



ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
И КОММУНИКАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОЙ ШКОЛЕ

Капустина Е.В.

# ФИЗИКА

КОНСПЕКТЫ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ

ОПТИЧЕСКИЕ  
ЯВЛЕНИЯ

8

# Урок №3.

## Преломление света.



## 1. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Свет распространяется прямолинейно в любой прозрачной среде, если эта среда однородна. На границе раздела двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, то есть происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет может частично пройти через границу сред, также меняя при этом, как правило, направление распространения. Это явление называют преломлением света. Изменение направления распространения света при переходе через границу раздела двух сред называют преломлением света.

Если опустить в стакан с водой карандаш, ложку или гибкую трубочку, то они кажутся «сломанными» (рис. 1). Это происходит из-за преломления света на границе воздуха с водой..

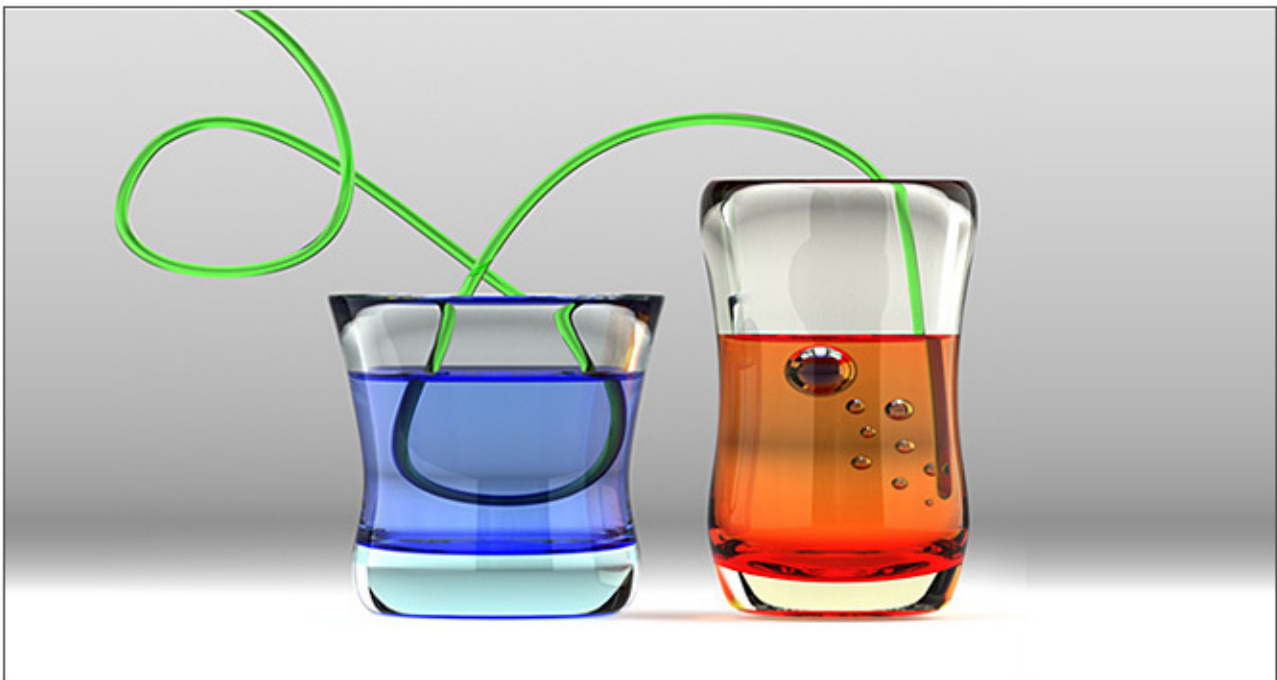


Рис. 1. Преломление света.

Вследствие преломления света объекты на дне водоема кажутся ближе, чем они есть на самом деле, а звезды на небосводе кажутся выше, чем они есть на самом деле. Преломление света в атмосфере Земли приводит к тому, что мы наблюдаем восход Солнца несколько раньше, а закат несколько позже, чем это имело бы место при отсутствии атмосферы. По той же причине вблизи горизонта диск Солнца выглядит заметно сплюснутым вдоль вертикали (рис. 2).

Явление преломления света наблюдается на границе двух прозрачных сред и объясняется разной скоростью распространения света в разных средах.



Рис. 2. Закат Солнца.

Различные среды, пропускающие свет, имеют различную оптическую плотность. Скорость света в них различна. Чем больше оптическая плотность среды, тем меньше в ней скорость света, и тем сильнее она будет преломлять свет, попадающий извне. В вакууме скорость света составляет приблизительно 300000 км/с. Во всех других средах скорость света меньше.

## 2. ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА.

Чтобы сформулировать законы преломления света, рассмотрим рисунок 3 и введем обозначения точек, лучей, углов. Напомним, что под световым лучом мы будем понимать линию, вдоль которой распространяется узкий пучок света.

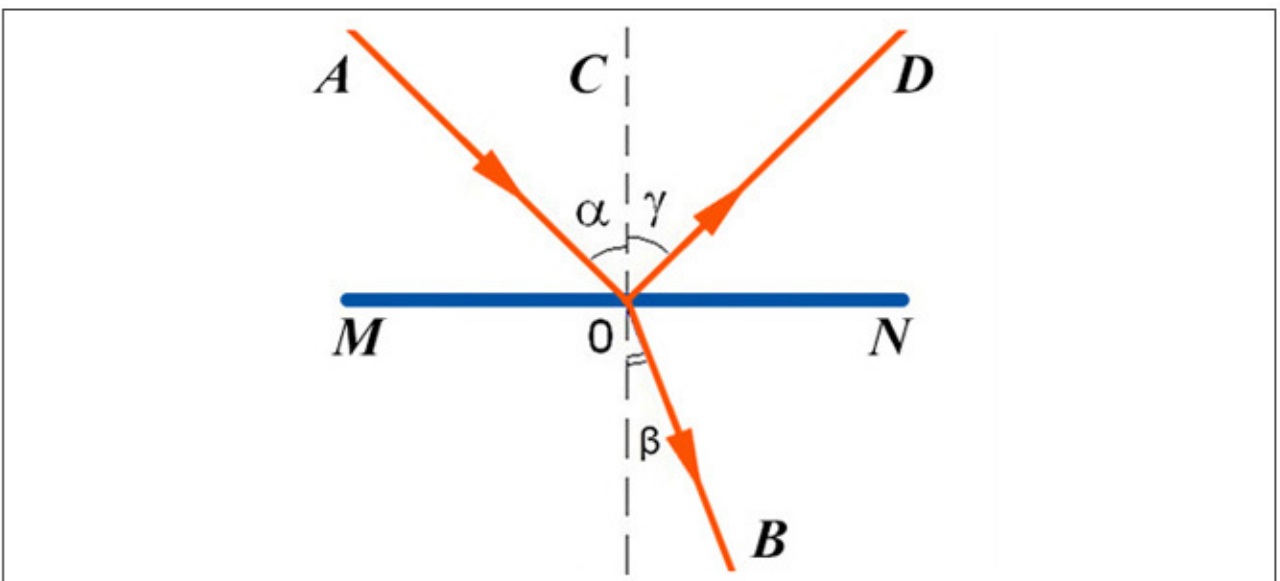


Рис. 3. Отражение и преломление света.

Пусть MN – граница раздела двух прозрачных сред, например, воздуха и воды.

Точка O – точка падения луча AO на границу раздела двух сред MN.

OC – перпендикуляр к границе раздела двух сред.

AO – падающий луч.

BO – преломленный луч.

DO – отраженный луч.

$\alpha$  – угол падения.

$\beta$  – угол преломления.

$\gamma$  – угол отражения.

Угол  $\alpha$  между падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред называют углом падения.

Угол  $\beta$  между преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред называют углом преломления.

**Опытным путем установлены следующие закономерности:**

1) Для одной и той же пары сред угол преломления  $\beta$  тем больше, чем больше угол падения  $\alpha$ .

Это значит, что при увеличении угла падения на границу раздела двух сред увеличивается и угол преломления. Заметим, что речь идет об одном и том же световом луче, который лишь изменяет направление своего движения при переходе из одной среды в другую, а не разделяется на два независимых световых луча.

2) При одинаковом угле падения  $\alpha$  луча света на границу раздела двух сред угол преломления  $\beta$  может иметь разные значения при переходе света в разные среды (вещества).

Это значит, что если свет падает из среды оптически менее плотной в более плотную среду, то угол падения  $\alpha$  будет больше угла преломления  $\beta$ . Преломленный луч оказывается ближе к перпендикуляру («прижимается» к перпендикуляру).

Если же оптическая плотность первой среды больше оптической плотности вещества второй среды, то угол падения  $\alpha$  будет меньше угла преломления  $\beta$ . Преломленный луч оказывается дальше от перпендикуляра («отклоняется» от перпендикуляра).

При изменении угла падения  $\alpha$  угол преломления также будет меняться и угол  $\beta$  (читай пункт 1).



3) При нормальном (под прямым углом) падении луча света на границу раздела двух сред преломление света отсутствует:  $\alpha = \beta = 0^\circ$ .

4) В любых средах проявляется свойство обратимости хода световых лучей: если падающий луч пустить в направлении луча ОВ, то преломленный луч пойдет в направлении луча ОА.

**Сформулируем законы отражения:**

1) Падающий луч ОА, преломлённый луч ОВ и перпендикуляр к границе раздела двух сред ОС, восстановленный в точку О падения луча, лежат в одной плоскости.

2) Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина постоянная для этих двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{2,1}$$

Постоянная величина  $n_{2,1}$  называется **относительным показателем преломления** (показателем преломления второй среды относительно первой). Исследования показали, что эта величина равна отношению скорости света  $v_1$  в первой среде к скорости света  $v_2$  во второй среде:

$$\frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}$$

**Среда, в которой скорость света меньше, называется оптически более плотной средой.**

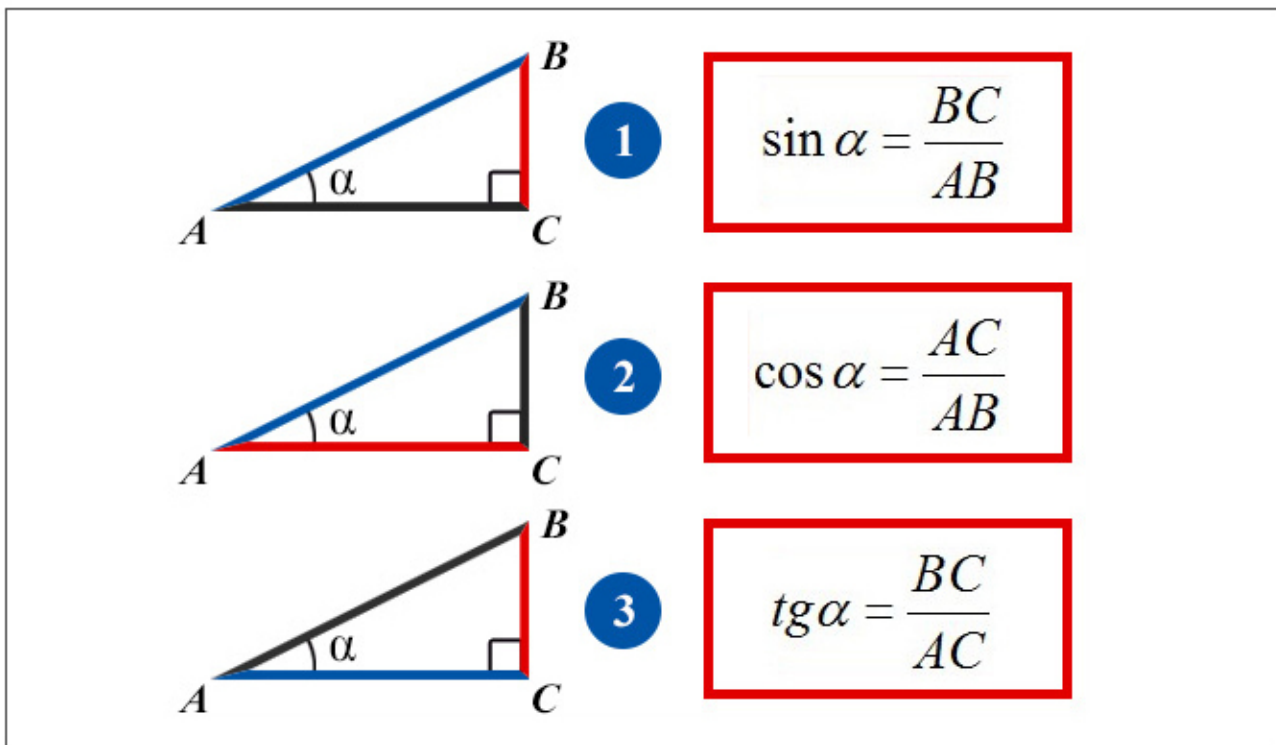
## СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТЕМАТИКИ.

**Соотношение углов и сторон прямоугольного треугольника.**

1. Синусом острого угла прямоугольного треугольника называется отношение противолежащего катета к гипотенузе.

2. Косинусом острого угла прямоугольного треугольника называется отношение прилежащего катета к гипотенузе.

3. Тангенсом острого угла прямоугольного треугольника называется отношение противолежащего катета к прилежащему катету.



Скорость распространения света в воздухе почти не отличается от скорости света в вакууме и равна  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. В любой другой среде свет распространяется с меньшей скоростью. Физической величиной, характеризующей уменьшение скорости распространения света в среде по сравнению со скоростью света в вакууме, является абсолютный показатель преломления среды  $n$ .

**Абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость распространения света в данной среде меньше, чем скорость света в вакууме:**

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

где  $n$  — абсолютный показатель преломления среды,  
 $c$  — скорость света в вакууме,  
 $v$  — скорость света в среде.

**Относительный показатель преломления двух сред  $n_{2,1}$  связан с абсолютными показателями преломления этих сред соотношением:**

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

где  $n_2$  — абсолютный показатель второй среды,  $n_1$  — абсолютный показатель первой среды.

Абсолютный показатель преломления зависит от физической природы среды, в которой распространяется свет, её температуры, плотности, агрегатного состояния и других физических параметров. Для любой среды  $n > 1$ .

Также абсолютный показатель преломления зависит от длины волны светового излучения.

**Таблица 1. Абсолютные показатели преломления света.**

<i>Вещество</i>	<i>n</i>	<i>Вещество</i>	<i>n</i>
Алмаз	2,42	Спирт	1,36
Рубин	1,76	Вода	1,33
Стекло	1,60	Лёд	1,31
Кварц	1,54	Воздух	1,00029

### **ВАЖНО!**

Если абсолютный показатель преломления первой среды меньше, чем абсолютный показатель преломления второй среды, то первая среда имеет меньшую оптическую плотность, чем вторая среда и  $\alpha > \beta$ .

Оптическую плотность среды не стоит путать с плотностью вещества.

## **4. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА**

При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду наблюдается явление **полного отражения** (рис. 4). Угол преломления  $\beta$  в этом случае больше, чем угла падения  $\alpha$ . Падающий луч света на границе раздела двух сред разделяется на два луча: преломленный и отраженный.

По мере увеличения угла падения интенсивность преломлённого луча уменьшается, а отраженного луча увеличивается. При достижении определенного значения угла падения  $\alpha_0$ , преломленный луч не пересекает границу раздела двух сред, а идет вдоль этой границы. Это значит, что угол преломления  $\beta = 90^\circ$ .



Угол падения  $\alpha_0$ , которому соответствует угол преломления  $\beta = 90^\circ$ , называется предельным углом полного отражения.

Когда угол падения  $\alpha > \alpha_0$ , свет не переходит во вторую среду, а лишь отражается от её границы, то есть происходит явление **полного внутреннего отражения**.

Явление, при котором свет, распространяясь в более плотной среде, полностью отражается от границы раздела с менее плотной средой, называется явлением полного отражения.

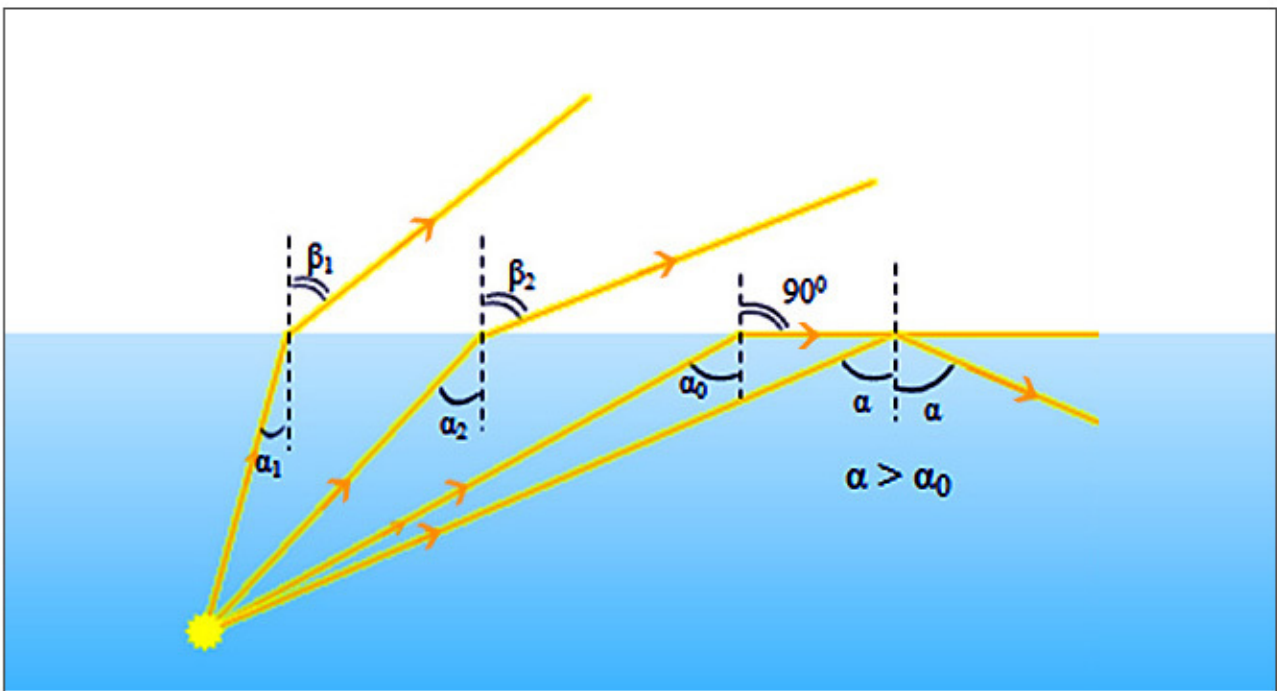


Рис. 4. Полное отражение.

Из закона преломления следует:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

Поскольку  $\sin 90^\circ = 1$ , то  $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$

Если второй средой является воздух (вакуум), то  $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$ , где  $n$  – абсолютный показатель преломления среды, из которой идут световые лучи.

Явление полного отражения света объясняет яркий блеск капель росы (рис. 5), осколков стекла и т. п. Это явление используют, ограняя и шлифуя драгоценные камни. Обрабатываемому камню придают такую форму, чтобы большинство падающих на него лучей отражались от внутренних граней.



*Рис. 5. Блеск капель росы.*

Блеск алмазов, выделяющий их из прочих драгоценных камней, также определяется явлением полного внутреннего отражения. Из-за высокого показателя преломления алмаза оказывается большим и число внутренних отражений, которые претерпевает луч света. При этом многократное отражение светового луча происходит с меньшими потерями энергии по сравнению со стеклом и другими материалами с меньшим показателем преломления (рис. 6).



*Рис. 6. Огранка бриллианта*

Полное внутреннее отражение света можно наблюдать, если смотреть из-под воды на поверхность: при определенных углах на границе раздела наблюдается не внешняя часть (то, что в воздухе), а видно зеркальное отражение объектов, которые находятся в воде (рис. 7).





Рис. 7. Отражение в поверхности раздела вода-воздух при наблюдении из-под воды

Полное отражение используют в волоконной оптике для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — световодов. За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути.

Кабели на базе оптических волокон используются в волоконно-оптической связи, позволяющей передавать информацию на большие расстояния и с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи (рис. 8).

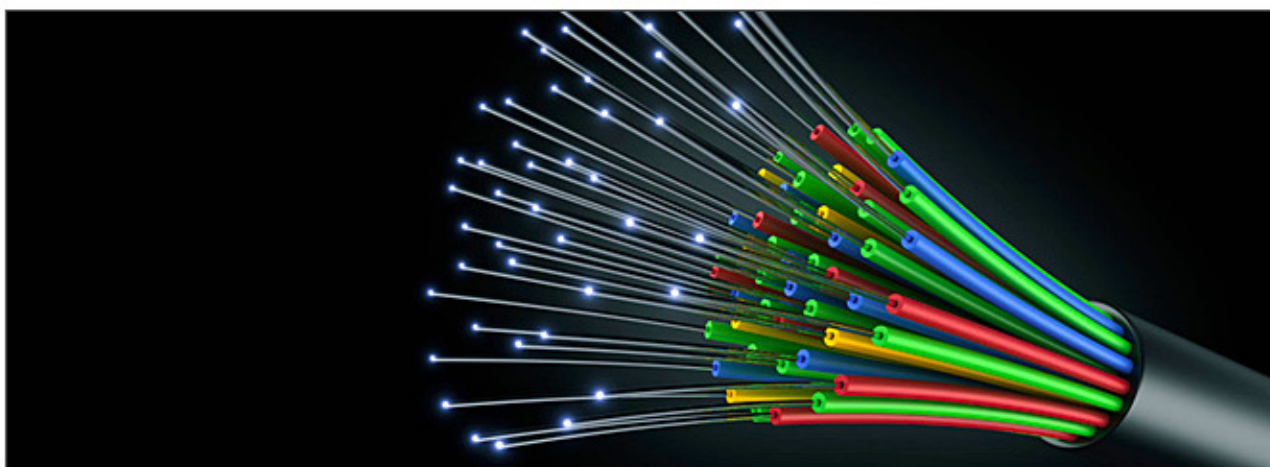


Рис. 8. Оптоволоконный кабель

## 5. СТЕКЛЯННАЯ ПРИЗМА.

Призма — оптический элемент из прозрачного материала (например, оптического стекла) в форме геометрического тела — призмы, имеющий плоские полированные грани, через которые входит и выходит свет.

Оптические призмы являются одним из основных элементов при создании оптических систем и оптических приборов.

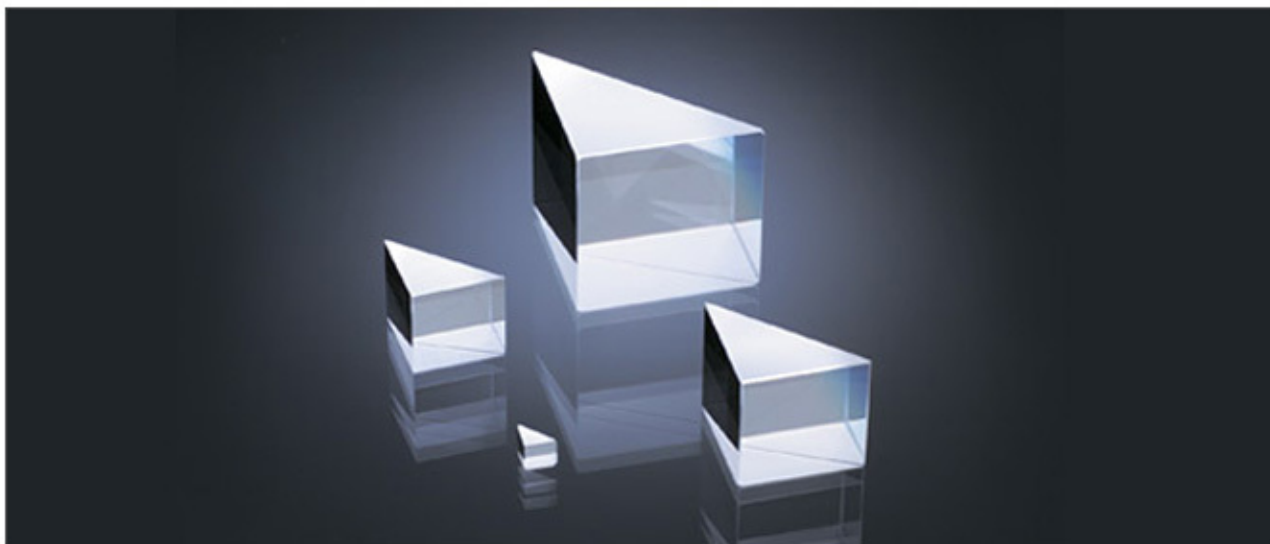
Призмы широко используются в оптических приборах различного назначения, таких как наблюдательные оптические приборы (телескопы, бинокли, микроскопы), оптические приборы для регистрации изображений на электронных приёмниках, сложные многофункциональные оптические приборы.

**Оптические призмы в зависимости от их оптической конструкции функционально позволяют:**

- изменять ход лучей в оптических приборах;
- оборачивать оптические изображения;
- уменьшать габариты оптических систем;
- разделять пучки лучей в оптических системах;
- вращать изображения в оптических системах;
- разлагать белый свет в спектр.

Важнейшей характеристикой призмы является показатель преломления материала, из которого она изготовлена.

Существуют различные виды призм. Простейшим типом призмы является треугольная призма, то есть тело, представляющее собой геометрическую фигуру с двумя треугольными основаниями и тремя боковыми гранями в форме прямоугольников (рис. 9).



*Рис. 9. Стекланные треугольники призмы.*

На рисунке 10 изображено сечение стеклянной треугольной призмы и показано прохождение одноцветного светового луча сквозь неё. Луч проходит сквозь призму, испытывая преломление дважды: первый раз при переходе из воздуха в стекло и второй раз — из стекла в воздух.



Угол  $A$  между преломляющими гранями называется преломляющим углом призмы.

Угол  $\alpha_1$  – угол падения светового луча на первую грань.

Угол  $\beta_1$  – угол преломления светового луча на первой грани.

Угол  $\alpha_2$  – угол падения светового луча на вторую грань.

Угол  $\beta_2$  – угол преломления светового луча на второй грани.

Угол  $\varphi$  между продолжением луча, падающего на призму, и луча, выходящего из призмы, называется углом отклонения луча от начального направления.

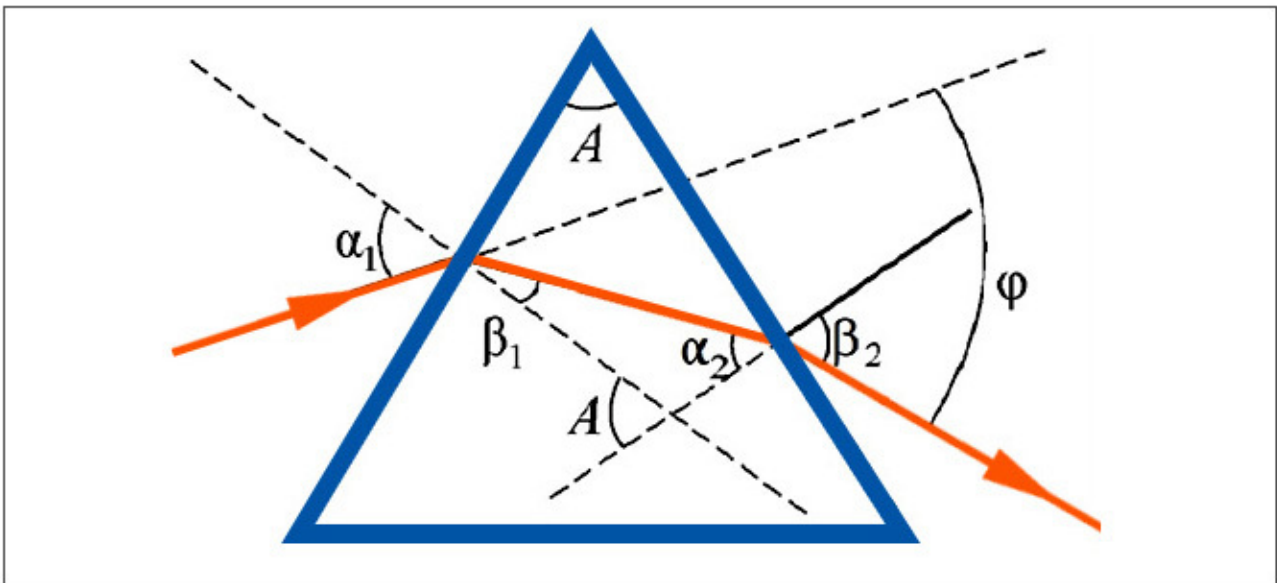


Рис. 10. Ход луча в треугольной призме.

Рассмотрим ход светового луча в этой треугольной призме.

Световой луч падает на грань стеклянной призмы под углом  $\alpha_1$ , проходит сквозь границу раздела воздух-стекло, преломляясь под углом  $\beta_1$ . Так как луч проходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду, то  $\alpha_1 > \beta_1$ .

Затем световой луч падает под углом  $\alpha_2$  на вторую границу раздела двух сред стекло – воздух. После преломления луч выходит из призмы под углом  $\beta_2$ . Так как луч проходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, то  $\alpha_2 < \beta_2$ . **Оба раза луч отклоняется к основанию призмы.**

В современных оптических приборах широко используются призмы полного внутреннего отражения. Их разделяют на поворотные и оборачивающие призмы. Отметим, что предельный угол преломления на границе стекло-воздух равен  $42^\circ$ .



Простая прямоугольная призма полного внутреннего отражения совершает поворот луча на угол  $90^\circ$  и на угол  $180^\circ$ . Все лучи, падающие на ее грани, образуют прямой угол с отраженными лучами. Причем падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости.

Рассмотрим ход лучей сквозь поворотную призму, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник (рис. 11).

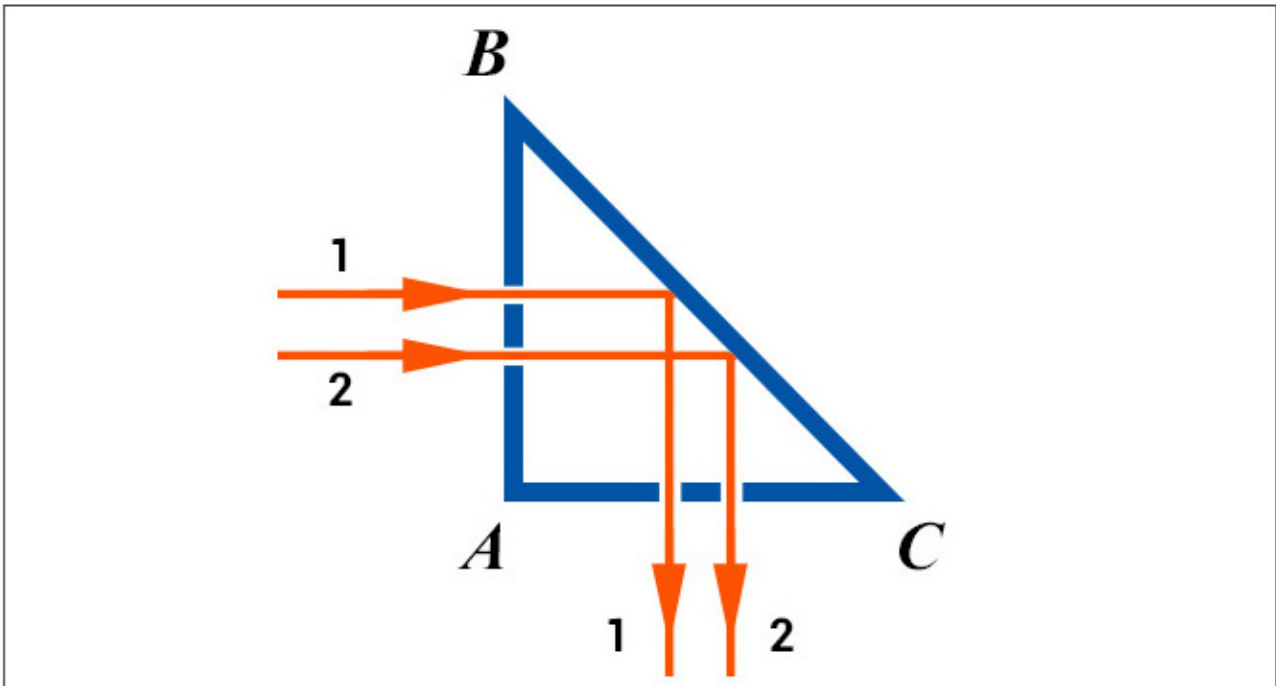


Рис. 11. Поворотная на  $90^\circ$  прямоугольная призма.

Проходя через боковую грань АВ, лучи не изменяют своего направления, так как угол падения равен нулю. На широкой грани ВС лучи полностью отражаются, так как угол падения равен  $45^\circ$  и, следовательно, больше предельного угла полного отражения для стекла, равного  $42^\circ$ . Таким образом, внутри призмы наблюдается однократное внутреннее отражение лучей от грани ВС и изменение направления световых лучей на  $90^\circ$ .

Поворотная на  $90^\circ$  призма предназначена для использования в перископах, в большинстве телескопов. Эта призма позволяет рассматривать объекты, находящиеся на значительной высоте над горизонтом, под гораздо более удобным углом.

На рисунке 12 показан ход лучей сквозь призму, которая является одновременно и поворотной на  $180^\circ$ , и оборачивающей. Внутри призмы световые лучи испытывают двукратное полное отражение: после полного отражения от грани АВ лучи падают на грань ВС, снова полностью отражаются от грани ВС и выходят из призмы по направлению, перпендикулярному широкой грани АС.

При выходе из призмы лучи 1 и 2 меняются местами. Поэтому призму и называют оборачивающей. Такой ход лучей используется, например, в призматических биноклях.

Оборачивающая призма позволяет получить в телескопах-рефракторах, а также в зеркально-линзовых телескопах, правильно ориентированное (незеркальное и неперевернутое) изображение, поэтому ее обычно используют при проведении наблюдений за наземными объектами.

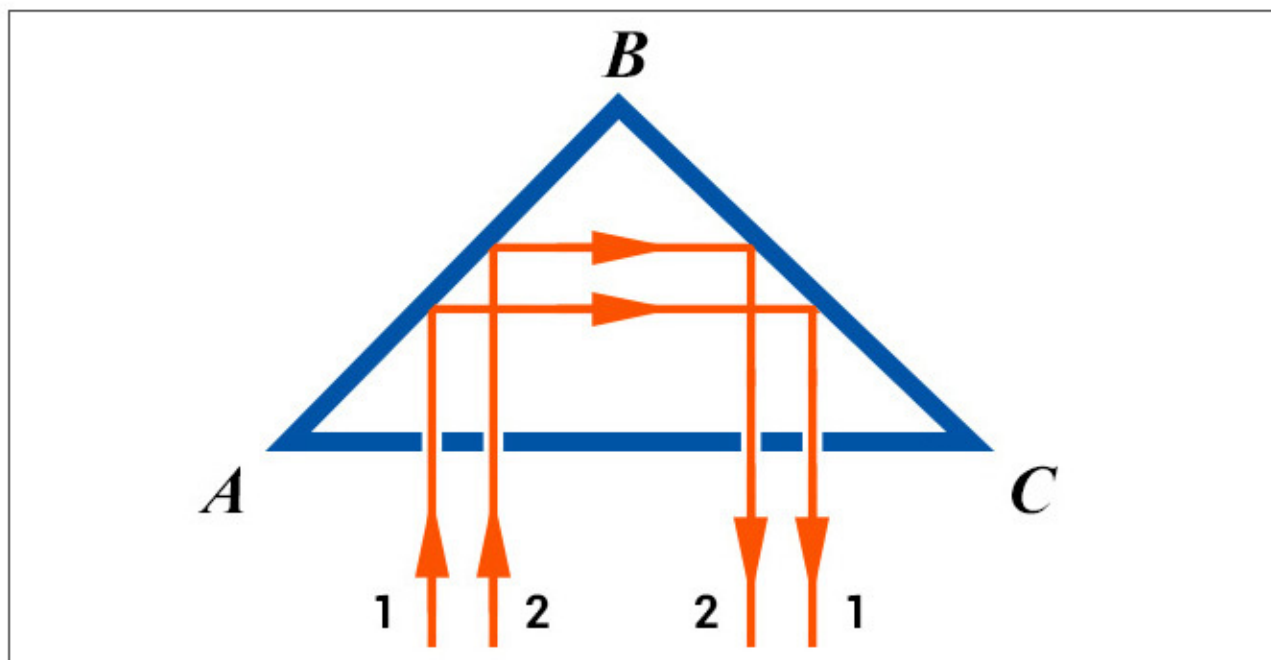


Рис. 12. Поворотная на  $180^\circ$  и оборачивающая прямоугольная призма.

Следует отметить, что действие оптической призмы подобно зеркалу. Одно из преимуществ призмы перед зеркалом заключается в том, что в призме, в отличие от зеркала, отражается почти 100% энергии светового луча и изображение получается ярким.

## 6. МИРАЖ.

Мираж (с французского языка — «видимость») — это оптическое явление в атмосфере, которое представляет собой преломление потоков света на границе между резко различными по плотности и температуре слоями воздуха.

Свет распространяется прямолинейно лишь в однородной среде. На границе раздела двух сред луч света преломляется, то есть несколько отклоняется от первоначального пути. Такой неоднородной средой является, в частности, воздух земной атмосферы: плотность его возрастает у земной поверхности из-за силы тяжести.

Для наблюдателя такое явление, как мираж, заключается в том, что вместе с реально видимым отдалённым объектом (или участком неба) также видно и его отражение в атмосфере.

**Миражи разделяют на:**

- «озёрные» или нижние, видимые под объектом;
- верхние, видимые над объектом;
- боковые.

**Нижний мираж.**

Нижний мираж наблюдается при резком понижении температуры воздуха над перегретой ровной поверхностью, часто пустыней или асфальтированной дорогой. Мнимое изображение неба создаёт при этом иллюзию воды на поверхности. Так, на уходящей вдаль дороге в жаркий летний день видится лужа (рис. 13).



*Рис. 13. «Озёрный мираж».*

**Верхний мираж.**

Верхний мираж наблюдается над холодной земной поверхностью при условии, что температура воздуха повышается с увеличением высоты. Верхние миражи случаются в целом реже, чем нижние, но чаще бывают более стабильными, поскольку холодный воздух не имеет тенденцию двигаться вверх, а тёплый — вниз.

Верхние миражи являются наиболее распространёнными в полярных регионах, особенно на больших ровных льдинах со стабильной низкой температурой. Такие условия могут возникать над Гренландией и в районе Исландии. Верхние миражи также наблюдаются в более умеренных широтах, хотя в этих случаях они слабее, менее четкие и стабильные.



Верхний мираж может быть прямым или перевернутым, в зависимости от расстояния до истинного объекта и изменения температуры над поверхностью. Часто изображение выглядит как фрагментарная мозаика прямых и перевернутых частей.

Верхние миражи могут иметь поразительный эффект за счет кривизны Земли. Если изгиб лучей примерно такой же, как кривизна Земли, лучи света могут перемещаться на большие расстояния, в результате чего наблюдатель видит объекты, находящиеся далеко за горизонтом. Это явление описано впервые в 1596 году, когда судно под командованием голландского мореплавателя и исследователя Виллема Баренца (1550—1597 гг.) в поисках Северо-восточного прохода застряло во льдах на Новой Земле. Экипаж был вынужден пережить полярную ночь. При этом восход Солнца после полярной ночи наблюдался на две недели раньше, чем ожидалось. В 20-м веке это явление было объяснено, и получило название «Эффект Новой Земли».

Таким же образом корабли, находящиеся на самом деле так далеко, что они не должны быть видны, могут появиться на горизонте и даже над горизонтом, как верхние миражи. Это может объяснить некоторые истории о полетах кораблей или прибрежных городов в небе, как описано некоторыми полярниками.

### **Боковой мираж.**

Боковые миражи могут возникать как отражение от нагретой отвесной стены. Описан случай, когда ровная бетонная стена крепости вдруг заблистала, как зеркало, отражая в себе окружающие предметы. В жаркий день мираж наблюдался всякий раз, когда стена достаточно нагревалась солнечными лучами.

### **Фата-моргана.**

Сложные явления миража с резким искажением вида предметов носят название Фата-моргана.

**Фата-моргана** (с итальянского *fata Morgana* — фея Моргана, по преданию живущая на морском дне и обманывающая путешественников призрачными видениями) — редко встречающееся сложное оптическое явление в атмосфере, состоящее из нескольких форм миражей, при котором отдалённые объекты видны многократно и с разнообразными искажениями.



*Рис. 14. Фата-моргана.*

Фата-моргана возникает в тех случаях, когда в нижних слоях атмосферы образуется (обычно вследствие разницы температур) несколько чередующихся слоёв воздуха различной плотности, способных давать зеркальные отражения. В результате отражения, а также и преломления лучей, реально существующие объекты дают на горизонте или над ним по несколько искажённых изображений, частично накладывающихся друг на друга и быстро меняющихся во времени, что и создаёт причудливую картину фата-морганы (рис. 14).