

стично отражается и частично проходит. После большого числа прохождений через окно она почти полностью удаляется из пучка благодаря отражениям. С другой стороны, компонента с поляризацией, параллельной плоскости падения, полностью проходит, так как при угле Брюстера коэффициент отражения для этой компоненты равен нулю. Поэтому даже после многих прохождений окна потери этой компоненты пренебрежимо малы. В конечном итоге половина света пропадает, а вторая половина выходит из лазера полностью линейно-поляризованной. Недорогие газовые лазеры, обычные для учебных физических лабораторий, имеют окна Брюстера. Если у вас есть такой лазер, проверьте с помощью поляроида поляризацию испускаемого света. Действие окна Брюстера показано на рис. 8.9.

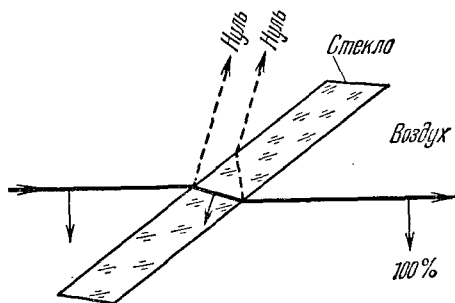


Рис. 8.9. Окно Брюстера.  
Рисунок для случая  $n=1,5$ .

*Поляризация радуги.* Поляризация радуги — пример еще более эффектный, чем поляризация голубого неба. Постарайтесь предсказать, является ли поляризация радиальной или тангенциальной (относительно дуги радуги). Если вы не можете дождаться радуги, чтобы проверить свои предсказания, то получите искусственную радугу, воспользовавшись садовым шлангом или пульверизатором \*).

#### 8.4. Двойное лучепреломление

В п. 8.3 мы научились изменять поляризацию пучка электромагнитных волн с помощью избирательного поглощения или отражения. (Избирательность в данном случае означает, что одна компонента поляризации поглощается или отражается сильнее другой.) Здесь мы покажем, как можно изменить поляризацию излучения, меняя относительную фазу двух компонент.

*Целлофан.* Возьмите два поляроида и ориентируйте их относительно друг друга так, чтобы свет не проходил. Поместите между поляроидами кусок обычного чистого целлофана, который употребляется, например, для обертки пищевых продуктов. Вы увидите, что теперь свет через скрещенные поляроида проходит. Целлофан совершенно прозрачен и практически не поглощает свет. Чтобы объяснить изменение поляризации света с помощью целлофана,

\*) Причина возникновения радуги и ее описание приведены в книге М. Мингарта «Свет и цвет в природе», Физматгиз, 1958.

следует предположить, что он меняет относительные фазы различных поляризованных компонент проходящего излучения. (Легко показать, что в этом случае не происходит потери интенсивности.)

Поворачивайте кусок целлофана, не меняя положения поляроидов. Вы обнаружите, что существуют два угла, сдвинутых на  $90^\circ$  относительно друг друга, где действие целлофана наибольшее, и два угла с таким же сдвигом в  $90^\circ$ , при которых действие целлофана не сказывается. Таким образом, в целлофане существуют два взаимно перпендикулярных направления, лежащих в плоскости целлофана, которые связаны со свойством образования фазового сдвига различных поляризованных компонент света.

Теперь убедитесь в том, что не всякий прозрачный пластик имеет такое специфическое свойство. Возьмите кусок чистого полиэтилена и поместите его между скрещенными поляроидами. Вы обнаружите, что по сравнению с целлофаном эффект незначителен, т. е. через скрещенные поляроиды проходит очень мало света. Таким образом, мы имеем кусок пластика, у которого нет оптических осей. Попытаемся искусственно создать в таком куске пластика оптическую ось. Растянем наш пластик и поместим его между скрещенными поляроидами так, чтобы направление растяжения составляло угол  $45^\circ$  с осями поляроидов. Эффект в этом случае будет огромен, т. е. система из двух скрещенных поляроидов с растянутым пластиком между ними будет пропускать свет.

Попытаемся объяснить свойства растянутого пластика. До растяжения большие органические молекулы пластика были похожи на сваренные макароны в кастрюле. Под действием сил растяжения молекулы вытянутся вдоль направления силы. Электроны в отдельной, похожей на цепочку, органической молекуле имеют различные «коэффициенты жесткости» для колебаний вдоль углеродной цепочки и колебаний в двух направлениях, перпендикулярных ее оси. Будем считать, что одно перпендикулярное растягивающей силе направление лежит в плоскости пластика. Тогда колебания электронов по второму направлению, перпендикулярному плоскости пластика, мы можем не учитывать. Электрическая восприимчивость для поля (т. е. наведенная поляризация на единицу объема и на единицу падающего электрического поля) в направлении растяжения будет отличаться от восприимчивости в перпендикулярном направлении. Таким образом, для этих двух направлений диэлектрические постоянные будут различны и поэтому будут различными и коэффициенты преломления.

*Медленная и быстрая оси задерживающей пластинки.* Направление растяжения диэлектрика и перпендикулярное направление (лежащие в плоскости пластинки) называются *оптическими осями*. Из этих двух осей та ось, которой отвечает наибольший коэффициент преломления (для поля  $E$ , направленного по этой оси), называется *медленной осью*. Больший показатель преломления означает меньшую фазовую скорость. Другая оптическая ось называется *быстрой*. Соответствующие коэффициенты преломления обозначим

через  $n_s$  и  $n_f$ , причем  $n_f < n_s$ . Слой целлофана или пластика, обладающего такими свойствами, называется *задерживающей пластинкой*.

Рассмотрим действие такой пластинки на бегущую электромагнитную плоскую волну. Разложим падающее на пластинку электрическое поле на две компоненты по взаимно перпендикулярным направлениям  $\hat{e}_s \equiv \hat{x}$  (медленная ось) и  $\hat{e}_f \equiv \hat{y}$  (быстрая ось). Будем считать, что пластинка установлена в точке  $z = 0$  и толщина ее равна  $\Delta z$ . Пластинка находится в вакууме. Пусть колебания электрического поля в падающей волне при  $z = 0$  определяются реальной частью выражения

$$E_c = (0, t) = e^{i\omega t} [\hat{x}A_s e^{i\varphi_s} + \hat{y}A_f e^{i\varphi_f}]. \quad (54)$$

Амплитуды  $A_f$  и  $A_s$  и фазы  $\varphi_f$  и  $\varphi_s$  мы получим, разложив электрические поля по двум направлениям  $\hat{x}$  и  $\hat{y}$ . (Так как эти амплитуды и фазовые константы произвольны, то выражение (54) отвечает общему случаю поляризации.) Рассмотрим проходящую волну внутри задерживающей пластинки между  $z = 0$  и  $\Delta z$ . Мы пренебрегаем потерями на отражение (считаем, что отражения нет) на первой поверхности и заменяем  $\omega t$  на  $\omega t - kz$ . Следует иметь в виду, что волновое число  $k$  неодинаково для направлений  $\hat{e}_s$  и  $\hat{e}_f$ . Учитывая, что  $k$  равно  $n\omega/c$ , т. е. зависит от показателя преломления, получим

$$E_c(z, t) = e^{i\omega t} [\hat{x}A_s e^{i\varphi_s} e^{-in_s\omega z/c} + \hat{y}A_f e^{i\varphi_f} e^{-in_f\omega z/c}]. \quad (55)$$

*Относительная задержка фазы.* За время прохождения через пластинку фаза каждой компоненты получит задержку относительно фазы, которая существовала бы без пластинки. Для  $s$ -компоненты эта задержка будет равна  $(n_s - 1)\omega\Delta z/c$ , т. е.

Задержка по фазе  $E_s$ , создаваемая пластинкой

$$\text{относительно вакуума} = (n_s - 1) \frac{\omega \Delta z}{c}. \quad (56)$$

Аналогично для  $f$ -компоненты имеем:

Задержка по фазе  $E_f$ , создаваемая пластинкой

$$\text{относительно вакуума} = (n_f - 1) \frac{\omega \Delta z}{c}. \quad (57)$$

Вычитая из уравнения (56) уравнение (57), находим фазовый сдвиг  $E_s$  относительно  $E_f$ :

Задержка по фазе  $E_s$  относительно  $E_f$  равна

$$(n_s - n_f) \frac{\omega \Delta z}{c} = (n_s - n_f) 2\pi \frac{\Delta z}{\lambda_{\text{вак}}}, \quad (58)$$

где  $\lambda_{\text{вак}}$  — длина волны в вакууме.

*Пластинка в четверть длины волны.* Рассмотрим пример, который поможет понять образование и знак сдвига фаз между  $\hat{e}_f$  и  $\hat{e}_s$ -компонентами. Предположим, что падающее излучение линейно

поляризовано и направление поляризации составляет угол в  $45^\circ$  с  $\hat{e}_s$  и  $\hat{e}_f$ . Тогда  $A_s$  и  $A_f$  равны и  $\varphi_s$  и  $\varphi_f$  тоже равны. Предположим, далее, что толщина пластинки такая, что медленная компонента претерпевает задержку по фазе на  $\pi/2$  относительно быстрой компоненты. Такая задерживающая пластинка называется *пластинкой в четверть длины волны* \*).

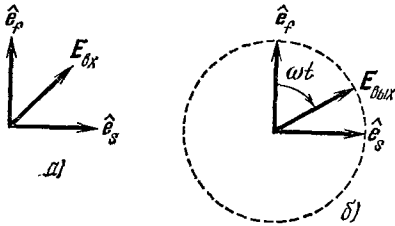


Рис. 8.10. Пластинка в четверть длины волны. Падающий на нее свет линейно поляризован под углом  $45^\circ$  к каждой оптической оси.

а) Вход; б) выход. Направление распространения перпендикулярно плоскости рисунка.

Волна на выходе из пластинки имеет одинаковые амплитуды для быстрой и медленной компонент, но быстрая компонента опережает медленную компоненту по фазе на  $90^\circ$ . Это значит, что на выходе мы имеем свет, поляризованный по кругу, с направлением вращения от  $\hat{e}_f$  к  $\hat{e}_s$  (рис. 8.10). Уравнение (55) включает в себя этот результат.

Чтобы понять действие пластинки на излучение, необходимо

помнить, что в пластинке происходит задержка по фазе медленной компоненты. Приведем словесное рассуждение, из которого следует, что направление вращения  $\mathbf{E}$  совпадает с показанным на рис. 8.10. Если компоненты линейно-поляризованного колебания, направленные вдоль  $\hat{x}$  и  $\hat{y}$ , распространяются в вакууме, то при любом заданном  $z$  в любое время  $t$  колебания вдоль  $\hat{x}$  и  $\hat{y}$  будут иметь те же значения, что колебания у источника света в более ранний момент времени. Эти две компоненты проходят через пластинку, у которой  $n_s$  больше чем  $n_f$ . На выходе пластинки мгновенное значение  $E_s$  будет соответствовать более поздней эмиссии, чем  $E_f$  (т. е.  $E_f$  было испущено раньше). Это объясняется тем, что бегущая волна  $E_s$  проходит то же расстояние, что и волна  $E_f$ , но с меньшей фазовой скоростью. Таким образом,  $E_f$  соответствует более раннему времени эмиссии и опережает по фазе  $E_s$ . Рис. 8.11 иллюстрирует сказанное.

*Свойства задерживающих пластинок.* Ниже приведены свойства задерживающих пластинок, которые нужно хорошо понять.

1. Пластинка толщиной в полволны (она в два раза толще пластинки в четверть волны) оставляет линейно-поляризованный свет линейно-поляризованным, при этом направление поляризации на выходе получается из направления поляризации на входе отражением относительно одной из оптической осей. (Нас почти никогда не интересует, какая это ось, т. е. нам не важна абсолютная фаза и нас не беспокоит изменение знака амплитуды.) Таким образом, пластинка в полдлины волны изменяет знак амплитуды одной из компонент падающей волны.

\*) Дальше мы часто будем писать вместо «пластинка в четверть длины волны» просто «пластинка  $\frac{1}{4} \lambda$ » и т. п.

2. Свет, поляризованный по кругу, после прохождения через пластинку в полволны остается поляризованным по кругу, но спиральность круговой поляризации меняется (из правой она становится левой, и наоборот).

3. Пластинка в  $\frac{1}{4}\lambda$  превращает линейно-поляризованный свет с направлением поляризации между  $\hat{e}_s$  и  $\hat{e}_f$  в эллиптически-поляризованный свет с направлением вращения от  $\hat{e}_f$  к  $\hat{e}_s$ . Если в падающем на пластинку свете направление поляризации составляет угол в  $45^\circ$  с  $\hat{e}_s$  и  $\hat{e}_f$ , то на выходе имеем свет, поляризованный по кругу

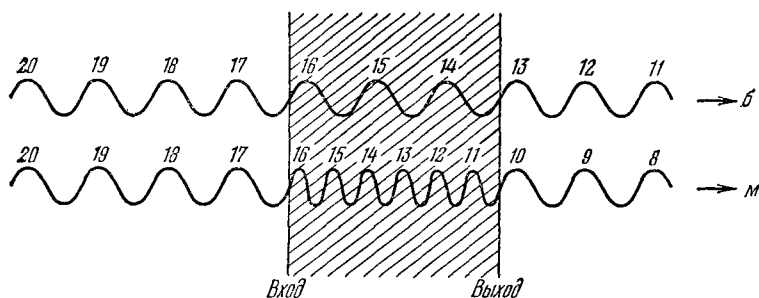


Рис. 8.11. Относительное запаздывание фазы для медленной и быстрой компонент поляризации.

Цифрами указано время эмиссии из источника света. На входе в задерживающую пластинку обе компоненты имеют одно и то же время эмиссии. На выходе медленная компонента, испущенная в десятом цикле колебаний, появляется в то же время, что и быстрая компонента цикла 13. Быстрая компонента опережает медленную на три полных цикла.

(З а м е ч а н и е. Если повернуть направление поляризации линейно-поляризованного света  $E_{вх}$  на рис. 8.10 на  $90^\circ$ , то направление вращения  $E_{вых}$ , происходящего с частотой  $\omega$ , изменится на обратное. Действительно, поворот на  $90^\circ$  означает изменение знака одной из компонент. Помня правило, что вращение происходит от быстрой оси к медленной, мы поймем причину изменения спиральности света на выходе.)

4. Пластинка в  $\frac{1}{4}\lambda$  превращает свет, поляризованный по кругу, в линейно-поляризованный. Чтобы вывести простое правило, по которому такое преобразование происходит, будем считать, что в падающем излучении вектор  $E_{вх}$  вращается от  $\hat{e}_f$  к  $\hat{e}_s$  (т. е. выберем соответствующим образом знаки  $\hat{e}_f$  и  $\hat{e}_s$ ). Тогда пластинка в  $\frac{1}{4}\lambda$  превращает свет, поляризованный по кругу, в линейно-поляризованный свет, направление поляризации которого составляет  $90^\circ$  с направлением, которое делит пополам угол между  $\hat{e}_s$  и  $\hat{e}_f$ . (В падающем излучении  $f$ -колебания уже имели опережение по фазе в  $\frac{1}{4}$  периода. После прохождения пластинки они будут опережать  $s$ -колебания на  $\frac{1}{2}$  периода.)

5. Задерживающая пластинка не оказывает никакого влияния на линейно-поляризованный свет, направление поляризации которого совпадает с направлением  $\hat{e}_s$  или  $\hat{e}_f$ .

6. Задерживающая пластинка не может поляризовать неполяризованный свет (т. е. свет, проходящий, например, непосредственно от солнца или лампы). Неполяризованный свет будет рассмотрен в п. 8.5. Здесь мы ограничимся довольно неопределенным утверждением, что для неполяризованного света при усреднении по временному интервалу наблюдения имеет место «случайное» соотношение между фазами компонент  $x$  и  $y$ . Относительный фазовый сдвиг, возникающий при прохождении через задерживающую пластинку, не меняет случайного соотношения между  $x$ - и  $y$ -компонентами, т. е. если фазы  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  некоррелированы, то то же можно сказать и о фазах  $\varphi_x$  и  $\varphi_y + \Delta\varphi$ .

7. Круговой поляризатор можно получить, сложив вместе плоскопараллельную пластинку и пластинку в  $1/4 \lambda$ , оптические оси которой составляют угол в  $45^\circ$  с осью пропускания поляроида. При этом неполяризованный свет сначала должен проходить через поляризатор.

8. Круговой поляризатор, создающий свет с правой спиральностью, будет пропускать 100% (пренебрегаем малыми потерями на отражение) света с такой спиральностью, падающего со стороны пластинки в  $1/4 \lambda$ . Он будет полностью поглощать свет с левой спиральностью, падающий со стороны пластинки в  $1/4 \lambda$ . (Эти свойства кругового поляризатора можно понять по аналогии с фильерой для нарезания резьбы и винтом. Будем считать, что фильера «преобразует» цилиндрический, т. е. «неполяризованный», стержень в винт с правой нарезкой. Очевидно, что «правый» винт может проходить через фильеру как в прямом, так и в обратном направлениях, в то время как «левый» винт будет срезаться.) Этот факт имеет интересные следствия. (См. домашний опыт 8.18.)

Мы рассмотрели задерживающие пластинки, полученные односторонним растяжением пластика. (Повторите эти опыты!) Именно этим способом изготовлены пластинки в  $1/4 \lambda$  и  $1/2 \lambda$ , которые имеются в вашем оптическом наборе \*). Обычное оконное стекло изотропно и, следовательно, не вызывает двойного лучепреломления (т. е. у него нет оптической оси). Если смотреть через скрещенные поляризаторы на кусок стекла, находящийся между ними и испытывающий давление, то можно заметить, что в некоторых местах свет будет проходить через такую систему (мы увидим некоторые части стекла). Сильно сжатое небьющееся стекло дает интересный пример двойного лучепреломления. На поверхности предметов из пластика, находящихся под давлением и помещенных между скрещенными поляризаторами, образуются красивые цветные узоры (мы смотрим на пластик через поляризатор), которые возникают потому, что сдвиг фаз различен для разных длин волн.

Свойством двойного лучепреломления обладает большинство кристаллов. Если (подобно растянутому пластику) у них есть только одно направление анизотропии, они называются *одноосными кристаллами*. Направление оси анизотропии называется *необыкновенным*

---

\*) См. сноску на стр. 368.

направлением. Другие два направления, перпендикулярные оси анизотропии, называются *обыкновенными* направлениями. Показатели преломления для волны, электрическое поле которой направлено по необыкновенной или по обыкновенной оси, обозначаются через  $n_e$  и  $n_o$  соответственно. Является ли ось анизотропии быстрой или медленной, зависит от кристаллической структуры. В табл. 8.1 приведены показатели преломления желтого света, испускаемого возбужденным атомом натрия, для некоторых кристаллов ( $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ ).

Таблица 8.1

Некоторые одноосные кристаллы

Материал	$n_e$	$n_o$	e-ось
Кварц	1,553	1,544	Медленная
Кальцит	1,486	1,658	Быстрая
Лед	1,307	1,306	Медленная

*Оптическая активность.* Для наблюдения оптической активности сделайте следующий интересный опыт. Налейте в стеклянную (но не пластмассовую) банку или бокал примерно пятисантиметровый слой фруктового сиропа или концентрированного раствора сахара. Расположите один поляризатор под банкой, а второй над ней. Источник света поместите снизу и посмотрите на свет через верхний поляризатор. Вы увидите красивые цветные узоры. Чтобы ограничить интервал длин волн, воспользуйтесь красным или зеленым фильтром. (Интервал длин волн, пропускаемый фильтром, можно определить с помощью дифракционной решетки.) Меняйте толщину слоя раствора. Вы обнаружите, что линейно-поляризованный свет останется линейно-поляризованным, но направление поляризации поворачивается примерно на  $10^\circ$  по часовой стрелке на каждый сантиметр раствора. Это явление называется *оптической активностью*. Попробуем его объяснить.

Линейно-поляризованный свет, образованный первым поляризатором, может быть представлен как суперпозиция двух компонент с правой и левой круговой поляризацией, имеющих равные интенсивности (рис. 8.12):

$$E_c = E_0 \hat{x} e^{i\omega t} = \frac{E_0}{2} [\hat{x} e^{i\omega t} + \hat{y} e^{i(\omega t - 1/2\pi)}] + \frac{E_0}{2} [\hat{x} e^{i\omega t} + \hat{y} e^{i(\omega t + 1/2\pi)}]. \quad (59)$$

Молекулы сахара имеют винтовую структуру. Все молекулы сахара, сделанного, например, из сахарного тростника, имеют одинаковое направление закручивания винта (одинаковую спиральность). Спиральность винта не зависит от того, с какой стороны мы на него смотрим. Поэтому раствор, в котором молекулы сахара ориентированы случайно, имеет спиральность, которая совпадает со

спиральностью одной молекулы. Из-за винтовой структуры молекул раствор сахара имеет различные показатели преломления для света с правой и левой круговой поляризации.

При распространении через раствор сахара линейно-поляризованной волны (такая волна есть суперпозиция двух волн с левой и правой круговой поляризациями) одна из поляризованных по кругу компонент опережает по фазе другую. Сделав чертеж и немного подумав, вы можете убедиться, что направление поворота плоскости поляризации линейно-поляризованного света (имеется в виду вращение в зависимости от глубины раствора) совпадает с направлением вращения быстрой компоненты (быстрой компоненте соответствует меньший показатель преломления). Подумайте, что произойдет, если через раствор сахара послать в обратном направлении

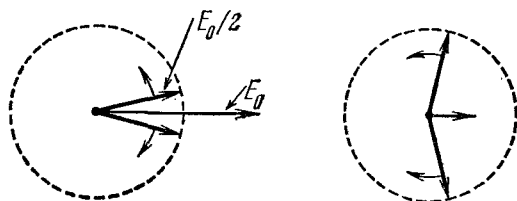


Рис. 8.12. Линейно-поляризованные колебания с амплитудой  $E_0$  можно рассматривать как суперпозицию левой и правой круговой поляризации с амплитудами  $E_0/2$ .  
 Направление линейной поляризации зависит от разности фаз круговых компонент.

свет, отраженный от зеркала после прямого прохождения. Удвоится ли вращение? Или же вращения вообще не будет?

*Первое из великих открытий Пастера.* Луи Пастер обнаружил, что оптически неактивная форма винной кислоты является смесью равного числа молекул винной кислоты, имеющих левую и правую спиральности. Изучая кристаллы винной кислоты под микроскопом, он обнаружил в неактивной (рацемической) смеси кристаллы обеих спиральностей. С помощью маленького пинцета ему удалось разделить кристаллы с правой и левой спиральностью. Водный раствор кристаллов данной спиральности поворачивает плоскость поляризации точно так же, как естественная винная кислота, полученная из винограда. Другая группа выделенных кристаллов вращает плоскость поляризации на тот же угол, но в другом направлении. Последний тип кристаллов винной кислоты никем до Пастера не наблюдался \*).

Наблюдаемая у органических молекул живых организмов спиральность определенного знака, несомненно, является ключом к разгадке эволюции жизни на нашей планете. Все молекулы ДНК (основа клетки) имеют свойства правой спирали. Почему? Может ли это быть результатом случайного начального выбора? Может быть,

\*) С этим и другими великими экспериментами Пастера, вы можете познакомиться в книге: Rene D u b o s, *Pasteur and Modern Science*, New York, 1960.



когда-то в океане было равное количество примитивных организмов, состоящих из левых и правых ДНК, а затем по каким-то причинам «левые» организмы исчезли? На эти вопросы еще нет ответа \*).

*Отражение от металла.* Мы знаем, что свет, отраженный от диэлектрика (стекла, воды), может быть сильно поляризован (для угла Брюстера поляризация достигает 100%). Кажется удивительным, что свет, отраженный от блестящих металлических поверхностей, практически не поляризован. Причина в том, что зеркальная металлическая поверхность почти полностью отражает обе компоненты. Именно поэтому поверхность кажется такой яркой. Она казалась бы темнее, если бы одна компонента поляризации отражалась в меньшей степени, чем другая. (Чтобы убедиться в этом, поместите посеребренное зеркало рядом с куском стекла и смотрите на обе поверхности под углом Брюстера для стекла. Стекло расположите на черном фоне.)

Итак, блестящая поверхность металла не создает поляризованного света из падающего на нее неполяризованного света. Было бы неверно делать из этого факта поспешный вывод, что поверхность металла не оказывает влияния и на поляризованный свет. Кусок целлофана не образует поляризованного света из падающего неполяризованного света, однако он может изменять поляризационное состояние падающего поляризованного света. Таким же свойством обладает блестящая поверхность металла. Вы можете убедиться в этом, проделав несложный опыт, в котором линейно-поляризованный свет превращается после отражения от металла в свет, поляризованный по кругу. (См. домашний опыт 8.28.)

## 8.5. Ширина полосы, время когерентности и поляризация

Здесь будет рассмотрен вопрос о поляризации света, испускаемого атомами. Мы воспользуемся классической моделью электрона, связанного с тяжелым ядром. Электрон колеблется и испускает классические электромагнитные волны; такой атом можно сравнить с небольшой радиоантенной. В классической картине мы пренебрегаем тем, что свет испускается и поглощается порциями (фотонами). Несмотря на пренебрежение «зернистой» структурой света, большинство результатов классической теории находит подтверждение в более сложной квантовой теории. Основное различие между обеими теориями в том, что в классической теории поток энергии в электромагнитной волне считается непрерывным, а в квантовой теории он состоит из отдельных порций — фотонов. Однако уравнения Максвелла (уравнения классической электромагнитной теории) дают правильное описание среднего потока энергии. В классической теории электрическое и магнитное поля электромагнитного

---

\*) Прекрасный обзор значения спиральности для живых организмов и для слабого взаимодействия, приводящего к распаду элементарных частиц дан в книге: M. G a r d n e r, *The Ambidextrous Universe*, New York, 1964.