

## Введение

Думаю, вы уже слышали, что свет – это совокупность огромного числа элементарных частиц – фотонов, обладающих двумя, казалось бы, взаимоисключающими свойствами: а в некоторых экспериментах они ведут себя как обыкновенные частицы, а в некоторых – как элементарные волны. В межзвёздном пространстве эти волны – частицы мчатся с невероятно большой скоростью –  $3 \cdot 10^8$  м/с. Скорость эта столь велика, что искривлением траектории фотонов в гравитационном поле, как правило, пренебрегают. Принято обозначать скорость света в вакууме буквой  $c$ . Скорость фотонов (точнее, скорость движения соответствующих гребней или впадин волн)  $v$  в среде и его скорость  $c$  в вакууме связаны простым соотношением

$$vn = c, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности  $n$  называется *показателем преломления* соответствующего *вещества*. *Показатель преломления вакуума по определению равен 1.*

Траектории фотонов мы будем называть световыми лучами. Существует широкий круг явлений, которые можно описать с помощью простой, но весьма эффективной теории, называемой приближением геометрической оптики. Сформулируем основные постулаты этой теории.

### § 1. Постулаты геометрической оптики

№ 1. В прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно.

№ 2. Распространение любого светового пучка в среде не зависит от наличия других пучков света.

№ 3. Освещенность любой сколь угодно малой части экрана, создаваемая несколькими световыми пучками, равна сумме освещенностей, создаваемых каждым пучком в отдельности.

№ 4. Плоскость  $P$ , проходящая через падающий луч ( $S_1$ ), и нормаль ( $N$ ), проведенную к границе раздела двух сред через точку падения луча  $S_1$ , называется *плоскостью падения*. Отражённый луч ( $S_3$ ) также лежит в плоскости падения. Было бы странно, если бы после отражения он отклонялся от этой плоскости влево или вправо. Ведь обе половины пространства абсолютно равноправны (рис. 1.1). Острый угол  $\varphi_1$ , образованный падающим лучом и нормалью, называется *углом падения*.

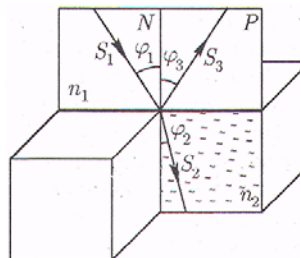


Рис. 1.1

Острый угол  $\varphi_3$  между отражённым лучом и нормалью – *углом отражения*. Угол падения равен углу отражения:

$$\varphi_1 = \varphi_3. \quad (1.1)$$

№ 5. Рассмотрим плоскую границу раздела двух различных прозрачных сред. Острый угол  $\varphi_2$ , образованный прошедшим во вторую среду лучом  $S_2$  и нормалью  $N$ , называется *углом преломления*. Луч падающий, отражённый и преломлённый лежат в одной плоскости  $P$ .

При сравнении двух прозрачных веществ то из них, которое имеет больший показатель преломления, называется «оптически более плотным». Следует заметить, что показатель преломления  $n$  не зависит от величины угла падения и угла преломления.

Математическая связь между углами падения и преломления, а также показателями преломления соответствующих сред выражается в виде обобщённого закона Снелла (в переводе с латинского - Снеллиуса)

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2. \quad (1.2)$$

Запомнить закон Снелла не просто, а очень просто: справа стоит произведение величин, относящихся к одной среде, а слева – к другой.

## § 2. Гипотезы Герона, Ферма, Весега

Известный физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии в области физики Ричард Фейнман однажды сказал: «По мере развития науки нам хочется получить нечто большее, чем просто формулу. Сначала мы наблюдаем явления, затем с помощью измерений получаем числа и, наконец, находим закон, связывающий эти числа. Но истинное величие науки состоит в том, что мы можем найти такой способ рассуждения, при котором закон становится очевидным».

Эти слова в полной мере можно отнести к открытию Герона Александрийского, жившего приблизительно в середине I века н. э. Герон предположил, что свет от источника до приёмника распространяется по кратчайшему пути. Его гипотеза делает излишним постулат № 1 геометрической оптики, ибо в однородной среде кратчайшее расстояние между двумя точками – прямая.

Несложно показать, что и закон отражения света от плоской поверхности вытекает из постулата Герона.

Но для света, проходящего через границу двух сред с различными показателями преломления, принцип Герона давал сбой.

Только через полтора тысячелетия (в 1650 году) французский математик и физик Пьер Ферма устранил это затруднение. По идее Ферма свет распространяется между двумя точками вдоль такого пути, на преодоление которого требуется наименьшее время. Такой способ рассуждения получил впоследствии название *принцип наименьшего времени* Ферма.

**Задача 2. 1.** Зрочок человека находится на высоте  $H$  над поверхностью водоёма, а точечный источник света  $S$  – на глубине  $h$ . Расстояние от человека до источника (вдоль поверхности воды) равно  $L$  (рис. 2.1). Показатель преломления воды  $n_1$ , воздуха –  $n_0 = 1$ . Используя принцип Ферма, докажите, что свет от источника  $S$  до зрочка наблюдателя  $M$  будет распространяться вдоль пути, удовлетворяющего соотношению

$$n_1 \sin \varphi_1 = \sin \varphi_0.$$

**Решение.** Пусть расстояние вдоль поверхности воды от точки  $B$  до  $S$  равно  $x$ . Тогда  $BS = \sqrt{h^2 + x^2}$ ,  $MB = \sqrt{H^2 + (L - x)^2}$ .

$$t = \frac{SB}{v} + \frac{BM}{c} = \frac{n_1 \sqrt{h^2 + x^2} + \sqrt{H^2 + (L - x)^2}}{c}.$$

Согласно принципу Ферма, время на преодоление пути от  $S$  до  $M$  минимально, а это значит, что  $\frac{dt}{dx} = 0$ , или

$$n_1 \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{L - x}{\sqrt{H^2 + (L - x)^2}} = 0.$$

Из рис. 2.1 видим, что

$$\frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} = \sin \varphi_1, \text{ а } \frac{L - x}{\sqrt{H^2 + (L - x)^2}} = \sin \varphi_0,$$

откуда  $n_1 \sin \varphi_1 = \sin \varphi_0$ , что и требовалось доказать.

Позднее ученые заметили, что время прохождения пути от источника до приёмника может иметь не только минимум, но и локальный максимум. Пришлось подправлять принцип Ферма. Он звучит так: *луч света всегда распространяется в пространстве между двумя точками по пути, вдоль которого время его прохождением экстремально.*

Но на этом совершенствование принципа Герона-Ферма не закончилось. В середине 60-х годов прошлого века советский физик Виктор Григорьевич Веселаго предположил возможность существования сред с отрицательным показателем преломления. Он разработал теорию распространения электромагнитных волн в таких средах (журнал «Успехи физических наук», том 92, № 517, 1967 г.). И вот через 35 лет, в 2000 го-

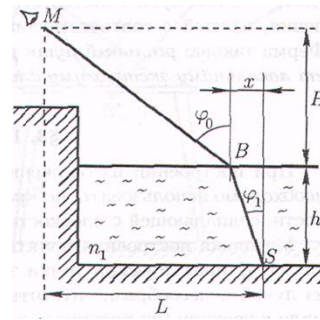


Рис. 2.1

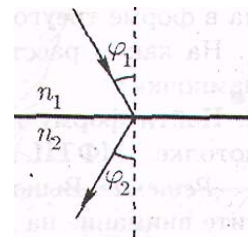


Рис. 2.2

ду в научной литературе появилось сообщение о том, что созданы композитные материалы, необычные электродинамические свойства которых легко объяснить, если принять что коэффициент преломления таких материалов **отрицателен**. Например, преломлённый луч на границе воздуха и композитного материала отклонился в сторону, противоположную отклонению для обычного случая  $n > 0$  (рис. 2.2).

Чтобы подправить принцип Ферма целесообразно ввести понятие *оптической длины* пути светового луча:

$$L = \sum l_i n_i,$$

где  $l_i$  — длина пути в соответствующем веществе,  $n_i$  — его показатель преломления, взятый с соответствующим знаком. Новая формулировка принципа Ферма такова: *реальный путь распространения света в среде соответствует локальному экстремуму длины оптического пути.*