Оптика

Предмет оптики

- Оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также взаимодействие излучения с веществом.
- Свет – электромагнитная волна

Спектр электромагнитных волн

	радиоволны	оптика	рентген	гамма
λ	Км - мм	2 мм – 10 нм	$10 - 10^{-2}$ нм	< 0.01 нм
ν (Гц)	$< 10^{11}$	$1{,}5\ 10^{11} – 3\ 10^{16}$	$3\ 10^{16} – 3\ 10^{19}$	$> 3\ 10^{19}$
ε = hν		10^{-3} – 100 эВ	20 эВ – 0,1 Мэв	> 0,1 МэВ

Оптический диапазон: 2 мм – 10 нм (~ 17 октав)

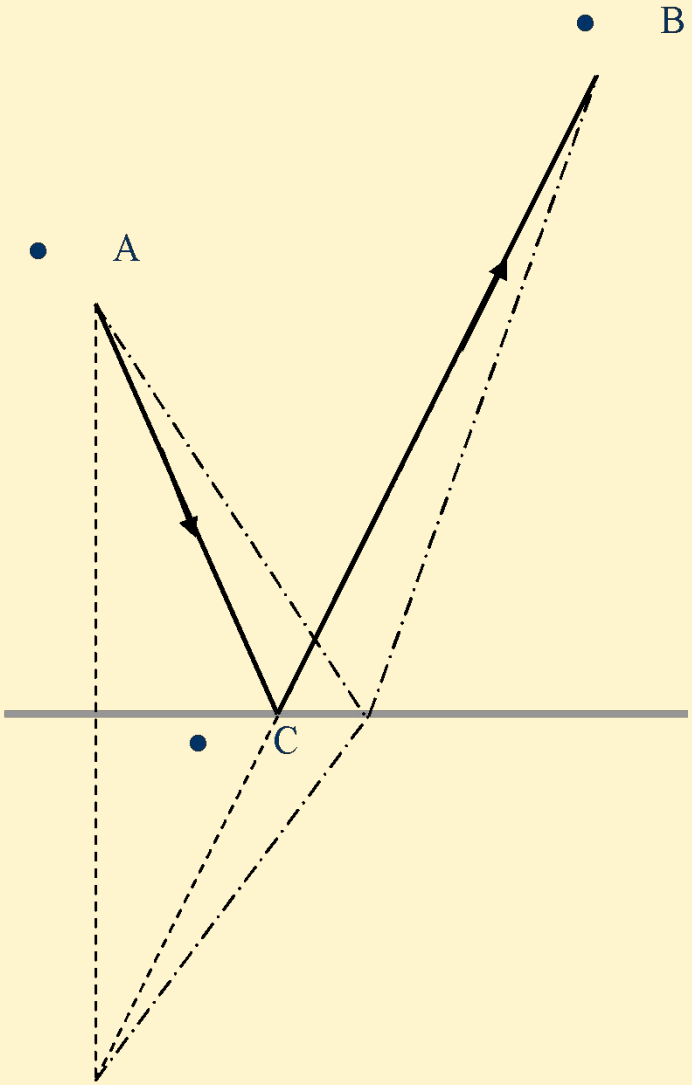
- Инфракрасное излучение: 2 мм – 760 нм
- Видимый свет: 400 – 760 нм
- Ультрафиолет: 400 – 10 нм
- Энергия кванта видимого света $\varepsilon = hc/\lambda$
  ε(эВ) = 1.23/λ(мкм) = 1.6 – 3 эВ
- **Почему мы видим свет с λ ~ 0,5 мкм?**

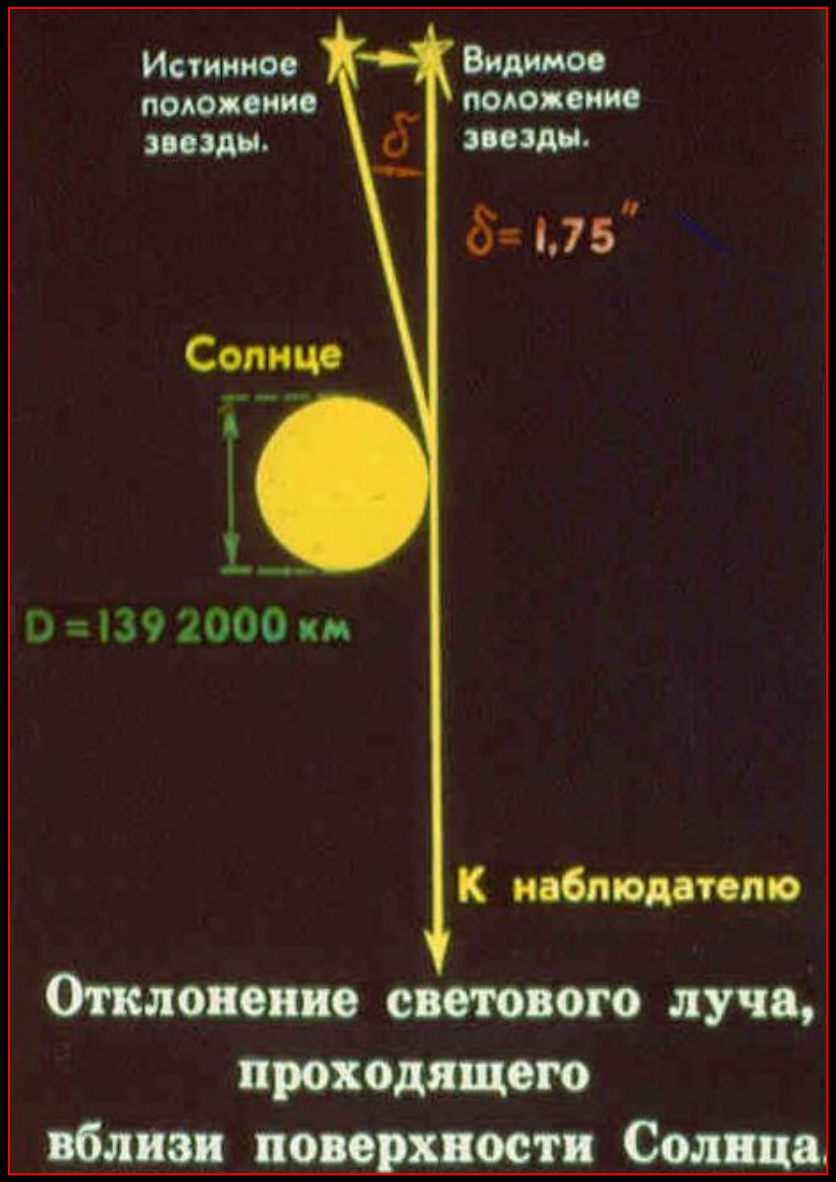
Принцип Ферма – принцип наименьшего времени

- Свет при распространении из одной точки в другую выбирает путь, которому соответствует наименьшее время распространения.
- Свет выбирает самый короткий *оптический путь* $s = \int n d\ell$

Принцип Ферма и закон зеркального отражения.

- При зеркальном отражении путь АСВ - кратчайший





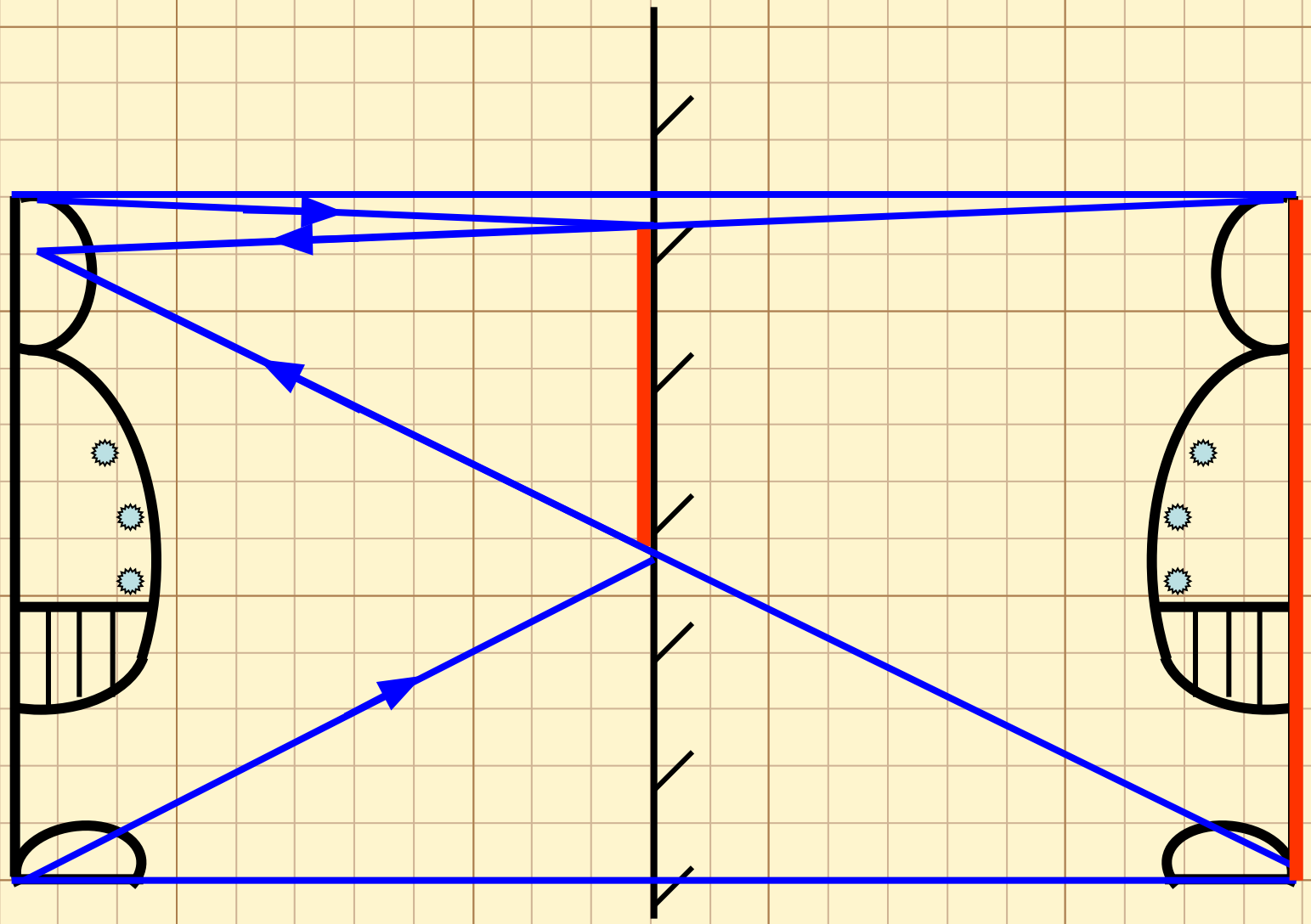
Отклонение светового луча, проходящего вблизи поверхности Солнца.

Прохождение пучка лучей света вблизи черной дыры.

Свет в однородном гравитационном поле распространяется прямолинейно и равномерно.

Свет в однородной среде распространяется прямолинейно и равномерно

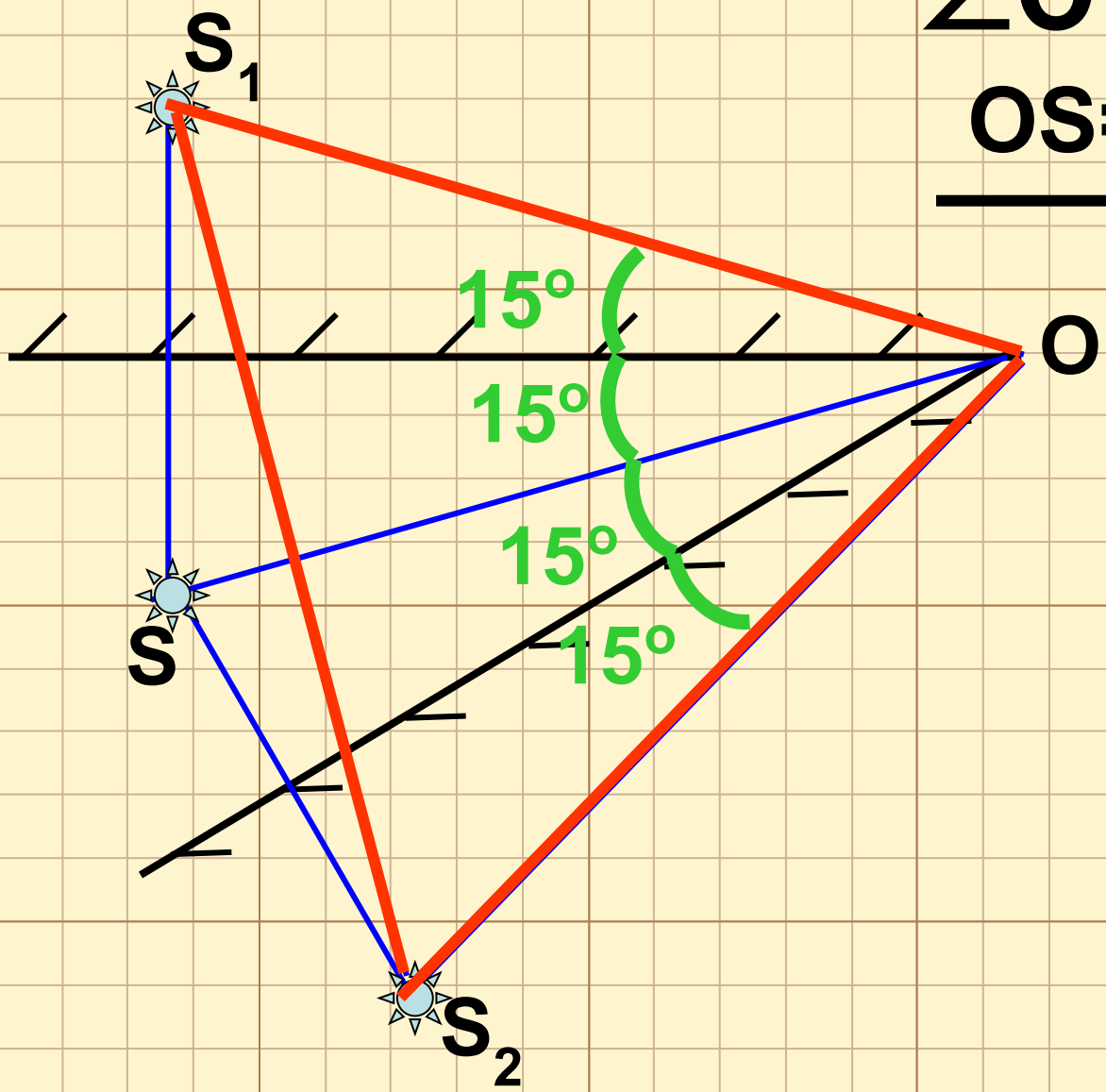
На рисунках фотография лазерного луча распространяющегося вдоль границы между пресной и соленой водой.



$\angle O = 30^o$

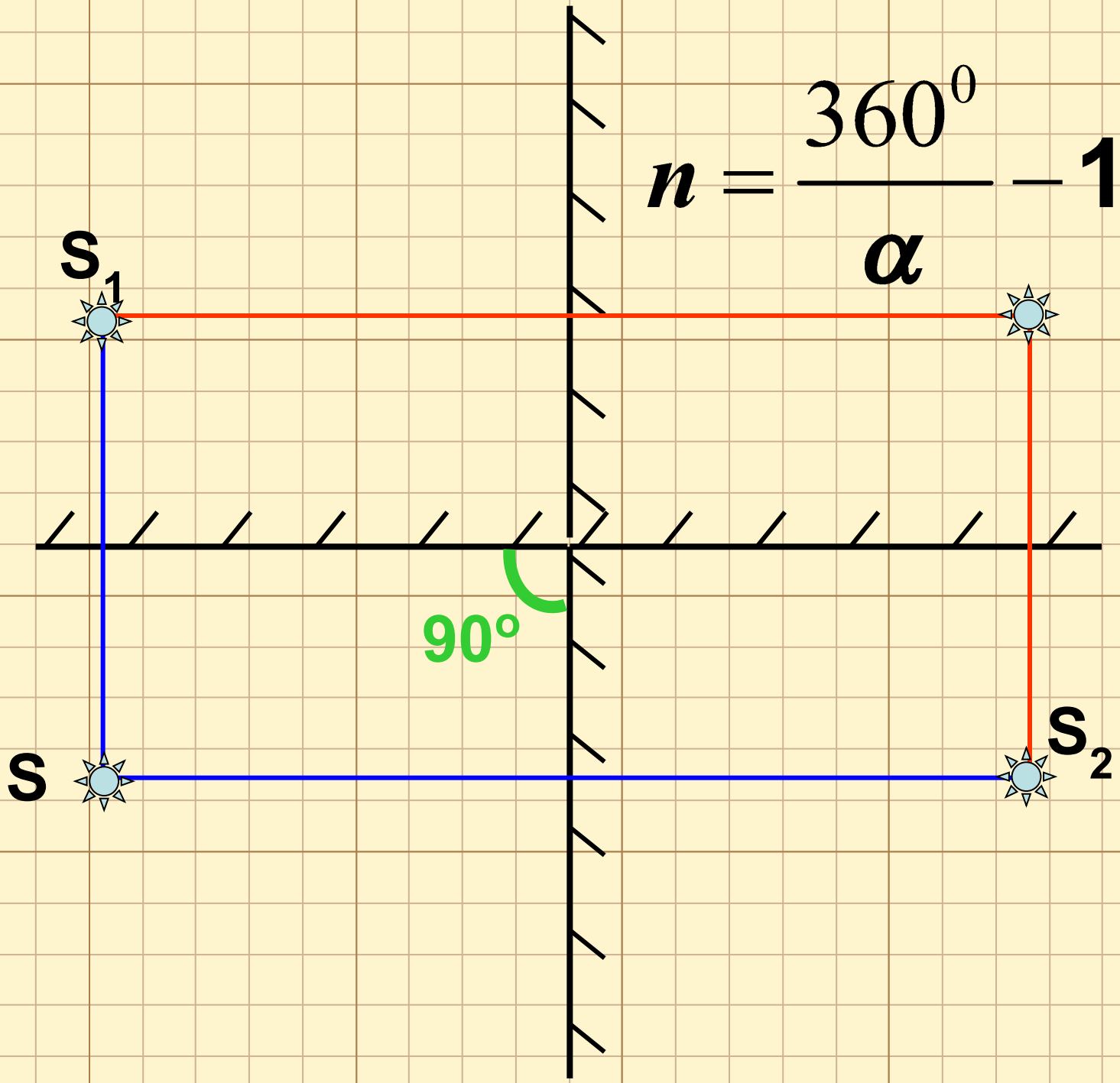
OS=10см

S_1S_2 – ?



$OS = OS_1 = OS_2 = S_1S_2 = 10$см

$$n = \frac{360^0}{\alpha} - 1$$



15.18. Солнечный луч составляет с поверхностью земли угол $\varphi = 40^{\circ}$. Под каким углом к горизонту следует расположить плоское зеркало, чтобы солнечный луч попал на дно глубокого колодца?

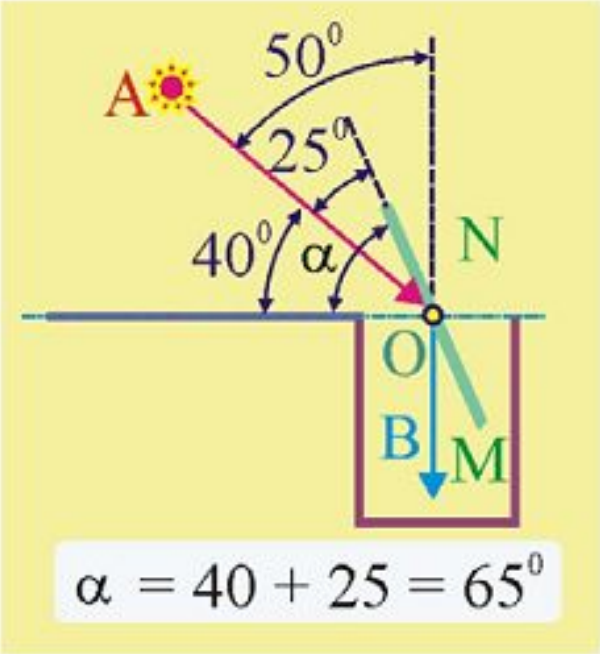


Рис. 15.18. Зеркало и колодец

Решение

1. Угол между вертикалью и солнечным лучом составляет

$$\gamma = 90^{0} - 40^{0} = 50^{\circ};$$

2. Построим далее биссектрису угла γ, которая будет с солнечным лучом составлять угол $\theta = 25^{\circ}$.

3. Таким образом, если плоское зеркало NM расположить под углом

$$\alpha = \frac{\gamma}{2} + 40^{\circ} = 25^{\circ} + 40^{\circ} = 65^{\circ},$$

то солнечный луч благополучно достигнет дна колодца, т.к. он проследует параллельно его стенкам.

15.22. Человек, ростом h = 1,75 м находится на расстоянии L= 6 м от вертикального столба высотой H = 7 м. На каком расстоянии от себя человек должен расположить плоское горизонтальное маленькое зеркало, чтобы увидеть в нём отражение верхушки столба?

Решение

1. Выделим на поверхности земли точку C, перемещая которую по поверхности объемся выполнения закона отражения между двумя лучами исходящими с вершины столба и из глаза наблюдателя.

2. В результате такого выбора образуются два подобных прямоугольных треугольника

$$\Delta ABC \sim \Delta CDK,$$

$$\frac{h}{d} = \frac{H}{L-d}; \quad \Rightarrow \quad d = \frac{Lh}{h+H} = 1{,}2\text{м}.$$

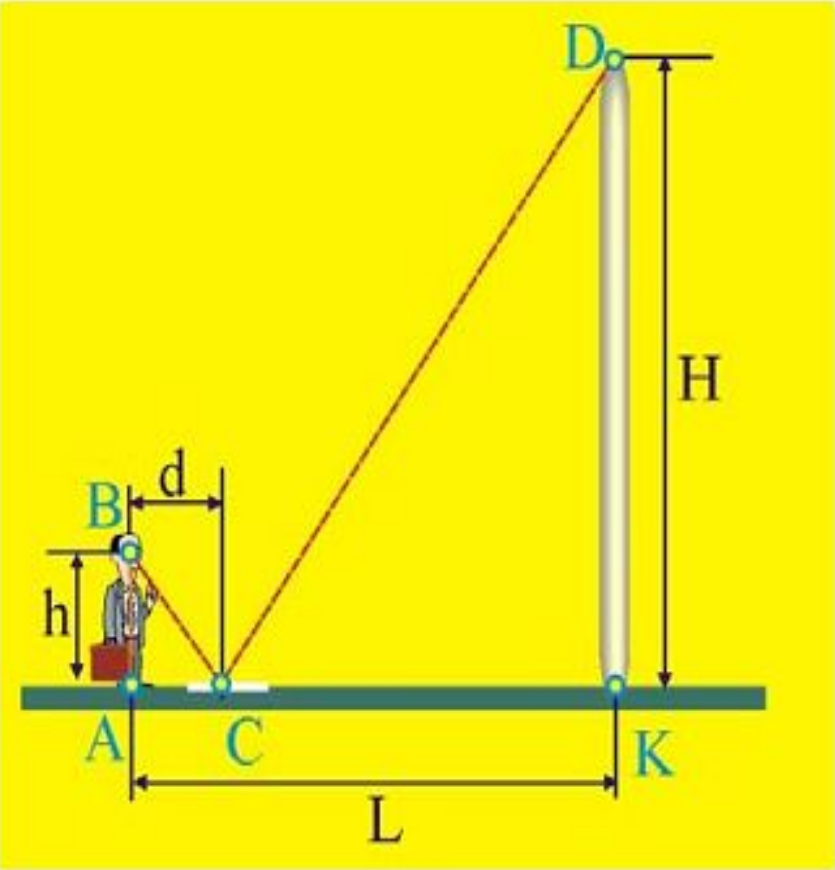


Рис. 15.22. Верхушка столба

15.27. Размеры вертикального заднего окна автомобиля B × H = (120 × 45) см^2. Водитель сидит на расстоянии x = 2 м от заднего окна. Каковы должны быть минимальные размеры плоского зеркала заднего вида, расположенного на удалении x_0 = 0,5 м перед водителем, чтобы он имел наилучший обзор дорожной обстановки сзади?

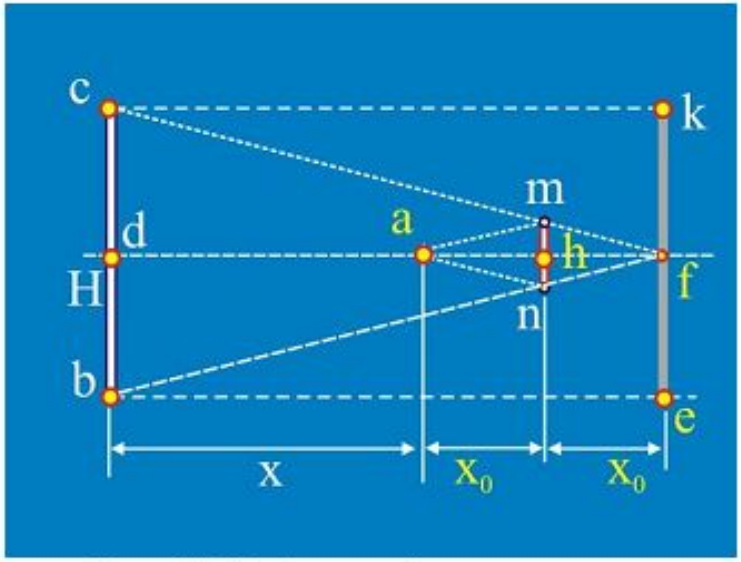


Рис. 15.27. Автомобильное зеркало

Решение

1. Рассмотрим вначале соотношение между вертикальным размером зеркала h и вертикальным размером заднего стекла автомобиля из условия того, что глаз водителя должен видеть отражение нижней и задней кромки стекла.

2. Для определения высоты зеркала h рассмотрим подобие двух треугольников, образованных лучами в процессе построения отражения точек c и b от кромок зеркала, m и n

$$\Delta bcf \sim \Delta amn,$$

$$\frac{H}{x+2x_0} = \frac{h}{x_0} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{Hx_0}{x+2x_0} = \frac{0{,}45 \cdot 0{,}5}{2+1} = 0{,}075\,\text{м}$$

3. Горизонтальный размер зеркала получается методом таких же построений только в горизонтальной плоскости

$$z = \frac{Bx_0}{x+2x_0} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}5}{3} = 0{,}2\ \text{м};$$

15.56. Построить ход луча, который, выйдя из точки А, находящейся внутри зеркального ящика, попадёт в тоску В, отразившись последовательно от каждого из четырёх зеркал.

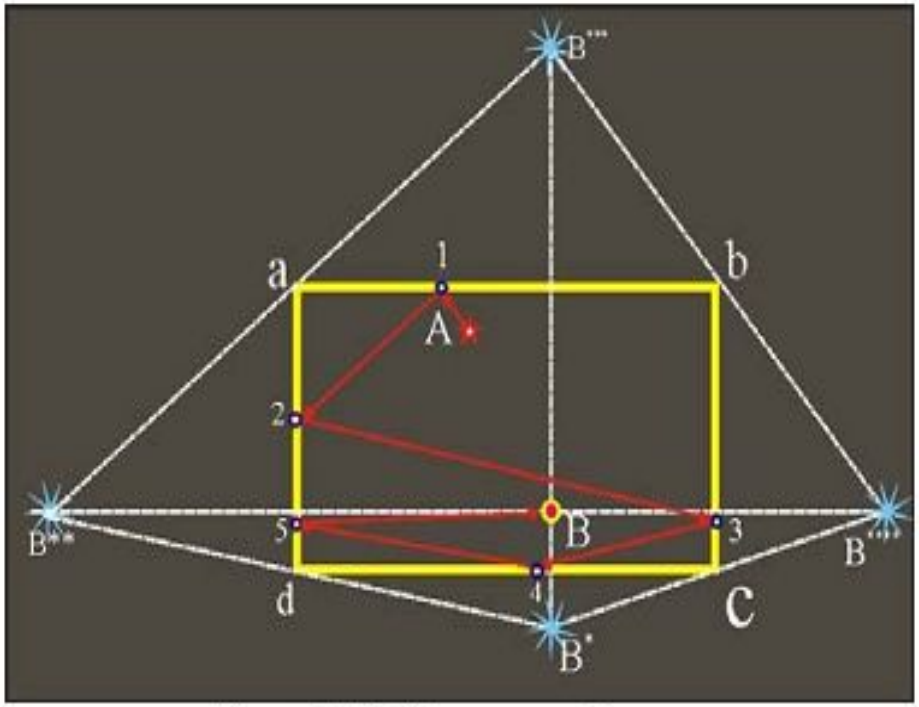


Рис. 15.56. Зеркальный ящик

Решение

1. Строим изображения точки В во всех четырёх зеркалах, получаем пирамиду $B^{*}B^{**}B^{***}B^{****}$.

2. Из точки А строим лучи параллельные линиям, соединяющим соответствующие изображения точки В в зеркалах, используя закон отражения получаем последовательные отражения луча в точках 1, 2, 3, 4, 5, которые в конечном счёте, обеспечат его попадание в точку В.

15.30. Отражающая поверхность зеркала составляет с плоскостью стола угол α = 135 ^{o}. По направлению к зеркалу по столу катится шар со скоростью v = 2 м/с. В каком направлении и с какой скоростью движется изображение шара?

Решение

1. Выберем три произвольных положения центра шара s_1, s_2 и s_3, приняв центр шара за светящуюся точку, построим их изображения в наклонённом зеркале.

2. Из построения видно, что за фиксированный промежуток времени Δt центр шара перемещается по горизонтали на расстояние x_1 а изображение этой точки перемещается вертикально на такое же расстояние x_1.

3. Изображение шара, таким образом, будет двигаться вертикально вверх со скоростью центра шара v = 2 м/с.

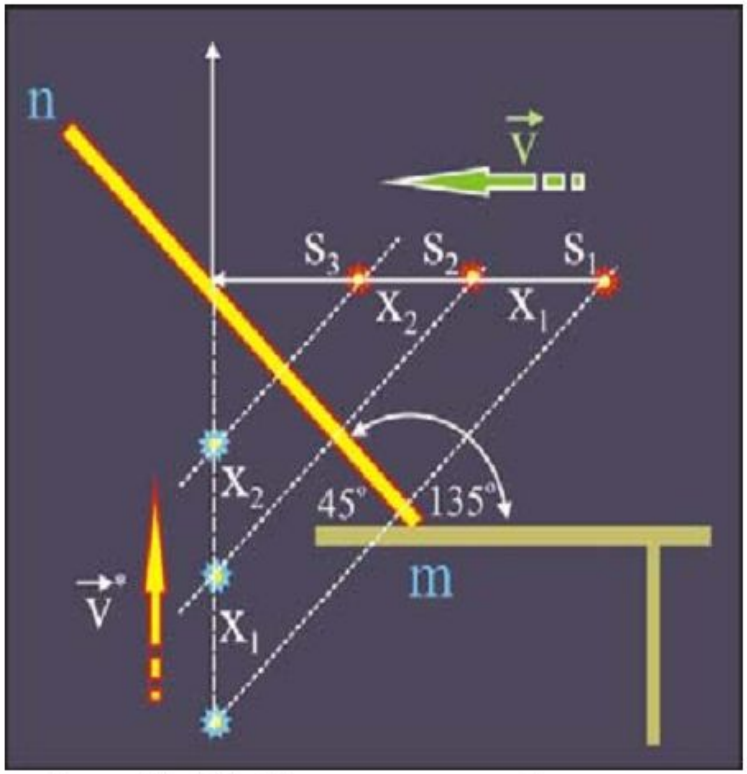


Рис. 15.30. Скорость изображения

15.34. Зеркало mn вращается с угловой скоростью ω вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа. С какой линейной скоростью движется изображение точки S в зеркале, если она неподвижна и находится на расстоянии r от оси вращения зеркала?

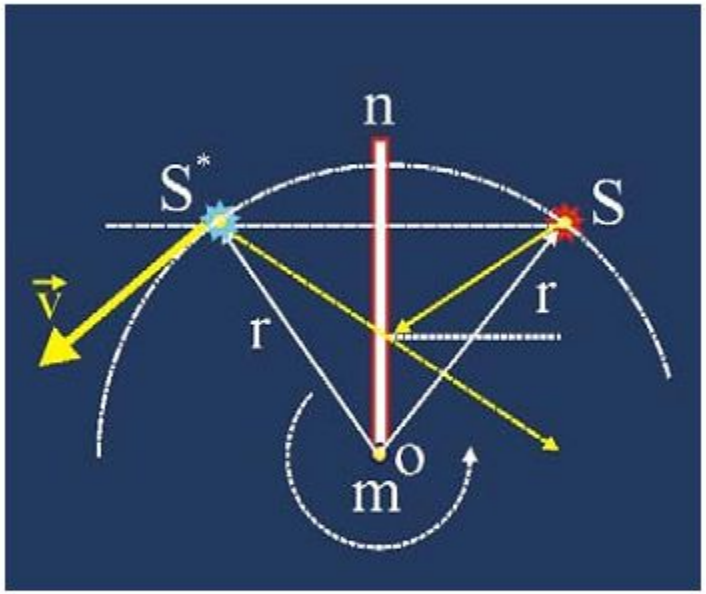


Рис. 15.34. Линейная скорость изображения во вращающемся зеркале

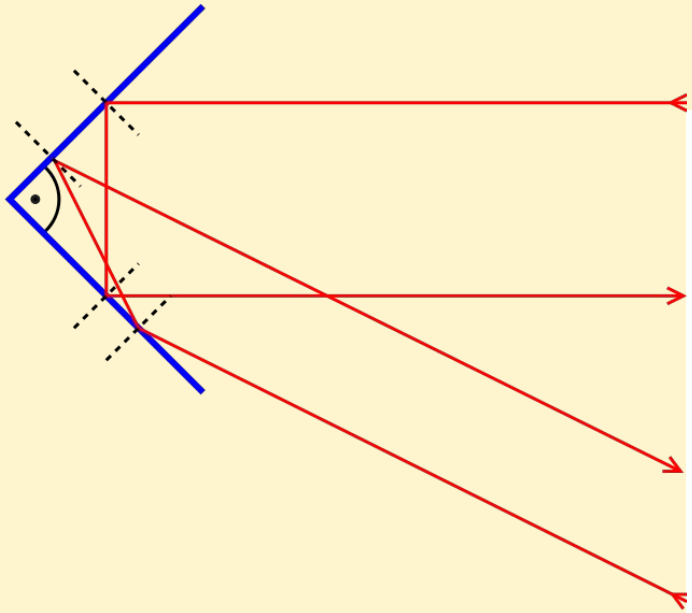
Решение

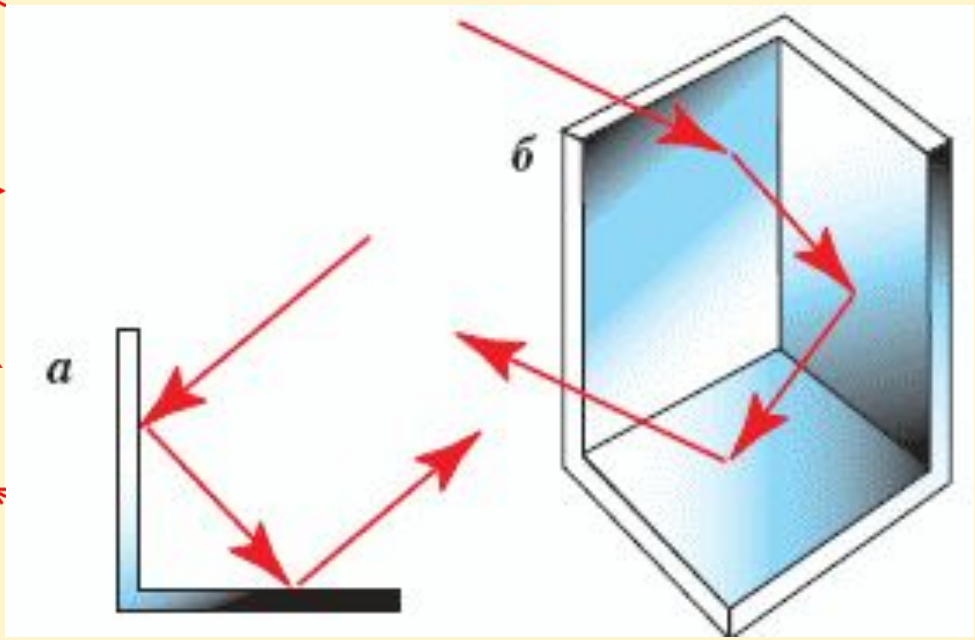
1. Как видно из построения, выполненного на основании закона отражения, изображение S^* будет находиться на расстоянии r от оси вращения и перемещаться по круговой траектории, совершая равномерное вращение вокруг оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости чертежа.

2. Так как угол поворота изображения в два раза больше угла поворота зеркала, то и угловая скорость изображения будет в два раза больше угловой скорости зеркала, т.е. линейная скорость изображения определится как:

$$v = \frac{2\Delta\varphi}{\Delta t} r = 2\omega r ;$$

Уголковый отражатель.
Зеркало, не меняющее лево на право.

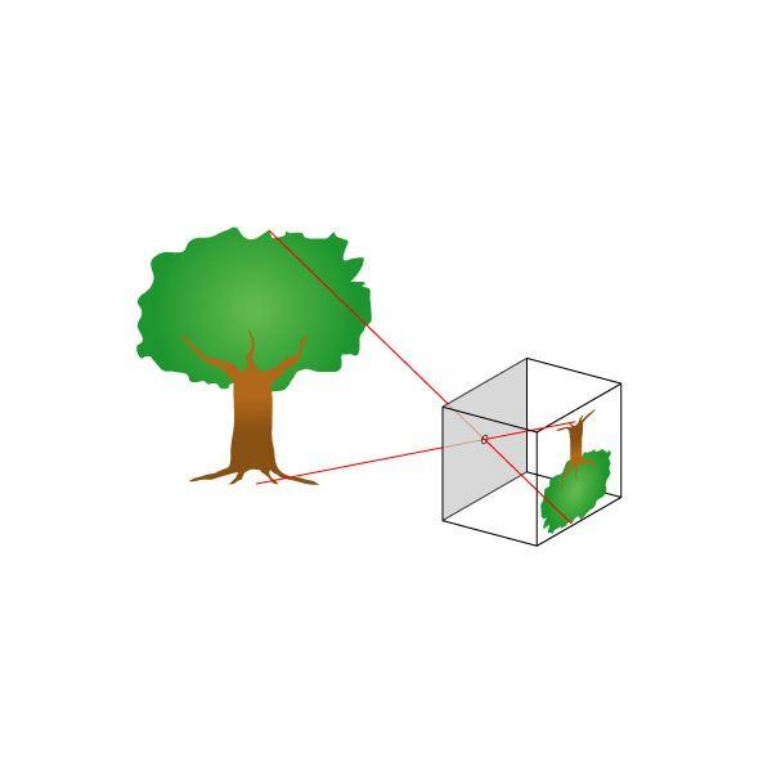


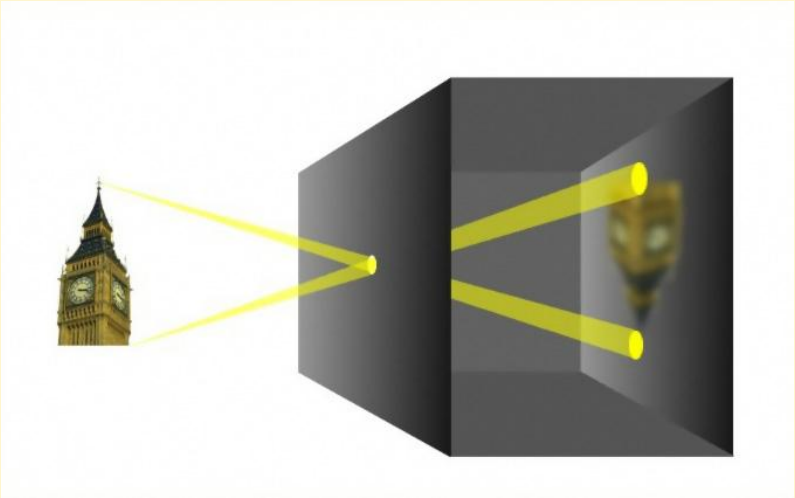


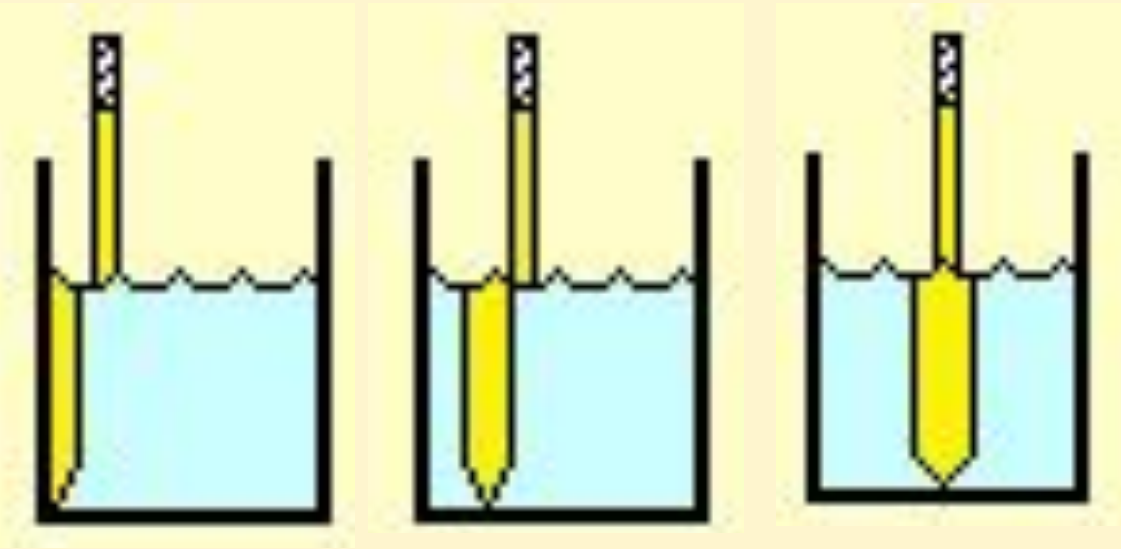
Кошачий глаз (кОтОфот)

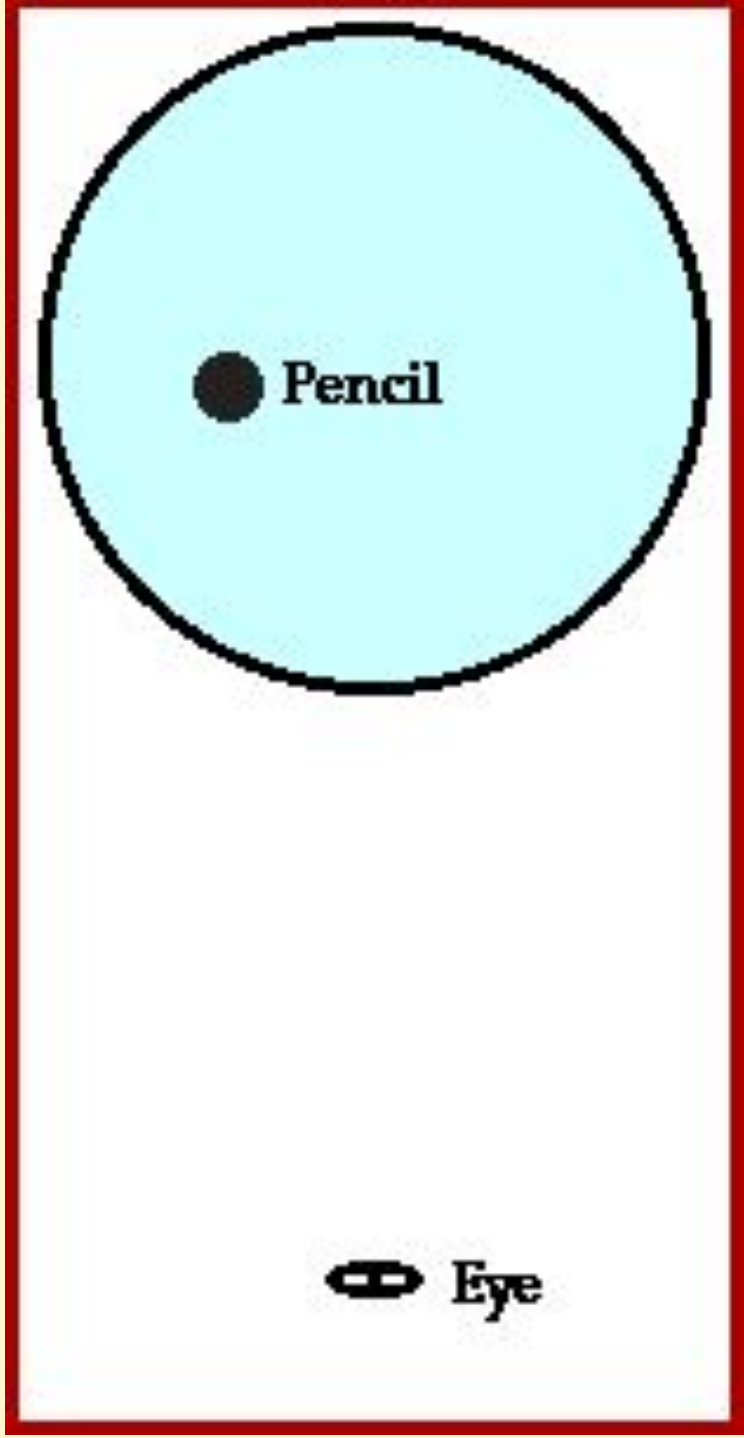
Вот так выглядит кот в свете фото вспышки или в свете автомобильных фар

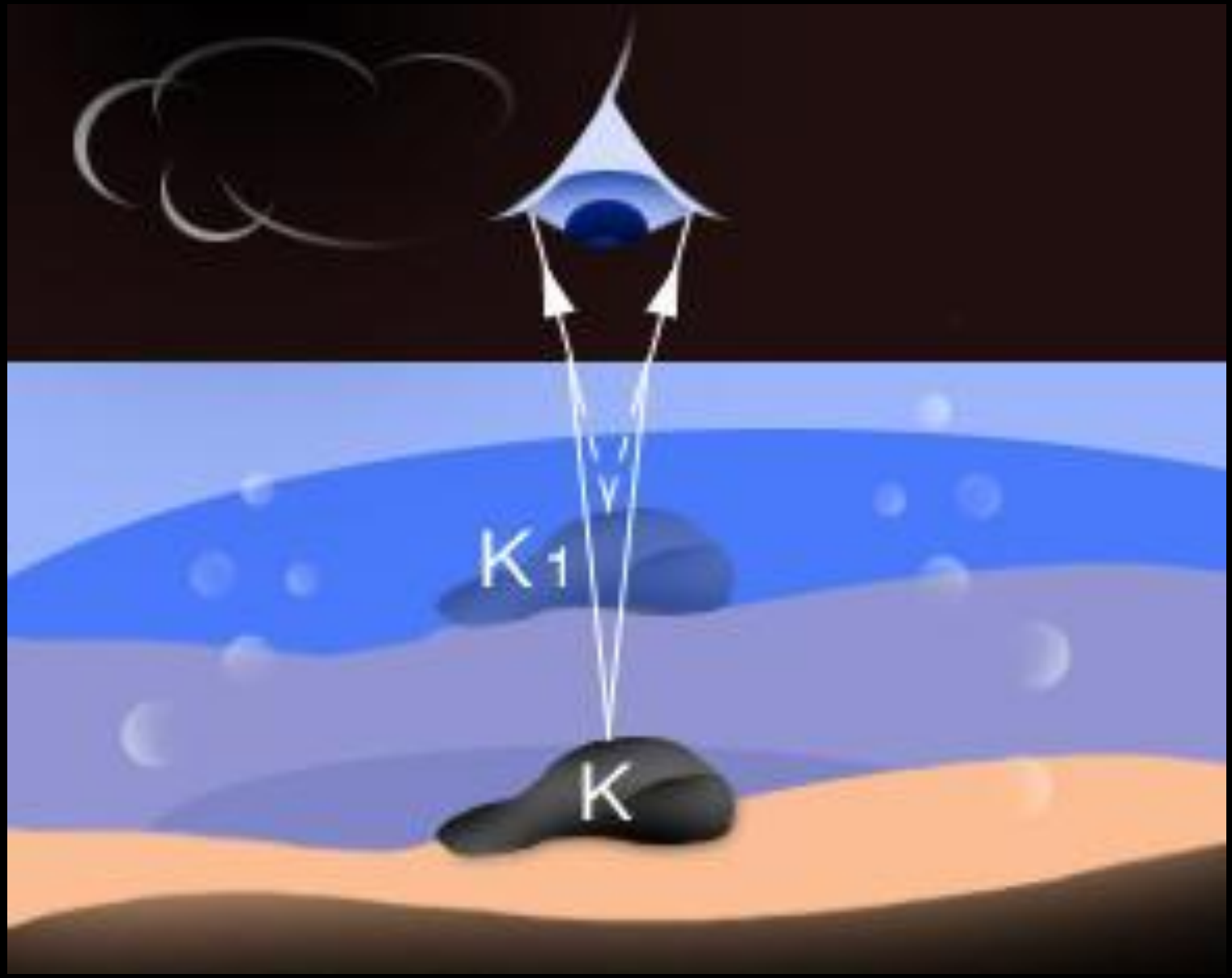
Камера обскура (тёмная комната)

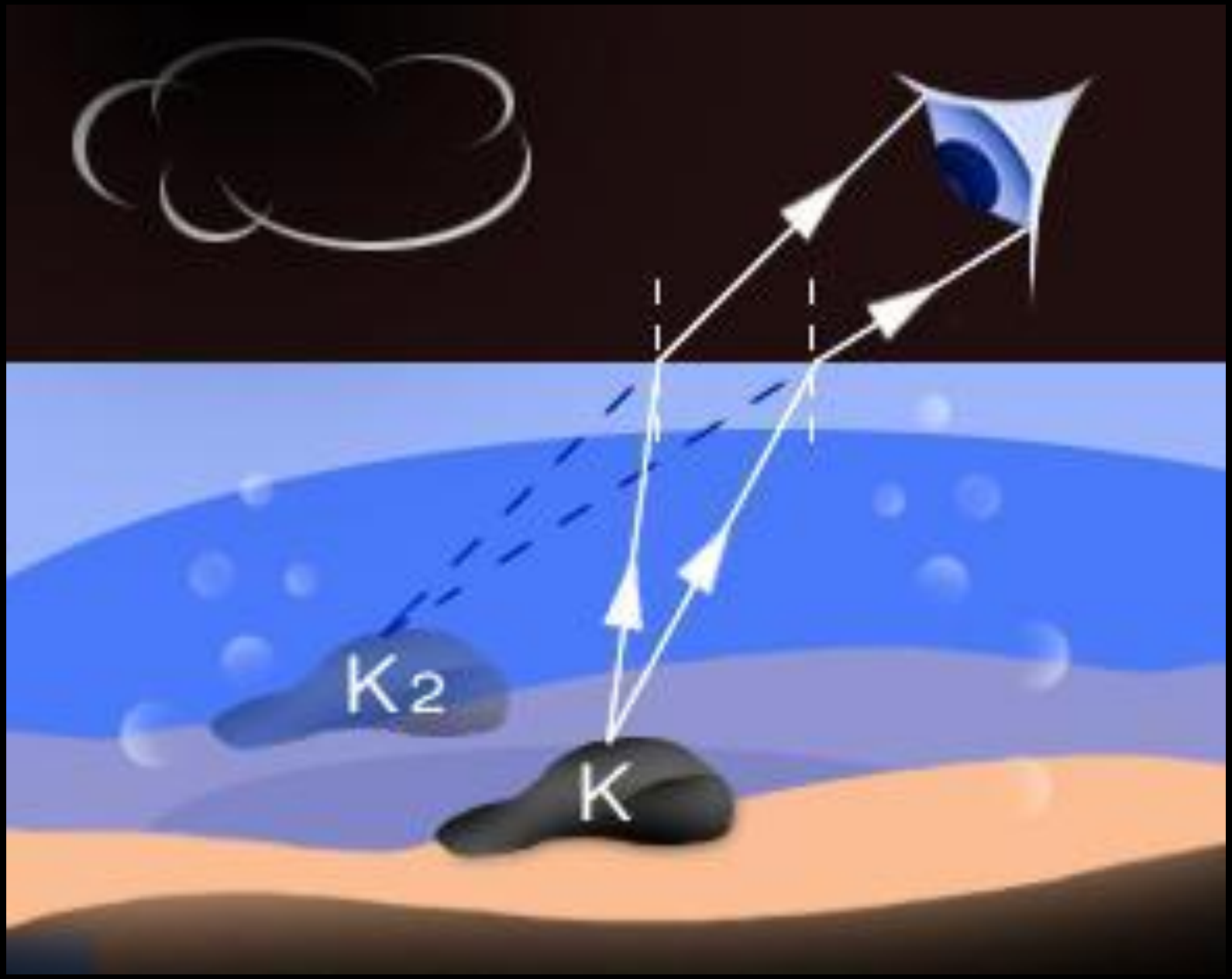


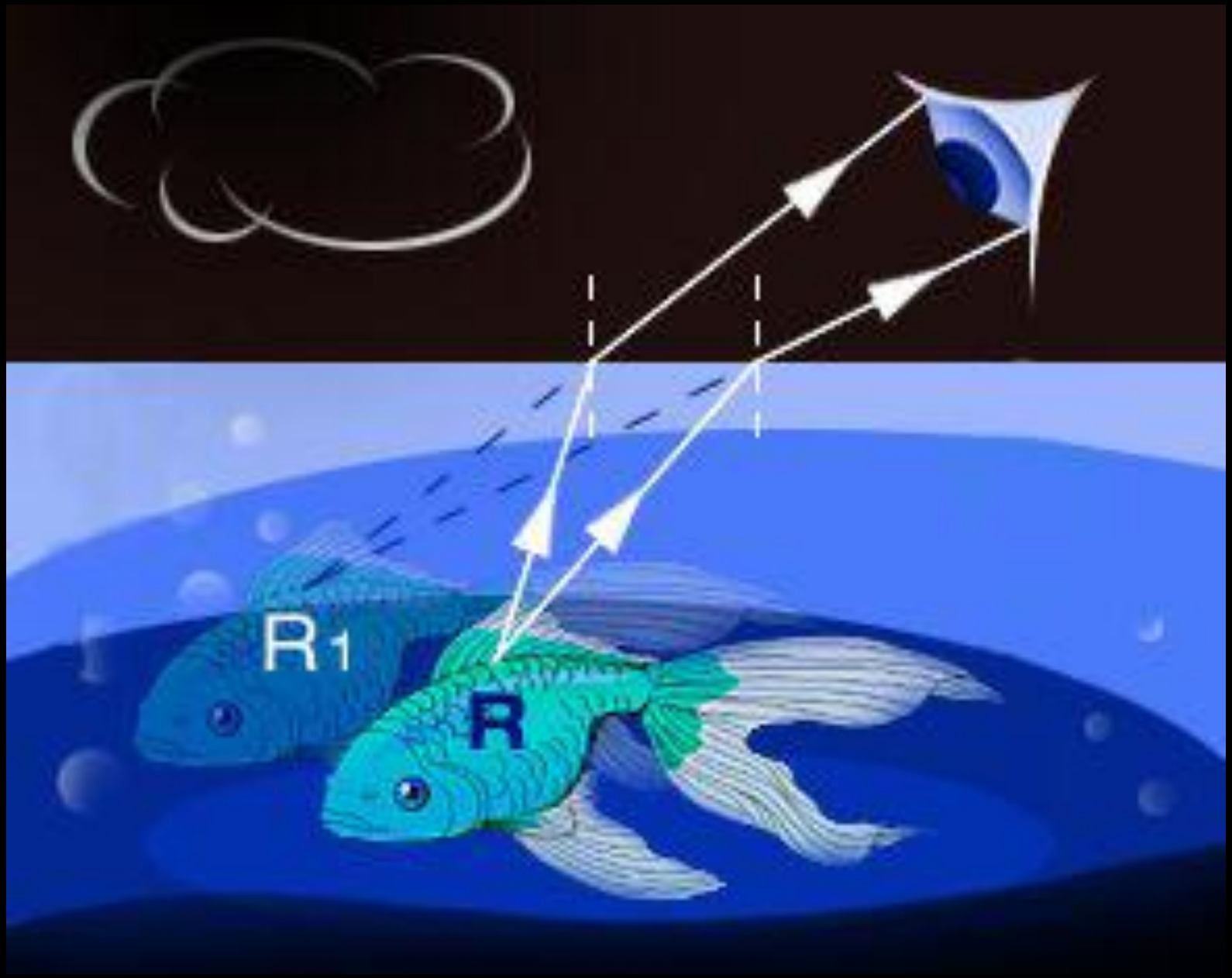




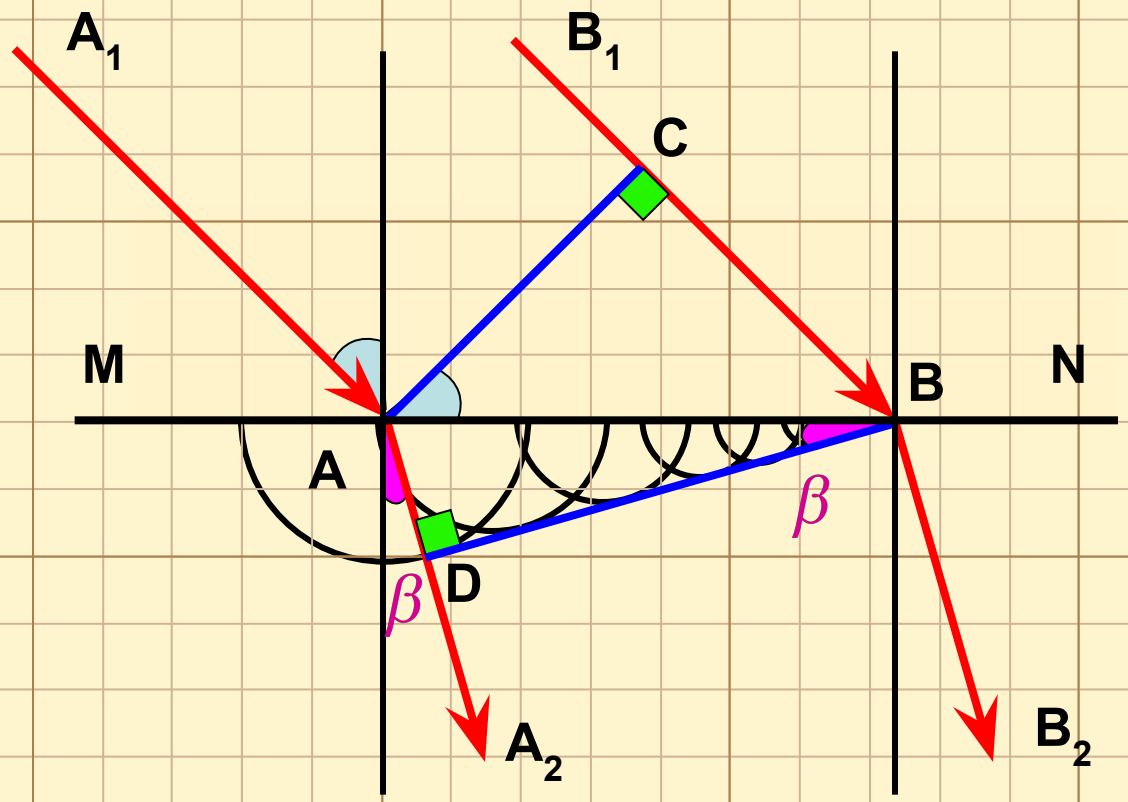

Pencil
Eye


K1
K


K2
K


R1
R

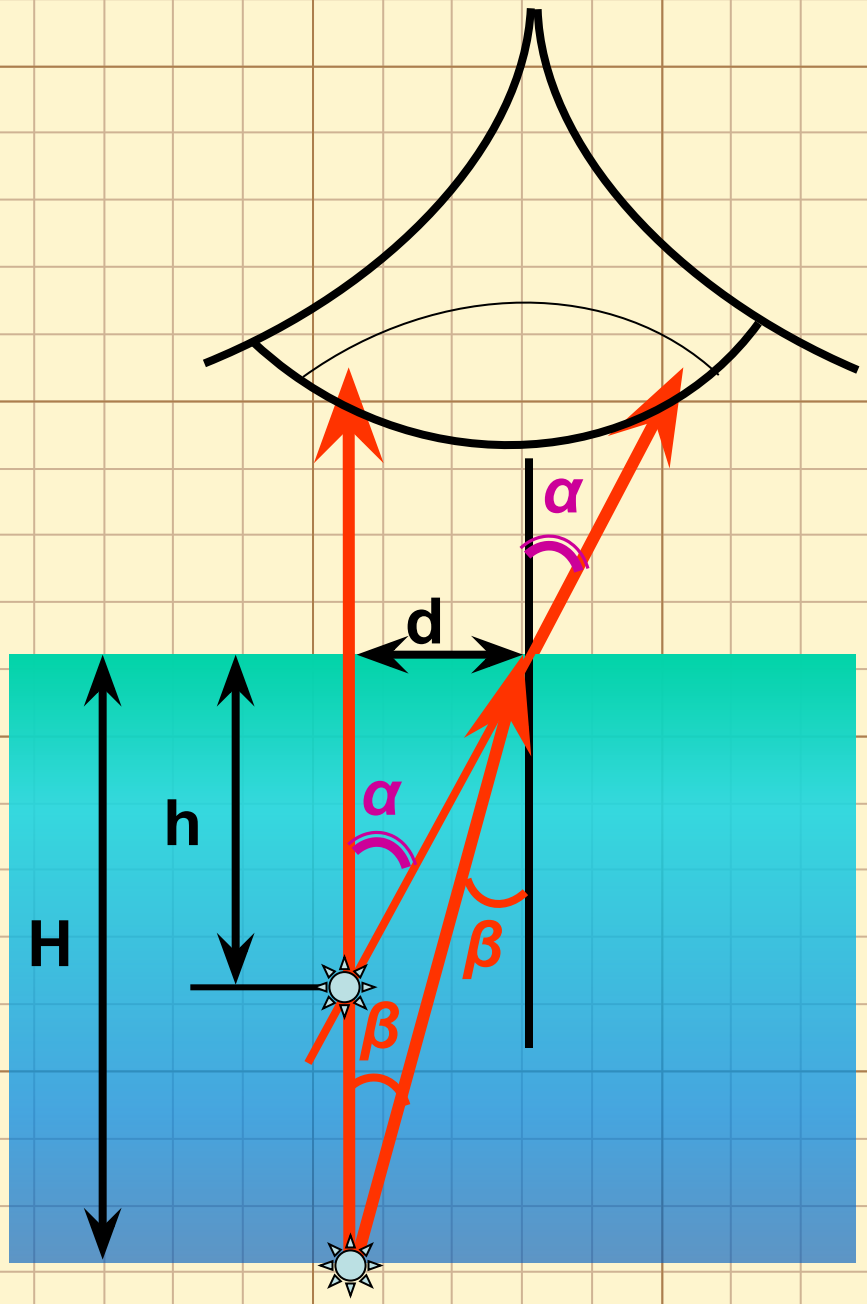
Закон преломления волн



$$CB = \upsilon_1 t = AB\sin\alpha \quad (1)$$

$$AD = \upsilon_2 t = AB\sin\beta \quad (2)$$

$$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = const$$



$$\frac{d}{h} = tg\alpha \approx \sin\alpha \quad (1)$$

$$\frac{d}{H} = tg\beta \approx \sin\beta \quad (2)$$

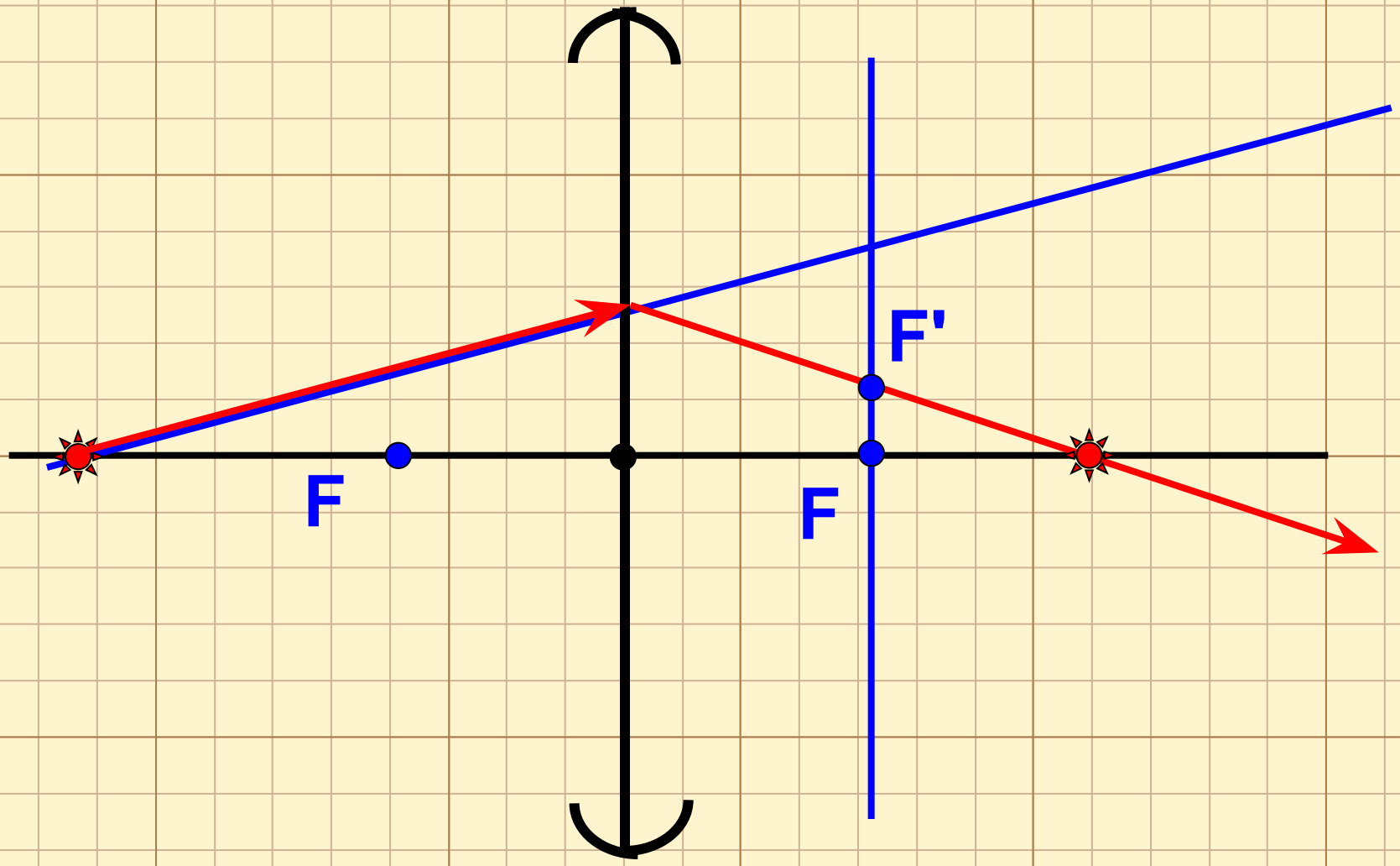
(1):(2) ⇒

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$$

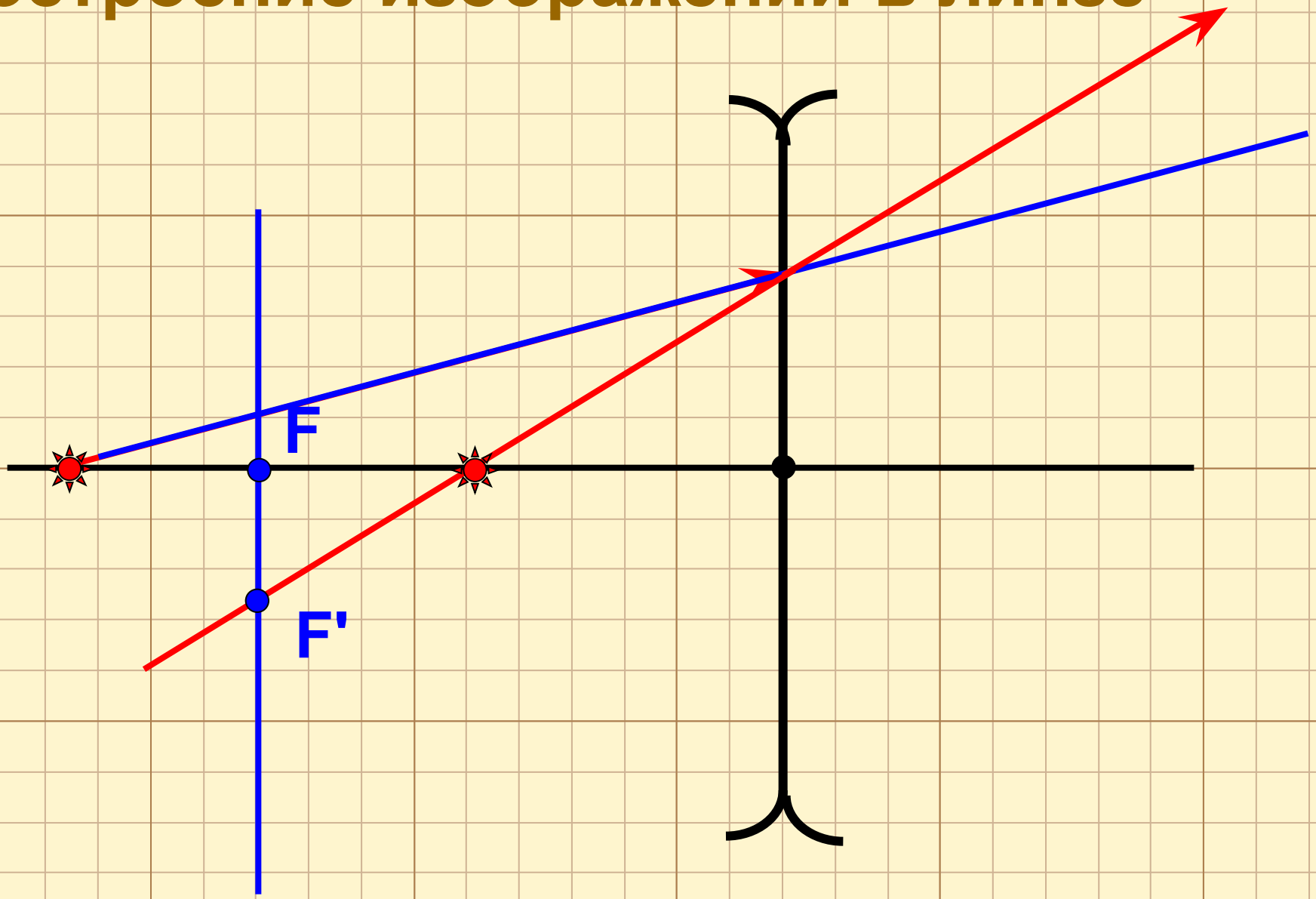
$$h = \frac{H}{n}$$

Построение изображений в линзе

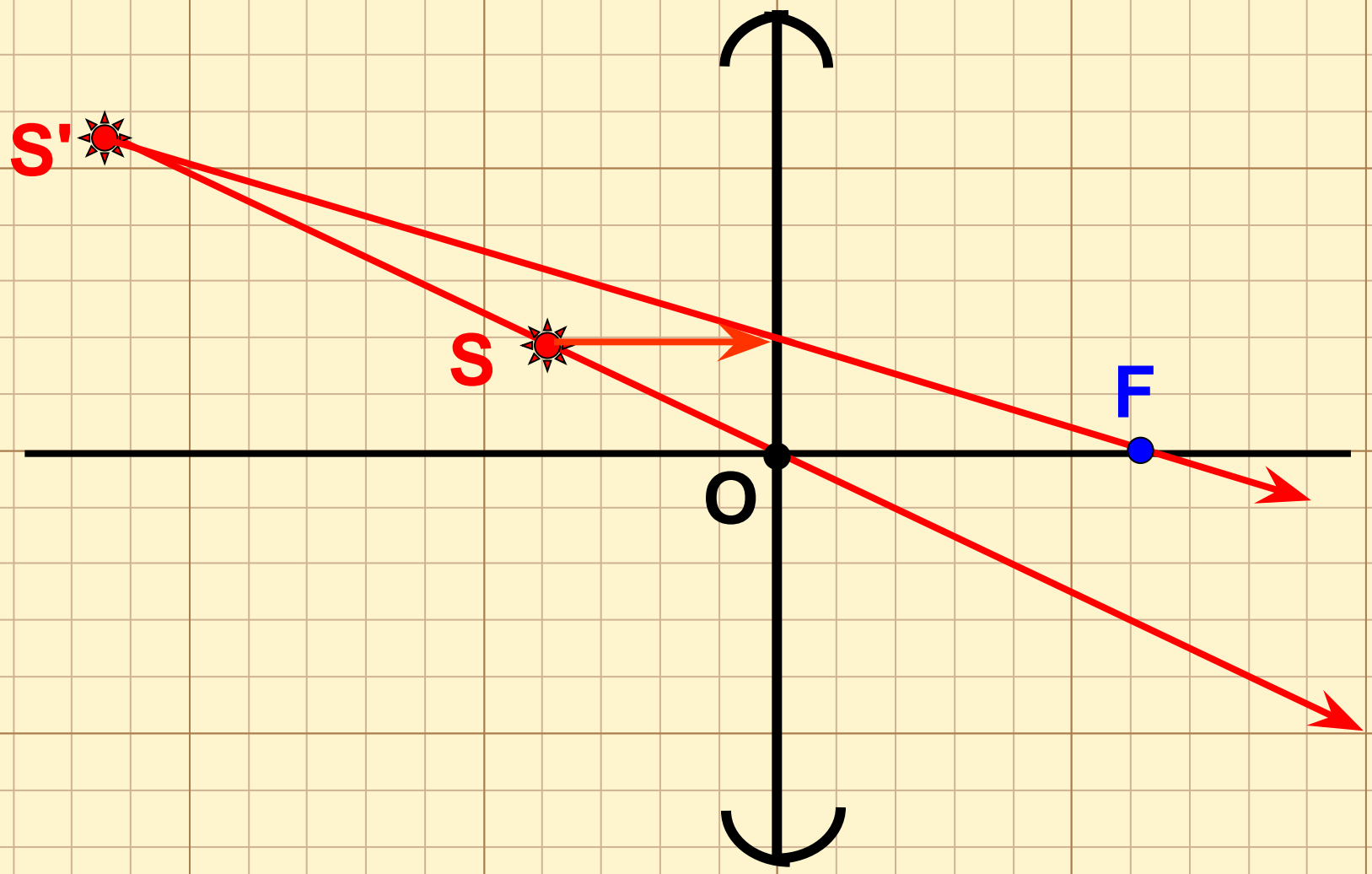
Построение изображений в линзе



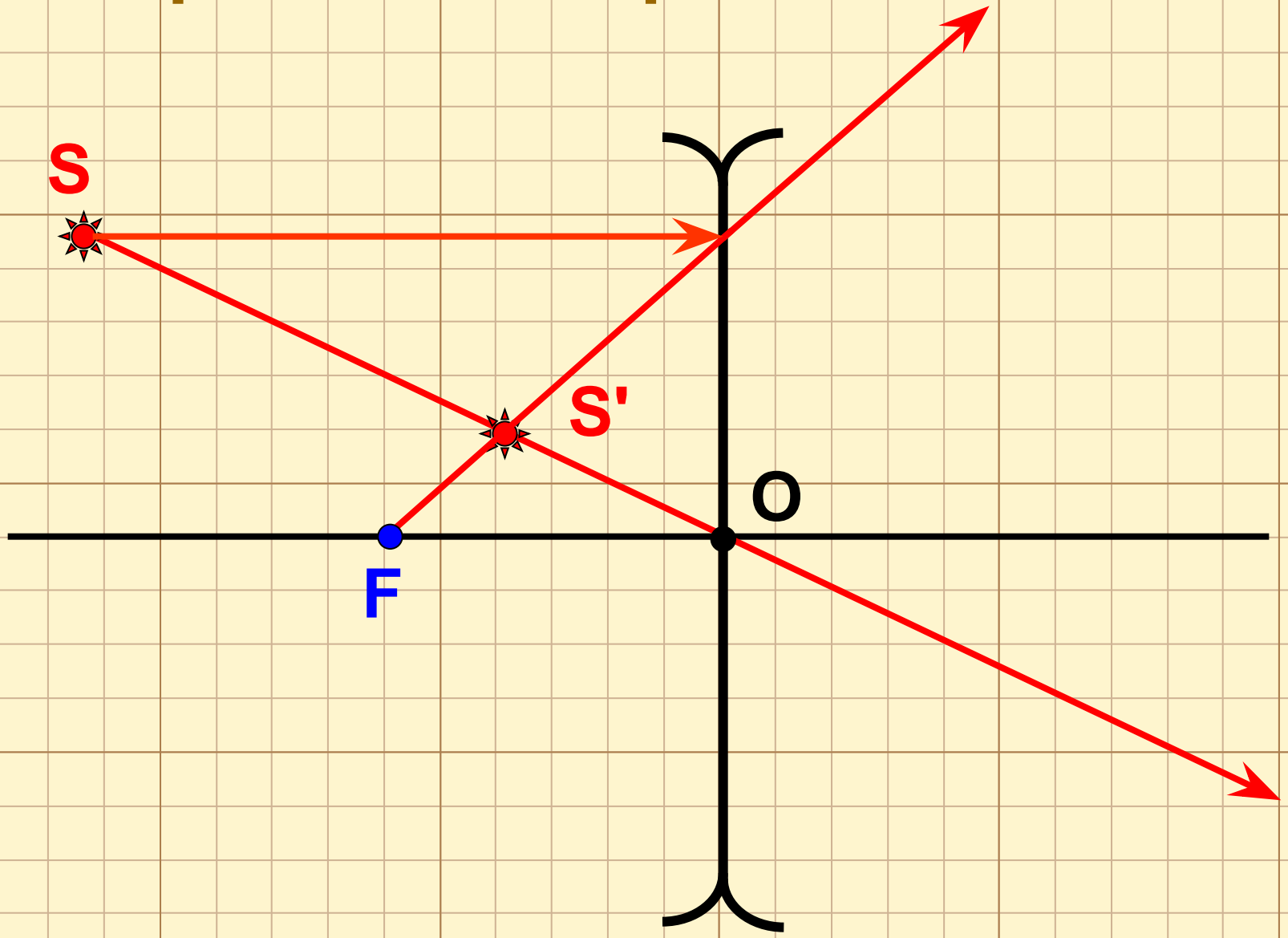
Построение изображений в линзе

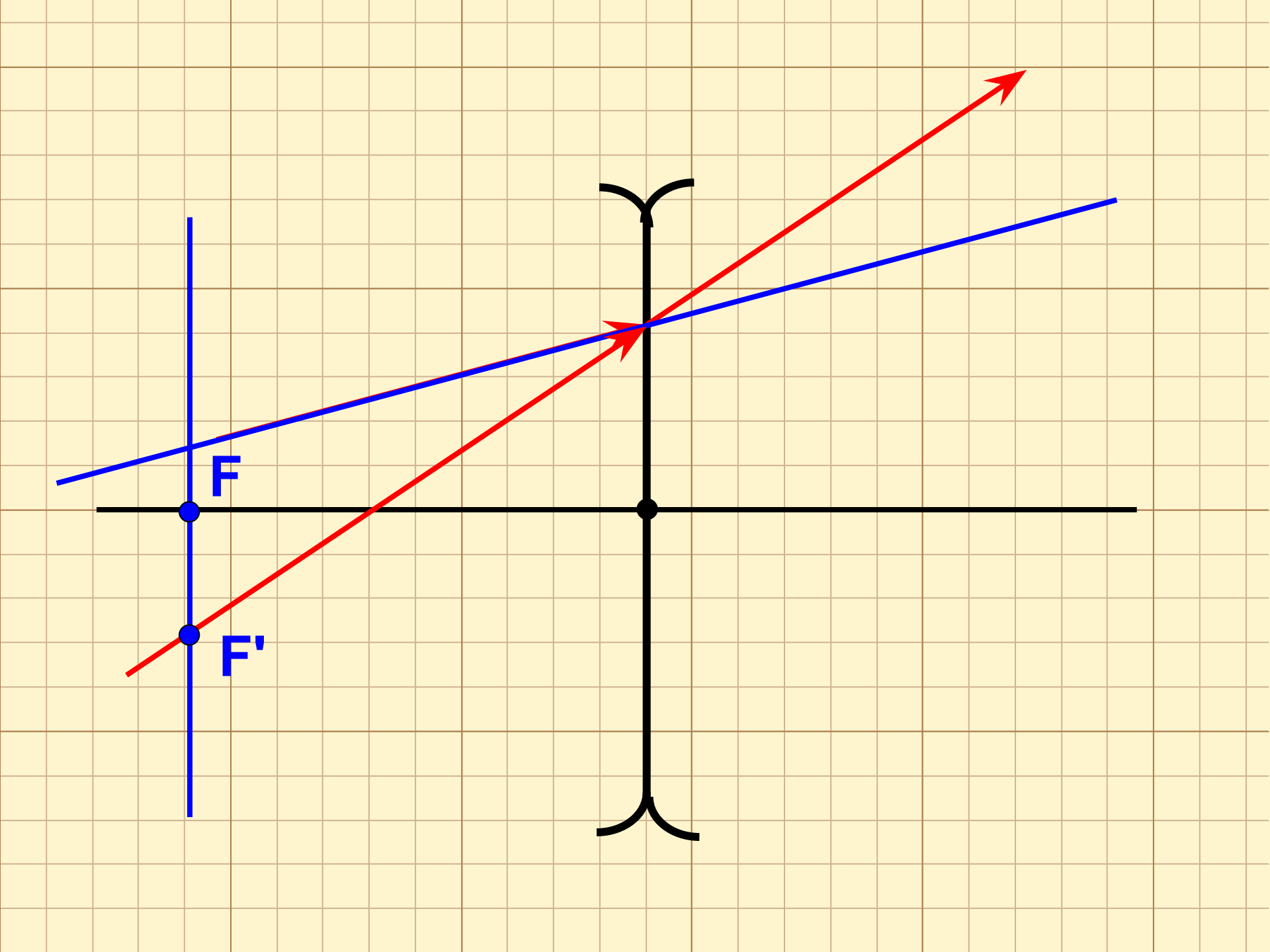


Построение изображений в линзе

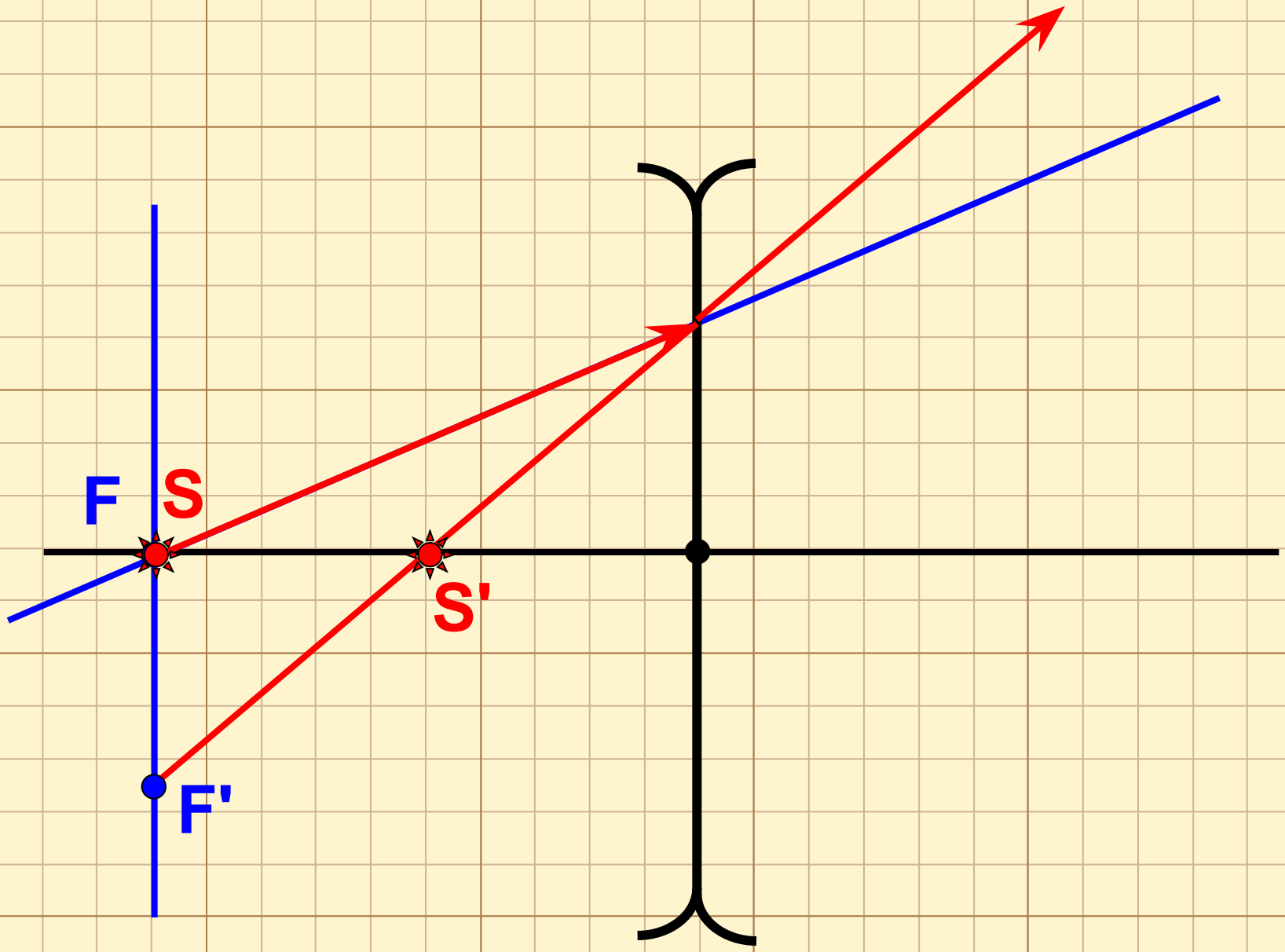


Построение изображений в линзе

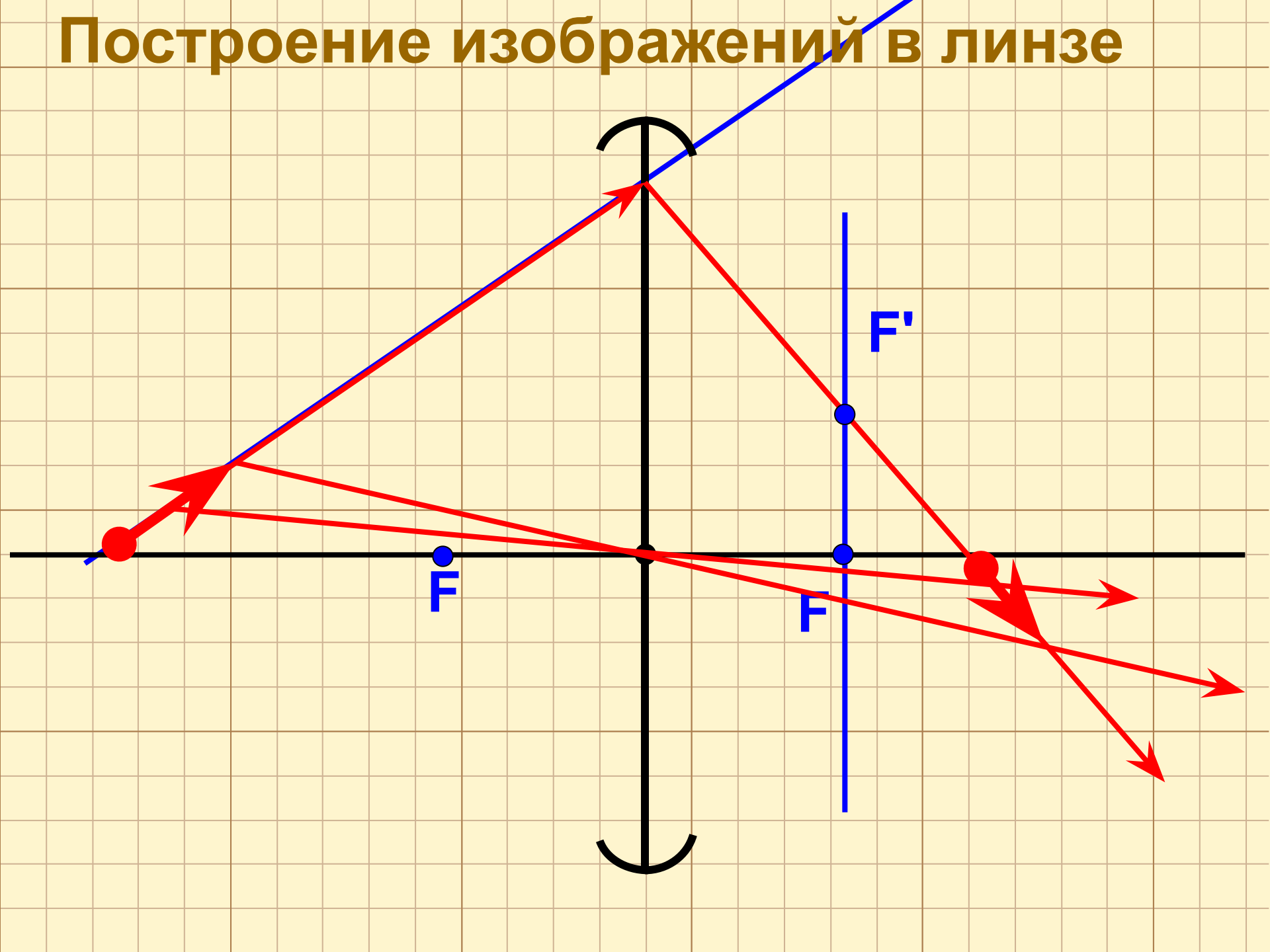



F
F'

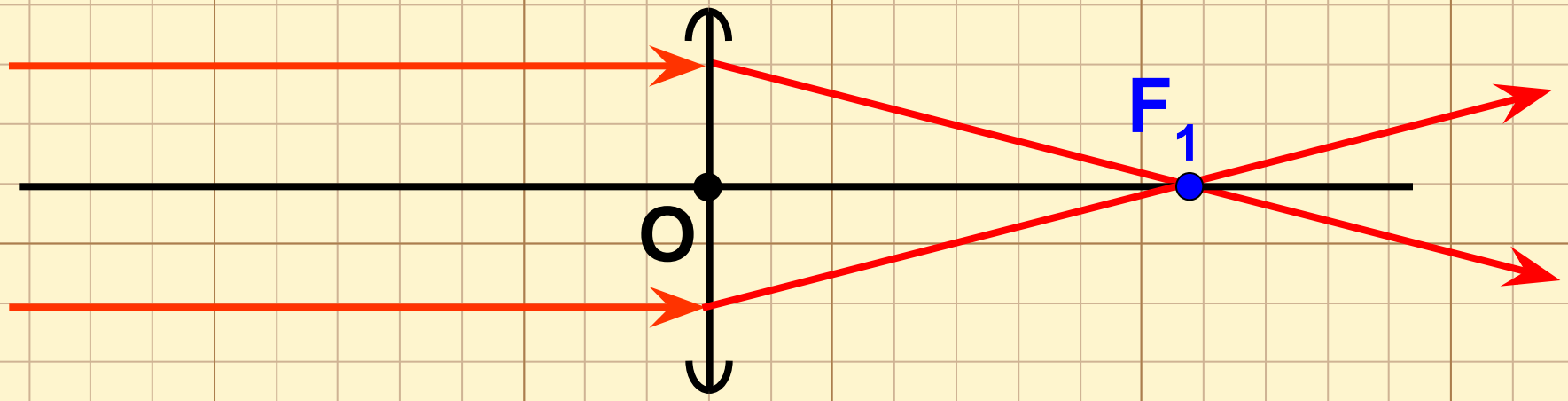
Построение изображений в линзе

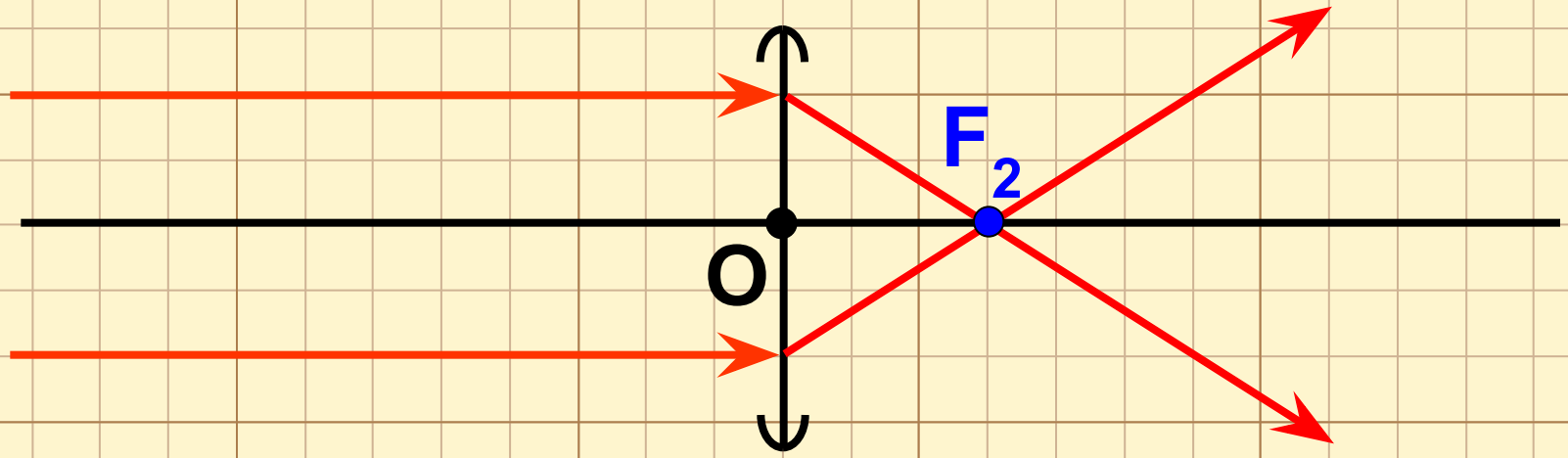


Построение изображений в линзе



Оптическая сила линзы (D)

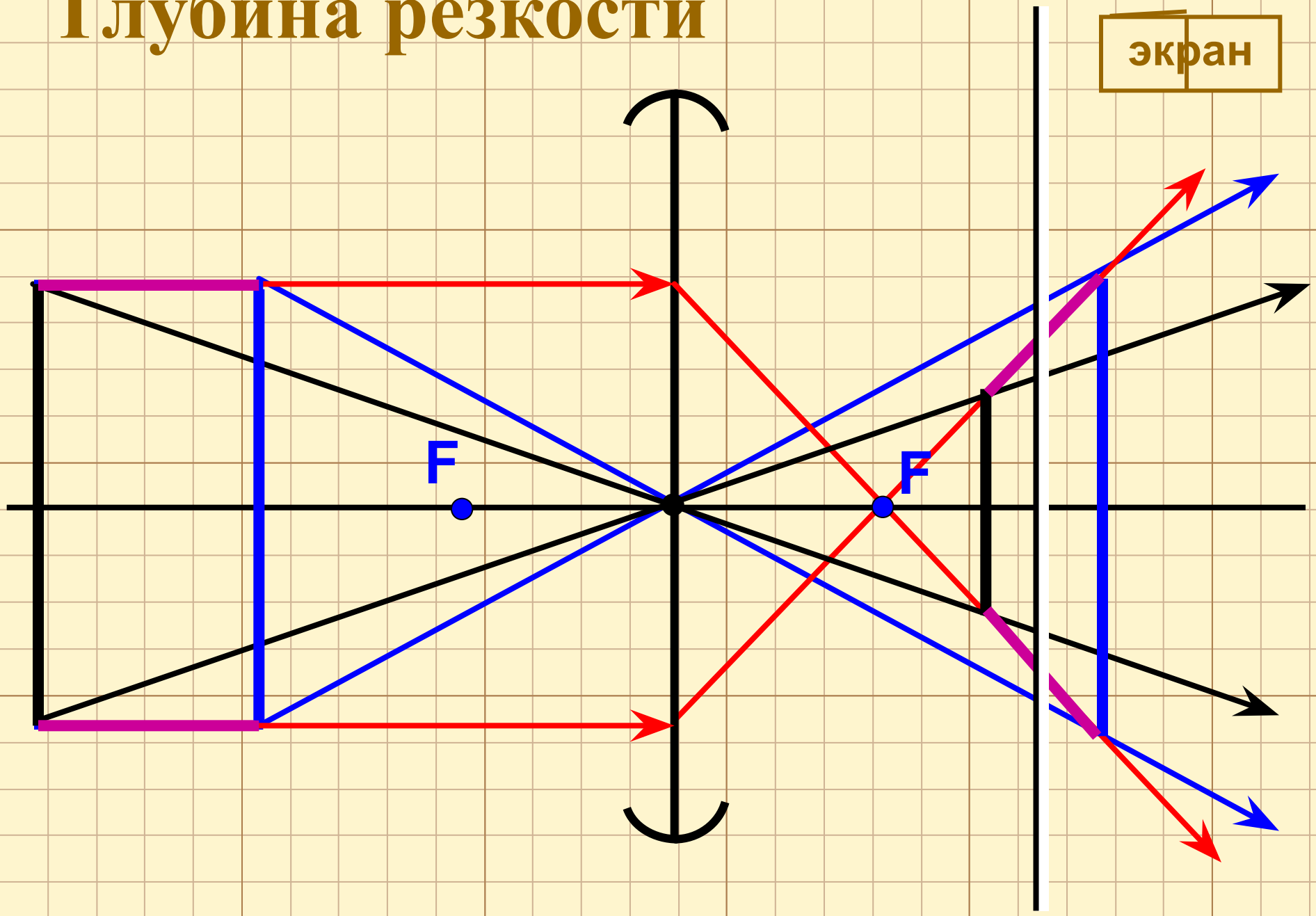




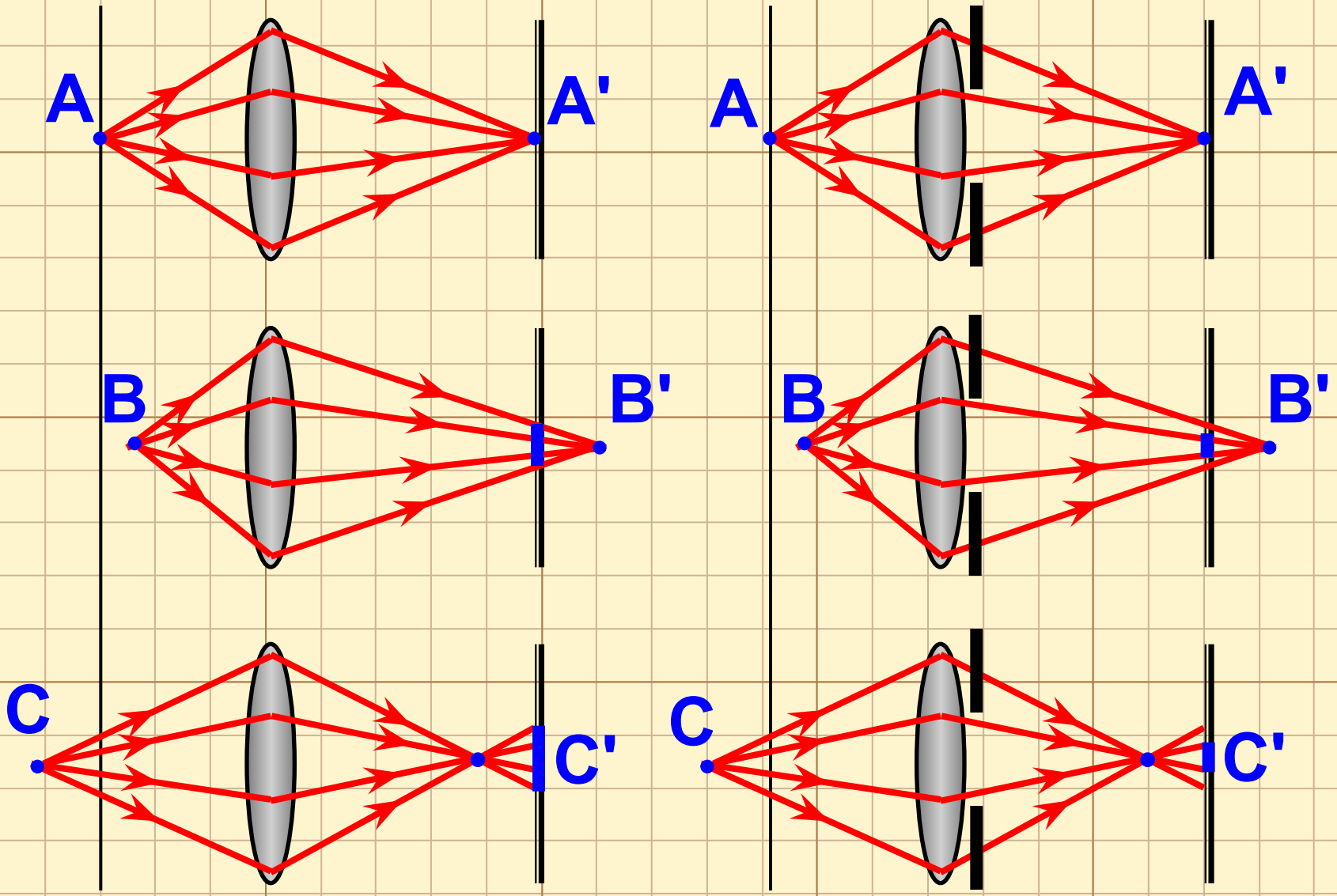
$$D = \frac{1}{F}$$

$$[D] = \frac{1}{м} = дптр$$

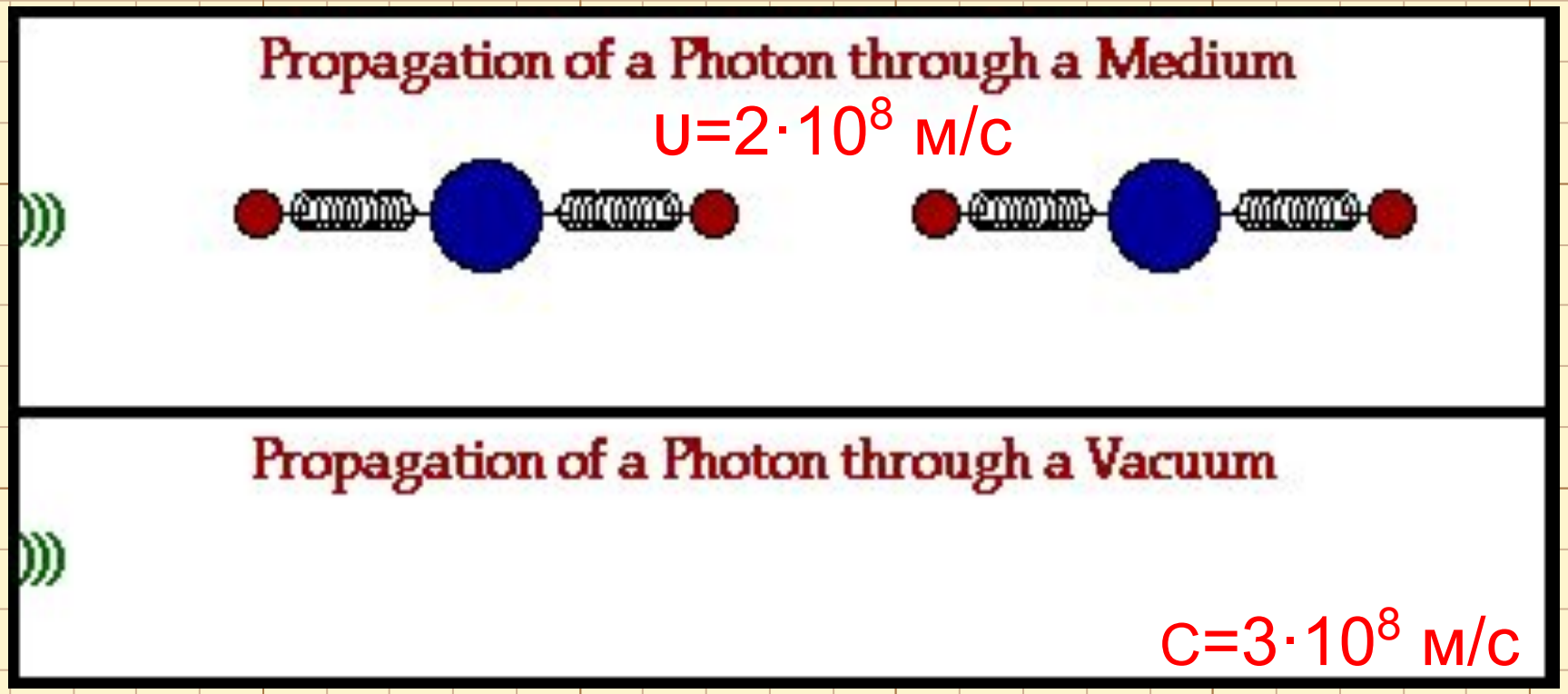
Глубина резкости



Глубина резкости



Скорость света



Стекло
n=1,5

$$\upsilon = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1{,}5} = 2 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$$

Природа света

17 век

Исаак Ньютон

корпускулярная теория (свет – поток частиц)

Христиан Гюйгенс

волновая теория (свет – волна)

19 век

Джеймс Кларк Максвелл

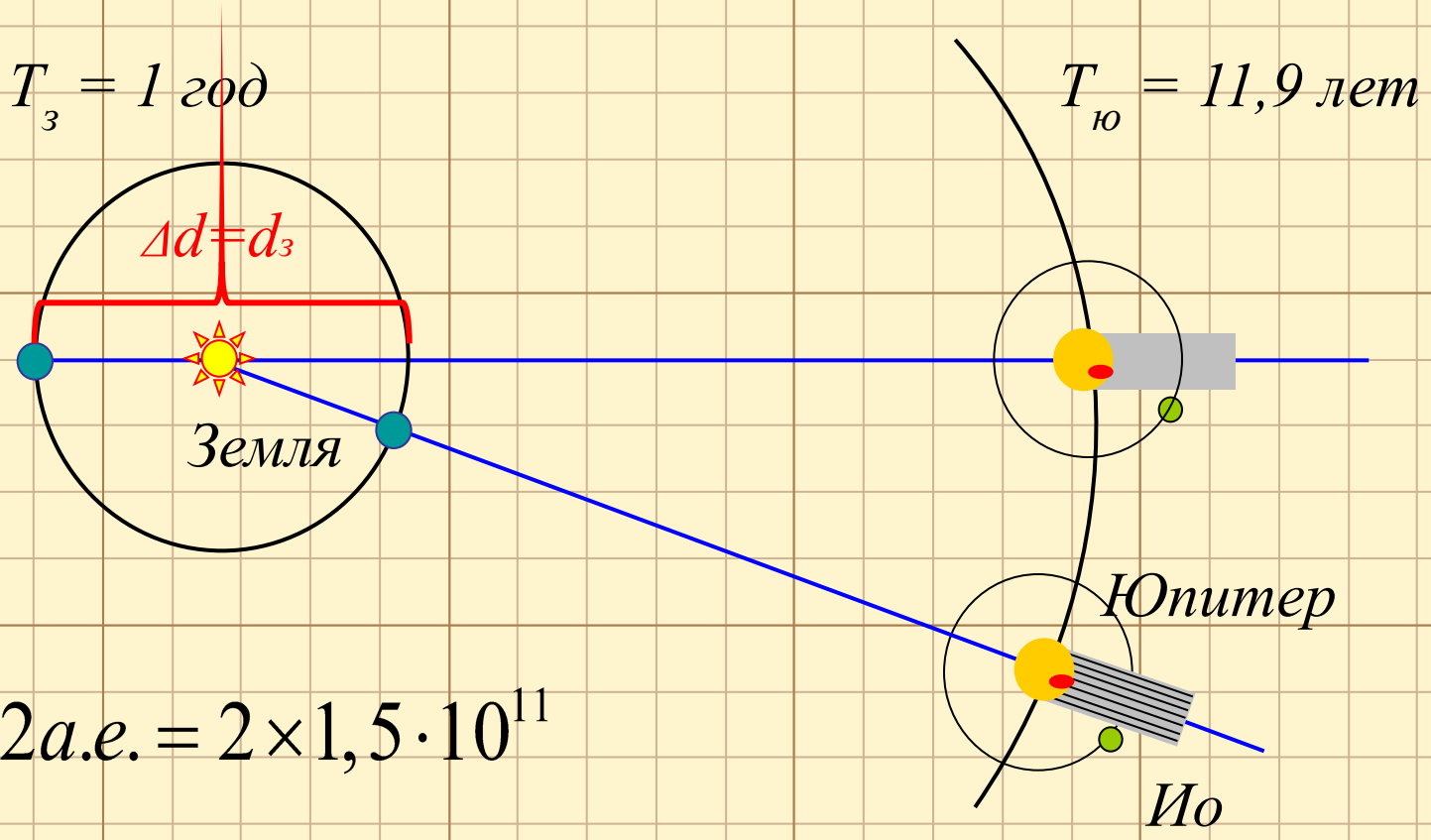
– электромагнитная природа света

20 век

Макс Планк

– квантовая природа света

Скорость света (1676 Оле Рёмер)

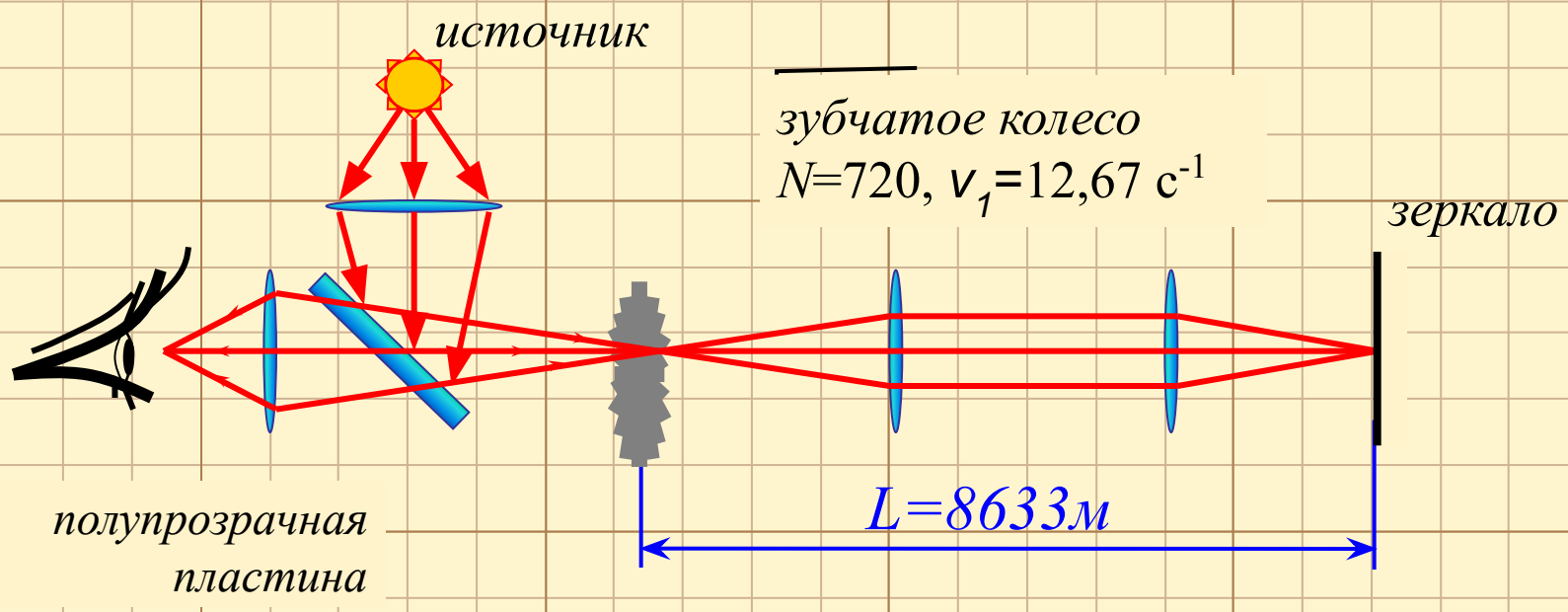


$$\Delta d = 2 а.е. = 2 \times 1,5 \cdot 10^{11}$$

$$\Delta t = 22 \text{ мин} = 22 \times 60$$

$$c = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{3 \cdot 10^{11}}{1320} = 2,15 \cdot 10^{8} \text{ —}$$

Скорость света (1849 Ипполит Физо)



$$c = \frac{2L}{t} = 4LN\nu = 4 \cdot 8633 \cdot 720 \cdot 12{,}67 = 3{,}15 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$$

$$t = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2N\nu}$$

Опыт Майкельсона, 1927 г.

$$C = 299\ 792\ 458 \pm 1{,}2 \text{ м/с}$$

Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета!

$$C_{ЕГЭ} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Лабораторная работа

Измерение показателя преломления стекла

$$n_{пр} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{AE}{CD}$$

$$n =$$

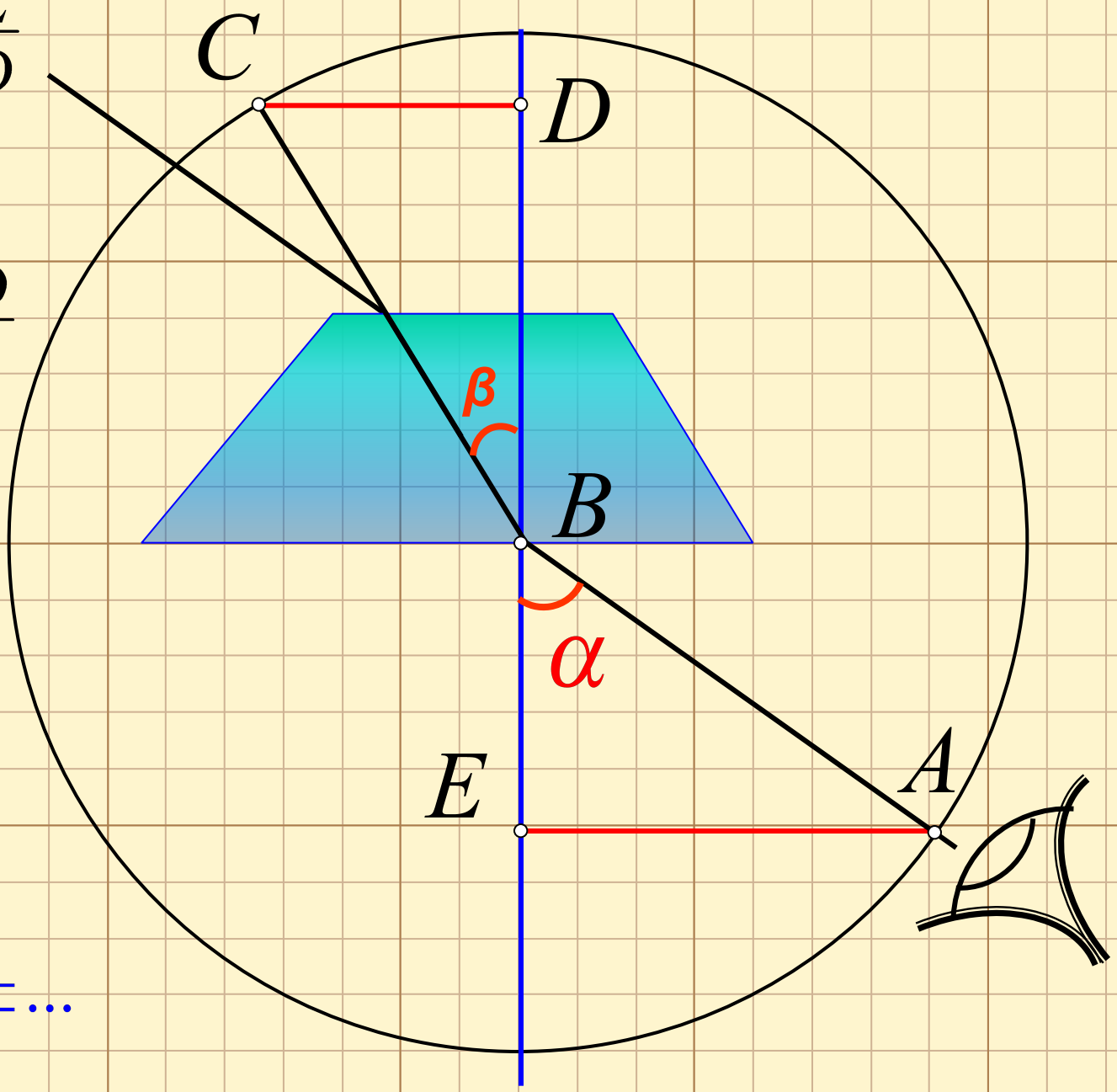
$$\varepsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta CD}{CD}$$

$$\varepsilon =$$

$$\Delta n = n_{пр}\varepsilon$$

$$\Delta n =$$

$$n = n_{пр} \pm \Delta n$$



Ответ: $n = \ldots \pm \ldots$

15.123. На стеклянную трехгранную призму с преломляющим углом 45° падает луч света и выходит из неё под углом 30°. Найти угол падения луча на призму.

Решение

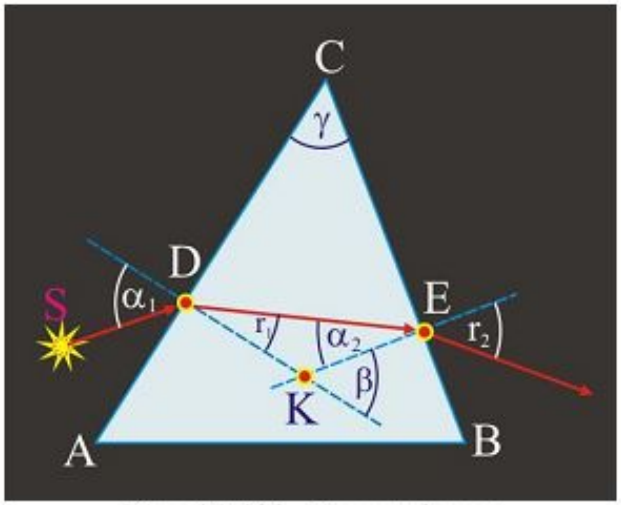


Рис. 15.123. Угол падения

1. Построение хода заданного луча внутри призмы позволяет получить ΔDKE у которого внешний угол β равен сумме двух его внутренних углов

$$\beta = r_1 + \alpha_2;$$

2. Угол β получен пересечением двух нормалей к граням призмы, следовательно:

$$\beta = \gamma;$$

3. Таким образом, для угла γ можно записать уравнение

$$\gamma = r_1 + \alpha_2; \quad \Rightarrow \quad r_1 = \gamma - \alpha_2;$$

4. Запишем далее закон преломления для грани CB

$$\frac{\sin\alpha_2}{\sin r_2} = \frac{1}{n}; \quad \Rightarrow \quad \sin\alpha_2 = \frac{\sin r_2}{b} = \frac{\sin 30^\circ}{1{,}5} \cong 0{,}333; \quad \alpha_2 = \arcsin 0{,}333 \cong 19{,}5^\circ;$$

5. Определим далее величину угла r_1

$$r_1 = 45^\circ - 19{,}5^\circ = 25{,}5^\circ;$$

6. Из закона преломления для грани AC

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin r_1} = n; \quad \Rightarrow \quad \alpha_1 = \arcsin(n\sin\alpha_1) \cong 40^\circ;$$

4.9. [9–11] (1994, 11–1) Если внимательно присмотреться к своему отражению, видимому в плоском стеклянном зеркале с посеребрённой задней поверхностью, то помимо основного изображения можно увидеть ещё два дополнительных изображения меньшей яркости. Как они будут располагаться относительно основного изображения? Толщина стекла равна d, показатель преломления n.

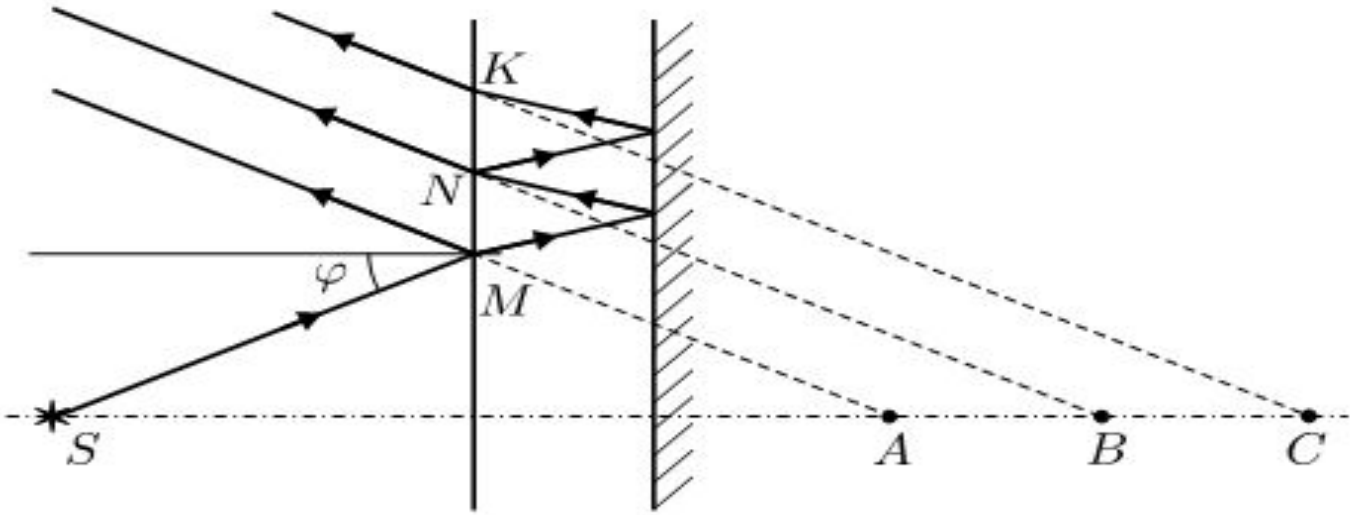


Рис. 4.9.

Определим, как будут располагаться дополнительные изображения A и C относительно основного. Пусть толщина стеклянной пластины d, показатель преломления стекла n. Если угол φ падения световых лучей на зеркало мал, то $MN \approx 2\varphi d/n \approx NK$, и $AB = BC \approx MN/\varphi = 2d/n$. Итак, эти дополнительные изображения будут располагаться впереди и позади основного на расстояниях $2d/n$ от него.

15.82. Показатель преломления атмосферы некоторой планеты радиусом R изменяется с высотой над её поверхностью по закону

$$n = n_0 - \alpha h; \quad \text{при } h >> n_0/\alpha.$$

На какой высоте тонкий пучок света, выпущенный горизонтально, будет обходить планету, оставаясь, всё время на этой высоте?

Решение

1. Выделим два луча, находящиеся на расстояниях r_1 и r_2 от центра планеты. Время их одного полного оборота должно быть одинаковым, потому что векторы скоростей световых волн всегда перпендикулярны волновым фронтам

$$\tau_1 = \tau_2; \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi r_1}{v_1} = \frac{2\pi r_2}{v_2}; \quad \frac{r_1}{v_1} = \frac{r_2}{v_2};$$

2. Выразим скорости распространения света в атмосфере через скорость света в вакууме c и соответствующие коэффициенты преломления

$$v_1 = \frac{c}{n_1}; \quad v_2 = \frac{c}{n_2}; \quad \Rightarrow \quad r_1 n_1 = r_2 n_2;$$

3. Введём следующие обозначения

$$r_1 = R + h; \quad r_2 = R + h + \Delta h; \quad n = n_o - \alpha h;$$

4. Образуем систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} &r_1 n_1 = r_2 n_2; \\ &r_1 = R + h; \\ &r_2 = R + h + \Delta h; \\ &n = n_0 - \alpha h; \end{aligned}\right\} \quad \text{при} \quad \Delta h << h \quad h = \frac{1}{2}\left(\frac{n_0}{\alpha} - R\right);$$

4.18*. [11] (1997, 11–2) В веществе, показатель преломления которого монотонно зависит от одной из декартовых координат, луч света может распространяться по дуге окружности. Найдите вид зависимости показателя преломления от этой координаты.

4.18*. Выберем начало координат в центре окружности радиуса R, по дуге которой распространяется луч света. Пусть показатель преломления монотонно изменяется вдоль оси Z.

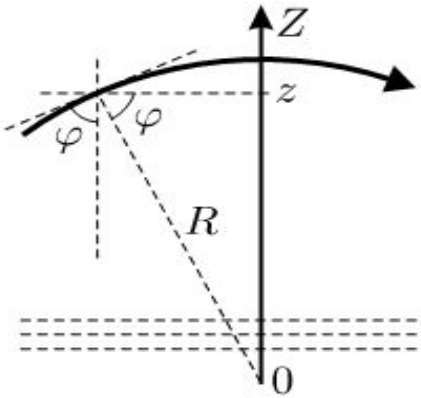


Рис. 4.18.

Разобьём среду на множество тонких слоёв, перпендикулярных оси Z, как показано горизонтальными пунктирными линиями на рисунке 4.18. В пределах каждого из слоёв показатель преломления можно считать неизменным. Пусть φ — угол между осью Z и касательной к лучу в некоторой точке. Тогда, как следует из построения на рисунке, φ является также углом падения луча на слой с координатой z. В соответствии с законом преломления $n(z)\sin\varphi = \text{const}$. Так как $\sin\varphi = z/R$, то

$$n(z) = \frac{\text{const}}{\sin\varphi} = \frac{R\cdot\text{const}}{z} = \frac{\alpha}{z},$$

где α — постоянный коэффициент. Таким образом, для того, чтобы луч света мог распространяться в среде по дуге окружности, показатель преломления должен убывать обратно пропорционально координате z, отсчитываемой от центра этой окружности.

Изобразим на рисунке 4.19 сечение пластины плоскостью, в которой лежит указанная ось симметрии. Обозначим расстояние от плоской поверхности пластины до фокуса через L и рассмотрим произвольный луч из пучка, упавший на плоскую поверхность пластины на расстоянии x от начала координат. Тогда оптическая длина пути для этого луча равна

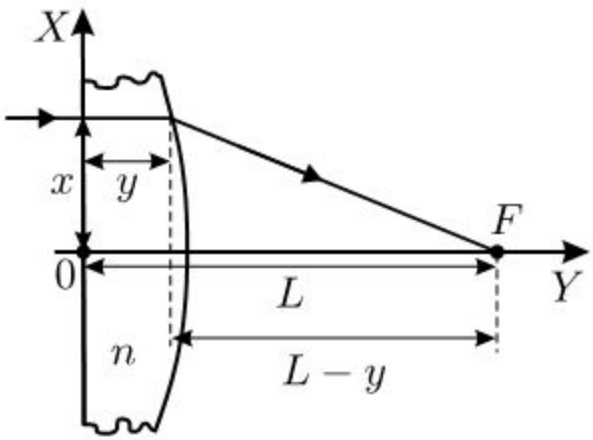


Рис. 4.19.

$$l = ny + \sqrt{x^2 + (L-y)^2} = \text{const},$$

так как все лучи независимо от точки падения должны иметь одинаковую оптическую длину. Это условие представляет собой записанное в неявном виде искомое уравнение функции $y(x)$, определяющей форму правой поверхности пластины.

Для малых отклонений x падающих лучей от оси симметрии (при $x \ll (L-y)$) полученное уравнение можно преобразовать. Вынесем из под знака корня величину $(L-y)$ и применим приближённую формулу $\sqrt{1+z} \approx 1 + (z/2)$. В результате получим:

$$y(n-1) + L + \frac{x^2}{2(L-y)} \approx \text{const}.$$

Для удобства представления этого результата найдём максимальную толщину пластины y_0. Для этого положим в полученном уравнении $x = 0$. Тогда $y_0 = (\text{const} - L)/(n-1)$ и

$$y \approx y_0 - \frac{x^2}{2(n-1)(L-y_0)}.$$

При записи последнего уравнения мы учли, что вблизи оси симметрии пластины $L - y \approx L - y_0$. Полученное уравнение при $x \ll (L-y)$ представляет собой уравнение сферы радиусом $R = (L-y_0)(n-1)$. Отметим, что так как $L - y_0 = F$ (где F — фокусное расстояние), то $R = F(n-1)$, что совпадает с известным результатом для радиуса кривизны поверхности линзы.

15.79. Тонкий пучок света, проходящий через центр стеклянного шара радиусом R, фокусируется на расстоянии 2R от его центра. Найти показатель преломления стекла.

Решение

1. Запишем соотношения между углами

$$\alpha = 2\gamma;$$

$$\alpha + \gamma = 2\beta;$$

2. Ввиду малости углов синусы углов можно в первом приближении заменить углами и закон преломления записать следующим образом

$$\frac{\alpha}{\beta} = n; \quad \Rightarrow \quad n = \frac{2\gamma}{\frac{2\gamma + \gamma}{2}} = \frac{4}{3} \cong 1{,}33;$$

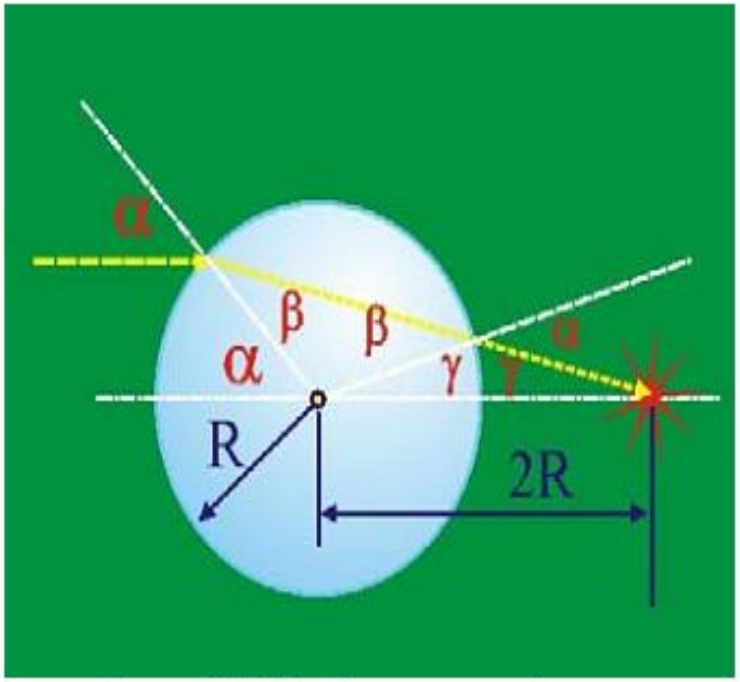


Рис. 15.79. Стеклянный шар

15.133. Два параллельных луча, расстояние между которыми равно радиусу R круглого прямоугольного прозрачного цилиндра, падают на боковую поверхность этого цилиндра. Лучи параллельны основанию цилиндра. Определить величину показателя преломления материала цилиндра n, при котором лучи пересекаются на его поверхности.

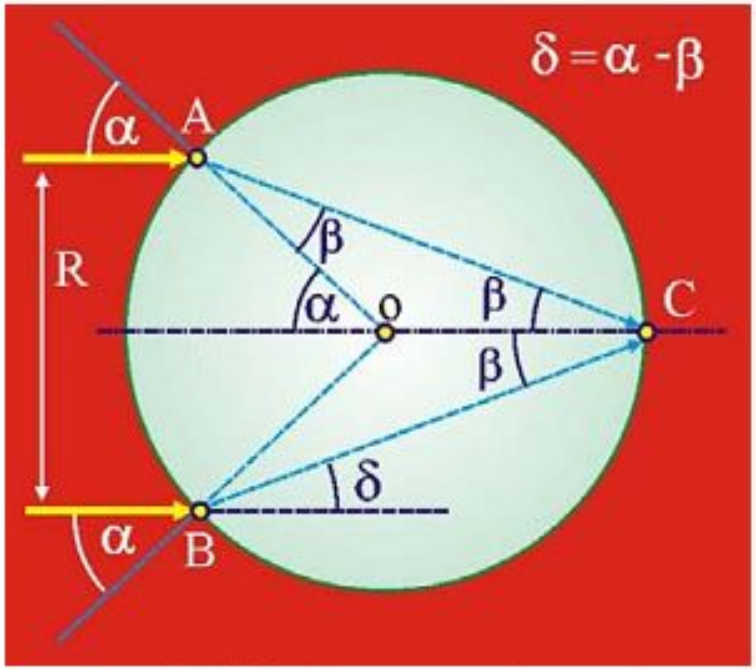


Рис. 15.133. Прозрачный цилиндр

Решение

1. Если расстояние между падающими лучами равно радиусу цилиндра, то угол падения будет равен $\alpha = 30^{\circ}$.

2. При пересечении лучей в точке C на диаметрально противоположной стороне цилиндра

$$\beta = \frac{\alpha}{2} = 15^{\circ};$$

3. Запишем закон преломления

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n; \quad \Rightarrow \quad n = \frac{\sin 30^{\circ}}{\sin 15^{\circ}} \cong 1{,}92;$$

15.139. Тонкий пучок света, падающий на полушарие из стекла с показателем преломления n перпендикулярно его плоской грани, собирается на расстоянии S от выпуклой поверхности. На каком расстоянии S_1 от плоской поверхности полушария соберутся лучи, если пучок света пустить с обратной стороны?

Решение

1. При падении луча на плоскую грань полусферы луч преломившись на границе раздела, попадёт в точку B. Так как по условию луч тонкий, то

$$\beta \approx \tau = n\alpha\ ;$$

2. Из геометрических соображений при условии малости углов

$$AC = OA\beta = BC(\alpha - \beta),$$

откуда:

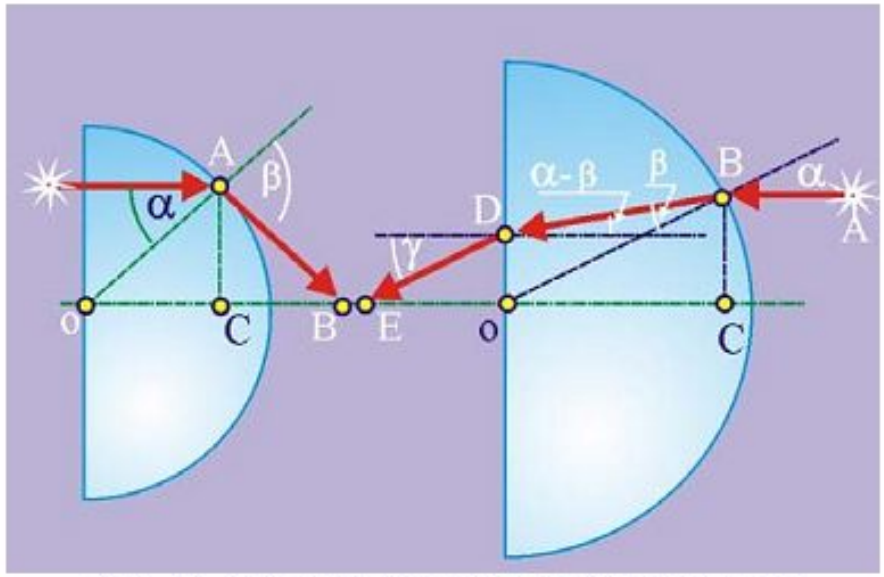


Рис. 15.139. Свет в стеклянном полушарии

$$BC = S \approx \frac{r}{n-1};$$

3. При распространении света в обратном направлении $\beta \approx \alpha n$ и $\gamma \approx (\alpha - \beta)n$, поэтому искомое расстояние можно записать уравнением:

$$S_1 = OE \approx \frac{OD}{\gamma} \approx \frac{OC[\alpha - (\alpha - \beta)]}{n(\alpha - \beta)} \approx \frac{r}{n(n-1)} = \frac{S}{n};$$