

висимых лазеров с помощью надлежащих приемников света (например, тех же фотоэлементов) стало сравнительно легко осуществимой экспериментальной работой.

## § 27. Классические интерференционные опыты

1. Опыт Юнга. Юнг получал полосы интерференции по способу, описанному им в публичных лекциях 1807 г. Яркий пучок света от Солнца падал на экран с малым отверстием или узкой щелью  $S$  (рис. 115). Дифрагированный свет шел ко второму экрану с двумя узкими отверстиями или щелями  $S_1$  и  $S_2$ . На этих щелях свет также претерпевал дифракцию, в результате чего получались два перекрывающихся расходящихся пучка света с вершинами в  $S_1$  и  $S_2$ . Ввиду общности происхождения эти пучки когерентны. На экране в месте перекрытия пучков наблюдались параллельные интерференционные полосы (см. предыдущий параграф, пункт 8). Расстояние между щелями  $S_1$  и  $S_2$  должно быть велико по сравнению с шириной каждой щели. Удобный способ получения нужных щелей был указан Рэлеем. Стеклопластинки покрываются тонким слоем серебра и тем самым становятся непрозрачными. На серебряном слое одной из пластинок лезвием бритвы проводится одна, а на другой две близко расположенные параллельные линии, которые и используются в качестве щелей.

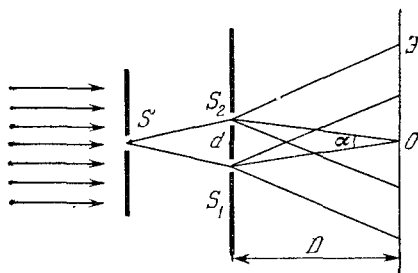


Рис. 115.

Оценим по формуле (26.13) ширину  $\Delta x$  интерференционной полосы. Допустим, что расстояние  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$  составляет 1 мм, а расстояние от щелей до экрана  $D = 1$  м. Тогда  $\alpha = d/D = 0,001$  рад. Для красного света ( $\lambda = 600$  нм) получаем  $\Delta x = \lambda/\alpha = 6 \cdot 10^5$  нм = 0,6 мм. В синем свете ширина полосы будет порядка 0,4 мм. Таким путем впервые Юнг измерил длины световых волн, хотя эти измерения и не могли быть точными. В опыте Юнга из-за дифракции свет распространяется от щелей  $S_1$  и  $S_2$  в различных направлениях неравномерно. Влияние этого осложняющего обстоятельства будет выяснено в главе IV.

Задолго до Юнга, в 1665 г., аналогичный опыт был поставлен Гримальди. Однако в опыте Гримальди свет от Солнца падал непосредственно на щели  $S_1$  и  $S_2$ . Дополнительной щели  $S$  не было. При такой постановке опыта интерференционные полосы получаться не могли, ввиду значительных угловых размеров Солнца (см. § 28, пункт 7).

При использовании лазеров, генерирующих практически параллельные пучки лучей, щель  $S$  в опыте Юнга не нужна.

2. Зеркала Френеля. В 1816 г. Френель осуществил следующий интерференционный опыт. Свет от узкой ярко освещенной щели  $S$  (рис. 116) падал на два плоских зеркала  $CD$  и  $CE$ , наклоненных друг к другу под углом, близким к  $180^\circ$ . Щель  $S$  устанавливалась параллельно линии  $C$  пересечения плоскостей зеркал. При отражении падающий пучок разделялся на два когерентных пучка, как бы исходивших от прямых  $S_1$  и  $S_2$ , являющихся мнимыми изображениями щели  $S$  в зеркалах. Прямой свет от источника  $S$  загораживался непрозрачной ширмой  $MN$ . На экран  $\mathcal{E}$

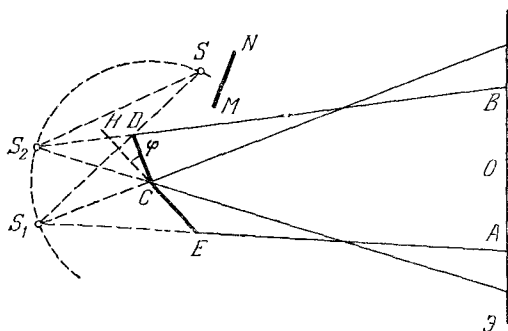


Рис. 116.

попадали только отраженные пучки. В области  $AB$ , где пучки перекрывались, наблюдались параллельные интерференционные полосы. Для расчета ширины интерференционной полосы  $\Delta x$  введем следующие обозначения:  $CO = a$ ,  $CS = b$ ,  $\angle HCD = \varphi$ . Так как точки  $S$ ,  $S_1$  и  $S_2$  лежат на одной окружности радиуса  $b$ , то, предполагая угол  $\varphi$  малым, можем написать  $d = S_1S_2 = 2b\varphi$ . Угол  $\alpha$ , под которым из точки  $O$  видно расстояние  $S_1S_2$ , равен  $\alpha = d/(a + b) = 2b\varphi/(a + b)$ , а потому

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{a+b}{2b\varphi} \lambda. \quad (27.1)$$

Угол  $\alpha$  можно просто измерить по шкале зрительной трубы. Для этого трубу следует поместить в точке  $O$  и установить ее на отчетливое видение изображений  $S_1$  и  $S_2$  щели  $S$ . Тогда можно найти  $\lambda$  по формуле  $\lambda = \alpha \Delta x$ . Ширина области перекрытия  $AB = 2a\varphi$ , а потому число полос, которые могут наблюдаться на экране, равно

$$N = \frac{2a\varphi}{\Delta x} = \frac{2a\varphi\alpha}{\lambda} = \frac{4ab}{\lambda(a+b)} \varphi^2, \quad (27.2)$$

В опыте Френеля интерференционная картина искажается дифракцией на ребре  $C$ , вдоль которого пересекаются плоскости зеркал.

**3. Б и п р и з м а Ф р е н е л я.** Бипризма Френеля состоит из двух стеклянных призм с малыми преломляющими углами, сложенных своими основаниями (рис. 117). Практически она изготовляется из целого куска стекла. Источником света служит ярко освещенная щель  $S$ , устанавливаемая параллельно ребру бипризмы. После преломления в бипризме падающий пучок света разделяется на два когерентных пучка с вершинами в мнимых изображениях  $S_1$  и  $S_2$  щели  $S$ . В области  $AB$  экрана пучки перекрываются и дают систему параллельных интерференционных полос. Пусть  $\beta$  — преломляющий угол бипризмы,  $n$  — ее показатель преломления,  $a$  и  $b$  — длины отрезков  $CO$  и  $SC$ . Каждая половина бипризмы отклоняет параксиальный луч на угол  $(n - 1)\beta$ . Расстояние  $d$  между изображениями  $S_1$  и  $S_2$  равно  $d = S_1S_2 = 2b(n - 1)\beta$ , а угловое расстояние между ними  $\alpha = d/(a + b)$ . Ширина полосы

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{\lambda(a + b)}{2b(n - 1)\beta}. \quad (27.3)$$

Искажения интерференционной картины, вносимые дифракцией на ребре  $C$  бипризмы, более существенны, чем в опыте с зеркалами Френеля. Однако осуществить опыт с бипризмой значительно легче.

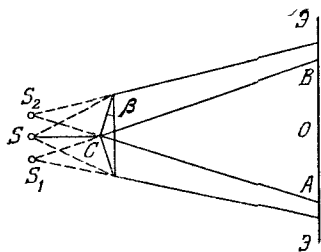


Рис. 117.

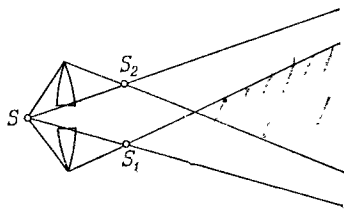


Рис. 118.

**4. Б и л и н з а Б и й е.** Собирательная линза разрезается пополам, и обе половинки ее раздвигаются. Образовавшаяся система называется *билинзой*. На билинзу направляется свет от щели  $S$ , параллельной плоскости разреза (рис. 118). В  $S_1$  и  $S_2$  получаются действительные изображения щели  $S$ . Пучки света, проходящие через  $S_1$  и  $S_2$ , перекрываются. В местах перекрытия наблюдается интерференция. Если щель  $S$  поместить между билинзой и ее фокальной плоскостью, то изображения  $S_1$  и  $S_2$  будут мнимыми. В этом случае интерференция невозможна, так как световые пучки не перекрываются. Чтобы получить интерференцию и при таком расположении щели  $S$ , надо из центральной части линзы вырезать плоскопараллельный кусок стекла и обе половинки линзы сблизить

между собой. Тогда пучки будут перекрываться, и интерференция станет возможной.

5. **Зеркало Ллойда** (1800—1881). Свет, исходящий из узкой ярко освещенной щели  $S_1$  (рис. 119), отражается от полированной плоской поверхности черного стекла. На участке  $AB$  экрана,

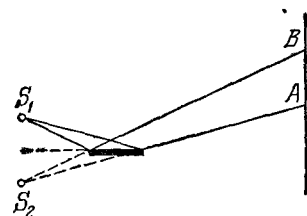


Рис. 119.

где перекрываются прямой и отраженный свет, наблюдаются полосы интерференции.

6. Во всех описанных опытах полосы интерференции можно наблюдать на белом матовом экране. Можно пользоваться также матовым стеклом, наблюдая полосы интерференции на его задней стороне через лупу или микроскоп малого увеличения. Такой *объективный* способ наблюдения применял и Френель в первых

опытах. Но он заметил, что полосы интерференции не исчезали, а становились более яркими, когда матовое стекло убиралось. Поэтому в дальнейших исследованиях Френель перешел к *субъективному* методу наблюдения интерференционных (и дифракционных) полос. Идея, на которой основан субъективный способ наблюдения полос, весьма проста. Допустим, что интерференционные полосы получены на задней плоскости  $\Pi$  матового стекла. Интенсивность света в какой-либо точке  $P$  плоскости  $\Pi$  определяется разностью фаз интерферирующих лучей, приходящих в эту точку. Отобразим теперь с помощью линзы плоскость  $\Pi$  на сопряженную плоскость  $\Pi'$ . Лучи, вышедшие из точки  $P$ , снова соберутся, теперь в точке  $P'$ . Но так как оптические длины всех лучей между сопряженными точками одинаковы, то интерферирующие лучи придут в точку  $P'$  с той же разностью фаз, какой они обладали в точке  $P$ . Поэтому в плоскости  $\Pi'$  получится изображение не только плоскости  $\Pi$ , но и всей системы интерференционных полос на ней. Линза как бы переносит интерференционную картину с плоскости  $\Pi$  на плоскость  $\Pi'$ . Так же действует и оптическая система глаза, с помощью которой интерференционные полосы получают на сетчатке. Если пользоваться зрительной трубой, установленной на бесконечность, то таким путем будет наблюдаться интерференционная картина, получающаяся на бесконечном (т. е. очень далеком) расстоянии от глаза.

7. **Интерференционный опыт Поля** (р. 1884). Все установки, описанные выше, отличаются малой светосилой, а потому они мало пригодны для демонстрации интерференции света в большой аудитории. Опыт Поля свободен от этого недостатка. Здесь источник света  $S$  (рис. 120), которым может служить небольшая, но достаточно яркая ртутная лампа, помещается перед пластинкой слюды, толщина которой порядка нескольких сотых долей

миллиметра. Свет отражается от передней и задней поверхностей пластинки с образованием двух мнимых изображений  $S_1$  и  $S_2$  источника  $S$ . Прямой свет от источника  $S$  загороживается ширмой. Получаются два широких когерентных пучка света с вершинами в точках  $S_1$  и  $S_2$ . Падая на экран, потолок или стены аудитории, они дают при интерференции систему светлых и темных колец (см. пункт 6 предыдущего параграфа). Благодаря большому количеству света кольца хорошо видны во всей аудитории. Преимущества метода Поля будут выяснены в § 28.

8. Опыт Меслина. Этот опыт является видоизменением опыта Бийе. Только в нем половинки разрезанной линзы не раздвигаются перпендикулярно к оптической оси, а смещаются вдоль нее,

и притом на значительное расстояние (рис. 121). Половинки билинзы дают действительные изображения точечного источника  $S$  в точках  $S_1$  и  $S_2$  на главной оптической оси. Интерференционные полосы наблюдаются в заштрихованной области, где накладываются соответствующие пучки света, т. е. между изображениями  $S_1$  и  $S_2$ . В плоскости, перпендикулярной к главной оптической оси, интерференционные полосы имеют вид концентрических полуколец с общим центром на этой оси.

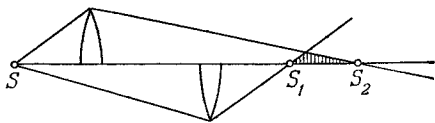


Рис. 121.

другой пучок проходит через свой фокус  $S_2$  позже. На этом основании можно прийти к заключению, что прохождение волны через фокус сопровождается изменением фазы на  $\pi$ .

Это легко понять на примере скалярной сферической волны, сходящейся к своему центру  $O$  и заполняющей полный телесный угол  $4\pi$ . Представим поле этой волны в виде  $E_1 = \frac{1}{r} f_1 \left( t + \frac{r}{v} \right)$ , где  $r$  — расстояние от центра  $O$ , а  $v$  — скорость распространения волны. Когда волна проходит через центр  $O$ , начинает образовываться расходящаяся сферическая волна  $E_2 = \frac{1}{r} f_2 \left( t - \frac{r}{v} \right)$ . Волновое поле в пространстве теперь представится в виде

$$E = \frac{1}{r} f_1 \left( t + \frac{r}{v} \right) + \frac{1}{r} f_2 \left( t - \frac{r}{v} \right).$$

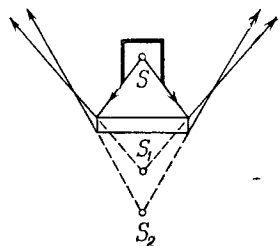


Рис. 120.

Но напряженность поля  $E$  нигде не может обращаться в бесконечность, в частности и при  $r = 0$ . Поэтому необходимо, чтобы в любой момент времени выполнялось соотношение  $f_2(t) = -f_1(t)$ , т. е. функция  $f_2$  может отличаться от функции  $f_1$  только знаком. Если колебания  $f_1$  и  $f_2$  синусоидальны, то в точке  $O$  их фазы будут противоположны. А это и значит, что при прохождении через фокус фаза волны меняется на  $\pi$ .

Из приведенного рассуждения следует, что на передовом фронте функция  $f_1$  должна оставаться непрерывной. Если бы здесь она испытывала разрыв, то при подходе передового фронта к центру  $O$  напряженность поля  $E$  возрастала бы неограниченно. То же самое относится и к заднему фронту волны, а также к функции  $f_2$ .

### ЗАДАЧИ

1. Как надо поместить собирающую линзу в опыте с бипризмой (см. рис. 117), чтобы ширина интерференционной полосы  $\Delta x$  не зависела от положения экрана? Найти  $\Delta x$ . Найти максимальное число  $N$  полос, которое может наблюдаться в этой установке, если оно получается при удалении экрана от бипризмы на расстояние  $L$ .

$$\text{О т в е т. } \Delta x = \frac{\lambda}{2(n-1)\beta}; \quad N = \frac{4L(n-1)^2\beta^2}{\lambda}.$$

2. При каком расстоянии  $L$  экрана от бипризмы в предыдущей задаче число интерференционных полос  $N$  будет максимальным, если расстояние между вершинами бипризмы равно  $l$ ? Найти  $N$ . При каком положении экрана полосы пропадут?

$$\text{О т в е т. } N = l(n-1)\beta/\lambda;$$

$L = \frac{l}{4(n-1)\beta}$ . Если экран удалить от бипризмы на расстояние  $L$  или больше, то полосы пропадут.

3. Найти число полос интерференции  $N$  в установке с бипризмой (см. рис. 117).

$$\text{О т в е т. } N = \frac{4ab}{a+b} \frac{(n-1)^2\beta^2}{\lambda}.$$

4. В опыте с бипризмой Френеля экран для наблюдения интерференционных полос расположен перпендикулярно к оси установки. Нулевая полоса получается в центре

экрана в вертикальной плоскости, проходящей через ребро бипризмы и ось установки. В какую сторону и на какую величину  $x$  сместится нулевая полоса, если освещающую щель немного сместить в сторону на величину  $h$  перпендикулярно к оси установки?

Решение. При смещении источника из положения  $S$  в положение  $S'$  (рис. 122) действие бипризмы  $CAB$  сведется к действию ее части  $DEB$  и плоскопараллельной пластинки  $CAED$ . Суммируя смещения, вызываемые этими частями в отдельности, найдем, что центр интерференционной картины из прежнего положения  $O$  сместится вверх на расстояние  $x = hb/a$ .

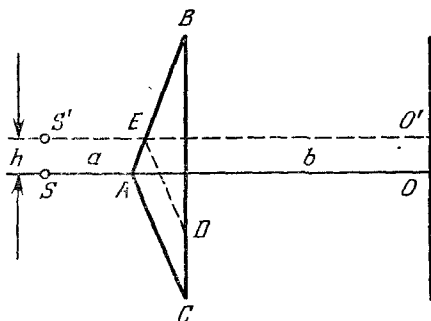


Рис. 122.