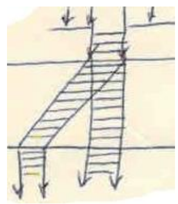
Оптика. Лекция 1

Световые лучи. Закон прямолинейного распространения света

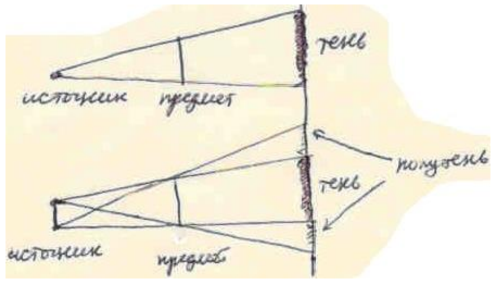
Направление распространения света обычно задают с помощью *лучей – направленных линий, указывающих направление распространения световой энергии*. Это направление можно найти экспериментально, если поставить на пути света непрозрачный экран с небольшим отверстием. Тогда в запыленной комнате мы увидим путь света в виде узкого, прямолинейного канала – *светового пучка*. Казалось бы, уменьшая отверстие, можно сузить этот пучок до линии и сколь угодно точно установить направление распространения световой энергии. Но в действительности с уменьшением отверстия пучок сжимается лишь до тех пор, пока диаметр отверстия значительно превышает длину световой волны. Когда же диаметр отверстия оказывается сравнимым с длиной волны, становится заметным расширение пучка за счет дифракции. Свет огибает края экрана, подобно тому, как это происходит с волнами на поверхности воды. Поэтому получить сколь угодно тонкий пучок света, который можно было бы назвать световым лучом, мы не сможем.

Таким образом, ***под световым лучом понимают направленную линию, в каждой точке которой касательная совпадает с направлением распространения световой энергии***. И когда говорят об отражении или преломлении световых лучей, имеют в виду изменение направления распространения световой энергии. Чтобы экспериментально определить это направление, выделяют узкие световые пучки, диаметр которых все же должен существенно превосходить длину волны (для видимого света $\lambda \sim (4\div8)*10^{-5}$ см). Тогда осевые линии этих пучков и будут являться световыми лучами. Основная польза от введения понятия светового луча заключается, с одной стороны, в его предельной наглядности, а с другой стороны, в том, что поведение лучей в изотропных средах определяется простыми законами – *законами геометрической оптики*. *Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представлений о свете как о совокупности световых лучей. При этом физическая природа света не исследуется.*

Часть законов геометрической оптики известна с древности, что объясняется их простотой и легкостью наблюдения за световыми лучами. Любопытно, однако, что, как оказалось, законы геометрической оптики, открытые для легко наблюдаемых световых лучей (как линий, указывающих направление распространения световой энергии), на самом деле всегда справедливы только для невидимых глазом волновых нормалей (последние в теории волн часто также называют лучами, что иногда приводит к терминологической путанице). Просто в изотропных средах (до середины 17 века другие среды учёным не попадались) направления световых лучей (вектора Пойтинга) и волновых нормалей совпадают. Однако, в анизотропных средах часто это не так. При этом в анизотропных средах волновые нормали подчиняются законам геометрической оптики, а световые лучи могут вести себя неожиданным образом. Так, например, при нормальном падении на анизотропную среду световой пучок может разбиться на два преломленных пучка, что совершенно не укладывается в обычные представления геометрической оптики (см. рисунок, где волновые фронты обозначены тонкими горизонтальными линиями). В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением изотропных сред, поэтому не будем проводить разграничений между лучами и волновыми нормалями.



Одним из древнейших законов геометрической оптики является *закон прямолинейного распространения света*. Он приводится в работах Эвклида (III в до н.э.) и гласит, что *в однородной среде линия луча прямолинейна*.

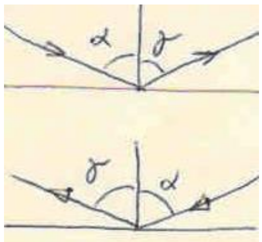


Прямолинейностью распространения света объясняется, например, образование *тени*, т.е. области, куда не поступает световая энергия. При малых размерах источника (светящаяся точка) получается резко очерченная тень. При больших размерах источника создаются нерезкие тени. Дело в том, что от каждой точки источника свет распространяется прямолинейно, и предмет, освещенный уже двумя светящимися точками, дает две несовпадающие тени, положение которых образует тень неравномерной густоты. Полная тень при протяженном источнике образуется лишь в тех участках экрана, куда свет не попадает совсем. По краям полной тени располагается более светлая область. Это полутень. По мере удаления от области полной тени, полутень становится все более и более светлой. Из области полной тени глаз совсем не увидит источника света, а из области полутени он увидит лишь часть его поверхности. Часто тень вообще не образуется. Так, например, в пасмурный день нельзя увидеть тени от столбов, домов и других предметов. Это объясняется тем, что в этом случае предметы освещаются так называемым изотропно рассеянным светом, который падает на них равномерно со всех сторон.

Закон отражения света. Изображение в плоском зеркале.

Согласно закону прямолинейного распространения света, луч света, распространяющегося в однородной среде, является прямолинейным, пока он не дойдет до границы этой среды с другой средой. На границе двух сред луч меняет свое направление. Часть энергии света (в ряде случаев и вся энергия) возвращается в первую среду. Это явление называется *отражением света*. Ещё в древности был установлен следующий закон отражения света:

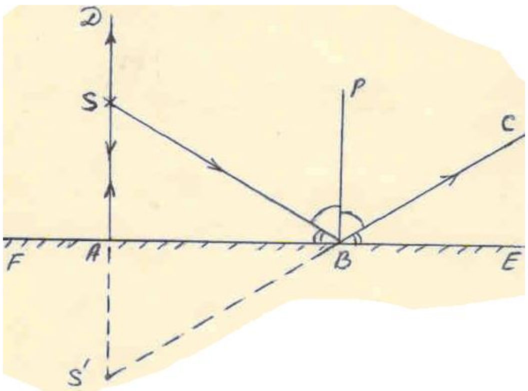
падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения γ равен углу падения α.



Очевидно, что этот закон будет также выполняться, если распространение света будет происходить в обратном направлении. ***Обратимость хода световых лучей*** является их важным свойством.

Заметим, что ранее такой же закон отражения был получен для волн на основе использования принципа Гюйгенса.

Пусть светящаяся точка S находится перед плоской отражающей поверхностью FE, т.е. перед *плоским зеркалом*. Рассмотрим ход двух лучей, исходящих из точки S и падающих на зеркало. Пусть один из них (SA) падает на зеркало нормально (т.е. его угол падения равен нулю), а другой (SB) – под произвольным углом. После отражения от зеркала эти лучи в соответствии с законом отражения будут направлены соответственно вдоль прямых AS и BC, причем $S\hat{B}P = C\hat{B}P$ ($PB \perp AE$), и поэтому $S\hat{B}A = C\hat{B}E$ (см. рисунок). Пусть продолжения отраженных лучей AS и BC пересекаются в некоторой точке S'. Так как $C\hat{B}E = A\hat{B}S'$ (как вертикальные углы), то $S\hat{B}A = A\hat{B}S'$. Кроме того, $S\hat{A}B = B\hat{A}S' = 90°$, и, следовательно, треугольники SAB и $S'AB$ равны (по общей стороне AB и двум прилегающим углам). Отсюда следует, что $|S'A| = |SA|$, кроме того $SS' \perp FE$, т.е. *точка S' расположена симметрично точке S относительно плоского зеркала*. В силу произвольности выбора луча SB, исходящего из точки S, ясно, что продолжение любого луча, испущенного источником S и отраженного от зеркала, будет так же проходить через точку S'. Заметим, что если несколько таких отраженных лучей попадёт в глаз наблюдателя, то ему будет казаться, что они выходят из точки S'. Причем положение точки S' *не зависит* от положения наблюдателя.



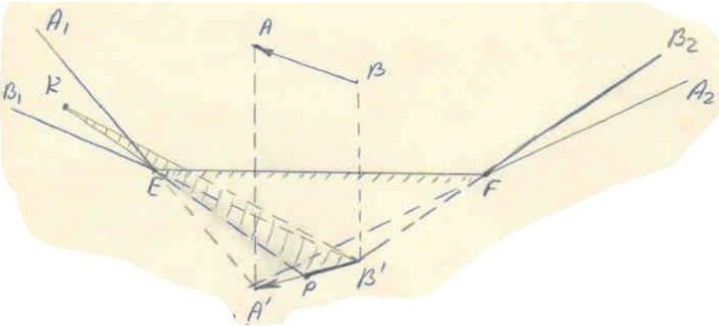
Определение. Точка пересечения лучей, исходящих из точечного источника и изменивших свое направление на одной или нескольких границах раздела сред (или в неоднородной среде), называется *действительным изображением источника*. Изображение называется *мнимым*, если пересекаются не сами лучи, а их продолжения.

Последнее название связано с тем, что в точку, где расположено мнимое изображение, не попадает энергия от источника света.

Таким образом, *изображение точки в плоском зеркале является мнимым и расположено симметрично ей относительно плоскости зеркала*. Поэтому *изображение любого пред-*

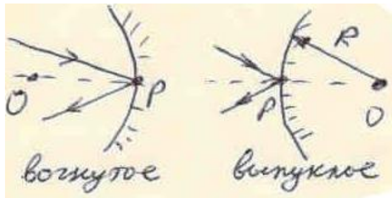
мета (изображением предмета называется совокупность изображений всех его точек) *в плоском зеркале расположено симметрично самому предмету относительно плоскости зеркала, т.е. размеры предмета и его изображения равны*.

Известно, что не из любой точки можно *увидеть изображение* в плоском зеркале (ясно, что изображение существует, не зависимо от того, видим мы его или нет). На рисунке показано изображение $A'B'$ предмета AB в плоском зеркале EF. Очевидно, изображение точки B видно из области, ограниченной зеркалом и лучами EB_1 и FB_2. Аналогично изображение точки A видно из области, ограниченной зеркалом и лучами EA_1 и FA_2. Поэтому полностью изображение предмета видно из так называемой *области видения*, ограниченной зеркалом EF и лучами EA_1 и FB_2. Ещё из двух областей (углы B_1EA_1 и B_2FA_2) видна только часть изображения предмета AB. Это области *частичного видения* (например, из точки K видна только правая часть PB' изображения). Из других точек пространства изображение не видно совсем.

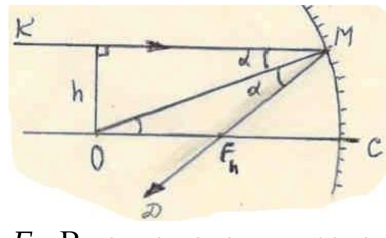


Сферическое зеркало

Если взять в качестве отражающей поверхности часть внешней или внутренней поверхности зеркальной сферы, то получится ***сферическое зеркало***. Различают два типа сферических зеркал – ***вогнутые*** (у них свет отражается от внутренней поверхности сферы) и ***выпуклые*** (у них свет отражается от внешней поверхности сферы). Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют ***оптическим центром зеркала*** (точка O на рис.). Радиус сферической поверхности R называют ***радиусом кривизны*** зеркала. Любую прямую, проходящую через оптический центр зеркала и само зеркало, называют ***оптической осью зеркала*** (прямая OP). Среди оптических осей принято выделять одну главную. Обычно ***главная оптическая ось*** отличается от остальных оптических осей, которые называют ***побочными***, лишь тем, что она по тем или иным причинам более удобна для решения рассматриваемой задачи. Точку пересечения главной оптической оси и зеркала называют ***полюсом зеркала*** (точка P).



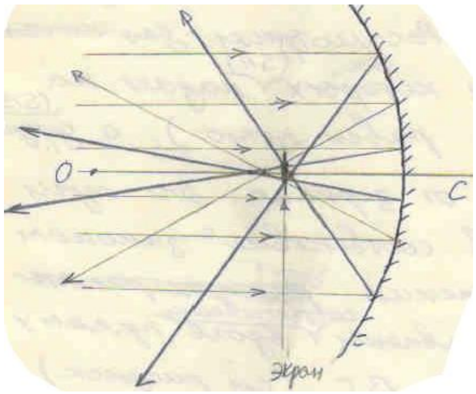
Пусть на зеркало падает луч KM, проходящий на расстоянии h от оптического центра зеркала. Обозначим отраженный луч – MD, оптическую ось, параллельную падающему лучу – OC, а точку пересечения отраженного луча и оптической оси – F_h. В точке падения прове-



дем перпендикуляр к зеркалу – им будет радиус OM. Из закона отражения следует, что $K\widehat{M}O = O\widehat{M}D = \alpha$. Кроме того, $C\widehat{O}M = K\widehat{M}O = \alpha$ (как внутренние накрест лежащие углы при параллельных прямых). Следовательно, треугольник OF_hM является равнобедренным и отрезок $OF_h = OM/(2\cos\alpha) = R/(2\cos\alpha)$. Учитывая также, что $\sin\alpha = h/R$, получим

$$|CF_h| = |OC| - |OF_h| = R - R/(2\cos\alpha) = ½R\{2 - 1/(1 - h^2/R^2)^{1/2}\}.$$

Пусть теперь на сферическое зеркало падает целый пучок лучей, параллельных оптической оси OC. Такой пучок падает, например, от «бесконечно» удаленного объекта «бесконечно» малых угловых размеров: $R << L$, $l << L$, где l – размер объекта, L – расстояние до объекта. Эти условия прекрасно выполняются, в частности, для звезд. Для различных лучей этого пучка величина h будет разной, и, следовательно, после отражения эти лучи будут пересекать оптическую ось в разных точках. Поэтому, если поместить на пути отраженных лучей какой-нибудь экран, перпендикулярный оси OC, то при любом его положении на нём будет видно светлое круглое пятно с неясными границами, которое никогда не сожмется в точку (на рисунке указано положение экрана, при котором диаметр пятна минимален). То есть с помощью широкого пучка лучей, падающего на сферическое зеркало, нельзя получить точечное изображение бесконечно удаленного объекта бесконечно малых угловых размеров. Подобные погрешности изображения, вызванные использованием широких пучков лучей, называют ***сферической аберрацией***. Сферическую аберрацию можно значительно уменьшить, если использовать пучки параксиальных (приосевых) лучей.



Определение. Луч, образующий малые углы с оптической осью и нормалью к сферической границе раздела, называется *параксиальным (приосевым) лучом*. Пучок лучей называется параксиальным, если все его лучи параксиальные.

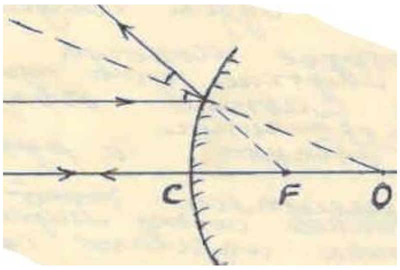
В рассматриваемом случае пучок будет параксиальным, если его ширина $h << R$. В этом приближении $|CF_h| \approx ½R\{1 - h^2/(2R^2)\}$. Поэтому все лучи такого пучка пройдут вблизи точки F оптической оси, такой, что $|CF| = R/2$. Причем при $h \le 0,1R$ для всех лучей пучка $|F_hF|/|CF| \le 0,005$. Точку F называют фокусом сферического зеркала.

Определение. Точка, в которой пересекаются после отражения лучи параксиального пучка, падающего на сферическое зеркало параллельно его оптической оси, называется *фокусом зеркала*. Фокус, лежащий на главной оптической оси, называется *главным фокусом зеркала*. Расстояние, на котором находится от зеркала главный фокус, называется *фокусным расстоянием F сферического зеркала*.

Совокупность всех фокусов сферического зеркала, очевидно, образует часть сферической поверхности с радиусом кривизны $R/2$. Если рассматривать лишь малые углы между главной и побочной осями, то соответствующая часть этой сферической поверхности будет близка к части плоскости, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус. Эта плоскость называется ***фокальной плоскостью зеркала***. Плоскость, проходящая через полюс зеркала перпендикулярно его главной оптической оси, называется ***главной плоскостью зеркала***.

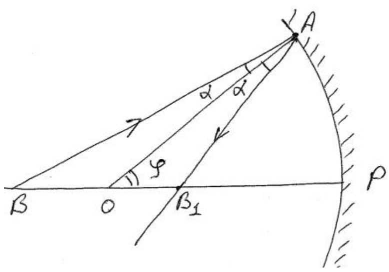
Определение. Величина, обратная фокусному расстоянию зеркала, называется его *оптической силой* $D = 1/F = 2/R$. Оптическую силу выражают в *диоптриях* (дптр). Оптической силой 1 дптр обладает зеркало с фокусным расстоянием 1 м.

Если *параксиальный пучок* направить на выпуклое зеркало параллельно его оптической оси, то отраженный пучок будет расходящимся. Действуя аналогично случаю вогнутого зеркала, можно показать, что продолжения этих отраженных лучей будут пересекаться вблизи точки оптической оси, находящейся за зеркалом на расстоянии $R/2$ от его оптического центра и самого зеркала. Эта точка называется *фокусом выпуклого зеркала*. Поскольку в этом случае в фокусе пересекаются не сами отраженные лучи, а их продолжения, то фокус выпуклого зеркала является *мнимым*, и его фокусное расстояние принято считать отрицательным: $F = -R/2$.



Формула сферического зеркала

Рассмотрим произвольный луч, исходящий из лежащей на оптической оси сферического зеркала точки B. Пусть он падает на зеркало в точке A и после отражения пересекает оптическую ось в точке B_1 (см. рисунок). Очевидно, площадь треугольника BAB_1 равна сумсумме площадей треугольников BAO и OAB_1, где O – центр кривизны поверхности зеркала. Пользуясь тем, что площадь треугольника равна половине произведения длин двух его сторон на синус угла между ними и учитывая закон отражения, получим: $uR\sin\alpha + u_1R\sin\alpha = u_1u\sin 2\alpha$, где R – радиус кривизны зеркала, $u = BA$, $u_1 = B_1A$. Пользуясь тригонометрической формулой $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$, имеем



$$uR + u_1R = 2u_1u\cos\alpha. \qquad (1)$$

Видно, что в общем случае положение точки B_1 зависит от направления луча BA. Ограничимся в дальнейшем параксиальными лучами ($\alpha \ll 1$ и $\varphi \ll 1$). Для них можно принять $\cos\alpha \approx 1$, $u \approx BP \equiv s$, $u_1 \approx B_1P \equiv d$. Здесь s – расстояние от источника до главной плоскости зеркала, d – расстояние от изображения до главной плоскости зеркала. В этом приближении формула (1) принимает вид

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{d}=\frac{2}{R}\equiv\frac{1}{F}, \tag{2}$$

где $F\equiv R/2$ – фокусное расстояние зеркала. Полученная формула называется ***формулой сферического зеркала*** или просто ***формулой зеркала***. Из формулы (2), следует, что:

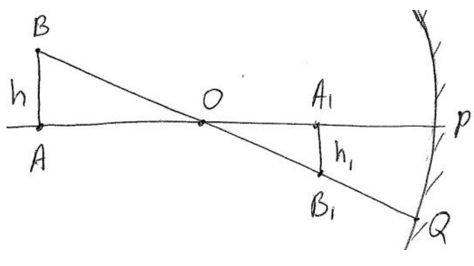
$$d=\frac{Fs}{s-F},\quad s=\frac{Fd}{d-F},\quad F=\frac{sd}{d+s}. \tag{3}$$

Из формулы (2) видно, что в рассматриваемом приближении положение точки B_1 не зависит от направления луча BA. Следовательно, все параксиальные лучи, выходящие из одной точки оптической оси, после отражения от сферической поверхности пересекутся приближенно в одной точке, также лежащей на оптической оси. Поэтому точка B_1 будет ***оптическим изображением точки B в параксиальных лучах***.

Формула (2) была получена для случая вогнутого зеркала, действительного изображения и действительного источника света B. Аналогичная формула справедлива и для случая выпуклого зеркала, мнимого изображения и (или) мнимого источника (когда источником служит точка схождения продолжений падающих на зеркало лучей). При этом необходимо пользоваться следующими ***правилами знаков*** для входящих в нее величин: *расстояния от действительного источника или изображения до главной плоскости зеркала считаются положительными, расстояния от мнимого изображения или источника – отрицательными, фокусное расстояние выпуклого зеркала считается отрицательным.*

Поперечное увеличение сферического зеркала

Рассмотрим теперь случай, когда точечный источник B не лежит на главной оптической оси. Проведем прямую BO, соединяющую точку B с центром кривизны O поверхности зеркала. Такую прямую можно рассматривать как оптическую ось, сведя тем самым разбираемый случай к предыдущему. Пользуясь формулой (2) имеем:



$$\frac{1}{BQ}+\frac{1}{B_1Q}=\frac{2}{R}. \tag{4}$$

Пусть A и A_1 – проекции соответственно точек B и B_1 на главную оптическую ось, h = BA, h_1 = B_1A_1. Тогда, если $h\ll BO$, то $BO\approx AO$, $B_1O\approx A_1O$, и значит,

$$BQ\approx AP\equiv s,\qquad B_1Q\approx A_1P\equiv d, \tag{5}$$

Из (4), (5) следует, что при малых расстояниях от источника (изображения) до главной плоскости зеркала формула (2) по-прежнему справедлива. ***Поэтому небольшой перпен-***

дикулярный главной оптической оси отрезок длиной h будет изображаться (в параксиальных лучах) отрезком длиной h_1***, перпендикулярным главной оптической оси***. При этом из подобия треугольников *ABO* и A_1B_1O имеем следующую формулу для ***поперечного линейного увеличения сферического зеркала*** (т.е. увеличения зеркалом линейных размеров предметов в направлениях, перпендикулярных главной оптической оси зеркала):

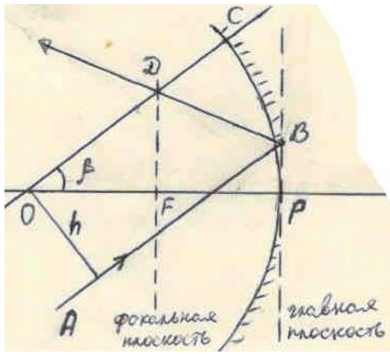
$$\left|\frac{h_1}{h}\right| = \left|\frac{2F-d}{s-2F}\right|.$$

Подставляя в эту формулу соотношения (3), получим еще несколько более удобных формул для ***поперечного линейного увеличения***:

$$\left|\frac{h_1}{h}\right| = \left|\frac{F}{s-F}\right| = \left|\frac{F-d}{F}\right| = \left|\frac{d}{s}\right|. \qquad (6)$$

Удобные лучи для построения изображений в сферическом зеркале

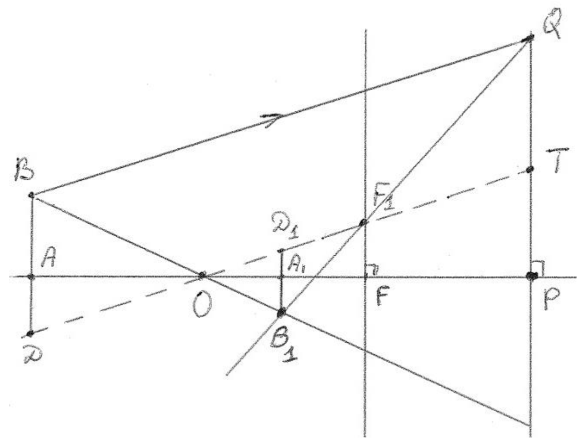
Итак, мы доказали, что сферическое зеркало создаёт почти точечное изображение точечного источника в параксиальных лучах. У нас есть формулы для расчёта положения этого изображения. Мы можем также находить его положение строя ход параксиальных лучей. Однако на практике последним методом пользоваться практически не возможно, т.к. для повышения точности необходимо использовать лучи почти совпадающие с главной оптической осью. Возникает вопрос: можно ли найти это изображение с помощью простых геометрических построений? Оказывается можно, если *использовать произвольные, в том числе не параксиальные лучи, и строить ход отраженных лучей по специальной технологии, которая имеет физический смысл только для параксиальных лучей.*



Пусть *OP* – главная оптическая ось зеркала, *F* – главный фокус зеркала, *O* – его оптический центр. Специальная технология построения хода отраженного луча состоит в следующем. *Проведем побочную оптическую ось параллельно падающему лучу AB (**точка B лежит в главной плоскости зеркала!**). Она пересечет **фокальную плоскость зеркала** в точке D. Через эту точку и пройдет отраженный луч BD.*

Для параксиальных лучей этот способ построения легко обосновать. Пучок параксиальных лучей ($h << R$ и угол β мал!), параллельных побочной оптической оси, после отражения, как известно, собирается в побочном фокусе *D*, лежащем вблизи фокальной плоскости (угол β мал, напомню, что при произвольном угле β побочный фокус лежит на сфере радиуса *R*/2 с центром в точке *O*). Поскольку через побочный фокус *D* проходят все отраженные параксиальные лучи, то для его отыскания достаточно рассмотреть один из таких лучей. Можно взять луч, проходящий через оптический центр O, т.е. совпадающий с побочной оптической осью. После отражения этот луч, очевидно, идет по той же оптической оси и проходит через искомую точку D. Следовательно, искомая точка D является точкой пересечения фокальной плоскости и побочной оптической оси. Подчеркнем еще раз, что проведенные построения имеют физический смысл только для *параксиальных лучей*, т.е. *лучей, распространяющихся под малым углом к главной оптической оси и на небольшом расстоянии от оптического центра зеркала*. Реальное направление распространения других лучей будет существенно отличаться от направления, найденного описанным выше способом. *Однако для нахождения положения изображения в параксиальных лучах нам и не нужно знать реальный ход не параксиальных лучей.*

Докажем, что ***если строить описанным выше способом ход произвольного испущенного точечным источником B луча BQ после его отражения от зеркала, то он пройдёт через точку, являющуюся изображением этого точечного источника в параксиальных лучах***.



Пусть O – центр кривизны зеркала, F – его фокус, а P – полюс, OT побочная оптическая ось, параллельная падающему лучу BQ, точка Q лежит в главной плоскости зеркала, а точка F_1 – в его фокальной плоскости (см. рисунок). Очевидно, что QF_1 – формальный отраженный луч, ход которого построен по описанной выше технологии. Пусть B_1 – точка пересечения формального отраженного луча QF_1 с побочной оптической осью BO, а отрезки BD и B_1D_1 перпендикулярны главной оптической оси OP. Тогда из подобия (по двум углам) треугольников OBD и OB_1D_1, а также треугольников F_1QT и $F_1B_1D_1$ имеем:

$$\frac{B_1A_1}{BA} = \frac{A_1O}{AO} = \frac{B_1D_1}{BD}, \quad \frac{B_1D_1}{QT} = \frac{A_1P - F}{F}.$$

При записи последнего соотношения учтено, что высоты подобных треугольников относятся также как их стороны. Но $QT = BD$ (как противоположные стороны параллелограмма). Кроме того, $AO = s - 2F$, $A_1O = 2F - A_1P$, где s, как обычно, – расстояние от источника до главной плоскости зеркала. Поэтому, обозначая также $h \equiv BA$, из последних соотношений получим

$$\frac{B_1A_1}{h} = \frac{2F - A_1P}{s - 2F} = \frac{A_1P - F}{F}.$$

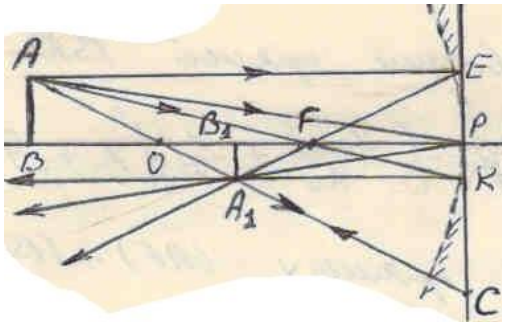
Откуда, окончательно имеем:

$$A_1P = \frac{sF}{s-F}, \quad \frac{B_1A_1}{h} = \frac{F}{s-F}.$$

Сопоставляя последние формулы с (3) и (6) убеждаемся, что точка B_1 совпадает с изображением точки B, полученным в параксиальных лучах, что и требовалось доказать.

Итак, для *нахождения изображения точки в параксиальных лучах, не обязательно использовать только параксиальные лучи*! Можно пользоваться любыми лучами (даже теми, которых в реальности может и не быть, например, из-за отверстия в зеркале), но при этом следует четко понимать, что в реальной оптической системе изображение *будет действительно* находиться в найденной точке, только если оно создается *параксиальными* лучами. Иначе в рассчитанном месте будет находиться не точечное изображение точки, а светлое пятнышко, а вместо четкого изображения предмета – его размытое изображение.

Наиболее удобны для построений обычно следующие лучи:



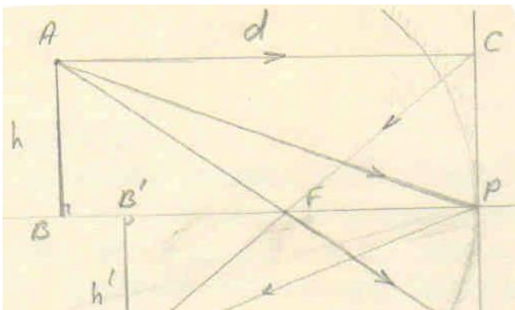
1) луч AO, проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч идет по той же прямой;

2) луч AE, параллельный главной оптической оси; отраженный луч EF проходит через главный фокус зеркала (следует из определения фокуса);

3) луч AF, идущий через главный фокус; отраженный луч параллелен главной оптической оси (следует из обратимости хода лучей);

4) луч AP, падающий на зеркало в его полюсе; отраженный луч PA_1 симметричен с падающим лучом относительно главной оптической оси (по закону отражения).

Если точка B находится на главной оптической оси, то все четыре удобных луча сливаются в один. В этом случае изображение точки B (точку B_1) можно построить либо с помощью произвольного второго луча, либо найдя изображение A_1 любой точки A, такой, что отрезок AB перпендикулярен главной оптической оси, тогда точка B_1 будет основанием перпендикуляра, опущенного из точки A_1 на главную оптическую ось (см. рисунок). Это следует из доказанного выше свойства изображения отрезка, перпендикулярного главной оптической оси (или из формулы зеркала, поскольку для точек A и B значения d одинаковые).



Построим изображения (действительного) предмета, расположенного перпендикулярно главной оптической оси, в некоторых частных случаях (см. три рисунка). Из первого рисунка видно, что в выпуклом зеркале изображение такого предмета всегда мнимое, прямое и уменьшенное. Мнимое, прямое, но увеличенное изображение возникает и в вогнутом зеркале, если предмет расположен между фокусом и зеркалом (см. второй рисунок). Если же предмет расположен дальше центра вогнутого сферического зеркала (см. третий рисунок), то образуется действительное, перевернутое и уменьшенное изображение, лежащее между фокусом и центром. Пользуясь принципом обратимости хода лучей и третьим рисунком легко сообразить, что если предмет поместить между фокусом и центром вогнутого зеркала, то за центром возникнет действительное, перевернутое и увеличенное изображение предмета.