



Лукьянов Андрей Александрович

*Кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий инженер Лаборатории
по работе с одаренными детьми МФТИ.*

ОПТИКА в 8 классе Олимпиадной школы МФТИ. Теоретическое введение. Часть 1

Рассказано об основных положениях геометрической оптики, но сначала – коротко о том, что такое свет вообще, затем – о законе прямолинейного распространения света и законе отражения. (О законе преломления – в следующей части статьи). Коротко затронуты вопросы истории оптики.

Сегодня мы продолжим разговор о работе Олимпиадной школы по экспериментальной физике при МФТИ. Кто-то из вас, вероятно, знаком с нашей школой в Климентовском переулке Москвы. Если нет, о её работе можно прочитать на сайте <http://edu-homelab.ru>.

Речь пойдёт об Оптике в 8 классе нашей школы. Большинство лабораторных работ по механике, теплоте и электричеству были подробно описаны в серии статей, опубликованных автором в 2014–2017 г.г. в журнале «Потенциал». На их основе в 2018 г. автором была написана книга [1]. К сожалению, в ней совсем не вошла оптика. Наконец, руки дошли и до неё.

«Оптика – самое тёмное место в физике». Не помню автора этой шутки (цитирую мысль, а не автора). Смысл шутки понятен всем, кто преподавал физику. Оптика в школьном курсе – раздел, можно сказать, многострадальный. В 8 классе на неё не находится нужного количества времени по «естественной» причине – конец учебного года. К сожалению, и в следующий класс оптика часто остаётся «младшей сестрёнкой» «более важных» механики, молекулярной физики (с термодинамикой) и электричества (с магнетизмом).

Увы, и наша Олимпиадная школа не чересчур преуспела в преподавании оптики. О причине, мож-

но считать, сказано – учебный год в нашей Школе заканчивается в конце апреля, когда в большинстве обычных школ (откуда и приходят к нам учащиеся) к изучению Оптики ещё не успевают всерьёз приступить. О каких уж олимпиадных задачах рассказывать ребятам?!

По этой причине проведению лабораторных работ у нас в Школе предшествует **теоретическое**

1. Что такое свет?

О свете все мы узнаём с самого раннего детства. Маленький ребёнок уже понимает, что с заходом солнца, наступает темнота, однако фонарик или лампочка в квартире снова делают предметы видимыми. Каждый ещё в детстве наблюдал лучи света, пробивающиеся сквозь листву деревьев или через щели в шторах. Многие могли видеть и луч прожектора, например, маяка. Даже малые дети понимают, что если телевизор загородить чем-то непрозрачным (например, стеной, выйдя в соседнюю комнату), то мы перестанем видеть телевизор, хотя он при этом не исчезнет вовсе: мы слышим, что он работает, а если убрать загородку, телевизор вновь окажется на своем месте. (Только самые маленькие дети считают, что если закрыть глаза, то не только они не будут ничего видеть, но и их тоже перестанут видеть другие. ☺)

Свет нам даёт разнообразные сведения об окружающих предметах. Благодаря зрению (т.е. восприятию света) мы получаем от 80% до 90% информации. Но что такое сам свет? Оказывается, это – не простой вопрос даже для самых больших ученых в мире.

введение. Школьники должны отдавать себе отчёт в том, о чем идёт речь и какие величины они измеряют. С теоретического введения **для тех, кто впервые знакомится с оптикой**, начнём и мы. Изложенное далее – это материал с «перебором». Некоторые вопросы излагались не на одном лишь первом, вводном, занятии, но были «разбросаны» по разным занятиям.

Люди давно задавали себе вопрос, что такое свет. Этим интересовались ещё древние греки 2,5 тысячи лет назад. Римский поэт **Тит Лукреций Кар** (ок. 95 – ок. 55 до н.э.) написал большую поэму «О природе вещей», в которой подвёл итог размышлений древних о свете так:

*Прежде всего, от вещей
всевозможных, какие мы видим,
Необходимо должны истекать
и лететь, рассыпаясь,
Тельца, которые бьют по глазам,
вызывая в них зренье.*

Итак, свет, по мнению Лукреция, – это поток неких частиц (физики говорят – **корпускул**). Древними учёными не было это доказано; была лишь высказана гипотеза, предположение. Никаких корпускул света никто предъявить не мог. Тем не менее, нужна была какая-то модель света, ведь Физика – это всегда создание неких *моделей* Мира. Итак, исторически первой в физике была **корпускулярная модель света**.

Альтернативой ей стала **волновая теория света**, появившаяся спустя почти два тысячелетия.

Сторонники её видели сходство в звуковых и световых явлениях, а про звук люди уже знали, что это – волна: звук представляет собой волновой процесс периодических сжатий и разрежений в разных местах, например, воздуха (если речь о звуке в воздухе).

Последовательными сторонником волновых представлений о свете были англичанин **Роберт Гук** (1635–1703) и нидерландский физик **Христиан Гюйгенс** (1629–1695). Волновой теории того времени далеко не всё удалось объяснить в оптике. А главное – было непонятно, *какой именно волновой процесс происходит, что колеблется в световой волне*. Когда мы видим, например, волну на поверхности воды, мы понимаем, что в колебательном движении участвуют частицы (молекулы) воды: вода в разных местах то поднимается, то опускается (на самом деле, движение частиц воды более сложное). В случае звука тоже было все более или менее понятно. В волновой теории света приходилось делать предположения о существовании некоей гипотетической светоносной среды – эфира, волны в котором якобы и представляют собой свет. Считалось, что эта среда каким-то образом проникает во все тела – стекло, прозрачные жидкости, – по которым распространяется свет. Этой среды однако никто не мог обнаружить.

Часто считают, что англичанин **Исаак Ньютон** (1643–1727) был сторонником корпускулярной теории света. Он – один из создателей классической механики, но много с успехом размышлял и о других явлениях, в частности, о свете. Размышлял и ставил опыты. Так вот,

его представления о свете были сложными, не чисто корпускулярными. О свете он выражался очень осторожно, говоря, что он – противник гипотез. И полагал *неприемлемой лишь чисто волновую* теорию света [2].

Несмотря на критику со стороны Ньютона, волновая теория света успешно развивалась, например, в трудах английского и французского учёных – **Томаса Юнга** (1773–1829) и **Жана Огюстена Френеля** (1788–1827). Очень многие оптические явления волновая теория смогла объяснить и даже предсказать (чего не скажешь о корпускулярной теории). Именно после трудов названных учёных в науке утвердилось представление о том, что свет – это волна ... Пусть, даже непонятно *чего!*

Ответа на вопрос, что за *волновой процесс* представляет собой свет, пришлось ждать до середины XIX столетия, когда английский физик **Джеймс Клерк Максвелл** (1831–1879) доказал, что в световой волне колеблются напряженности электрического и магнитного полей (отсюда название «электромагнитные волны»).

Старшеклассники об этом знают. Восьмиклассникам приходится, увы, лишь обещать, что чуть позже им объяснят, что представляют собой эти напряженности.

На самом деле, ещё чуть позже они узнают, что и волновая теория света не всё объяснила. Для понимания так называемого фотоэффекта (вырывания из металлов электронов под действием света) **Альберту Эйнштейну** (1879–1955) в 1905 году пришлось в некотором смысле вернуться к корпускуляр-

ной теории света. Это был непростой шаг. После трудов Максвелла, казалось, начался триумф волновой теории света (и вообще электромагнитных явлений). И вдруг – снова корпускулы! Эйнштейн сознавал, что, например, интерференцию и дифракцию можно объяснить лишь на основе волновой (а не корпускулярной) теории света. С другой стороны, волновая теория никак не объясняла фотоэффект (давала неправильные предсказания). Можно сказать, что ситуация с 1905 года не слишком изменилась и до наших дней: одни оптические явления объясняет волновая теория света, другие – корпускулярная. Возник даже термин **корпускулярно-волновой дуализм** (двойственность).

В общем, в утешение 8-классникам скажем, чтобы они не слишком комплексовали из-за того, что не знают, *что такое свет*. Не знают **до конца (!)** что это такое и очень большие учёные. Лауреат Нобелевской премии за создание квантовой теории света **Ричард Фейнман** (1918–1988) в своей книге «КЭД – странная теория света и вещества»

(КЭД – квантовая электродинамика) пишет [3]:

*«То, о чём я собираюсь вам рассказывать, студенты-физики изучают на третьем или четвертом курсе – и вы думаете, что я собираюсь это объяснить так, чтобы вы всё поняли? Нет, вы не сможете этого понять. ... Моя задача – убедить вас **не** отворачиваться из-за того, что вы этого не понимаете. Дело в том, что мои студенты-физики тоже этого не понимают. Поэтому что **я сам** этого не понимаю. Никто не понимает.»*

Не надо, разумеется, думать, что физики совсем уж ничего не знают о свете. Знают и понимают очень много. Иначе бы они не смогли построить свои сверхмощные телескопы и не увидели бы в них галактики, которые существовали миллионы и даже миллиарды лет до наших дней. А в микроскоп смогли рассмотреть отдельные атомы поверхностей металлов. Не было бы и никаких лазеров и светодиодов. Да и у вас бы не работали, например, фотоаппараты (фотоаппарат – это очень непростое устройство).

2. Энергия и масса света

Кроме того, что свет несёт нам информацию о мире, он несёт ещё и энергию. Основной источник энергии на Земле – Солнце. Находится оно далеко от Земли – на расстоянии примерно $R_C \approx 150$ млн. км (это примерно в 110 раз больше диаметра Солнца, который в свою очередь приблизительно в 110 раз больше диаметра Земли). Если представить Солнце в виде апельсина размером 10 см, то Землю нужно представить маковкой в 1 мм, расположенной на расстоянии 10 м от апельсина.

Количество энергии, поступающей от Солнца в форме электромагнитного излучения на 1 м^2 земной поверхности перпендикулярно ей за 1 с (без учёта отражения от атмосферы и поглощения в ней) приблизительно равно 1400 Дж. Если сфокусировать все эти 1,4 кДж на площадь, как у конфорки электроплиты, то получим как раз ту мощность, которая имеет одна бытовая конфорка. Вполне можно варить суп! Итак, энергия, идущая от Солнца, совсем не мала. Все мы это,

безусловно, знаем и без вычислений: находиться в солнечный летний день в тенистой беседке или на металлической крыше – совсем не одно и то же.

С другой стороны никто и никогда не ощущал вместе с приходом света от Солнца ещё и притока мас-

сы (но, например, дуновение ветерка ощущаем!). Масса, переносимая светом, действительно, крайне мала. На всю поверхность Земли свет от Солнца приносит за секунду менее 2 кг. Свет, если ему и приписывать массу, – это чрезвычайно лёгкая субстанция.

3. Угловой размер Солнца и прямолинейное распространение света

Видимый диаметр Солнца равен примерно $D_C \approx 1,4$ млн. км (вопрос о резких границах Солнца оставляем в стороне). Это – очень не маленькая величина: орбита Луны, при обращении её вокруг Земли, могла бы поместиться внутри Солнца. Только из-за очень большого удаления Солнца от Земли его угловой размер невелик: $\phi \approx \frac{D_C}{R_C} \approx \frac{1,4}{150} \approx 0,009$ радиан $\approx 0,5^\circ$ (рис. 1). Этот рисунок очень «карикатурно» передает геометрические размеры: угловой диаметр «Солнца» на нем составляет примерно $7,6^\circ$, то есть приблизительно в 15 раз больше реального углового размера Солнца.

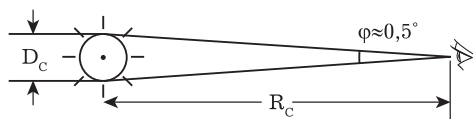


Рис. 1

Солнце можно полностью заслонить монетой достоинством 10 рублей (диаметром 22 мм), расположив монету между глазом и Солнцем на расстоянии $l \approx 2,4$ м от глаза (рис. 2).

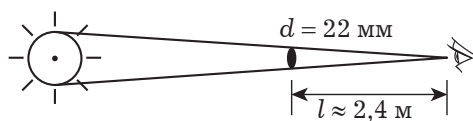


Рис. 2

Многим кажется, что это расстояние будет много меньше (скажем, порядка длины руки). Легко, однако, проверить пропорцию $\frac{D_C}{R_C} \approx \frac{d}{l} \approx 110$, которая следует из подобия соответствующих треугольников. (Подумайте, каких именно треугольников на рис. 2)

Впрочем, какое отношение к свету имеют треугольники и их подобие? Причём здесь вообще геометрия? Какая связь с физикой? Дело в том, что лучи света, идущего от Солнца (и не только от него), представляют собой прямые линии. Прямолинейные лучи света каждый из вас не раз наблюдал, например, когда свет от Солнца пробивался сквозь тучи (рис. 3) или сквозь листву деревьев, или сквозь оконную занаве-



Рис. 3

ску. Многие учащиеся, наверняка, пользовались и лазерной указкой. (На лабораторных работах нашей Школы это обязательно придётся сделать!) Даже просто образование резкой тени от предмета связано с прямолинейностью хода лучей.

Об этом знали ещё древние греки. Закон прямолинейного распространения света чётко сформулировал **Евклид** (III в. до н.э.), знаменитый основоположник геометрии (хотя это

некоторыми историками оспаривается; может быть, и однофамилец).

Учёт преломления света в атмосфере, а также явлений интерференции и дифракции (прохождение света через очень малые отверстия) несколько усложняют картину. Но рассмотрение этих тонких эффектов отложим до «лучших времён». Оставим в стороне и ещё более тонкие эффекты искривления света в гравитационном поле.

4. Закон отражения света и принцип наикратчайшего пути (времени распространения)

Евклид первым чётко сформулировал закон отражения света. Пусть узкий пучок света AO (например, луч лазерной указки; неважно, что у Евклида не было такой) падает на зеркально гладкую поверхность xy (рис. 4). Через луч AO можно провести бесконечно много плоскостей. Однако две прямые AO и Oz (перпендикуляр к плоскости xy в точке O) определяют уже **одну** единственную плоскость xz . Ее называют *плоскостью падения*.

Экспериментальный факт, вы-

ражающий **закон отражения света**, состоит в том, что

- 1) отражённый луч OB лежит в плоскости падения;
- 2) угол падения равен углу отражения: то есть угол между падающим лучом AO и нормалью (перпендикуляром) Oz к поверхности xy равен углу между отражённым лучом OB и той же нормалью.

Часто забывают про то, что отражённый и падающий лучи «должны» лежать в одной плоскости. Кто-то мог бы допустить, что отражённый свет пойдёт, например, по направлению OC (рис. 4) или в какой-то ещё плоскости. Такого никогда не наблюдали для гладких отражающих поверхностей. Это может удивлять, но это – экспериментальный факт.

Почему это могло бы удивить? Дело в том, что отражённый свет – это свет, идущий от множества (чудовищно большого числа) частиц поверхности. Как им удаётся столь согласованно посылать свет – 1) именно в плоскости падения и 2) как раз под «нужным» углом – вопрос не такой простой. (Об отражении от шероховатой поверхности см. далее.)

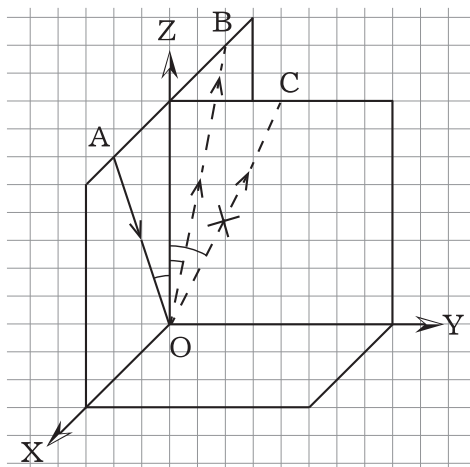


Рис. 4

Древние греки знали об отражении света ещё и следующее удивительное свойство. Представим себе, что луч света выходит из точки A (рис. 5), отражается в точке C от гладкой «горизонтальной» плоскости и попадает в точку B . При этом считаем выполненным равенство углов падения и отражения: $\alpha = \beta$.

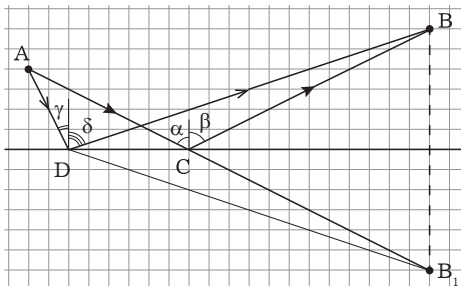


Рис. 5

Теперь пофантазируем. Пусть луч света попал в точку B , отразившись не в точке C , а в какой-то другой точке D . Для неё уже не будет справедливо равенство углов падения и отражения, $\gamma \neq \delta$. Теперь рассчитаем два промежутка времени – которое затратит свет на преодоление 1) суммы расстояний $AC + CB$ и 2) суммы расстояний $AD + DB$. Считаем, что свет (в форме ли частиц или волны – безразлично) движется с постоянной скоростью v по любым путям. Ясно, что надо сравнить суммы двух путей $l = AC + CB$ и $L = AD + DB$.

Сделаем дополнительное построение: отразим в плоскости падения, как в зеркале, точку B ; получим новую точку B_1 . Расстояние CB_1 бу-

дет равно расстоянию CB , поэтому $l = AC + CB = AC + CB_1$.

Нетрудно сообразить (сделайте это самостоятельно), что линия ACB_1 есть прямая (не ломаная!). Ломаной будет линия ADB_1 . Длины ломаных ADB_1 и ADB равны друг другу, так как $DB_1 = DB$, то есть

$$L = AD + DB = AD + DB_1.$$

А теперь обратимся к треугольнику AB_1D . В нем длина стороны AB_1 (равная сумме длин отрезков $AC + CB_1$) меньше суммы двух других сторон $AD + DB_1$, то есть $AC + CB_1 < AD + DB_1$, значит, справедливо неравенство $l < L$.

Это означает, что длина истинного пути (сумма отрезков $AC + CB$) – меньше любых других, гипотетических, путей (имеется в виду: с обязательным отражением от плоскости). Следовательно, время, затрачиваемое светом, чтобы попасть из точки A в точку B для истинного пути – наименьшее из возможных. Древние греки (**Герон Александрийский**, I в. н.э.) рассуждали о расстояниях, но не о временах. В середине XVII века француз **Пьер Ферма** (1601–1665) в 1662 году обобщил принцип *Герона*. В его рассуждениях более важным стало рассуждение о временах (к этому мы ещё вернёмся во 2-й части статьи).

Иногда говорят, что при отражении света луч выбирает наикратчайший путь из точки A в точку B . Это не так: направив свет по направлению луча AO (рис. 4), мы уже не даём ему права выбирать.

5. Почему мы видим предметы? Отражение света от матовой (шероховатой) поверхности

Так почему мы видим предметы? Потому что они излучают свет? Тог-

да почему шкаф мы видим днём или вечером при включённой люстре, но

не видим (практически не видим) ночью без искусственного освещения? Дело в том, что большинство тел излучает очень мало света (и наш глаз просто не в состоянии отреагировать на столь малое его количество). А если шкаф и излучает свет, то не тот, который мы способны видеть (не той длины волны). Солнце излучает немало света, электрическая лампа фонарика и лампа люстры излучают значительно меньше, но достаточно, чтобы мы могли видеть. А платяной шкаф излучает недостаточно! Видим же мы его потому, что он **отражает** солнечный свет или свет от фонарика (лампы люстры).

Но здесь имеется тонкость. Если бы платяной шкаф был целиком **идеально зеркально отражающим**, то, например, узкий пучок света от него мы могли бы и не увидеть. Мы его увидим, только если будем смотреть вдоль отражённого луча (рис. 6).

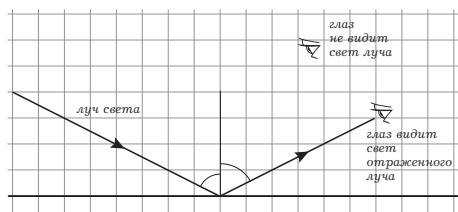


Рис. 6

ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ НИ В КОЕМ СЛУЧАЕ НЕ ДОПУСКАЙТЕ ПОПАДАНИЯ В ГЛАЗА ДАЖЕ ОТРАЖЁННЫХ ЛУЧЕЙ ЛАЗЕРНОЙ УКАЗКИ!

К вопросу о том, почему мы видим со стороны сам луч, например, в воздухе или в воде, мы ещё вернёмся в следующей статье.

Причина, почему мы видим несветящиеся предметы, состоит в том,

что отражение от них происходит в разных местах поверхности «одно-временно» под различными углами. Из-за шероховатости поверхности близко расположенные друг к другу её участки наклонены под сильно разными углами. От каждого участка свет отражается, конечно, с соблюдением закона «угол падения равен углу отражения», но направления лучей, отражённых от разных участков, оказываются несопадающими друг с другом (рис. 7). Причём отражённые лучи будут не только в показанной на рисунке плоскости. Такое отражение называется **диффузным**. Поэтому, если луч света от Солнца упадет на такую, шероховатую, поверхность, этот участок поверхности можно будет наблюдать из разных мест (рис. 7).

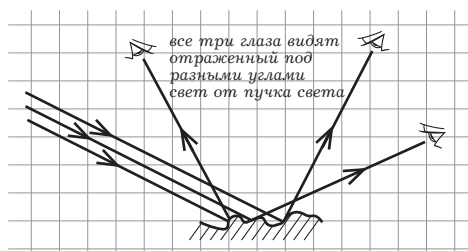


Рис. 7

По причине диффузного отражения мы видим целиком шероховатые поверхности (а их – большинство вокруг нас): в наш глаз одновременно приходит свет, отражённый от разных мест несветя-

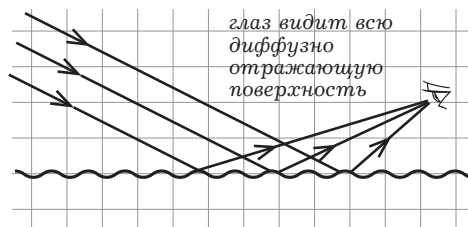


Рис. 8

щегося, но отражающего свет тела (рис. 8). По этой же причине мы ви-

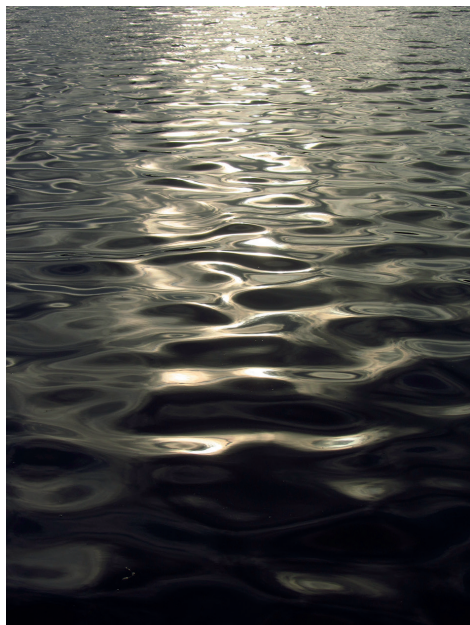


Рис. 9

дим и солнечные и лунные дорожки на водоемах (рис. 9 – 10).



Рис. 10

6. Угловой отражатель (катафот) и секстант

Закон отражения нашел красивое применение в угловом отражателе (катафоте) – примерно таком, как на вашем велосипеде. Если имеются две отражающие плоскости, перпендикулярные друг другу, то, как легко сообразить, взглянув на рис. 11, при падении луча AB на одну из поверхностей он после отражения от неё, а затем от второй плоскости (в точке C) пойдёт затем по направлению CD , параллельно исходному лучу. Если луч света от какой-то машины попал на отражатель вашего велосипеда, то отразится он по направлению именно этой машины, а не какой-нибудь другой, в стороне от нее.

На самом деле в угловом отражателе используются не две, а три взаимно перпендикулярные пло-

скости (даже – множество таких троек плоскостей). Картинку в этом случае нарисовать труднее; труд-

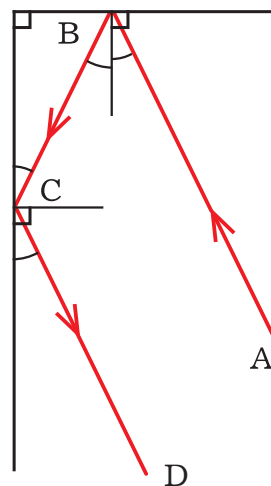


Рис. 11

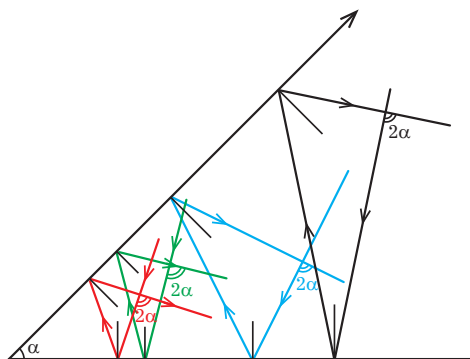


Рис. 12

нее и доказательство, что после последовательного отражения луча от всех трёх плоскостей луч пойдёт обратно исходному лучу. Если вы уже знакомы с векторной алгеброй, в частности – с понятием скалярного произведения векторов, то можете это доказать самостоятельно, либо разобраться в решении задачи 9 заданника [4]

Другое красивое применение закон отражения нашёл в устройстве ещё одного прибора – секстанта. В нём имеются два зеркала, которые образуют друг с другом двугранный угол α . Пусть на одно из них падает луч, лежащий в плоскости, перпендикулярной ребру угла. Неочевидный факт состоит в том, что угол отклонения луча от первоначального направления после отражения от обоих зеркал не зависит от угла падения на первое зеркало и равен 2α (рис. 12). Это важно, например, в условиях корабельной качки – прибор можно держать трясущимися руками. Подробнее – см. [5].

Во 2-й части Теоретического введения (в следующей статье) будет рассказано о скорости света, о показателе преломления и о законе преломления света.

Литература

1. Лукьянов А.А. Экспериментальная физика. 8 класс. Учебно-методическое пособие для учащихся общеобразовательных учреждений. – М.: ООО «Азбука-2000», 2018. – 128 с.
2. Вавилов С.И. Исаак Ньютон. – М.-СПб.: Издательство Академии наук ССР, 1945. – 230 с.
3. Фейнман Р. КЭД – странная теория света и вещества. – М.: Наука, 1988. – 144 с. – (Б-чка «Квант», Вып. 66)
4. Гинзбург В.Л., Левин Л.М., Сивухин Д.В., Четверикова Е.С., Яковлев И.А. Сборник задач по общему курсу физики, т.IV, Оптика – 4-е изд. /Под ред. Сивухина Д.В. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
5. Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. Физика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1979. – 464 с. (стр. 392)