



А.А. Лукьянов,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий инженер Лаборатории
по работе с одаренными детьми МФТИ

ОПТИКА в 8 классе Олимпиадной школы МФТИ. Теоретическое введение. Часть 2

Вторая часть Теоретического введения – это продолжение разговора, начатого в первой части статьи [1]. Основные темы теперь – скорость света в вакууме и в веществе, показатель преломления, закон преломления света. Кратко затронуты вопросы истории оптики.

Мы продолжаем разговор о работе Олимпиадной школы по экспериментальной физике при МФТИ в Климентовском переулке Москвы. О её работе можно прочитать на сайте <http://edu-homelab.ru/>. Сегодня – вторая часть Теоретического введения, материал которого реально был рассмотрен на

нескольких занятиях (не двух, а примерно шести-семи, включая лабораторные работы и их сдачу). Разбиение Теоретического введения на две части связано с желанием не обрушивать на головы восьмиклассников сразу слишком большого объёма информации – его ведь надо усвоить.

1. Скорость света

Ранее [1] уже говорилось о скорости распространения света вне зависимости от модели света – корпускулярной или волновой. Поговорим об этом чуть более подробно.

Во-первых, ясно, что если встать на корпускулярную точку зрения,

то есть представить себе свет как поток неких частиц, то совсем непросто представить себе поток частиц с абсолютно одинаковыми скоростями. А если скорости частиц разные? Что в этом случае понимать под скоростью света – скорость каких именно частиц?

В случае волновой трактовки света ситуация кажется на первый взгляд лучше. Во всяком случае для звуковых волн скорость разных волн в одной и той же среде вроде бы одна и та же. Увы, это справедливо лишь для волн с большой длиной волны (длина волны – расстояние между двумя соседними, например, горбами (или впадинами) в волне). Кроме того, это верно лишь для волн малой высоты (амплитуды). Все видели волны, набегающие на берег, с загибающимися вперед гребнями, которые обгоняют нижнюю часть волны. Скорости в разных местах таких волн – разные. И тогда снова встает вопрос «Что понимать под скоростью волны?»

Об одной и той же скорости во всей волне можно говорить для так называемых синусоидальных волн (рис. 1а), без распространяющихся заострений (рис. 1б) и без загибов (рис. 1в). Только их и будем иметь в виду в дальнейшем.

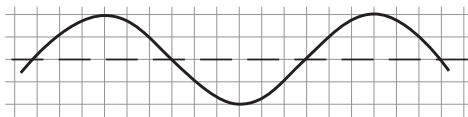


Рис. 1а

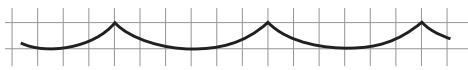


Рис. 1б



Рис. 1в

Впрочем, когда физики впервые задали себе вопрос о скорости света, о такой премудрости не думали. Было лишь ясно, что скорость света чрезвычайно велика. Но в какой мере велика?

Видимо, первым из физиков, кто заговорил об измерении скорости света, был итальянец **Галилео Галилей** (1564–1642), который обсуждал наблюдая с большого расстояния стрельбы из орудий. При этом всегда сначала видно пламя, а затем слышен звук выстрела. Об этом он пишет: «звук доходит до нашего слуха через большие промежутки времени, нежели свет: но это несколько не убеждает меня в том, что распространение света происходит мгновенно и не требует известного, хотя и малого времени ...».

Галилей предложил такую идею эксперимента для измерения скорости света. Пусть два человека, *A* и *B*, стоят на расстоянии *L* друг от друга и держат закрытыми фонари. Они договорились действовать так. Сначала человек *A* в некоторый момент времени открывает свой фонарь и засекает по своим часам момент открывания фонаря. Когда свет дойдёт до человека *B*, тот открывает свой фонарь, чем посылает ответный сигнал человеку *A*. Тот увидит этот сигнал, когда свет придёт к нему. Считая скорость света *v* одинаковой туда и обратно, нетрудно, казалось бы, найти эту скорость по формуле $v = \frac{2L}{\Delta t}$, где $2L$ – сумма расстояний от *A* до *B* и обратно, Δt – промежуток времени между моментами открывания человеком *A* своего фонаря и моментом приёма им же сигнала от человека *B*. Идея эксперимента проста, но опыт у Галилея ничего не показал.

Причина неудачи Галилея была в том, что скорость света чрезвычайно велика. Впервые правильно её порядок оценил в 1676 году из данных наблюдений за спутниками Юпитера датский астроном **Оле**



Рёмер (1644–1710). При этом он получил значение 214 000 км/с. Современное значение скорости света в вакууме $\approx 300\,000$ км/с (совсем точно: 299 792 458 м/с). Погрешность метода Рёмера составляет $\approx (300 - 214)/300 \approx 0,30$ (то есть 30%). Она была связана с неточностью определения астрономических расстояний.

Эйнштейн [2] объяснил неудачу опыта Галилея так: *«При той экспериментальной технике, которая была доступна во времена Галилея, не было шансов определить скорость света таким путём. Если расстояние было порядка одного километра, то он должен был бы определять промежутки времени порядка одной сотысячной секунды.»*

2. Главный сюрприз скорости света

Говоря о скорости света, мы ничего не говорили о скорости источника света, о скорости наблюдателя, о скорости системы отсчёта, в которой производят наблюдения. Не странно ли это? – Если, например, человек идет со скоростью $v = 1$ м/с по палубе парохода в том же направлении, в котором тот сам движется относительно берега со скоростью $V = 5$ м/с, то скорость человека относительно берега будет $v + V = 1 + 5 = 6$ м/с. Она разная для наблюдателя на палубе и на берегу. Скорость – величина относительная (зависит от системы отсчёта, в которой она измерена). $v = 1$ м/с – это скорость в системе отсчёта, связанной с палубой парохода, а $v + V = 1 + 5 = 6$ м/с – в системе отсчёта, связанной с берегом.

Если говорят о скорости звука в воздухе $v_{\text{звука}} = 330$ м/с без явного указания системы отсчёта, то молчаливо предполагают, что речь идёт о

Для измерения скорости звука в воздухе метод Галилея был вполне пригоден. При этом нужно было бы измерить промежуток времени

ни $\Delta t = \frac{2L}{v_{\text{звука}}}$, что при расстоянии

$L = 1000$ м и скорости звука в воздухе $v_{\text{звука}} = 330 \div 340$ м/с составляет $\Delta t \approx 6$ с. Скорость света, грубо говоря, в 900 тысяч раз больше. Поэтому

промежуток времени $\Delta t = \frac{2L}{v_{\text{света}}}$ бу-

дет в 900 000 раз меньше.

Эйнштейн однако подчеркивает: *«Галилей сформулировал проблему определения скорости света Формулировка проблемы часто более существенна, чем её разрешение ... »*

системе отсчёта, где воздух, по которому идёт звуковая волна, покоится.

Если встать на точку зрения, что свет – это волна, распространяющаяся в гипотетическом эфире, который якобы пронизывает все тела, то вроде бы, тоже всё понятно: скорость света – это скорость света относительно эфира (в системе отсчёта, в которой эфир покоится). Беда однако состоит в том, что ни движущегося, ни поящегося эфира никто не наблюдал. Так что же такое скорость света – пусть сначала в вакууме (не в веществе)?

Ситуация «прояснилась» в начале прошлого века после того, как Эйнштейн в 1905 году вынужден был ... постулировать, что свет в вакууме распространяется во всех инерциальных системах отсчёта с одной и той же скоростью 300 000 км/с, причём, эта скорость не зависит от того, как (с какой ско-



ростью) движается источник света (излучатель) и наблюдатель (приемник). Разумеется, такой постулат не был очевидным. Скорее он казался безумным (а как же тогда быть с законом сложения скоростей $v+V$?). Эйнштейн, можно сказать, выстрадал этот постулат. Ещё в отрочестве он размышлял, например, о том, что будет, если он «побежит» за светом со скоростью света. И он не мог себе представить, что догонит свет: представить себе застывшее (статическое) электромагнитное поле,

но без зарядов он не мог. (Кстати, закон сложения скоростей $v+V$ в теории относительности пришлось подправлять.)

Всё же решающими были не мысленные эксперименты, а настоящий эксперимент, выполненный в 1887 году американскими физиками **Альбертом Майкельсоном** (1852 – 1931) и **Эдвардом Морли** (1838 – 1923). Подробнее о нём говорить не будем. Это – тема особого и большого разговора, выходящая за рамки первоначального знакомства со светом.

3. Что показывает показатель преломления света?

В разных веществах скорость света различна, притом сильно различна. Не будем здесь запутывать читателя наличием *двух скоростей света в веществе – фазовой и групповой*. Мы будем говорить только об одной из них – фазовой – и будем её называть просто скоростью света v . (До работы Гамильтона 1839 года физики и не подозревали, что есть две скорости света (это относится вообще к любой волне, не обязательно электромагнитной)).

Фазовая скорость зависит от частоты колебаний волны (волна – это колебательный процесс, но не одной точки, а сразу бесконечно большого их числа). Эту зависимость называ-

ют дисперсией скорости. С зависимостью скорости волны в веществе от частоты оказывается связано такое хорошо всем известное оптическое явление, как радуга.

Если мы интересуемся не очень широким диапазоном световых частот, то можно приближенно приписать веществу единую скорость распространения световых волн v , а всё вещество описать единственным оптическим параметром – показателем преломления n (точнее: абсолютным показателем преломления), который можно найти как отношение скорости света в вакууме c к скорости света в веществе v :

$$n = \frac{c}{v} \tag{1}$$

4. Каковы значения показателя преломления для разных веществ?

Приведём значения показателей преломления для конкретных часто встречающихся веществ:

Вещество	Показатель преломления n
Воздух при нормальных условиях	1,0003
Вода *	$\approx 4/3 \approx 1,333$
Лед	1,31
Стекло обычное	$\approx 1,5$



Вещество	Показатель преломления n
Стекло (лёгкий крон)	1,57
Стекло (тяжёлый флинт)	1,80
Фторид магния MgF_2 **	1,38
Сульфид цинка ZnS	2,3–2,4
Алмаз	2,42

*) В воде показатели преломления для разных цветов света – разные; например для красного и фиолетового цветов показатели преломления равны, соответственно, 1,331 и 1,344.

**) Им покрывают поверхности линз для уменьшения потерь на отражение.

Показатель преломления воздуха очень близок к единице. Его часто и считают равным единице, кроме особых случаев. Один из них – *миражи*, второй – так называемая *рефракция* света (мы видим Солнце, когда оно уже зашло за горизонт (см., например, Беседу 2 в [3])).

Скорость света в веществах, показанных в таблице, в полтора, а то и два с половиной раза меньше скорости света в вакууме (показатели преломления больше единицы).

Удивительно большими показателями преломления могут обладать газы в состоянии так называемого конденсата Бозе–Эйнштейна. Переход газов в это состояние был теоретически предсказан названными авторами в начале прошлого столетия, но был получен в лабораторных условиях лишь почти столетие спустя. В экспериментах 1999 года, выполненных в Гарварде (США), было обнаружено, что в конденсате атомов натрия при температуре 10^{-9} К свет движется через конденсат с неправдоподобно маленькой скоростью – всего 17 м/с, что примерно в 18 млн раз меньше скорости света в вакууме

[4]. Разумеется, простого («школьного») объяснения этому явлению нет.

А может ли показатель преломления быть меньше единицы? Может, например, в металлах и в плазме так бывает довольно часто. В металлах показатель преломления рентгеновских лучей меньше единицы, правда, очень близок к единице.

Обратите внимание: согласно формуле (1), в условиях, когда $n < 1$, фазовая скорость распространения света в веществе **больше скорости света в вакууме!** Для тех, кто уже читал книги по теории относительности, скажем, что в этом нет противоречия с теорией Эйнштейна. Оказывается, не может превышать скорости света в вакууме та самая вторая (**групповая**) скорость света в веществе. Она, как выясняется, и не превышает.

Показатель преломления металлов обладает ещё и таким замечательным свойством: квадрат показателя преломления может быть ... отрицательным: $n^2 < 0$. Да-да, квадрат величины меньше нуля! (Со временем математики объяснят вам это «странное» утверждение). Световой волне в такую среду проникнуть чрезвычайно трудно (возможно лишь на малые расстояния порядка длины волны). Свет от таких сред отражается. Именно это свойство металлов позволяет изготавливать из них зеркала.

Отражение радиоволн от ионосферы, делающее возможной даль-

нюю радиосвязь (на тысячи километров), обусловлено тем, что для радиоволн с частотой, меньшей некоторого значения, квадрат показателя преломления ионосферы также меньше нуля.

Отрицательность квадрата показателя преломления ($n^2 < 0$) – вовсе не экзотика. Не пытайтесь искать здесь противоречие с формулой (1). Она, оказывается, – не определение показателя преломления (для тех, кто знаком с *комплексными числами*, добавим, что в случае $n^2 < 0$ формула (1) определяет *вещественную часть* показателя преломления, но у него будет еще и так называемая *мнимая часть*). Вещества с $n^2 < 0$ хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально.

Труднее оказалось сделать материал, у которого не квадрат, а сам

показатель преломления отрицателен $n < 0$. Начиная примерно с 1968 года в СССР **Виктор Веселаго** (Физический институт Академии наук, МФТИ) развивал идею о возможности сред с такими показателями преломления. (Снова не пытайтесь искать противоречий с формулой (1).) В природе веществ с $n < 0$ еще не обнаружили, но в 2000 году в университете в Сан-Диего (США) идея была реализована для электромагнитного излучения в миллиметрового диапазона. В дальнейшем были созданы материалы с $n < 0$ для длин волн порядка 1 мкм. Это уже практически **видимый диапазон длин волн**, который простирается от примерно 0,4 мкм (фиолетовые лучи) до 0,8 мкм (красный свет). (Для продвинутого читателя о веществах с $n < 0$ можно рекомендовать книгу [5].)

5. Что такое длина волны света?

Как уже говорилось [1], волновая теория света успешно развивалась, даже несмотря на то, что не было понятно, какой именно волновой процесс связан со световой волной. Так продолжалось почти два столетия (вплоть до появления трудов Максвелла). Физикам было достаточно того, что «просто» имеется некий волновой процесс. – *Какой-то*, не важно какой именно! В этом была смелость Гука, Гюйгенса, Юнга, Френеля и их коллег и даже их гениальность. Они изучали объект, про который толком не знали, что он такое. Но продвигались успешно.

Кстати, история повторилась в XX веке. В 1924 году французский физик **Луи де Бройль** (1892–1987) выдвинул показавшуюся вначале сумасшедшей идею, что не только

свет – это волна, но что волновые процессы связаны и с ... частицами, например с электронами. Очень быстро из этого предположения возникла так называемая квантовая механика, без которой сейчас совершенно немыслима теория строения веществ (атомов, атомных ядер, молекул, металлов, полупроводников, сверхпроводников ...). Но физики еще долго горячо спорили, *что такое* сама волна де Бройля.

Это должно быть уроком для молодых людей, вступающих в науку. Не всегда про изучаемое ими явление или исследуемый объект им будет заранее всё известно. А зачем тогда вообще его исследовать?! И кому нужны исследователи, если и так всё ясно?!

Не входя в детали того, что такое

световая волна, скажем лишь необходимое для дальнейшего понимания. Со световой волной связан некий волновой процесс. В простейшем случае волна – это что-то вроде синусоиды, показанной на рис. 2 (точнее – двух синусоид, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях).

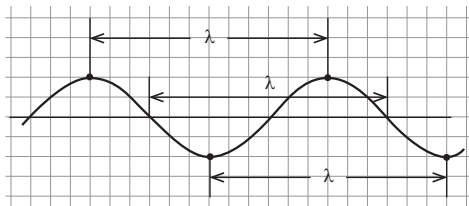


Рис. 2

Главное отличие реальной волны от рисунка – то, что «синусоида» волны **движется**, например вправо (рис.3) с некоторой скоростью.

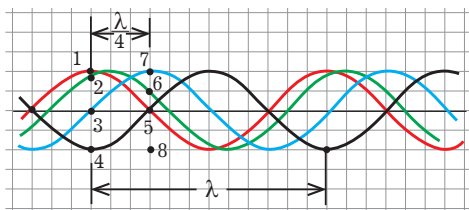


Рис. 3 Профили волны в разные моменты времени

Зримым образом волны могут быть волны на поверхности воды. Длинной волны λ называют расстояние между двумя, например, соседними, вершинами горбов (или между двумя соседними самыми низкими точками впадин).

В волне в каждой точке пространства происходят колебания (на поверхности воды – колебания уровня воды). Пусть в начальный момент времени точка 1 представляла собой высшую точку горба на красной синусоиде. Потом она опустится и

перейдет в точку 2 зеленой синусоиды, затем ещё опустится до точки 3 на синей синусоиде. Заметьте: при этом горб волны переместится на четверть длины волны (красная синусоида перейдет в синюю). Точка 5 при этом поднимется до положения точки 7 (пройдя через точку 6). Движение в сечении 123 продолжится, – уровень «воды» будет понижаться до тех пор, пока не дойдет до самой низкой уровня синусоиды – точки 4 (при этом в сечении 567 уровень «воды» вернется до положения 5). После этого в сечении 1234 начнется подъем уровня вплоть до начальной точки 1, а в сечении 5678 уровень опустится до положения точки 8, а затем вернется в положение 5. И далее всё повторится. И не раз. На движение уровня от наивысшей точки до самой низшей и обратно уйдет время T , называемое периодом колебаний. Из рис. 3 легко понять, что за это время вершина горба сместится на расстояние, равное длине волны λ ; новая красная синусоида совпадет с первоначальной красной.

Фазовой скоростью волны называют отношение
$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2)$$

Во избежание недоразумений скажем, что реальное движение частиц воды в волне на поверхности – это не просто подъёмы и опускания частиц воды [6].

Как уже говорилось [1], световые волны (электромагнитные волны видимого человеком диапазона) характеризуются длинами волн (в вакууме) от примерно 0,4 мкм (фиолетовый свет) до 0,8 мкм (красный свет). Это очень маленькая часть бесконечно большого набора длин электромагнитных волн. Рентгеновские лучи характеризуются,

например, длинами волн порядка межатомных расстояний в твердых телах (порядка 10^{-10} м = 0,1 нм). Излучение, используемое для связи мобильных телефонов, имеет длины волн порядка дециметров.

Периоды колебаний в световой волне по меркам обыденной жизни чрезвычайно малы. Пола-

гая в формуле (2) скорость света равной скорости света в вакууме $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с, получаем для периодов колебаний значение порядка 10^{-15} с, а для частот колебаний (числа колебаний за одну секунду) $\nu = 1/T$ примерно $4 \cdot 10^{14}$ Гц для красного света и $0,8 \cdot 10^{15}$ Гц для фиолетового света.

6. Закон преломления света Снеллиуса – Декарта

При падении света на прозрачные среды (на стекло, воду и др.) лишь незначительная часть света (часть его энергии) отражается от границы среды – большая часть проходит в среду. При падении света перпендикулярно на стеклянную пластинку прошедшая часть энергии может достигать 95%, а для воды – 98%. При скользящем падении отражение ещё меньше. Но всё же отражение света практически всегда имеет место. Исключение – отражение специально подготовленного (поляризованного) света при падении его на поверхность под так называемым углом Брюстера.

В дальнейшем мы сосредоточим свое внимание на прошедшей в среду (преломлённой) волне (не забывая, конечно, о волне отражённой). Пусть плоская поверхность $EPQR$ разделяет две прозрачные среды с разными показателями преломления, одна из которых (1) находится выше этой плоскости, а другая (2) – ниже неё (рис. 4). Пусть луч света AO падает из среды 1 на плоскость $EPQR$. В точке O плоскости произойдёт частичное отражение света (луч OC) и частичное преломление, то есть прохождение света в среду 2 (луч OB).

Для отражённого луча будет

справедлив закон отражения: 1) отражённый луч OC всегда лежит в плоскости падения $KLMN$; 2) угол отражения равен углу падения (рис. 4).

Преломлённый луч, тоже не выйдет за пределы плоскости падения (рис. 4). С углом, под которым пойдёт преломлённый луч, – сложнее. Для одной и той же пары сред при разных углах падения углы преломления оказываются сложным образом зависящими от углов падения. Настолько сложным, что древние греки, преуспевшие во многом, не смогли обнаружить правильной закономерности. Измерением углов преломления света при переходе его из воздуха

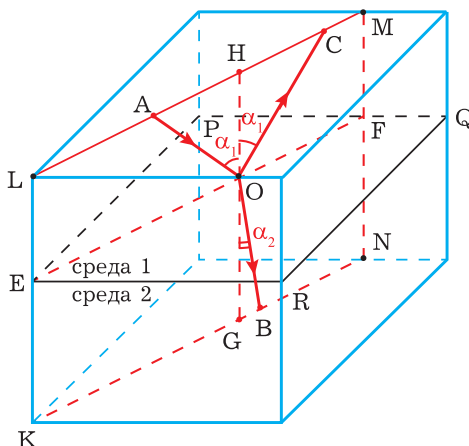


Рис. 4

в воду занимался древнегреческий астроном и оптик **Клавдий Птолемей** (ок. 100 – ок. 170 н.э.). Его экс-

периментальные данные сведены во вторую строчку следующей таблицы [7]:

$\alpha_1, ^\circ$	10	20	30	40	50	60	70	80
$\alpha_2, ^\circ$ по Птолемею	7,5	15	22	29	35	40,5	45	47,5
α_1/α_2	1,33	1,33	1,36	1,38	1,43	1,48	1,56	1,68
$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$	1,33	1,32	1,33	1,33	1,34	1,33	1,33	1,34

Лишь при малых углах можно усмотреть закономерность

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{10}{7,5} = \frac{4}{3} = \frac{20}{15} = \frac{\alpha'_1}{\alpha'_2}.$$

При больших углах эта закономерность исчезает.

Закономерность

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha'_2} = \text{const},$$

которая видна из последней строчки таблицы, была найдена в 1621 г. нидерландцем **Снеллом** (по латыни – **Снеллиусом**) (1580–1626). Его работа, к сожалению, не была опубликована при жизни ученого. Об этой закономерности впервые узнали в 1637 г. из работы француза **Рене Декарта** (1596–1650). Историками науки не доказано, знал ли Декарт о работе Снелла или нет.

При одном и том же угле падения для разных пар веществ углы преломления будут разными – всё зависит от абсолютных показателей преломления каждого из веществ.

Современная формулировка **закона преломления света** такова: 1) преломлённый луч лежит в плоскости падения, 2) синусы угла падения и угла преломления обратно пропорциональны показателям пре-

ломления $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$, или иначе

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2. \quad (3)$$

Трудно сказать, почему античные учёные не смогли догадаться до сравнительно простой для них закономерности

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha'_2} = \text{const}.$$

Конечно, у них ещё не было понятия синуса (его ввели индийские учёные после IV в. н.э.), но у них были некие аналоги этого понятия. Порой древние греки выводили соотношения, эквивалентные очень сложным тригонометрическим формулам. Например, Аристарх (III в. до н.э.) фактически пользовался формулой по-

$$\text{ловинного угла } \sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}.$$

С учётом связи (1) показателя преломления со скоростью света в среде, соотношение (3) можно записать через скорости света в разных средах:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3')$$

В таком виде закон преломления света смог доказать с **точки зрения волновой теории** голландец Христиан Гюйгенс (1629–1695) в своем «Трактате о свете» (1678). Он же с тех же волновых позиций объяснил и закон отражения света. Последний был понятен учёным и с корпускулярной точки зрения. А вот закон преломления света корпускулярная теория не

смогла объяснить: некое доказательство предложил Декарт, но ему пришлось сделать предположение, что, например, в воде свет распространяется быстрее, чем в воздухе, что, как выяснилось впоследствии, неверно.

На самом деле, Гюйгенсу удалось в своем трактате с позиций волновой теории объяснить еще многое, например, очень непростое явление

двойного *лучепреломления* в кристалле исландского шпата.

О преломлении скажем ещё, что при переходе из одной среды в другую **частота света** (величина $\nu = 1/T$, где T – период колебаний (см. формулу (2)) **остаётся неизменной**. Меняется, однако, длина волны, так как изменяется скорость распространения света.

7. Полное внутреннее отражение

Формула (3) содержит следующий сюрприз. Пусть луч света переходит из среды 1 в среду 2, причём, показатель преломления $n_1 > n_2$. В этом случае говорят, что *свет переходит из оптически более плотной среды в среду менее оптически плотную* (например, из воды в воздух). По формуле (3) имеем:

$$\sin \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha_1, \text{ причём } \frac{n_1}{n_2} > 1. \text{ При}$$

увеличении угла падения α_1 будет расти и угол преломления α_2 , – да так расти, что при некотором значении угла α_1 синус угла α_2 станет равным единице, то есть сам угол станет прямым углом (90°): преломлённый луч будет скользить вдоль поверхности. А что будет при дальнейшем увеличении угла α_1 ? По формуле

$$\sin \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha_1 \text{ синус угла } \alpha_2 \text{ станет}$$

больше единицы при $\sin \alpha_1 > \frac{n_2}{n_1}$. Но

синус угла α_2 не может быть больше единицы. Что видят физики в эксперименте в этом случае? Иногда говорят, что при этом будет только отраженный луч (о нём мы пока молчали, но ранее подчёркивали, что он всегда есть). Отражённый луч действительно видят. Практически только его. Не сразу рассмотрели, что кое-что (некое электромагнитное поле, хотя и не совсем волна) проникает и во вторую среду. Мы не будем здесь говорить об этом подробнее. Интересующиеся могут обратиться к книге [8].

Полному внутреннему отражению посвящена отдельная лабораторная работа в нашей школе, о чем будет рассказано в статье чуть позже.

8. Принцип Ферма и закон преломления света

Ранее в п. 4 [1] было сказано о важном обобщении принципа наименьшего пути Герона при отражении света, которое сделал француз Ферма.

Предположим, что свет переходит из среды 1 с меньшим показателем преломления в среду 2 с большим показателем преломления. Это

значит, что в 1-й среде скорость света больше, чем во 2-й: $v_1 > v_2$. При пересечении границы сред в точке В луч изменит направление примерно так, как показано на рис. 5. Считаем, что выполняется закон преломления

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Рассмотрим какую-нибудь точку

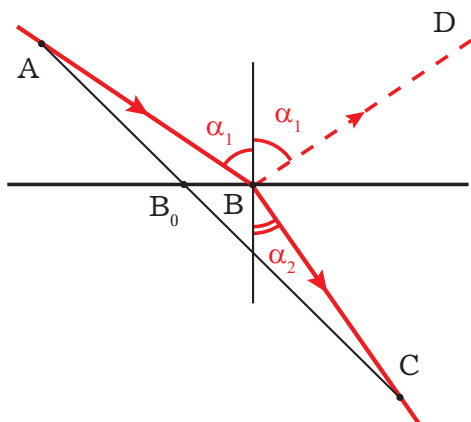


Рис. 5

А на падающем луче и какую-нибудь точку C на преломлённом луче (отражённым лучом не интересуемся). Соединим эти две точки отрезком прямой AC (B_0 – точка пересечения прямой AC с границей раздела сред). В треугольнике ABC сумма длин сторон $AB+BC$ больше стороны AC .

Итак, ясно, что длина истинного пути луча – не самая короткая из всех возможных: прямой путь AC явно короче.

Всё хитрее с **временами**, затрачиваемыми светом на прохождение истинного пути ABC и на прохождение прямого пути AB_0C (гипотетического). Оказывается (это и составляет содержание принципа Ферма), что **время движения по истинному пути меньше, чем по любому гипотетическому**. Это можно доказать строго математически средствами высшей математики (с применением производной [3]). Смысл полученного можно понять: в случае гипотетического пути AB_0C свет слишком малый участок AB_0 (меньший, чем AB) двигался с большой скоростью v_1 и слишком большой путь B_0C (большой, чем BC) двигался с меньшей скоростью v_2 .

9. Обратимость световых лучей

В заключение скажем еще об одном важном свойстве световых лучей, которое носит название **обратимости световых лучей** [9]: *если при выходе светового луча из любой системы преломляющих и отражающих сред заставить световой луч на последнем этапе отразиться точно назад, то он пройдет всю систему в обратном направлении и вернется к своему источнику*. (Маленькое уточне-

ние: в точке B рис. 5 луч все же отразится вниз, а не по направлению BD .) Мы не всегда задумываемся об этом свойстве световых лучей, просто привыкнув к нему. Но именно благодаря ему мы, например, видим глаза человека, который видит в это самое мгновение наши глаза: свет от нашего глаза к чужому и свет от чужого глаза к нашему идет по одному и тому же пути, но в разных направлениях.

Заключение

Не весь изложенный в статье материал одинаково подробно обсуждался с учащимися нашей школы, – что-то лишь с наиболее подготовленными из них (например, принцип Ферма) и не обязательно на

одном занятии. Всего Оптике было отведено 4 лабораторных занятия (включая две сдачи работ, то есть два обсуждения результатов экспериментов) плюс четыре отдельных «теоретических» занятия, из

которых только первое было лекцией. На трех остальных разбиралось много задач. В настоящей статье и в [1] эти задачи опущены, чтобы не было перебора материала. В следующих статьях, посвящённых лабо-

раторным работам (о прохождении света через плоскопараллельную пластинку (1), о преломлении света в призме (2) и о полном внутреннем отражении (3)), найдётся место и для задач.

Литература

1. Лукьянов А.А. Оптика в 8 классе Олимпиадной школы МФТИ. Теоретическое введение. Часть 1 // Потенциал, 2019, № ..., с. ...-....
2. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики; см. Эйнштейн А. Собрание научных трудов, в 4-х томах, т. IV. – М.: Наука, 1967. – 600 с. (стр. 415 «Скорость света»)
3. Тарасов Л.В., Тарасова А.Н. Беседы о преломлении света. – М.: Наука, 1982. – 176 с. (Б-чка «Квант». Вып. 18) (стр. 15)
4. Воронов В.К., Подоплелов Ф.В. Современная физика. – М.: КомКнига. 2005. – 512 с. (§1.2. Конденсация Бозе – Эйнштейна, стр. 20–24)
5. Белotelов В.И., Звездин А.К. Фотонные кристаллы и другие материалы. – М.: Бюро Квантум, 2006. – 144 с. (Б-чка «Квант». Вып. 94. Приложение к журналу «Квант» № 2/2006)
6. Кадомцев Б.Б., Рыдник В.И. Волны вокруг нас. – М.: Знание, 1981. – 152 с.
7. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики: С древнейших времен до конца XVIII века. – М.: КомКнига, 2007. – 352 с. (стр.80)
8. Ландсберг Г.С. Оптика. – 5-е изд. – М.: Наука, 1976. – 928 с. (стр. 486-488).
9. Элементарный учебник физики, в 3-х томах /Под ред. Ландсберга Г.С., т. III. Колебания, волны, оптика, строение атома – 6-е изд. – М.: Наука, 1970. – 640 с.