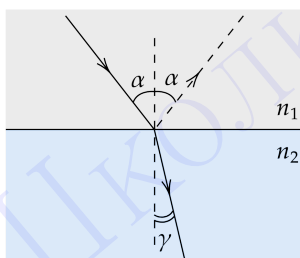


ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

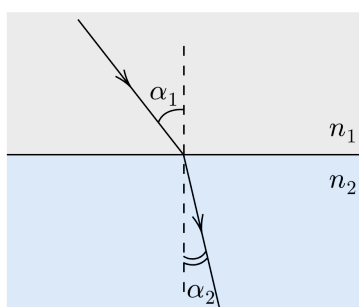
Основные формулы

Закон преломления (Закон Снеллиуса): $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$

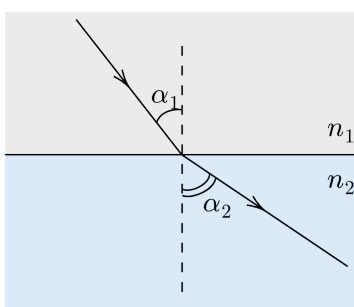


Абсолютный показатель преломления: $n = \frac{c}{v}$

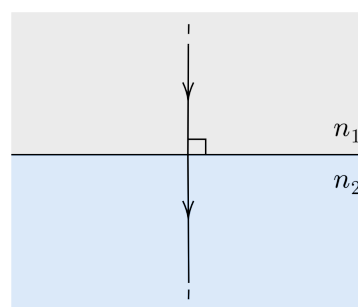
Относительный показатель преломления: $n = \frac{n_2}{n_1}$



$$n_1 < n_2 \Rightarrow \alpha_1 > \alpha_2$$

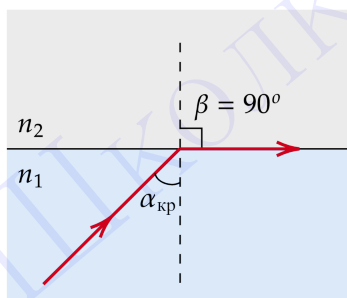


$$n_1 > n_2 \Rightarrow \alpha_1 < \alpha_2$$



$$\alpha_1 = 0^\circ \Rightarrow \alpha_2 = 0^\circ$$

Закон полного внутреннего отражения: $\sin \alpha_{\text{кр}} = \frac{n_2}{n_1}$



$$n_1 > n_2$$

Понятие геометрической оптики

Геометрическая оптика изучает законы распространения света в прозрачных средах, отражения света от зеркально-отражающих поверхностей и принципы построения изображений при прохождении света в оптических системах без учета его волновых свойств. В рамках геометрической оптики свет распространяется как луч. Все законы геометрической оптики могут быть выведены из одного постулата, который называется принципом Ферма.

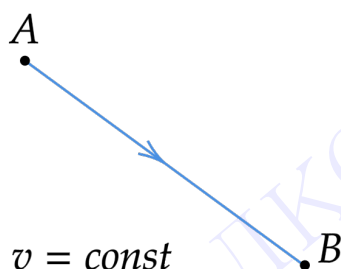
Принцип Ферма: свет всегда стремится попасть из одной точки в другую за экстремальное — наибольшее или наименьшее — время.

Как правило, в рамках школьной программы рассматриваются оптические системы, которые соответствуют только второму случаю. С учетом этого можно упростить данный принцип и свести его к следующему: **«Свет всегда стремится попасть из одной точки в другую за наименьшее время».**

Обратите внимание, что в задачах ЕГЭ чаще всего нужно опираться не на сам принцип Ферма, а на законы, которые из него следуют. Рассмотрим эти законы.

Законы геометрической оптики

1. Закон о прямолинейном распространении света: в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно.

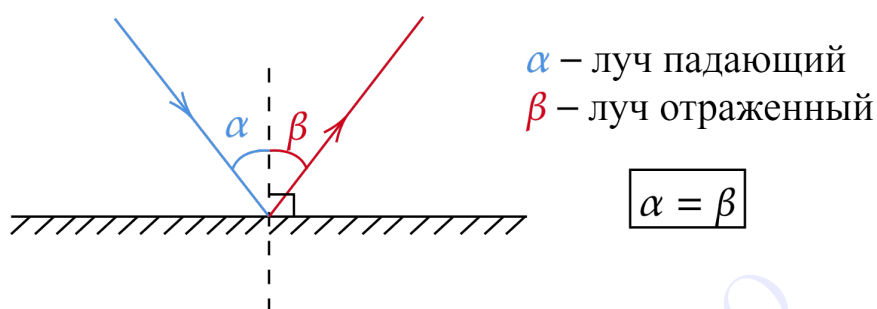


В однородной прозрачной среде свет распространяется с постоянной скоростью. Чтобы попасть из точки A в точку B за наименьшее время (исходя из принципа Ферма), свету необходимо распространяться прямолинейно.

2. Законы отражения:

1) При отражении падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, проведенный в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2) Угол отражения равен углу падения.

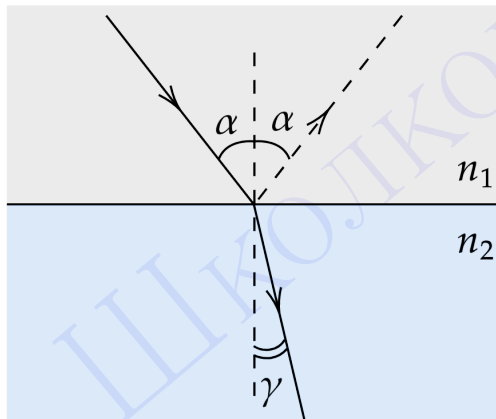


Обратите внимание, что углом падения называется угол между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности. Углом отражения называется угол между отраженным лучом и перпендикуляром к поверхности.

3. Закон преломления (Закон Снеллиуса)

Соотношение между углами падения, преломления и абсолютными показателями преломления сред:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$$



Абсолютный показатель преломления

В вакууме свет распространяется со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. В любой другой среде свет распространяется со скоростью меньшей, чем в вакууме. Чтобы показать, во сколько раз изменяется его скорость, в физике вводят величину, которая называется **абсолютным показателем преломления**. Физический смысл абсолютного показателя преломления — отношение скорости распространения света c в вакууме к его скорости v в данной среде:

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

Абсолютный показатель преломления всегда больше или равен 1: $n \geq 1$. Для воздуха принято $n_{\text{возд}} = 1$, то есть в воздухе свет распространяется с той же скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, что и в вакууме.

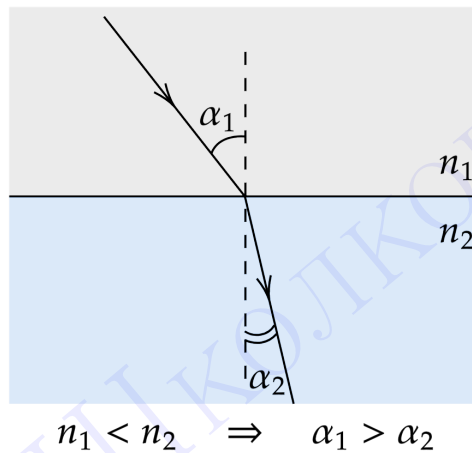
Относительный показатель преломления

Относительный показатель преломления двух сред — это отношение абсолютных показателей преломления данных сред:

$$n = \frac{n_2}{n_1}$$

Частные случаи для закона Снеллиуса

- Переход из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду



При $n_1 < n_2$ закон Снеллиуса $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$ выполняется, если:

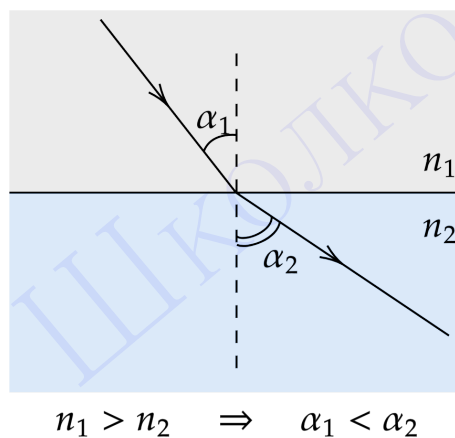
$$\sin \alpha_1 > \sin \alpha_2$$

Функция синуса возрастает от 0 до 90 градусов. То есть чем больше угол α , тем больше его синус $\sin \alpha$, поэтому

$$\alpha_1 > \alpha_2$$

При переходе из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду **угол преломления меньше угла падения**.

- Переход из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду



При $n_1 > n_2$ закон Снеллиуса $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$ выполняется, если:

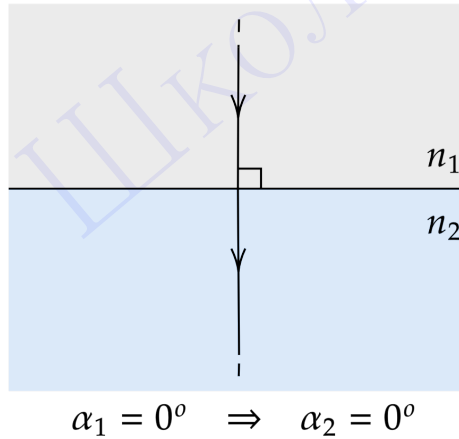
$$\sin \alpha_1 < \sin \alpha_2$$

Функция синуса возрастает от 0 до 90 градусов. То есть чем больше угол α , тем больше его синус $\sin \alpha$, поэтому

$$\alpha_1 < \alpha_2$$

При переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду **угол преломления больше угла падения.**

- Луч падает перпендикулярно поверхности раздела сред



Угол между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности равен 0° , то есть угол падения $\alpha_1 = 0^\circ$. Запишем закон Снеллиуса для этого случая:

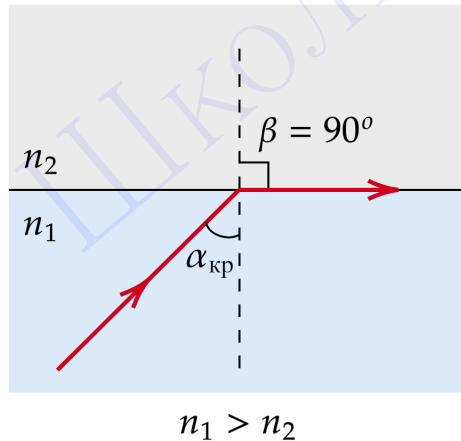
$$n_1 \sin 0^\circ = n_2 \sin \alpha_2$$

$$n_1 \cdot 0 = n_2 \sin \alpha_2$$

Чтобы закон выполнялся, синус угла преломления $\sin \alpha_2$ также должен быть равен нулю, а значит и сам угол α_2 должен быть равен нулю. Из этих рассуждений можно сделать вывод, что **луч, падающий перпендикулярно границе раздела двух сред, не преломляется.**

Полное внутреннее отражение

В законе полного внутреннего отражения рассматривается ситуация, когда свет переходит **из оптически более плотной** среды n_1 **в оптически менее плотную** среду n_2 . Для $n_1 > n_2$ угол преломления, как известно из частных случаев для закона Снеллиуса, больше угла падения. Если постепенно увеличивать угол падения при переходе света в оптически менее плотную среду, то угол преломления также будет увеличиваться.



При некотором (критическом) значении угла падения $\alpha_{\text{кр}}$ угол преломления станет равен 90° .

Луч идет из среды n_1 под углом $\alpha_{\text{кр}}$ и выходит в среду n_2 под углом преломления, равным 90° . С учетом этого запишем закон Снеллиуса:

$$n_1 \sin \alpha_{\text{кр}} = n_2 \sin 90^\circ, \text{ причем } \sin 90^\circ = 1$$

$$n_1 \sin \alpha_{\text{кр}} = n_2$$

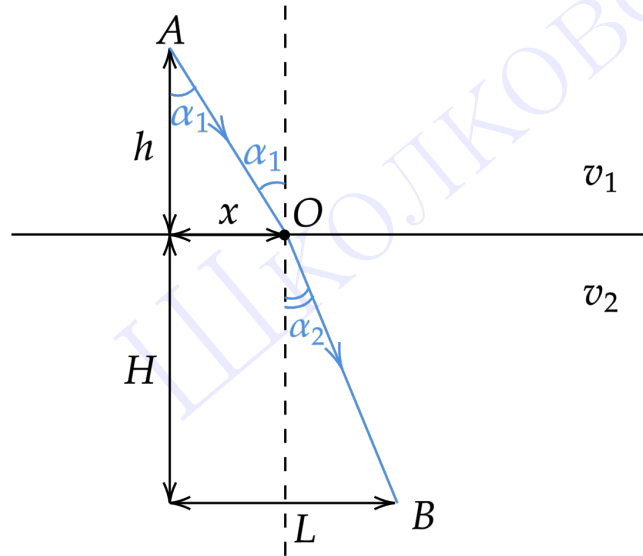
Отсюда закон полного внутреннего отражения:

$$\sin \alpha_{\text{кр}} = \frac{n_2}{n_1}$$

При углах падения больше критического $\alpha_{\text{кр}}$ преломленного луча не существует.

Закон Снеллиуса: вывод через принцип Ферма

Пусть имеется точка A и точка B . Примем, что в первой среде n_1 свет распространяется со скоростью v_1 , а во второй n_2 — со скоростью v_2 . По принципу Ферма свет попадает из точки A в точку B за наименьшее время.



Время распространения луча из точки A в точку B складывается из времени прохождения отрезка AO и времени прохождения отрезка OB :

$$t(x) = \frac{AO}{v_1} + \frac{OB}{v_2}$$

Пусть мы точно знаем положение точек A и B , то есть расстояния h , H и L фиксированы. По теореме Пифагора из прямоугольных треугольников можно сделать замены для OA и OB :

$$t(x) = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{H^2 + (L - x)^2}}{v_2}$$

Чтобы найти минимальное время, найдем производную от функции времени $t(x)$ по x (все остальные величины воспринимаем как константы, то есть как некоторые числа) и приравняем ее к нулю:

$$t'(x) = \frac{1}{v_1} \cdot \frac{1}{2\sqrt{h^2 + x^2}} \cdot 2x + \frac{1}{v_2} \cdot \frac{1}{2\sqrt{H^2 + (L - x)^2}} \cdot 2(L - x) \cdot (-1) = 0$$

$$\frac{1}{v_1} \cdot \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} = \frac{1}{v_2} \cdot \frac{L - x}{\sqrt{H^2 + (L - x)^2}}$$

Еще раз вспомним теорему Пифагора и сделаем обратные замены:

$$\frac{1}{v_1} \cdot \frac{x}{AO} = \frac{1}{v_2} \cdot \frac{L-x}{OB}$$

Заметим, что отношения $\frac{x}{AO}$ и $\frac{L-x}{OB}$ из геометрического определения синуса (отношение противолежащего катета к гипотенузе) можно заменить как $\sin \alpha_1$ и $\sin \alpha_2$ соответственно:

$$\frac{1}{v_1} \cdot \sin \alpha_1 = \frac{1}{v_2} \cdot \sin \alpha_2$$

Домножим обе части равенства на скорость света c :

$$\frac{c}{v_1} \cdot \sin \alpha_1 = \frac{c}{v_2} \cdot \sin \alpha_2$$

Отношение $\frac{c}{v}$ есть не что иное, как абсолютный показатель преломления n :

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Таким образом, мы вывели закон Снеллиуса.