

§ 1.13. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

В этом параграфе мы рассмотрим более подробно, чем в § 1.8, вопросы, связанные с преломлением света.

Показатель преломления

Из-за преломления наблюдается кажущееся изменение размеров, формы и расположения предметов. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого стакана монету или другой небольшой предмет. Подвинем стакан так, чтобы центр монеты, край стакана и глаз находились на одной прямой. Не меняя положения головы, станем наливать в стакан воду. Заметим, что по мере повышения уровня воды дно стакана с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь становится видимой полностью.

В этом же стакане установим наклонно карандаш. При наблюдении сверху карандаш кажется надломленным у поверхности воды. Конец карандаша, находящийся в воде, кажется приподнятым (рис. 1.57). Рассматривая стакан сбоку, замечаем, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону и увеличенной в диаметре (рис. 1.58).

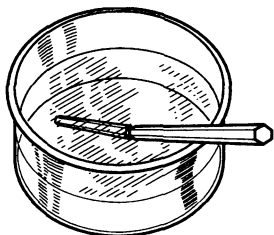


Рис. 1.57

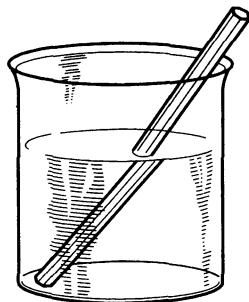


Рис. 1.58

Эти и многие другие явления объясняются изменением направления световых лучей на границе двух прозрачных сред.

Переход луча света из одной среды в другую подчиняется закону преломления (см. § 1.8):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \quad (1.13.1)$$

где n_{21} — показатель преломления второй среды относительно первой, а v_1 и v_2 — скорости света в первой и второй средах.

Показатель преломления данной среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления этой среды:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.13.2)$$

где c — скорость света в вакууме, а v — в данной среде.

Пользуясь формулой (1.13.1), можно выразить относительный показатель преломления n_{21} через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред. Действительно, так как

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ и } n_2 = \frac{c}{v_2},$$

то

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.13.3)$$

Из двух прозрачных сред *оптически более плотной* считается та, в которой скорость света меньше.

Отсюда следует, что при переходе света из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную угол преломления меньше угла падения. В самом деле, из выражений (1.13.1) и (1.13.3) имеем

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.13.4)$$

Но $n_2 > n_1$, поэтому $\sin \alpha > \sin \beta$. Следовательно, $\beta < \alpha$. Это значит, что, попадая в среду оптически более плотную, луч отклоняется в сторону перпендикуляра к границе двух сред. Наоборот, если происходит переход луча из среды оптически более плотной в среду менее плотную, угол преломления оказывается больше угла падения.

Абсолютный показатель преломления среды имеет глубокий физический смысл. Он связан со скоростью распространения света в данной среде. Эта скорость в свою очередь зависит от физического состояния среды, в которой распространяется свет, т. е. от температуры соответствующего вещества, его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от свойств самого света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого меньше, чем для фиолетового.

Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение n и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью n от указанных факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух — твердое тело или воздух — жидкость, а не через границу вакуум — среда. Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха очень незначительно. Действительно, абсолютный показатель преломления воздуха (для желтого света при нормальных условиях) мало отличается от единицы ($n_1 \approx 1,000292$). Следовательно,

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2.$$

Значения показателей преломления для некоторых веществ относительно воздуха приведены в таблице 2 (данные относятся к желтому свету).

Таблица 2

Вещество	Показатель преломления относительно воздуха
Вода (при 20 °С)	1,333
Кедровое масло (при 20 °С)	1,516
Сероуглерод (при 20 °С)	1,63
Каменная соль	1,544
Кварц	1,54
Рубин	1,76
Алмаз	2,417
Различные сорта стекла	от 1,47 до 2,04

Преломление света в атмосфере Земли

Плотность атмосферного воздуха в среднем плавно уменьшается с высотой и испытывает разного рода случайные изменения из-за циркуляции воздушных масс и конвективных потоков при неоднородном нагреве. Изменение плотности воздуха вызывает изменение показателя преломления. Из-за этого световые лучи в атмосфере не распространяются строго прямолинейно.

Плавное изменение показателя преломления вызывает плавное же искривление световых лучей. Показатель преломления воздуха весьма мал, изменения показателя преломления еще меньше. Но если свет проходит значительные расстояния в атмосфере, то отклонения от первоначального направления распространения могут оказаться значительными. Искривление световых лучей при прохождении через атмосферу называют **рефракцией**.

Из-за рефракции все небесные тела — звезды, планеты, Луна и Солнце — кажутся нам расположенными несколько выше над горизонтом, чем в действительности (рис. 1.59). Скорость света меньше у поверхности Земли, чем на высоте, из-за изменения плотности воздуха с высотой. В результате световая волна медленнее движется у поверхности Земли и волновой фронт постепенно поворачивается к ее поверхности. Чем ближе луч света к горизонту, тем больше он смещается вниз. При заходе Солнца его нижний край испытывает кажущееся смещение на $36'$ (угловых минут), а верхний край только на $29'$. Поэтому Солнце у горизонта кажется нам сплюснутым. Благодаря рефракции мы наблюдаем его восход раньше и заход позже, чем на самом деле. Сутки в результате увеличиваются на одну-две минуты.

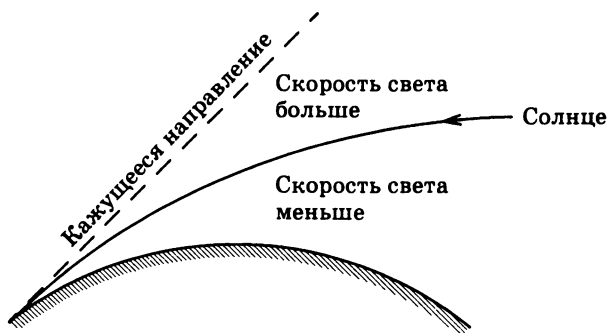


Рис. 1.59

Вы, вероятно, замечали, как колышутся предметы при наблюдении их сквозь костер. Это вызывается нерегулярными отклонениями световых лучей турбулентными потоками воздуха. То же самое можно наблюдать в жаркий солнечный день, когда воздух, нагреваясь над землей, устремляется вверх. При этом деревья, кустарники и дома вдалеке начинают трепетать и как бы струиться в воздухе.

По этой же причине звезды кажутся мерцающими. И. Ньютон в своей «Оптике» писал: «Так, воздух, сквозь который мы смотрим на звезды, пребывает в постоянном дрожании, как это видно из дрожащего движения тени от высоких башен и из мерцания неподвижных звезд». Звезды, которые видят космонавты, не мерцают.

Миражи

Во многих книгах, описывающих путешествия в пустынях, можно встретить рассказ о необычайном явлении, долго оставшемся непонятым. Внезапно вдалеке между чуть видимыми на горизонте горами и обессиленными от жажды людьми вырисовывается озеро с отраженными в нем небом, скалами или пальмами. Позабыв обо всем, люди бросаются вперед. Но таинственное озеро отодвигается все дальше и дальше, пока не исчезает так же внезапно, как появилось.

Происходит все это из-за того, что Солнце сильно нагревает песок пустыни. Воздух над песком на некоторое время становится менее плотным, чем в верхних слоях. Поэтому световые лучи, падая очень полого на поверхность нагретого слоя воздуха, искривляются и направляются вверх (рис. 1.60). Наблюдателю кажется, что они отражаются от земли. Обычно отражение происходит от поверхности воды. Поэтому и кажется, что между наблюдателем и горизонтом находится озеро. Образование мнимого изображения предметов из-за отражения света от слоев воздуха малой плотности называется **миражом**.

В жаркий день можно часто наблюдать мираж на асфальтированных дорогах. Свет отражается от нагретых слоев возду-

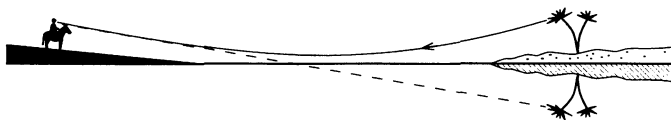


Рис. 1.60

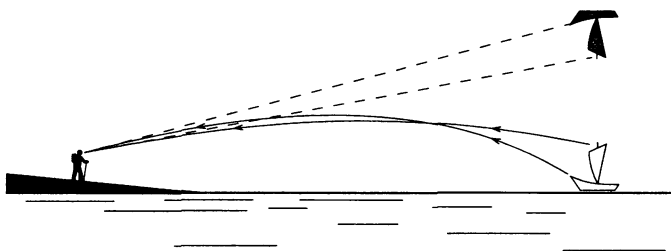


Рис. 1.61

ха, и создается впечатление луж, разлитых на асфальте (нижний мираж).

Иногда мираж можно наблюдать над холодной поверхностью моря (рис. 1.61), когда температура нижних слоев воздуха быстро растет с удалением от морской поверхности. В этом случае лучи света искривляются, поднимаясь в верхние, более теплые слои атмосферы (верхний мираж).