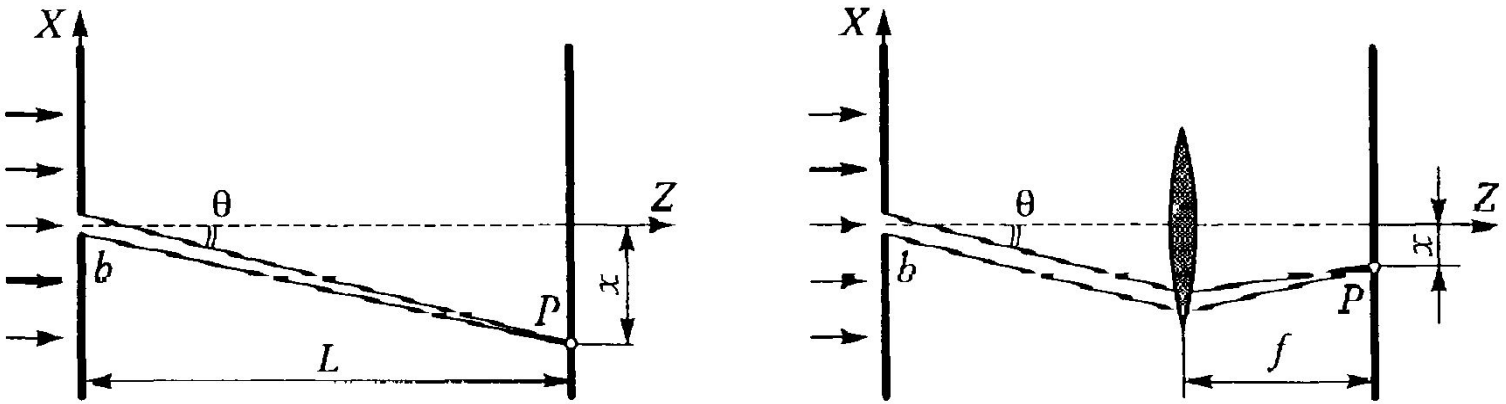
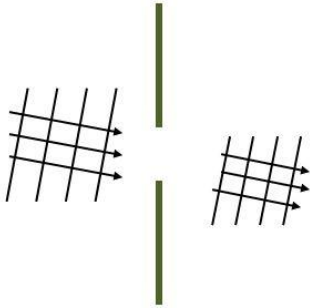
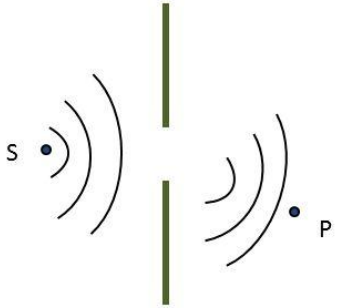


Рис. 8.1. Наблюдение дифракции Фраунгофера

Fresnel *vs.* Fraunhofer diffraction

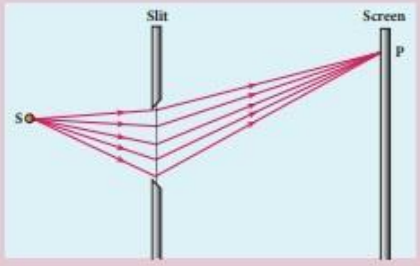
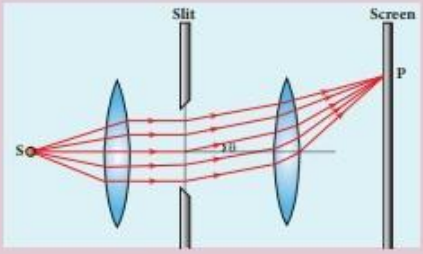


Fraunhofer:
both incident and diffracted waves may be considered to be planar (i.e. both S and P are far from the aperture)



Fresnel:
occurs when either S or P are close enough to the aperture that wavefront curvature is not negligible

Table 6.4 Difference between Fresnel and Fraunhofer diffractions

S.No.	Fresnel diffraction	Fraunhofer diffraction
1	Spherical or cylindrical wavefront undergoes diffraction	Plane wavefront undergoes diffraction
2	Light wave is from a source at finite distance	Light wave is from a source at infinity
3	For laboratory conditions, convex lenses need not be used	In laboratory conditions, convex lenses are to be used
4	Difficult to observe and analyse	Easy to observe and analyse
5		

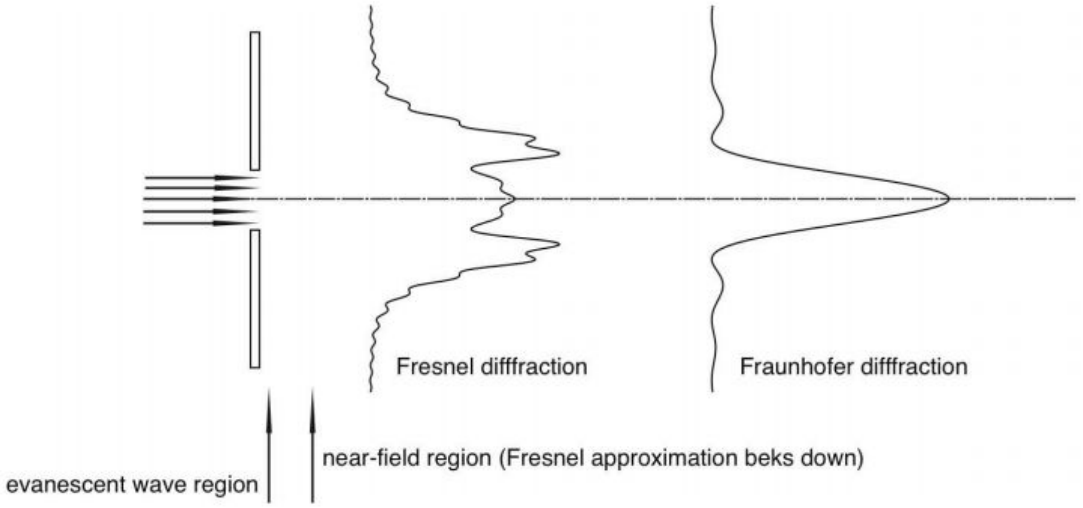
Дифракция Фраунгофера — случай дифракции, при которой дифракционная картина наблюдается на значительном расстоянии от отверстия или преграды.

Дифракционные явления Фраунгофера имеют большое практическое значение, лежат в основе принципа действия многих спектральных приборов, в частности,

Дифракция Френеля и Фраунгофера

При $m < 1$ перекрывается малая часть первой зоны и возникает практически важный случай *дифракции Фраунгофера* или *дифракции в дальней зоне* (плоскости 6 и 7). Условной границей между двумя видами дифракции считают *дистанцию Рэлея* R, соответствующую расстоянию, на котором круглое отверстие диаметра D, освещенное плоской монохроматической волной, открывает для центральной точки наблюдения одну первую зону, то есть

$$R = \frac{D^2}{\lambda}.$$



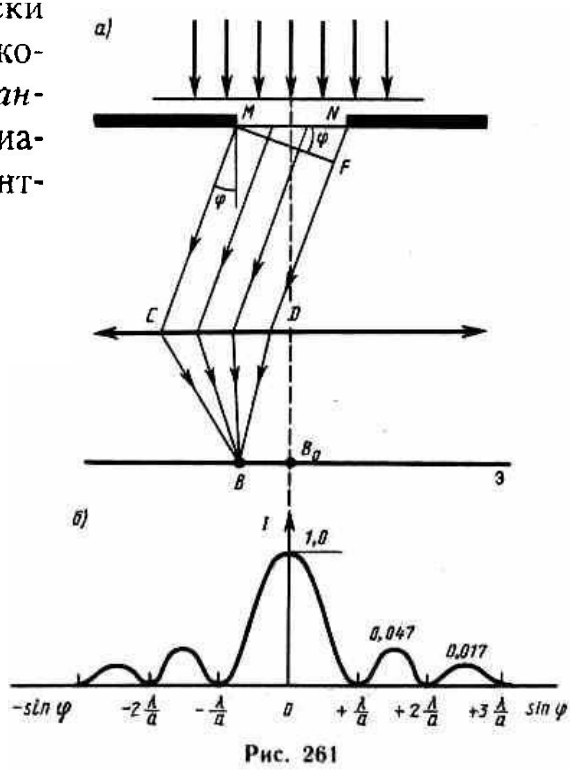


Рис. 261

Дифракция Фраунгофера – дифракция в параллельных лучах

Проведем численные оценки: при $\lambda = 0{,}5$ мкм для отверстия диаметром 1 мм $R = 2$ м; для $D = 10$ мкм дистанция Рэлея составляет всего 0,2 мм. С другой стороны, для отверстия диаметром 5 см даже на расстоянии 5 м число открытых полуволновых зон составляет $m = 1000$, а дистанция Рэлея отодвигается на 5 км! Таким образом, область, где работает приближение геометрической оптики, для отверстия размером в десятки микрон будет сжата до миллиметров, а для сантиметровых отверстий может составлять и сотни метров.

Рассмотренные вопросы:

1. Принцип Гюйгенса и объяснение дифракции
2. Дифракция радиоволн
3. Дифракция на щели
4. Дифракция на круглом отверстии
5. Пятно Пуассона
6. Дифракция на краю
7. Зоны Френеля (полуволновые зоны)
8. Фазор. Расчет дифракционной картины
9. Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера