

компонентами, причем опыты показали, что последнее одно и то же для всех линий бальмеровской серии водорода. В сильных полях (превосходящих примерно 100 000 В/см) были обнаружены отступления от линейной зависимости между расщеплением и напряженностью внешнего поля E_0 . Линии атомов или ионов, содержащих более одного электрона, дают не линейный, а *квадратичный эффект Штарка*, в котором расщепление пропорционально *квадрату электрического поля E_0* .

Классическая теория не дает объяснения эффекта Штарка, как и всякого явления, связанного с излучением и поглощением спектральных линий. Его теория — существенно квантовая и не может быть изложена в этом томе.

§ 94. Вращение плоскости поляризации

1. Если линейно поляризованный свет проходит через плоскопараллельный слой вещества, то в некоторых случаях плоскость поляризации света оказывается повернутой относительно своего исходного положения. Это явление называется *вращением плоскости поляризации* или *оптической активностью*. Если вещество не находится во внешнем магнитном поле, то оптическая активность и вращение плоскости поляризации называются *естественными*. В противоположном случае говорят о *магнитном вращении плоскости поляризации* или *эффекте Фарадея*.

Естественная активность была открыта в 1811 г. Араго на пластинках кварца, вырезанных перпендикулярно к оптической оси. В 1815 г. Био подробно исследовал это явление, а также обнаруженное им вращение плоскости поляризации в растворах сахара. Затем естественное вращение плоскости поляризации было найдено у многих других тел. К концу прошлого века число известных естественно-активных веществ превышало 700. Теперь их известно гораздо больше, хотя для большинства веществ, где обнаружено это явление, оно выражено очень слабо.

Для наблюдения явления можно установить на оптической скамье два скрещенных николя. Такая система не пропускает свет. Однако, если между николями ввести пластинку кварца, вырезанную перпендикулярно к оптической оси, или слой какого-либо другого оптически активного вещества, то свет через систему будет проходить. Но его можно погасить вращением одного из николей. Отсюда следует, что после прохождения через активное вещество свет остается линейно поляризованным, но его плоскость поляризации оказывается повернутой. Для успеха опыта падающий свет, если он белый, необходимо монохроматизировать, пропустив его через светофильтр, так как *угол поворота плоскости поляризации зависит от длины волны*. Кварц — одноосный кристалл. В описанном опыте свет распространяется вдоль оптической оси, когда кварц

ведет себя как изотропное тело, не давая обычного (линейного) двойного лучепреломления.

В зависимости от взятого вещества естественное вращение плоскости поляризации может происходить вправо или влево, причем эти два направления условились относить к наблюдателю, к которому свет приближается. В соответствии с этим различают *право- и левовращающие вещества*. Вращение вправо считается *положительным*, а влево — *отрицательным*.

2. Явление вращения плоскости поляризации указывает на определенную *дисимметрию*, свойственную оптически активным средам. Она выражается в том, что в таких средах направления вращения по и против часовой стрелки физически не эквивалентны. Поэтому в среде не может быть плоскости симметрии, проходящей через направление нормали к фронту волны. Иначе, как это следует из общих соображений симметрии, плоскость поляризации света не могла бы вращаться, если бы она совпадала с любой из плоскостей симметрии. В то же время естественно-активные среды, если они жидкие, *полностью изотропны*, т. е. все направления в них совершенно эквивалентны. Это проявляется, в частности, в том, что естественно-активная жидкость вращает плоскость поляризации *в одну и ту же сторону, независимо от направления распространения света*. Поэтому естественно-активную жидкость можно охарактеризовать как *дисимметрично-изотропную среду*. В кристаллах нет изотропии, но в одноосных кристаллах всякие два взаимно противоположные направления оптической оси также эквивалентны, по крайней мере в оптическом отношении.

Отмеченная дисимметрия напоминает дисимметрию винтовой спирали. Будем смотреть на один из торцов спирали. Пусть по спирали движется точка, вращаясь по часовой стрелке. Если при этом точка удаляется от нас, то спираль называется правой (в противоположном случае она называется левой). Если посмотреть на спираль с противоположного торца, то вращение той же точки будет происходить против часовой стрелки, но в этом случае точка будет приближаться к нам. Чтобы она удалялась, надо направление вращения изменить на противоположное. Таким образом, свойство спирали быть правой или левой не зависит от того, с какого торца на нее смотреть. Так и *свойство естественно-активной среды быть право- или левовращающей не зависит от того, в каком из двух прямо противоположных направлений распространяется свет*.

Таким образом, *если плоскость поляризации в естественно-активной среде вращается, например, вправо, то при изменении направления распространения света на противоположное она по-прежнему будет вращаться вправо. Однако направления вращения «вправо» и «влево» относятся к разным наблюдателям: к каждому из них свет должен приближаться. Объективно, независимо от выбора наблюдателя, вращения происходят в противоположные*

стороны, если лучи распространяются навстречу друг другу. Если свет заставить пройти туда и обратно через естественно-активное вещество, отразив его от зеркала, то плоскость поляризации возвратится к своему исходному направлению.

3. Кварц встречается в природе в виде двух модификаций: *правовращающего* и *левовращающего* (короче — *правого* и *левого*). Это явление называется *энантиоморфизмом* и встречается у кристаллов, не содержащих центров и плоскостей симметрии. Обе энантиоморфные модификации кристалла отличаются друг от друга внешней формой и внутренней кристаллической структурой. По своей симметрии они отличаются друг от друга примерно так же, как правая спираль отличается от левой или правая рука от левой. Таким образом, обе модификации *не конгруэнтны*, т. е. правая не может быть наложена на левую и наоборот. Но зеркальное изображение одной из этих модификаций может быть совмещено с другой. По-видимому, все естественно-активные кристаллы существуют в двух энантиоморфных модификациях, хотя не во всех случаях известны обе модификации. Некоторые жидкости, например винная кислота, могут встречаться также в виде двух модификаций, вращающих плоскость поляризации в противоположных направлениях.

4. Био установил на опыте, что угол поворота χ плоскости поляризации пропорционален толщине l оптически активного вещества: $\chi = \alpha l$, где коэффициент α называется *вращением на единицу длины*. Он зависит от длины волны, природы вещества и температуры. Для кварца при температуре 20°C и желтого света натрия ($\lambda = 589,3$ нм) $\alpha = \pm 21,728$, для хлорноватистоокислого натрия (NaClO_3) $\alpha = 3,170$ угловых градуса на миллиметр. Для некоторых жидких кристаллов α может достигать 40 000 градусов на миллиметр. Для правых и левых модификаций кварца и всех остальных кристаллов значения вращения α *одинаковы по величине, но противоположны по знаку*. Вращение α увеличивается с уменьшением длины волны. Био нашел, что величина α обратно пропорциональна квадрату длины волны λ^2 . Но такая зависимость грубо приближенна. В области прозрачности и малого поглощения хорошо согласуется с опытом формула Друде

$$\alpha = \sum_l \frac{B_l}{\lambda^2 - \lambda_l^2},$$

где B_l — постоянные, а λ_l — длины волн, соответствующие собственным частотам рассматриваемого вещества.

Оптическую активность жидкостей принято характеризовать *удельным вращением* $[\alpha]$. В случае химически чистых жидкостей это есть отношение вращения α к плотности жидкости ρ , т. е. $[\alpha] = \alpha/\rho$. В случае растворов речь идет обычно о растворах ак-

тивного вещества в неактивном растворителе. В этом случае при определении удельного вращения $[\alpha]$ под ρ понимают плотность активного вещества, т. е. массу его в единице объема раствора. Молекулярным вращением жидкости или раствора называют произведение $[M] = M [\alpha]$ удельного вращения $[\alpha]$ на молекулярную массу активного вещества. Зависимость вращения плоскости поляризации от концентрации активного вещества используется в сахарометрии для определения содержания сахара в растворе.

Вращение плоскости поляризации в одноосных кристаллах имеет место и в тех случаях, когда свет распространяется под углом к оптической оси. Но в этих случаях явление осложняется обычным двойным лучепреломлением. Еще больше усложнение в оптически двуосных кристаллах, так как вращение может быть разным вдоль каждой из оптических осей. Наконец, встречаются естественно-активные кристаллы кубической системы, не обнаруживающие обычного двойного лучепреломления (хлорноватистокислый натрий NaClO_3 , бромноватистокислый натрий NaBrO_3). Для них вращение α не зависит от ориентации кристалла.

5. Согласно Френелю, вращение плоскости поляризации, какова бы ни была его физическая природа, есть проявление особого, так называемого кругового двойного лучепреломления. Однако две волны, которые могут распространяться в оптически активной среде с определенными, но различными скоростями, поляризованы не линейно, как при обычном (линейном) двойном лучепреломлении, а по кругу: одна по левому, другая по правому.

Для обоснования достаточности такого предположения допустим, что плоская волна с вращающейся плоскостью поляризации распространяется в положительном направлении оси Z . Так как волна поперечна, ее электрический вектор E будет содержать только две компоненты E_x и E_y . Если A — амплитуда колебаний, то $E_x = A \cos \chi \cos(\omega t - kz)$, $E_y = A \sin \chi \cos(\omega t - kz)$, где χ — угол между направлением электрического вектора E и осью X . Этот угол может зависеть от координаты z , так что можно положить $\chi = -\alpha z$, где α — введенный ранее коэффициент, определяющий вращение плоскости поляризации. Когда коэффициент α положителен, то при распространении волны угол χ уменьшается, т. е. вращение происходит по часовой стрелке (вправо). При отрицательном α плоскость поляризации вращается против часовой стрелки (влево). Подставив значение $\chi = -\alpha z$ в выражения для E_x и E_y и воспользовавшись известными формулами тригонометрии, представим их в виде

$$E_x = \frac{A}{2} \cos(\omega t - kz + \alpha z) + \frac{A}{2} \cos(\omega t - kz - \alpha z),$$

$$E_y = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - kz + \alpha z + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - kz - \alpha z - \frac{\pi}{2}\right).$$

Разложим полученную волну на две: $E = E^n + E^l$, где компоненты векторов E^n и E^l определяются выражениями

$$E_x^n = \frac{A}{2} \cos(\omega t - k^n z), \quad E_y^n = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - k^n z + \frac{\pi}{2}\right), \quad (94.1)$$

$$E_x^l = \frac{A}{2} \cos(\omega t - k^l z), \quad E_y^l = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - k^l z - \frac{\pi}{2}\right). \quad (94.2)$$

и введены обозначения

$$k^n = k - \alpha, \quad k^l = k + \alpha. \quad (94.3)$$

В волне (94.1) компонента E_y опережает по фазе компоненту E_x на $\pi/2$, а в волне (94.2) отстает на такую же величину. Обе волны поляризованы по кругу: в волне (94.1) электрический вектор вращается от положительного конца оси Y к положительному концу оси X , в волне (94.2) вращение происходит в противоположном направлении (рис. 314). Иначе говоря, волна (94.1) поляризована по правому, а волна (94.2) — по левому кругу. Таким образом, кинематически волну с вращающейся плоскостью поляризации можно рассматривать как наложение двух волн, поляризованных по кругу: правому и левому. Скорости этих волн определяются выражениями

$$v^n = \frac{\omega}{k - \alpha}, \quad v^l = \frac{\omega}{k + \alpha}, \quad (94.4)$$

а показатели преломления — выражениями

$$n^n = \frac{c}{v^n} = \frac{c}{\omega} (k - \alpha), \quad n^l = \frac{c}{v^l} = \frac{c}{\omega} (k + \alpha). \quad (94.5)$$

Отсюда

$$n^l - n^n = \frac{2c}{\omega} \alpha, \quad \alpha = \frac{\omega}{2c} (n^l - n^n). \quad (94.6)$$

Если $n^l - n^n > 0$, то $\alpha > 0$, т. е. вращение плоскости поляризации происходит *вправо*. Если же $n^l - n^n < 0$, то плоскость поляризации вращается *влево*. Иначе говоря, *плоскость поляризации вращается в ту же сторону, что и электрический вектор поляризованной по кругу волны с меньшим показателем преломления, т. е. с большей фазовой скоростью*.

6. Приведенное рассуждение отнюдь не доказывает, что каждая из поляризованных по кругу волн (94.1) и (94.2) может в отдельности существовать в среде. Мы исходили из опытного факта, что в оптически активной среде может реально существовать волна с вращающейся плоскостью поляризации. Такая волна, конечно, должна быть *решением системы фундаментальных уравнений Максвелла*, дополненной материальными уравнениями в оптически активной среде. Должна удовлетворять этой системе уравнений и суперпозиция поляризованных по кругу волн (94.1) и (94.2), так как мы доказали, что такая суперпозиция дает волну с вращаю-

щейся плоскостью поляризации. Но любое решение всякой системы уравнений можно представить (и притом бесконечным числом способов) в виде суммы нескольких слагаемых, которые *вовсе не обязательно должны быть решениями той же системы*. Поэтому из того факта, что в оптически активной среде возможна волна с вращающейся плоскостью поляризации, еще не следует, что в ней возможны и одиночные волны с круговой поляризацией. Однако Френель предположил, что поляризованные по кругу волны со скоростями (94.4) действительно могут распространяться в оптически активной среде. Их можно назвать *нормальными волнами*, т. е. такими волнами, которые распространяются в среде с сохранением своей формы и характера поляризации. Это предположение есть *гипотеза*, которую теоретически Френель доказать не мог, так как для этого необходимо было бы располагать полной системой уравнений волновой теории света в оптически активных средах. Но Френель подтвердил свою гипотезу *экспериментально*.

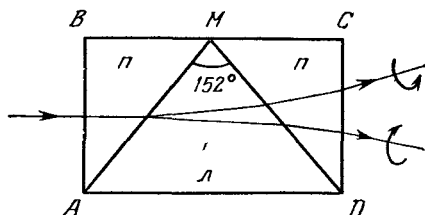


Рис. 316.

Френель изготовил сложную призму, состоящую из трех кварцевых призм: двух призм ABM и DCM из правовращающего кварца и одной AMD из левовращающего с тупым углом $M = 152^\circ$ (рис. 316). Оптические оси всех трех призм были параллельны основанию AD . Падающий луч, параллельный оптической оси, на грани AB не испытывал преломления, но разлагался внутри призмы ABM на два луча, поляризованные по кругу. Луч с правой поляризацией, как показывают формулы (94.5), имел меньший, а луч с левой поляризацией — больший показатель преломления ($n^n < n^n$). В левовращающей призме AMD соотношение между этими показателями преломления было обратным ($n^n > n^n$). Поэтому на грани AM лучи испытывали разное преломление: правый луч приближался к основанию AD , а левый удалялся. Угол расхождения между лучами еще больше увеличивался при преломлении на гранях DM и CD . В результате из призмы выходили два луча: один отклонялся вниз, а другой вверх, угол расхождения между которыми составлял около $4'$ (см. задачу к этому параграфу). Исследование с помощью параллелепипеда Френеля или пластинки $\lambda/4$ показало, что луч, отклонившийся вниз, был поляризован по правому, а вверх — по левому кругу.

Френель предлагал проверить свою гипотезу и для жидкостей путем комбинации большого ряда призм, попеременно наполненных жидкостями, вращающими плоскость поляризации вправо и влево. Позднее такой опыт был осуществлен и показал, что и в оптически

активных жидкостях также могут существовать две волны с различной круговой поляризацией: правой и левой.

Существование двойного кругового лучепреломления в кварце можно обнаружить и с помощью одной призмы, вырезанной так, что ее оптическая ось перпендикулярна к плоскости, делящей пополам двугранный преломляющий угол. При наименьшем отклонении луч внутри призмы идет параллельно оптической оси, не испытывая обычного двойного преломления. Если падающий свет естественный или поляризован линейно и содержит только одну спектральную линию, то в минимуме отклонения при выходе из призмы спектральная линия расщепляется на две линии, из которых одна поляризована по правому, а другая по левому кругу.

Таким образом, Френель доказал экспериментально, что при вступлении в оптически активную среду луч света испытывает двойное круговое лучепреломление: лучи, поляризованные по правому и левому кругу, идут внутри оптически активной среды с различными фазовыми скоростями. Если падающий свет был поляризован линейно, то при выходе из такой среды эти волны складываются снова в линейно поляризованную волну, но с повернутой плоскостью поляризации. Тем самым задача объяснения вращения плоскости поляризации была сведена к задаче объяснения кругового двойного лучепреломления.

Поляризованные по кругу в противоположных направлениях волны в окрестности полос или линий поглощения могут отличаться не только скоростями распространения, но и коэффициентами поглощения. Тогда они выйдут с различными амплитудами. Если падающий свет был поляризован линейно, то выходящий будет поляризован эллиптически. Это явление называется *круговым дихроизмом*. Оно впервые (1847 г.) было замечено Гайдингером (1795—1871) на аметисте и подробно изучено (1895 г.) Коттоном (1869—1951) на растворах солей винной кислоты.

ЗАДАЧА

Пользуясь данными, приведенными в тексте, вычислить угол расхождения $\delta\varphi$ между лучами, поляризованными по правому и левому кругу, вышедшими из призмы $ABCD$ в опыте Френеля (рис. 316). Зная обыкновенный показатель преломления кварца ($n_o = 1,544$ для $\lambda = 589,3$ нм), найти угловое расхождение между теми же лучами $\delta_1\varphi$ после преломления на плоскости AM и $\delta_2\varphi$ после последующего преломления на плоскости MD .

$$\text{О т в е т. } \delta\varphi = \frac{4\lambda\alpha}{\pi} \operatorname{tg} \frac{M}{2} = 3,92'; \quad \delta_1\varphi = \frac{\delta\varphi}{2n_o} = 1,27'; \quad \delta_2\varphi = \frac{\delta\varphi}{n_o} = 2,54',$$

§ 95. Магнитное вращение плоскости поляризации

1. В 1846 г. Фарадей обнаружил, что естественно-неактивное вещество, помещенное в постоянное сильное магнитное поле, вращает плоскость поляризации, когда свет распространяется вдоль