

§ 2.6. КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Простая интерференционная картина возникает в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плоско-выпуклой линзой большого радиуса кривизны. Эта интерференционная картина (линии равной толщины) имеет вид concentрических колец, называемых кольцами Ньютона.

Кольца Ньютона

Возьмите линзу с большим фокусным расстоянием (следовательно, с малой кривизной поверхности) и положите ее на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая поверхность линзы (лучше через лупу), вы обнаружите в месте соприкосновения линзы и пластины темное пятно и вокруг него маленькие радужные кольца. Расстояния между соседними кольцами быстро убывают по мере увеличения их радиуса (рис. 1, 1 на форзаце). Это и есть кольца Ньютона. Впервые их обнаружил Р. Гук, а Ньютон исследовал не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (мономатическим) светом. Оказалось, что радиусы колец растут пропорционально квадратному корню из порядкового номера кольца, а радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному (рис. 1, 2 и 3 на форзаце). Все это вы можете проверить с помощью самостоятельных наблюдений.

Объяснить, почему возникают кольца, Ньютон, придерживавшийся корпускулярной теории света, не мог. Впервые это удалось Юнгу на основе идеи интерференции.

Вычислим радиусы темных колец Ньютона. Для этого нужно подсчитать разность хода двух лучей, отраженных от выпуклой поверхности линзы на границе стекло — воздух и поверхности пластины на границе воздух — стекло (рис. 2.15).

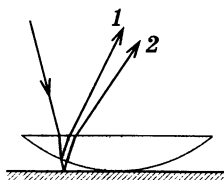


Рис. 2.15

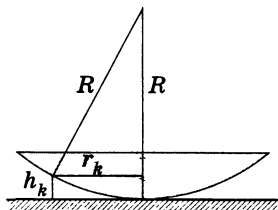


Рис. 2.16

Радиус r_k кольца номера k связан с толщиной воздушной прослойки простым соотношением. Согласно теореме Пифагора (рис. 2.16)

$$R^2 = r_k^2 + (R - h_k)^2,$$

где R — радиус кривизны линзы. Отсюда $2Rh_k = r_k^2 + h_k^2$. Так как радиус кривизны линзы велик по сравнению с h_k , то $h_k \ll r_k$. Поэтому $2Rh_k \approx r_k^2$ или

$$h_k = \frac{r_k^2}{2R}. \quad (2.6.1)$$

Вторая волна проходит путь на $2h_k$ больший, чем первая. Однако разность хода оказывается большей $2h_k$. При отражении световой волны, так же, как и при отражении механической волны, может происходить изменение фазы колебаний на π , что означает увеличение разности хода дополнительно на $\frac{\lambda}{2}$. Оказывается, что при отражении волны на границе среды с бóльшим показателем преломления фаза колебаний меняется на π . (То же происходит у волны на резиновом шнуре, конец которого жестко закреплен.) При отражении от оптически менее плотной среды фаза колебаний не меняется. В нашем случае фаза волны меняется только при отражении от стеклянной пластины.

С учетом дополнительного увеличения разности хода на $\frac{\lambda}{2}$ условие минимумов интерференционной картины запишется так:

$$2h_k + \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}(2k + 1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.6.2)$$

Подставляя в эту формулу выражение (2.6.1) для h_k , определим радиус темного кольца r_k в зависимости от λ и R :

$$r_k = \sqrt{\lambda R k}. \quad (2.6.3)$$

Темное кольцо в центре ($k = 0$, $h_k = 0$) возникает из-за изменения фазы на π при отражении от стеклянной пластины.

Радиусы светлых колец определяются выражением:

$$r_k = \sqrt{R \frac{\lambda}{2}(2k + 1)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.6.4)$$

Изменение длины волны в веществе

При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно обнаружить так. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления n воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшаются. Почему это происходит?

Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-либо среду скорость света уменьшается в n раз. Так как $v = \lambda\nu$, то при этом должна уменьшаться либо частота, либо длина волны. Но радиусы колец зависят от длины волны. Следовательно, когда свет входит в среду, изменяется в n раз именно длина волны, а не частота.

Почему пленки должны быть тонкими?

При наблюдении интерференции в тонких пленках нет ограничений на размеры источника. Но есть ограничения на толщину пленки. В оконном стекле вы не увидите интерференционной картины, подобной той, какую дают тонкие пленки керосина и других жидкостей на поверхности воды. Посмотрите еще раз на рисунок колец Ньютона в белом свете. По мере удаления от центра увеличивается толщина воздушной прослойки. При этом расстояния между интерференционными максимумами уменьшаются, а при достаточно большой толщине прослойки вся интерференционная картина смазывается, и колец не видно совсем.

То, что разность радиусов $\Delta r = r_{k+1} - r_k$ соседних колец уменьшается с ростом порядка спектра k , следует из формул (2.6.3) и (2.6.4). Но неясно, почему интерференционная картина вообще исчезает при больших k , т. е. при больших толщинах воздушной прослойки h .

Все дело в том, что свет никогда не является строго монохроматическим. Падает на пленку (или воздушную прослойку) не бесконечная монохроматическая волна, а конечный пучок волн. Чем менее монохроматичен свет, тем этот пучок короче. Если длина пучка меньше удвоенной толщины пленки, то волны 1 и 2, отраженные от поверхностей пленки, не встретятся никогда (рис. 2.17).

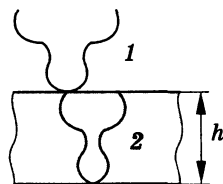


Рис. 2.17

Определим толщину пленки, при которой еще можно наблюдать интерференцию. Немонохроматический свет состоит из волн различной длины. Предположим, что спектральный интервал равен $\Delta\lambda$, т. е. присутствуют все длины волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$. Тогда каждому значению k соответствует не одна интерференционная линия, а разноцветная полоса. Чтобы интерференционная картина не смазывалась, нужно, чтобы полосы, соответствующие соседним значениям k , не перекрывались. В случае колец Ньютона необходимо, чтобы $r_{k+1}(\lambda) \geq r_k(\lambda + \Delta\lambda)$. Подставляя радиусы колец из формулы (2.6.4), получим:

$$\sqrt{\frac{R\lambda}{2}(2k+3)} \geq \sqrt{\frac{R(\lambda + \Delta\lambda)}{2}(2k+1)}. \quad (2.6.5)$$

Отсюда получается условие

$$\Delta\lambda \leq \frac{\lambda}{k + \frac{1}{2}}. \quad (2.6.6)$$

Если $\Delta\lambda \ll \lambda$, то k должно быть велико и

$$\Delta\lambda \leq \frac{\lambda}{k}. \quad (2.6.7)$$

Ширина спектрального интервала должна быть много меньше длины волны λ , деленной на порядок спектра k . Это соотношение справедливо не только для колец Ньютона, но и при интерференции в любых тонких пленках.