# Глава VII
# ДИСПЕРСИЯ, ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ СВЕТА

## § 7.1. Дисперсия света

1. Известно, что при пропускании через стеклянную призму узкого пучка белого света на экране, установленном позади призмы, наблюдается радужная полоска (рис. 7.1), которая называется **призматическим** или **дисперсионным спектром.** Спектр наблюдается на экране и в том случае, когда источник света, призма и экран помещены в замкнутый сосуд, из которого удален воздух. Следовательно, образование призматического спектра является наглядным свидетельством существования зависимости абсолютного показателя преломления $n$ стекла от частоты $\nu$ света: $n=n(\nu)$. Как показали исследования, зависимость $n$ от $\nu$ присуща всем веществам. Это явление получило название **дисперсии света.**

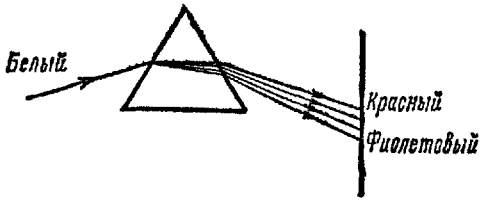

Рис. 7.1

По теории Максвелла, скорость света в вакууме $c=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ ($\varepsilon_0$ и $\mu_0$ — электрическая и магнитная постоянные) не зависит от частоты. Убедительные подтверждения этого вывода были получены в астрофизике при наблюдении излучения двойных звезд. Двойная звезда представляет собой систему, состоящую из двух звезд, которые связаны силами тяготения и движутся вокруг общего центра инерции. Наблюдатель, находящийся в плоскости движения обеих звезд, должен видеть периодически повторяющиеся взаимные затмения этих звезд, при которых яркость двойной звезды заметно уменьшается. Если бы скорость света в вакууме зависела от частоты, то при затмениях должна была бы изменяться не только яркость, но и окраска двойной звезды. Например, если бы скорость $c$ для красного света была больше, чем для фиолетового, то в начале затмения двойная звезда должна была бы приобрести сине-фиолетовую окраску, а в конце — красно-желтую. Однако опыты показали, что таких закономерностей в изменениях окраски двойных звезд нет. Следовательно, скорость в вакууме для света любой частоты $\nu$ одна и та же. Поэтому дисперсия света в веществе обусловлена зависимостью от $\nu$ фазовой скорости света в этом веществе:

$$v=\frac{c}{n(\nu)}=v(\nu).$$

Так как частота $\nu$ обратно пропорциональна длине волны $\lambda$ в вакууме ($\nu=c/\lambda$), то в равной мере можно говорить о зависимости $n$ и $v$ от $\lambda$: $n=n(\lambda)$ и $v=v(\lambda)$.

2. Дисперсию света в среде называют **нормальной,** если с ростом частоты $\nu$ абсолютный показатель преломления $n$ среды также возрастает: $\frac{dn}{d\nu}>0$ $\left(\text{соответственно } \frac{dn}{d\lambda}<0\right)$. Такой характер зависимости $n$ от $\nu$ наблюдается в тех областях частот, для которых среда п р о з р а ч н а. Например, обычное стекло прозрачно для видимого света и в этом интервале частот обладает нормальной дисперсией (рис. 7.1).

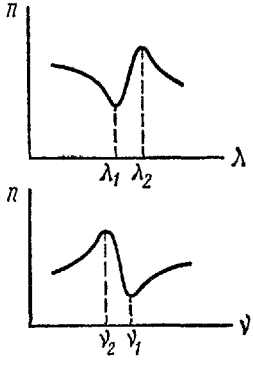

Рис. 7.2

Дисперсию света в среде называют **аномальной,** если с ростом частоты $\nu$ абсолютный показатель преломления $n$ среды уменьшается: $\frac{dn}{d\nu}<0$ $\left(\text{соответственно } \frac{dn}{d\lambda}>0\right)$. Аномальная дисперсия наблюдается в области частот, соответствующих полосам интенсивного поглощения света веществом. Для стекла эти полосы находятся в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. На рис. 7.2 показан типичный ход зависимости $n$ от $\nu$. Аномальной дисперсии соответствует интервал частот от $\nu_1$ до $\nu_2$.

В зависимости от характера дисперсии групповая скорость света в веществе (см. § 1.3) может быть как больше, так и меньше фазовой скорости $v$. В самом деле, $\omega=2\pi\nu$ и $\kappa=2\pi n\nu/c$, так что $d\omega=2\pi d\nu$,

$$d\kappa=\frac{2\pi}{c}\left(n d\nu+\nu\frac{dn}{d\nu}d\nu\right)$$

и групповая скорость

$$u=\frac{d\omega}{d\kappa}=\frac{c}{n+\nu\frac{dn}{d\nu}}=\frac{v}{1+\frac{\nu}{n}\frac{dn}{d\nu}}.$$

При нормальной дисперсии $\frac{dn}{d\nu}>0$ и $u<v$. При аномальной дисперсии $\frac{dn}{d\nu}<0$, и $u>v$, в частности, если

$$n+\nu\frac{dn}{d\nu}<1, \text{ то } u>c.$$

Между тем, согласно теории относительности и данным экспериментов, скорость распространения светового сигнала (цуга волн, ограниченного в пространстве) в любом веществе не может превосходить скорости света в вакууме. Поэтому полученный выше результат свидетельствует лишь о том, что в области аномальной дисперсии групповая скорость не совпадает со скоростью переноса энергии группой волн, эквивалентной рассматриваемому световому сигналу. Возможность описания сигнала с помощью групповой скорости основывается на предположении о том, что в процессе распространения сигнала в среде сохраняется «форма» сигнала, т. е. распределение амплитуды и энергии по его длине. Строго говоря, это условие вы-

полняется только для вакуума. Для всех других сред оно выполняется лишь приближенно и тем точнее, чем уже спектр частот сигнала и чем меньше дисперсия света в веществе при этих частотах. Вблизи полос поглощения дисперсия света в веществе столь велика, что «форма» сигнала быстро изменяется по мере его распространения в веществе.

3. На явлении нормальной дисперсии основано действие **призменных спектрографов** и **спектроскопов.** Принципиальная схема такого спектроскопа изображена на рис. 7.3. Он состоит из трех основных частей: коллиматора $K$, призмы $A$ и зрительной трубы $T$. Щель $S$ коллиматора находится в фокусе линзы $Л_1$. Поэтому исследуемый свет после прохождения через щель $S$ и коллиматорную трубу падает на призму $A$ параллельным пучком. Свет, прошедший через призму, собирается объективом $Л_2$ зрительной трубы. В фокальной плоскости линзы $Л_2$ образуется дисперсионный спектр. Этот спектр рассматривается через окуляр $Л_3$ зрительной трубы, играющий роль лупы. В призменном спектрографе линза $Л_3$ отсутствует, а изучаемый спектр регистрируется с помощью фотопластинки, помещаемой в фокальной плоскости линзы $Л_2$.

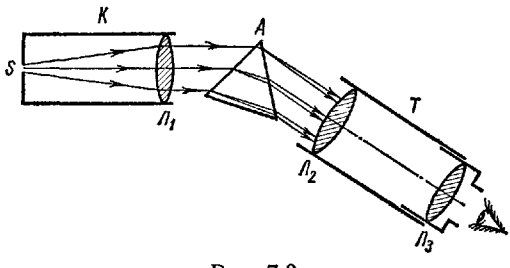

Рис. 7.3

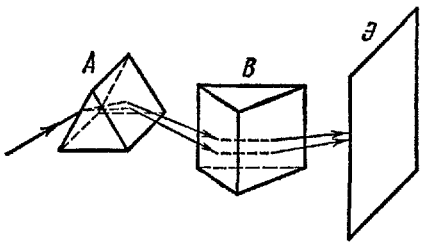

Рис. 7.4

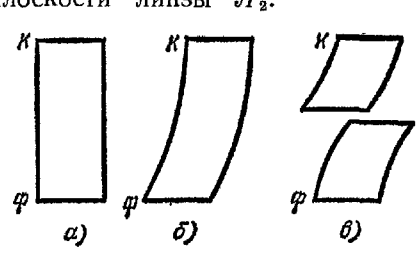

Рис. 7.5

Существенное отличие дисперсионного спектра от дифракционного состоит в нелинейности первого: угол отклонения призмой лучей монохроматического света не пропорционален ни длине волны этого света, ни его частоте. Поэтому дисперсионные спектральные приборы необходимо предварительно градуировать с помощью эталонных источников света, имеющих линейчатый спектр.

4. Для наблюдения нормальной и аномальной дисперсий можно воспользоваться **методом скрещенных призм,** примененным еще Ньютоном. Схема расположения призм и экрана показана на рис. 7.4. Призма $A$ — стеклянная, а призма $B$ изготовлена из вещества, дисперсия света в котором исследуется. Плоскости оснований призм взаимно перпендикулярны. Призма $A$ освещается параллельным пучком белого света. При прохождении через призмы $A$ и $B$ лучи света отклоняются

к основаниям призм, т. е. в двух взаимно перпендикулярных направлениях (вниз в призме $A$ и за чертеж в призме $B$). Углы отклонений для света различных длин волн тем больше, чем больше соответствующие значения показателей преломления призм. Если бы призмы $B$ не было, то на экране $Э$ наблюдался бы спектр, обусловленный нормальной дисперсией света в стекле. Он имел бы вид прямоугольной радужной полоски $К$ — $Ф$, показанной на рис. 7.5, *а*. Вследствие дисперсии света во второй призме спектр на экране искривляется. Его форма (при наблюдении картины на экране со стороны призмы $B$) в случае нормальной дисперсии в призме $B$ во всем интервале длин волн видимого света изображена на рис. 7.5, *б*. Наконец, вид спектра, показанный на рис. 7.5, *в*, соответствует случаю, когда одна из полос поглощения света веществом призмы $B$ находится в области видимого света. Сдвиг вправо нижней половины спектра по отношению к верхней обусловлен аномальной дисперсией в пределах полосы поглощения.

Метод скрещенных призм непригоден для изучения дисперсии света в газах и парах, показатели преломления которых очень близки к единице. Весьма точный метод измерения дисперсии в таких средах вплоть до границ линий поглощения был предложен Д. С. Рождественским.

## § 7.2. Взаимодействие света с веществом. Классическая теория дисперсии света

1. Дисперсия света является результатом взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами, входящими в состав вещества. Поэтому макроскопическая электромагнитная теория Максвелла не могла объяснить это явление. Классическая теория дисперсии была разработана лишь после создания Г. Лоренцем электронной теории строения вещества.

Из теории Максвелла следует, что абсолютный показатель преломления $n$ среды выражается формулой (4.2):

$$n=\sqrt{\varepsilon}, \tag{7.1}$$

где $\varepsilon$ — относительная диэлектрическая проницаемость среды. На первый взгляд кажется, что формула (7.1) противоречит данным опыта. Так, например, для воды, как известно из электростатики, $\varepsilon=81$. В то же время для видимого света абсолютный показатель преломления воды равен 1,33, а не 9. Однако это «противоречие» не связано с какими-либо принципиальными недостатками теории Максвелла. Оно «появилось» вследствие пренебрежения явлением дисперсии, т. е. неправильного применения формулы (7.1). Величина $\varepsilon$, так же как и $n$, зависит от частоты $\nu$ переменного электромагнитного поля: $\varepsilon=\varepsilon(\nu)$. В самом деле, большое значение относительной диэлектрической проницаемости воды в стационарном (электростатическом) поле $\varepsilon(0)=81$ обусловлено ориентационной поляризацией, т. е. преимущественной ориентацией в этом поле молекул воды, обладающих большими дипольными моментами. В переменном электрическом поле молекулы не могут мгновенно изменять свою ориентацию, так как их момент инерции от-