

с угловой скоростью ω зеркало M повернется на угол $\alpha = \omega t = \omega \frac{2l}{c}$ и займет положение, показанное на чертеже пунктиром. Отраженный от этого зеркала луч будет повернут на угол 2α по отношению к первоначальному и даст изображение источника S в точке S_2 . Измерив расстояние S_1S_2 и зная геометрические размеры прибора, можно определить угол α и вычислить скорость распространения света:

$$c = 2l \frac{\omega}{\alpha}. \quad (2.2)$$

Дальнейшее усовершенствование метода вращающегося зеркала позволило измерить величину c с очень большой точностью. По последним данным $c = 299\,793,0 \pm 0,3$ км/сек.

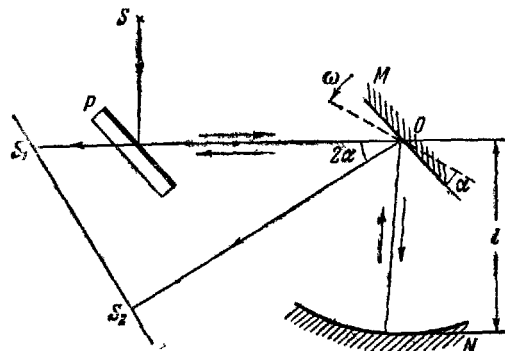


Рис 1.6.

Помещая на участке между зеркалами M и N трубу, заполненную водой, Фуко обнаружил, что угол сдвига α возрос в $\frac{4}{3}$ раза, а, следовательно, рассчитанная по формуле (2.2) скорость распространения света в воде v оказалась равной $\frac{3}{4}c$, т. е. меньше, чем в пустоте. Рассчитанный по формулам волновой теории (1.5) показатель преломления света в воде получился равным

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\frac{3}{4}c} = \frac{4}{3} = 1,33$$

в полном согласии с непосредственно измерявшимся по закону синусов. Таким образом, этот эксперимент дал, казалось бы, окончательное подтверждение справедливости волновой теории и закончил полуторавековой спор в ее пользу.

§ 3. Электромагнитная природа света. Возникновение теории квантов

В середине XIX в. начали обнаруживаться факты, указывающие на связь и аналогию оптических и электрических явлений. Так, в 1846 г. М. Фарадей наблюдал вращение плоскости поляризации света в телах, помещенных в магнитное поле. Тот же

Фарадей ввел представление об электрическом и магнитном полях, как о своеобразных натяжениях в эфире. В физике появился новый, «электромагнитный» эфир. Распространение электромагнитных полей в этом эфире должно было также происходить как волновой процесс. Возник вопрос о связи между световым и электромагнитным эфиром и оптическими и электромагнитными процессами.

Теоретические исследования Д. Максвелла (1865 г.) о распространении электромагнитных волн привели его к выводу, что скорость их распространения в пустоте равна отношению электромагнитной и электростатической единиц тока (т. II, § 32). Многочисленные измерения величины этого отношения (Вебер, Столетов и др.) привели к значению $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек = 300 000 км/сек, совпадающему со скоростью распространения света в пустоте. Было выдвинуто предположение о чисто электромагнитной природе световых волн.

Электромагнитная теория света явилась существенным шагом вперед в понимании природы оптических явлений. В физике остался лишь единый электромагнитный эфир.

	10^9 км	10^6 км	10^3 км	1 км	1 м	1 см	1 мм	1 мк	1 нм	1 \AA	1 X
λ	10^{11}	10^8	10^5	10^3	10^0	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-13}
$\lambda, \text{ м}$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-16}$
Улч (области шкалы)	Низкочастотные волны			Радиоволны		Ультракороткие радиоволны	Инфракрасные лучи	Ультрафиолетовые лучи	Рентгеновские лучи	Гамма-лучи	
	Световые лучи										

Рис. 1.7.

Свет оказался частным случаем электромагнитных волн с длиной волны от $\lambda = 400$ нм (фиолетовый) до $\lambda = 760$ нм (красный); единица длины нанометр (нм) равна 10^{-9} м. Только этот интервал значений λ оказывает непосредственное воздействие на наш глаз и является собственно светом. Однако и более короткие ультрафиолетовые лучи ($\lambda < 400$ нм) и более длинные инфракрасные ($\lambda > 760$ нм), открытые в самом начале XIX в., а также и еще более длинные радиоволны ($\lambda \approx 1$ км) имеют качественно одну и ту же электромагнитную природу и отличаются лишь методами их возбуждения и обнаружения. На рис. 1.7 приведена полная шкала электромагнитных волн, на которой видимый свет занимает сравнительно узкий участок.

Развитие электромагнитной теории света позволило понять ряд оптических явлений и вывести их количественные закономерности. Так, поляризация света оказалась обусловленной поперечностью электромагнитных волн. Возможность электрической поляризации и намагничивания тел во внешних полях позволила объяснить

закономерности распространения света в этих телах. Согласно электромагнитной теории, в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ скорость распространения электромагнитных волн равна (т. II, § 50)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (3.1)$$

Следовательно, показатель преломления среды равен

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (3.2)$$

Для многих прозрачных диэлектриков (у которых $\mu \approx 1$) было получено хорошее совпадение значений n и $\sqrt{\epsilon}$, подтверждающее вывод электромагнитной теории (3.1). Однако, например, для стекла и особенно для воды расхождение оказалось весьма значительным. Так, для воды измерение диэлектрической проницаемости в статических электрических полях дает $\epsilon=81$, а показатель преломления для видимого света $n=1,33$ вместо $\sqrt{81}=9$. Очевидно, что в столь быстро переменных полях, какими являются световые волны с частотой $\nu=c/\lambda \approx 10^{14}+10^{15}$ колебаний в секунду, за время полупериода $T/2=1/2\nu$ дипольные молекулы воды не успевают полностью повернуться по полю и величина ϵ для этих частот должна быть много ниже ее статического значения 81.

Таким образом, теорию Максвелла, формально введившую параметры среды ϵ и μ в свои уравнения, нужно было дополнить связью этих параметров со строением вещества. Возникшая в конце XIX в. электронная теория строения вещества позволила преодолеть ряд затруднений теории Максвелла. Перемещаясь в среде, переменное электромагнитное поле световой волны возбуждает вынужденные колебания электрических зарядов, составляющих атомы и молекулы. Колеблющиеся заряды представляют собой миниатюрные антенки, испускающие вторичные электромагнитные волны той же самой частоты. Наложение вторичных и первичных волн приводит к изменению скорости распространения суммарной волны, формально описываемому уравнением (3.1). Детальное развитие электронной теории Лоренцом позволило объяснить зависимость ϵ от частоты и закономерности распространения и поглощения света в различных средах. Благодаря этому стало возможным, изучая распространение света в данной среде, установить многие детали строения вещества, такие, например, как собственные частоты колебаний ионов в кристаллической решетке.

В электромагнитной теории остался эфир как гипотетическая среда, деформации и натяжения в которой и характеризуют векторы напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей.

Остались и затруднения с объяснением структуры самого эфира. Так, например, поперечность световых волн заставила приписать эфиру наличие модуля сдвига при отсутствии модуля растяжения. Наконец, необходимо было объяснить закономерности распространения света и электромагнитных волн в движущихся средах. К этому вопросу, изучение которого привело в конце концов к созданию теории относительности, мы вернемся ниже, в гл. VIII.

С другой стороны, несмотря на огромные успехи электромагнитной теории света, к концу XIX в. начали накапливаться новые факты, противоречившие представлениям о волновой природе света. Оказалось, что волновая (электромагнитная) теория излучения не способна объяснить распределение энергии в спектре абсолютно черного тела (см. ниже, гл. IX). Аналогичные затруднения возникли и при объяснении закономерностей фотоэлектрического эффекта (см. ниже, гл. X).

Выход из этих затруднений был найден лишь в самом начале XX в. В 1901 г. Планк показал, что спектр абсолютно черного тела может быть объяснен, если предположить, что излучение испускается и поглощается не непрерывно, но лишь порциями. При этом энергия ϵ_ϕ каждой порции излучения связана с частотой колебаний ν соотношением

$$\epsilon_\phi = h\nu, \quad (3.3)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ дж·сек есть универсальная константа, впоследствии названная постоянной Планка. В 1905 г. Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта, введя представление о световых частицах — «квантах света» или «фотонах», энергия которых определяется соотношением (3.3) и масса равна

$$m_\phi = \frac{\epsilon_\phi}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}. \quad (3.4)$$

Работы Планка и Эйнштейна явились началом развития квантовой физики — новой главы физики, не дописанной еще и в наши дни. Длительный путь исследований привел к современным представлениям о двойственной корпускулярно-волновой природе света. Формулы (3.3) и (3.4) связывают корпускулярные характеристики излучения, массу и энергию кванта, с волновыми — частотой колебаний и длиной волны. К вопросу о природе света мы еще вернемся подробнее в гл. XI, после детального ознакомления с основными экспериментальными работами, позволяющими судить о свойствах света, и с теоретической интерпретацией этих работ.