

ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЗАКОНОВ ФРЕНЕЛЯ

ПЕРВАЯ ЛЕКЦИЯ

(26.11 1940 г.)

Сегодня и в следующий раз мы рассмотрим вопрос об отражении волн на границе двух сред. Здесь есть целый ряд тонкостей и принципиальных моментов, на которые зачастую не обращают достаточного внимания.

Большой интерес имеют вопросы, связанные с существованием и поведением так называемых *поверхностных* волн. С ними приходится иметь дело, в частности, при рассмотрении упругих волн на границе двух тел. Сначала ими занимался Релей, потом ряд других ученых. Изучение этих волн важно и с практической точки зрения — для сейсмологии. В электродинамике, когда обратились к распространению радиоволн над поверхностью Земли, всплыл аналогичный вопрос. На первых порах здесь руководились соображениями, почерпнутыми именно из теории упругости, и отсюда Цепнек пришел к своей теории поверхностных волн. Однако это было не к пользе для дела. В чем различие этих двух случаев — упругих и электромагнитных поверхностных волн, что характерно для каждого, это мы тоже рассмотрим на дальнейших занятиях семинара. Затем я думал возобновить курс квантовой механики.

Сегодня мы займемся вопросом, который на первый взгляд кажется совершенно элементарным.

Имеются две оптически прозрачные однородные среды с плоской (для начала) границей раздела. Речь идет об отражении и преломлении плоской волны на этой границе — вопрос, рассматриваемый во всех учебниках. Но в нем есть два момента, которые нужно, по-моему, углубить.

Во-первых, всегда ли нам достаточно знать решение задачи только для плоской границы? Одно из самых идеальных осуществлений плоской границы — это свободная поверхность жидкости. Но согласно взглядам современной статистической физики поверхность жидкости *принципиально* является волнистой, очень мало, но неизбежно. Как отражается свет от такой «плоской» поверхности? Этот вопрос удовлетворительно (хотя и не исчерпывающим образом) разобрал Релей. Первое, что нужно здесь выяснить, — это особенности отражения от волнистой поверхности, но сегодня мы этого делать не будем.

Во-вторых, даже в обычном случае идеально плоской границы раздела вопрос совсем не так прост. В учебниках его изложение

схематизировано. Между тем опыт обнаруживает расхождения с теорией. Вопросы здесь есть, но мы можем только указать на них, так как ответов пока не дано.

Мы требуем от электромагнитной теории света, чтобы она дала нам законы отражения и преломления и выражения для интенсивностей отраженной и преломленной волн. Кажалось бы, формулы Френеля полностью решают дело. В частности, для коэффициентов отражения (которое только и будет нас сейчас интересовать) получаются выражения

$$R_p = \frac{\operatorname{tg}(\theta - \varphi)}{\operatorname{tg}(\theta + \varphi)}, \quad R_s = -\frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta + \varphi)},$$

где R_p относится к волне, у которой колебания происходят в плоскости падения, а R_s — к волне, у которой они перпендикулярны к этой плоскости, и где угол падения θ и угол преломления φ связаны законом преломления

$$\sin \theta = n \sin \varphi.$$

Первый, кто дал эти формулы, был Френель. Это было в 1823 г., когда все безраздельно стояли еще на точке зрения упругого эфира. Сказать, что Френель *вывел* эти формулы, было бы, пожалуй, слишком сильно. Скорее он их угадал, как он всегда угадывал: путем не особенно верных рассуждений он приходил к правильным результатам. Это был гений особого рода.

Очень много занимался вопросом об отражении и преломлении Коши. Он выводил законы этих явлений из граничных условий на поверхности раздела, но действовал при этом как математик, формально. Между тем, если рассматривать эфир как упругую среду, то физически необходимы шесть граничных условий, выражающих отсутствие разрывов на поверхности раздела для трех смещений и трех напряжений. Этим шести условиям можно удовлетворить, только допуская наличие в среде и продольных, и поперечных волн, т. е. считая упругую среду твердым телом. Таким образом, световой эфир должен быть твердым телом, в нем должны распространяться и поперечные, и продольные волны. Опыт же говорил, что световые колебания всегда поперечны. Было много попыток выйти из этого противоречия. Были, например, попытки считать эфир абсолютно несжимаемым. Продольные волны тогда невозможны, но зато возникают противоречия в объяснении других оптических явлений (распространение света в кристаллах).

В электромагнитной теории Максвелла все эти трудности отпали. Она требует выполнения только *четырёх* граничных условий — непрерывности тангенциальных компонент напряженностей и нормальных компонент индукций. Формулы Френеля получают

ся из нее естественно, и никаких продольных волн в теории не фигурирует. Исторически интересно, что в своем первом трактате Максвелл не касается вопроса об отражении. Уиттекер замечает по этому поводу, что Максвелл был еще слишком сильно связан тогда представлениями теории упругости и думал, что условий должно быть не четыре, а *шесть*. Гельмгольц первый показал, что в электромагнитной теории достаточно четырех условий, потом это подробно разобрал в своей докторской диссертации Г. А. Лоренц.

Но ограничиваясь четырьмя условиями и получая из них формулы Френеля, мы еще не избавляем себя от неожиданных парадоксов. Известно, что можно так подобрать толщину плоскопараллельной пластинки из прозрачного материала, чтобы она ничего не отражала. Сколь угодно толстая стопа из таких пластинок тоже не будет ничего отражать. В пределе, увеличивая число пластинок, мы можем получить полупространство, заполненное нашим прозрачным материалом и не дающее отражения, в то время как формулы Френеля, выводимые как раз для границы такого полупространства, дают вполне определенное отражение с коэффициентами R_p и R_s . В чем же дело?

Дело в том, что обычный вывод формул Френеля не полон. Мы с самого начала не вводим в рассмотрение волн, идущих во второй среде *снизу*, а берем в этой среде только одну (преломленную) волну. Это ниоткуда не следует. Во всяком случае, это не содержится в четырех граничных условиях, которые вполне допускают наличие *четырёх* волн — двух в первой среде и двух во второй.

Здесь есть и еще один, гораздо более интересный момент. Во всех теоретических выводах закона преломления последний берется только в одном из возможных его видов, а именно, преломленная волна уходит от границы раздела во вторую среду и нормаль этой волны лежит по другую сторону от нормали к границе, чем у падающей волны (рис. 1, *а*). Но условия на границе, не зависящие от времени, допускают и другой случай, изображенный на рис. 1, *б*. Почему этот случай отбрасывается? Откуда мы знаем, что преломленная волна идет вниз, а не вверх? Это тоже *привносится* в решение задачи извне и связано с интуитивным убеждением, что групповая скорость направлена так же, как и фазовая ¹.

Но все это до некоторой степени формальные моменты. Кроме них есть еще и физические интересные вопросы, к которым мы теперь и перейдем.

¹ [Подробно этот вопрос был рассмотрен Л. И. Мандельштамом в лекциях «Некоторые вопросы теории колебаний» (стр. 434—435) и в статье «Групповая скорость в кристаллической решетке» (том II, статья 52).]

Мы имеем формулы Френеля и можем испытать их экспериментально. Для угла падения $\theta = 0$ коэффициент отражения равен

$$R = \frac{n-1}{n+1}.$$

Сделаем опыт и профотометрируем отраженный свет. Такого рода исследованиями занимался Релей. Он показал, что коэффициент отражения очень нечувствителен к отклонениям от нормального падения. Так, например, для воды при $\theta = 10^\circ$ угол преломления $\varphi = 7^\circ 29'$, а коэффициент отражения только на 0,4% превышает значение при нормальном падении. Значит, малые отклонения пучка от нормали и от строгой параллельности не могут служить объяснением больших отклонений экспериментальных значений R от теоретических. Между тем, при точности измерений порядка 0,5—1% Релей получил отклонения от формул Френеля немного более 1%. Он не сделал отсюда выводов, но все время относился к формулам Френеля с некоторым недоверием.

Для суждения о согласии или несогласии формул Френеля с опытом особенно пригодны так называемые нулевые эффекты, т. е. исчезновение какого-либо явления, например отражения, при определенных условиях. На основании формул Френеля можно ожидать двух таких эффектов при отражении.

Во-первых, на границе двух тел, показателя преломления которых для какой-либо длины волны λ одинаковы (скажем, кронглас

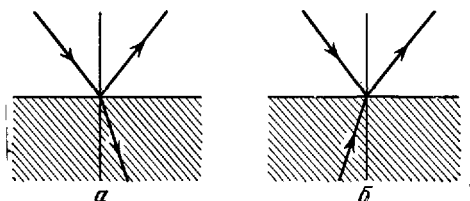


Рис. 1

и смесь бензола с сероуглеродом), отражение света этой длины волны должно исчезать. Такого рода опытами занимался Жамен и установил, что отражение все-таки остается, и притом довольно сильное. Конечно, если поверхность стекла загрязнена, то тогда ясно, что нулевого эффекта быть не должно. Но оказалось, что свести отражение на нет никакими химическими способами очистки не удастся. При обработке поверхности плавиковой кислотой отражение резко и заметно падает, однако некоторая величина остается и она *постоянна*. В чем же здесь дело? Несомненно, это

первое серьезное нарушение требований теории. Можно, конечно, сослаться на то, что иметь дело с твердыми телами в таких опытах, наверно, неприятно и что лучше взять две жидкости (подобные смеси — с одинаковым показателем преломления, но разной плотностью — приготовить можно). Хотя сегодня и нет таких опытов, но тем не менее можно сказать с полной уверенностью: остаточное отражение существует.

Во-вторых, формулы Френеля предсказывают нулевой эффект (отсутствие отражения) при падении света с p -поляризацией под углом Брюстера, т. е. при

$$\operatorname{tg} \theta = n, \text{ или } \theta + \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

В этом случае $R_p = 0$. Отклонения от этого закона также были замечены еще Жаменом. Он нашел, что никогда не удастся получить нуль, а достигается только минимум R_p . По формулам Френеля, при переходе через угол Брюстера R_p меняет знак, т. е. фаза отраженной волны должна скачком меняться на 180° . Непрерывность соблюдается благодаря тому, что в этот момент интенсивность проходит через нуль. Если же интенсивность не достигает нуля, то изменение фазы должно происходить непрерывно. Жамен это и обнаружил: при угле Брюстера сдвиг фазы равнялся 90° . Если записать R_p в виде

$$R_p = \rho e^{i\delta},$$

то по величине ρ при $\operatorname{tg} \theta = n$ можно судить об отклонении от формул Френеля. Для воды Жамен получил $\rho = 0,0058$ ($\delta = 90^\circ$). Для твердых тел (стекло) отклонения еще больше, но существенно, что они вообще есть и наблюдаются у всех тел.

Первый, кто пытался дать теорию этих аномалий, был Друде. Его теория, будь она верна, разрешила бы все вопросы. Он предположил, что на поверхности имеется тонкая пленка, не грязь, а переходный слой, толщина которого много меньше длины волны. В этом случае, если даже показатель преломления в таком слое непрерывно меняется по его толщине, очень легко рассчитывать, как ρ зависит от угла падения, толщины пленки и ее показателя преломления¹. Получается, что отражение есть и при угле Брюстера. Друде приводит такой пример: у тяжелого флинта $n = 1,75$. Если предположить, что у пленки n равно среднему арифметическому показателей стекла и воздуха, то достаточно толщины пленки $d = 0,0017 \lambda$, чтобы получить при угле Брюстера $\rho = 0,003$. Таким образом, речь идет о слоях толщиной порядка десятка межатомных расстояний.

¹ [См., например, Борн. Оптика. Харьков — Киев, ОНТИ, 1937, стр. 52; П. Друде. Оптика. М. — Л., ОНТИ, 1935, стр. 238.]

Казалось бы, все в порядке и объяснение найдено. В пользу этой теории говорило и то обстоятельство, что у кристаллов на свежем разломе наблюдалось заметное и быстрое увеличение ρ . Но Релей все же таким объяснением не удовлетворился. Он поставил очень простые и в то же время чрезвычайно тонкие опыты, пользуясь поверхностью воды. По сути дела, вся химия пленок на поверхности жидкости идет от Релея.

Пусть дело заключается в пленках, говорит Релей. Будем максимально очищать поверхность воды и затем специально покроем ее пленкой. При чистых веществах эта пленка обязательно получается мономолекулярной: ее просто не удастся сделать толщиной в 2—3 молекулярных слоя, так как при избытке наносимого вещества получается слой толщиной в одну молекулу, а остальное собирается в капли. Подобное загрязнение поверхности само по себе ничтожно, но на оптических ее свойствах оно уже существенно сказывается. Релей получил значения ρ для воды того же порядка, что и Жамен. В процессе очистки абсолютная величина ρ уменьшалась (ρ может быть как больше, так и меньше нуля, в зависимости от показателя преломления пленки). С усилением очистки поверхности Релей дошел до $\rho = 0$. Таким образом, все как будто бы получилось хорошо. Но тут он обнаружил, что при дальнейшей очистке ρ снова появляется, переменяя знак. Пользуясь в качестве источника света солнцем, Релей измерил значение $\rho = 0,0004$. От чего может получиться такой эффект? Очевидно, обращение ρ в нуль не есть результат окончательной очистки, а представляет собой эффект компенсации. Другими словами, имеется какая-то причина существования ρ у воды и вообще у всех веществ остаточного ρ , которая не сводится к наличию загрязнений.

Какие же факторы могут здесь оказать влияние?

Удовлетворительного объяснения нет, но, мне кажется, все же можно указать на то, что является ответственным за описанные явления. Дело, по-видимому, в том, что при описании «нулевых» эффектов среду уже нельзя считать однородным континуумом.