ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Лекция 3.4 «Телескопические системы, их оптические схемы и характеристики»

Телескопические системы, или зрительные трубы, это наиболее распространенная группа оптических приборов, используемая для самых разнообразных целей и выполняющих роль как самостоятельных приборов, так и составных частей более сложных оптических устройств.

Телескопическая система – оптическая система, с помощью которой можно рассматривать увеличенное изображение удаленного объекта.

К числу таких приборов относятся бинокли, зрительные трубы, телескопы, перископы, дальномеры и геодезические приборы (теодолиты, нивелиры и другие).

Схема телескопической системы состоит из двух компонентов: объектива и окуляра. Располагают их таким образом, чтобы задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Объектив создает действительное перевернутое изображение предмета в своей задней фокальной плоскости, а окуляр позволяет рассматривать это изображение глазом.

Для компенсации дефектов глаза (близорукость, дальнозоркость) в зрительных трубах обычно предусматривается возможность фокусировки (продольного перемещения) окуляра.

Поскольку рассматриваемые предметы находятся бесконечно далеко, входные пучки считаются параллельными. От осевых предметных точек приходят пучки параллельные оптической оси, от внеосевых предметных точек приходят пучки, наклоненные к оси под углом ω . Из телескопической системы пучки будут выходить под углом ω'.

Фокусы телескопической системы расположены в бесконечности, фокусные расстояния равны бесконечности.

Видимое увеличение телескопической системы

Видимое увеличение телескопической системы можно выразить через отношение фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$\Gamma = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = \frac{f_{об}'}{f_{ок}'} .$$

Если видимое увеличение положительное ($\Gamma > 0$), то изображение прямое. Если видимое увеличение отрицательное ($\Gamma < 0$), то изображение перевернутое. Увеличение измеряется в кратах, то есть в разах. Увеличение телескопических систем, может быть, от 8× для подзорных труб или биноклей до нескольких сотен и тысяч для астрономических телескопов.

Поле зрения телескопической системы

Угловое поле зрения телескопической системы зависит от углового поля окуляра и видимого увеличения:

$$tg\omega = \frac{tg\omega'}{\Gamma}.$$

Угловое поле окуляра обычно находится в пределах $50 - 70^o$, видимое увеличение большинства телескопических систем не превышает $10 - 30\times$, поэтому угловое поле телескопических систем не превышает 10^o.

Диаметры входного и выходного зрачков телескопической системы

Диаметр выходного зрачка определяется зрачком глаза:

$D' = D_{гл}$.

При наблюдении объектов через телескопический прибор глаз должен располагаться в плоскости выходного зрачка, тогда весь свет, входящий в объектив под разными углами к оси, попадет в глаз. Телескопические системы, предназначенные для наблюдений в дневное время, должны иметь выходные зрачки 2-5 мм, а в сумеречное время 5-7 мм.

Диаметры входного и выходного зрачков телескопической системы связаны между собой через видимое увеличение:

$$D = D'\Gamma.$$

Светосила телескопического прибора пропорциональна квадрату диаметра входного зрачка:

$$H = gD2,$$

где g – коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента пропускания оптической системы.

Угловой предел разрешения телескопической системы

Угловой предел разрешения телескопической системы зависит от диаметра входного зрачка. Если взять среднюю длину волны $\lambda = 0.5$ мкм, то зависимость углового разрешения от диаметра входного зрачка, выраженного в мм, будет следующей:

$$\Psi = 1.22\frac{\lambda}{D} = \frac{120''}{D}.$$

Например, если диаметр входного зрачка 6 м, то разрешающа

$$\frac{120''}{}$$

способность телескопической системы составит Ψ = 6000 = 0.02 .

При наблюдении разрешающая глазом способность телескопическо

. Угловые прибора ограничивается пределом разрешения глаза Ψгл =1пределы

разрешения телескопа в пространстве предметов и в пространстве изображений связаны между собой через видимое увеличение: Ψ′ = Ψ Г, причем Ψ′ = Ψгл .

Для того, чтобы глаз полностью использовал разрешающую способность телескопической системы, ее полезное видимое увеличение должно быть

$$\Gamma_{\text{п}} = \frac{\Psi_{\text{гл}}}{\Psi} = \frac{60''}{120''} \qquad D = 0.5D$$

Однако, поскольку выходные зрачки в телескопических системах различного назначения могут иметь разный диаметр, и разрешающая способность глаза в различных условиях наблюдения также может отличаться от стандартной, принято, что полезное увеличение может иметь значение в пределах:

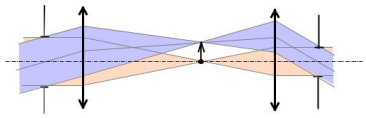
$$0.2D \le \Gamma_{\text{п}} \le 0.75D .$$

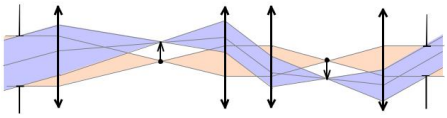
Схемы телескопических систем

Рассмотрим несколько типовых схем телескопических систем.

Схема Кеплера

В схеме Кеплера объективом и окуляром является положительная оптическая система (рис. 5.2). Объектив создает перевернутое действительное изображение в своей задней фокальной плоскости, которое можно наблюдать с помощью окуляра. Задняя фокальная плоскость объектива совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра, так что падающий на объектив параллельный пучок лучей выходит из окуляра также параллельным.





объектив окуляр

*F*об′ *F*ок

Схема Кеплера.

Одним из недостатков схемы Кеплера является большая длина оптической системы ($L = f$об′ + fок′), причем чем больше увеличение, тем длиннее должна

быть система Кеплера. Например, при фокусном расстоянии окуляр

= 30 Г

fоб′мм и увеличении = 40× , фокусное расстояние объект

fоб′ = fок′ Г =1.2 м, а общая длина системы $L = f$об′ + fок′ =1.23 м.

Еще

одним недостатком системы Кеплера является перевернутое

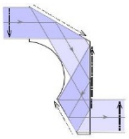
изображение. Это не имеет особого значения для исследования небесных тел, но представляет неудобство для наблюдения земных объектов. Поэтому в биноклях и зрительных трубах приходится применять **оборачивающие системы**, которые обычно ставятся между объективом и окуляром (рис. 5.3). Оборачивающие системы могут быть линзовые или призменные. Линзовые оборачивающие системы (рис. 5.3) еще больше увеличивают длину всей системы.

*F*ок

*F*об′

Рис. 5.3. Применение линзовых оборачивающих систем.

Призменные оборачивающие системы состоят из стеклянных призм, действующих, как зеркала (рис. 5.4). Они сокращают длину всей системы, но при этом увеличивается масса прибора, к тому же возникают трудности технологического характера, связанные с изготовлением и юстировкой призм. Такие системы обычно используются в биноклях большого увеличения.



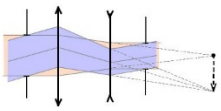


Рис. 5.4. Призменная оборачивающая система.

Одним из главных достоинств системы Кеплера является наличие промежуточного изображения в фокусе объектива, куда можно поставить сетку (прозрачную пластинку со шкалой) и с ее помощью производить точные измерения углов и расстояний.

Оптические системы, построенные по схеме Кеплера, используются для телескопов, подзорных труб, дальномеров, морских биноклей большого

увеличения (до 20×), а также для измерительных систем.

5.3.2.Схема Галилея

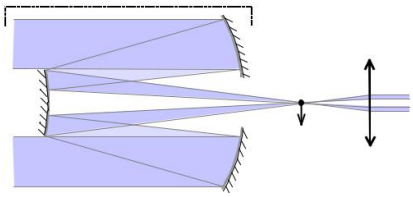
Втелескопической системе по схеме Галилея в качестве объектива используется положительная оптическая система, а в качестве окуляра – отрицательная (рис. 5.5). Задний фокус положительного объектива совпадает с передним фокусом отрицательного окуляра. При таком расположении промежуточное изображение отсутствует.

объектив окуляр

*F*об′ *F*ок

Рис. 5.5. Схема Галилея.

Достоинствами схемы Галилея являются прямое изображение и меньшая длина по сравнению со схемой Кеплера. В такой схеме общая длина вычисляется не как сумма, а как разность (по модулю) фокусных расстояний



объектива и окуляра: $L = f_{об}' - f_{ок}'$. Однако у этой схемы есть и свои

недостатки. Во-первых, у системы Галилея малое поле зрения, причем чем больше увеличение телескопа, тем меньше поле зрения. Во-вторых, в системе Галилея отсутствует промежуточное изображение (некуда поставить сетку), поэтому использовать такую систему в измерительных приборах нельзя.

Использование системы Галилея (малая длина и прямое изображение) особенно удобно для театральных биноклей с увеличением от двух до трех крат. Система Галилея также применяется для систем сумеречного и ночного наблюдения и в видоискателях фотоаппаратов и видеокамер.

Схема Кассегрена

Зеркальные телескопические системы образуют изображение путем отражения света от зеркальной поверхности сферической или параболической формы. Наибольшее распространение получила двухзеркальная схема Кассегрена. После отражения на главном зеркале пучок лучей попадает на вспомогательное зеркало, которое направляет его обратно – через отверстие в главном зеркале. Фокальная плоскость в этой системе располагается за оправой главного зеркала.

В фокальной плоскости зеркала могут быть помещены фотопластинки для фотографирования небесных объектов или любая другая светоприемная аппаратура: спектрографы, фотометры и так далее. Изображение либо получается непосредственно на фотографической пластинке, либо исследуется визуально через окуляр.

Эта система широко применяется в телескопах, установлена она и в Большом Телескопе Азимутальном (БТА). БТА – самый большой оптический телескоп в мире (находится на Северном Кавказе) с главным зеркалом диаметром 6 метров (его вес 650 тонн). Телескоп установлен в башне высотой 53 м с диаметром купола 45,2 м. В настоящее время телескоп обеспечивает выполнение важнейших научных программ.

Расстояние от последней поверхности (от большого зеркала) до фокуса значительно меньше фокусного расстояния, поэтому длина системы Кеплера с таким объективом может быть в несколько раз короче, чем если бы использовался обычный линзовый объектив.

Для того, чтобы обеспечить как можно большее увеличение при стандартном размере выходного зрачка, необходимо применение объективов с предельно большим диаметром. Увеличение диаметра входного зрачка позволяет увеличить и светосилу, и разрешающую способность, что необходимо, скажем, для наблюдения очень слабых звезд.

Технически изготовить зеркало большого диаметра легче, чем линзу, так как оптические неоднородности в толще стекла для зеркала не имеют значения, поэтому применение зеркальных систем позволяет увеличить диаметр входного зрачка, а тем самым – увеличение, светосилу и разрешающую способность телескопической системы. К тому же в зеркальных объективах хроматические аберрации намного меньше, чем в линзовых.

Для получения новых научных данных о звездах и галактиках требуется увеличение размеров телескопа. Но чем больше телескоп, тем труднее добиться безукоризненного по качеству изображения. На качество изображения влияют земная атмосфера, остаточные аберрации оптической системы, погрешности оптических поверхностей, термические и весовые деформации оптики, погрешности юстировки телескопа и многое другое.

Самые крупные телескопы мира имеют диаметр зеркала 5-6 метров. Это считается пределом конструкторских возможностей: дальнейшее увеличение диаметра зеркала, осложнив как его изготовление, так и создание самого телескопа, лишь немногим увеличит его разрешающую способность.

Одним из факторов, наиболее сильно воздействующих на разрешающую способность телескопа, является влияние земной атмосферы. Величина размазывания изображения, вызванного атмосферной турбулентностью (неоднородностью показателя преломления атмосферы), составляет несколько секунд даже в самых лучших с точки зрения астроклимата местах. Это, по крайней мере, в 10 раз больше того, что может дать телескоп, зеркало которого изготовлено с точностью, близкой к теоретическому пределу.

Одним из способов повышения разрешающей способности телескопов является вынос его за пределы земной атмосферы. В космических телескопах на качество изображения не влияет неоднородность атмосферы, кроме того, с их помощью возможно проводить исследования в области ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, которые земная атмосфера пропускает слабо. Все это позволяет повышать разрешающую способность телескопа в десятки и сотни раз.

Принцип действия телескопических систем вытекает из двух требований, предъявляемых к ним в процессе эксплуатации.

а). Телескопическая система предназначена для наблюдения далеких предметов, диаметр входного зрачка мал по сравнению с расстоянием до наблюдаемого предмета, поэтому допустимо считать переднюю апертуру системы равной нулю и предполагать, что в ее входной зрачок входят параллельные пучки света.

б). Телескопическая система является визуальным прибором. Если глаз человека эмметропический и его дальняя точка лежит на бесконечности, то для устранения утомления глаза напряжением аккомодации необходимо, чтобы изображение располагалось также на бесконечности. А это значит, что окуляр прибора должен покидать параллельный пучок лучей и, следовательно, задняя апертура системы также должна быть равной нулю.

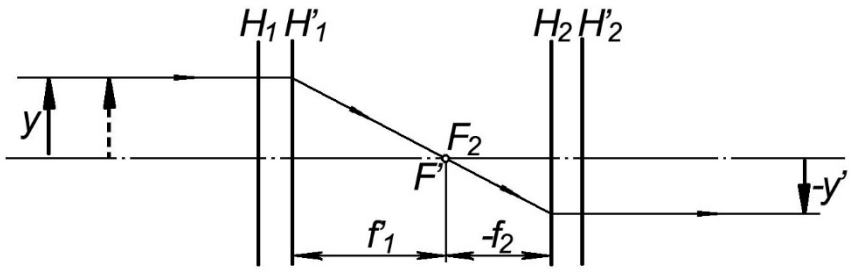


Рис. 1

Вот из этих условий и строится оптическая схема телескопической системы. На рис. 7.1.1 показана принципиальная схема простейшей телескопической системы, составленной из двух компонентов: объектива, главные плоскости H_1 и H'_1 и окуляра – главные плоскости H_1 и H'_1.

Как известно, для того чтобы луч выходил из системы параллельно оптической оси необходимо его прохождение через передний фокус окуляра. Луч же, попадающий в оптическую систему параллельно оси, проходит через задний фокус объектива. Отсюда вытекает, что в телескопической системе задний фокус объектива и передний фокус окуляра должны быть совмещены.

Если мы будем перемещать предмет вдоль оптической оси, то в следствии рассмотренного хода лучей изображение l' не изменит своей величины, то есть для телескопической системы линейное увеличение, равное, как видно из рисунка, отношению фокусных расстояний компонентов, остается постоянным

$$V = \frac{y'}{y} = - \frac{f'_2}{f'_1} = const .$$

А отсюда вытекает, что линейное увеличение в зрачках также является постоянной величиной.

$$V_C = V = const .$$

Как было показано, связь между линейным и угловым увеличениями всякой оптической системы выражается формулой

$$V \cdot W = - \frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}$$

Следовательно, угловое увеличение телескопической системы также постоянно и равно

$$W = \frac{n}{n' V} = const$$

При $n = n'$

$$W = \frac{1}{V} = - \frac{f'_1}{f'_2}$$

Для продольного увеличения была получена формула

$$Q = \frac{n'}{n} \cdot V^2$$

Для телескопической системы, при $n = n'$ будем иметь

$$Q = V^2 = const$$

Видимое увеличение

$$\Gamma = \frac{n \cdot p' \cdot x}{n' \cdot p \cdot x' \cdot V_C}$$

Для телескопической системы можно считать, что $p = x$ (в следствии большого расстояния объекта наблюдения от зрительной трубы можно принять его равным расстоянию от объекта наблюдения до наблюдателя) и $p' = x'$ (зрачок глаза совпадает с выходным зрачком), отсюда

$$\Gamma = \frac{n}{n' \cdot V_C} = \frac{n}{n' \cdot V} = W = const$$

при $n = n'$

$$V = \frac{1}{\Gamma} = const \; ; \; W = \Gamma = const \; ; \; Q = \frac{1}{\Gamma} = const$$

Из рис.111 также можно видеть, что абсолютная величина линейного увеличения V_C равная линейному увеличению в любых точках, равна отношению диаметров выходного зрачка D' и входного зрачка D.

$$V_C = V = \frac{D'}{D} \; |\Gamma| = \left|\frac{1}{V}\right| = \frac{D'}{D}$$

7.2. Зрительная труба Галилея

Зрительная труба Галилея, называемая еще голланской, была построена впервые в 1609 г. С помощью этой трубы Галилей в короткий срок сделал ряд астрономических открытий.

Характерной особенностью трубы Галилея является то, что ее первый компонент, объектив, положительный, а второй компонент окуляр, отрицательный (рис. 7.2.1). При этом, задний фокус объектива совмещен с передним фокусом окуляра.

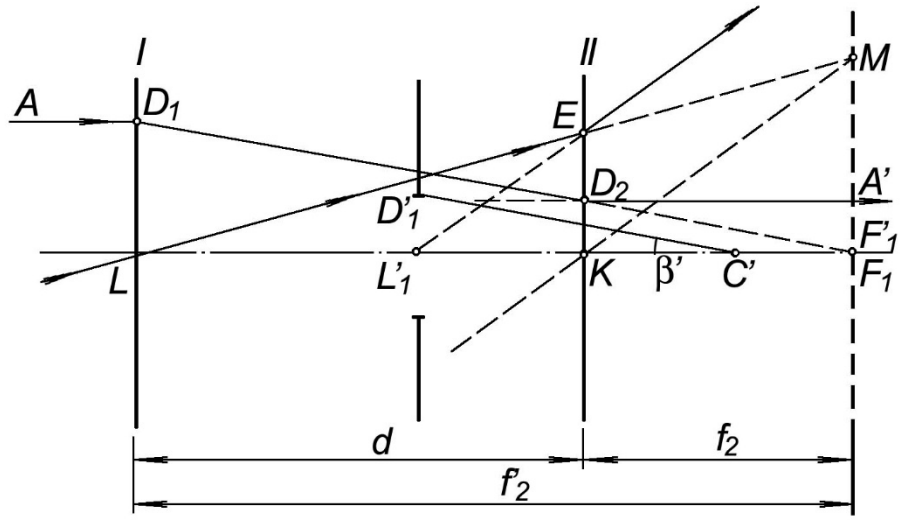


Рис. 2

Труба Галилея имеет два достоинства, которые определяют ее использование в современных приборах.

1). Зрительная труба Галилея имеет очень небольшую длину, действительно, расстояние между объективом *I* и окуляром *II*, определяемое как сумма задних фокусных расстояний этих компонентов, оказывается меньше фокусного расстояния объектива:

$$d = f'_1 + f'_2$$

Так как $f'_2<0$ то d определяется как разность абсолютных величин f'_2 и f'_1.

Это обстоятельство позволяет использовать трубы Галилея в качестве систем смены увеличения о чем будет сказано ниже.

2). Зрительная труба Галилея дает прямое изображение объекта. Действительно, так как $f'_1>0$, а $f'_2<0$ то

$$\Gamma = -\frac{f'_1}{f'_2} > 0 \quad ,$$

т.е. изображение неперевернутое.

Однако, зрительная труба Галилея имеет и ряд существенных недостатков, в следствие чего они не нашли широкого применения.

1). Луч AD_1 исходящий из осевой точки бесконечно далекого предмета, нигде не пересекает оптическую ось, т.е. нигде не возникает действительного промежуточного изображения предмета. Отсюда вытекает следующее: во-первых, в приборе нет места, где можно было расположить полевую диафрагму, чтобы полностью устранить виньетирование. Во-вторых, невозможно разместить сетку с маркой, чтобы ее можно было наблюдать вместе с объектом.

2). Зрительная труба Галилея имеет малое поле зрения. Чтобы понять это, нужно проследить ход лучей и найти положение выходного люка.

Луч AD_1 проходит через край свободного отверстия объектива *1*. Найдем величину и положение изображение этого отверстия объектива. Построим луч, проходящий через совмещенные главные точки объектива (луч *BLE*) и продолжим его до пересечения с передней фокальной плоскостью MF_2 окуляра. Чтобы найти ход луча после окуляра через точку *M* и точку *H* (совмещенные главные плоскости окуляра) проводим вспомогательный луч *KM*.

Пучок лучей, имеющий точку пересечения *M*, расположенную в передней фокальной плоскости окуляра, после окуляра должен идти параллельным пучком. Следовательно, луч *BLE* после окуляра будет параллелен вспомогательному лучу *KM*.

Точка пересечения *L'* продолжения этого луча с оптической осью дает положение центра изображения объектива *1*. Размер этого изображения определяет точка *D'*, где продолжение луча D_2A' (проходящего через край объектива *1*) встретится с плоскостью, проходящей через точку L_1. Т.о. изображение входного отверстия объектива получается мнимым и расположенным внутри зрительной трубы. Наблюдатель лишен возможности совмещать зрачок глаза с изображением входного объектива, т.к. глаз находится за окуляром, например, в точке *C'*.

Т.к. в зрительных трубах выходным зрачком является глаз человека то изображение входного отверстия объектива будет выходным люком и ограничивается видимое поле зрения: угол $\beta = LCD'$ представляет собой половину угла зрения прибора со стороны глаза.

Малый и не поддающийся увеличению угол поля зрения служит препятствием для применения труб галилеевского типа в современных оптических приборах.

Объективом зрительной трубы служит собирающая линза (или система линз) с достаточно большим фокусным расстоянием. А вот окуляром может быть как собирающая, так и рассеивающая линза. Соответственно имеются два вида зрительных труб:

-труба Кеплера - если окуляр является собирающей линзой;
-труба Галилея - если окуляр является рассеивающей линзой.

Телескоп. Телескопы (***зрительные трубы***) предназначены для наблюдения удаленных объектов. Они состоят из двух линз – обращенной к предмету собирающей линзы с большим фокусным расстоянием (объектив) и линзы с малым фокусным расстоянием (окуляр), обращенной к наблюдателю. Зрительные трубы бывают двух типов:

- **Зрительная труба Кеплера**, предназначенная для астрономических наблюдений. Одна дает увеличенные **перевернутые** изображения удаленных предметов и поэтому неудобна для земных наблюдений.

- Принцип действия трубы Кеплера очень прост: объектив даёт изображение удалённого обекта в своей фокальной плоскости, а затем это изображение рассматривается в окуляр как в лупу. Таким образом, задняя фокальная плоскость объектива совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра.
- Ход лучей в трубе Кеплера изображён на рис. 4.

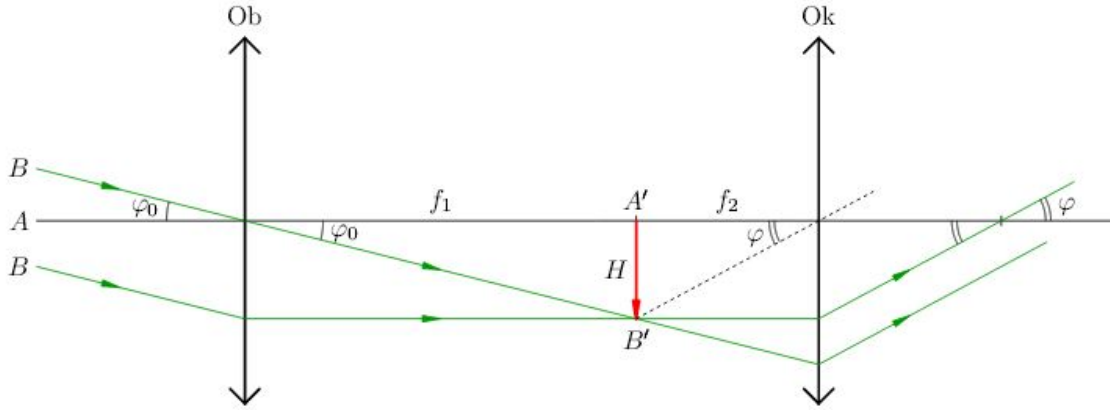


Рис. 3

Объектом служит далеко расположенная стрелка, направленная вертикально вверх; она не показана на рисунке. Луч из точки идёт вдоль главной оптической оси объектива и окуляра. Из точки идут два луча, которые ввиду удалённости объекта можно считать параллельными.
В результате изображение нашего объекта, даваемое объективом, расположено в фокальной плоскости объектива и является действительным, перевёрнутым и уменьшенным.
Увеличение зрительной трубы — это отношение угла зрения при наблюдении в трубу к углу зрения при наблюдении невооружённым глазом. Ход лучей в трубе Кеплера принципиально тот же, что и в микроскопе. Изображением объекта на сетчатке также будет стрелочка, направленная вверх, и поэтому в трубе Кеплера мы увидим объект перевёрнутым. Во избежание этого в пространстве между объективом и окуляром ставят специальные оборачивающие системы линз или призм, которые ещё раз переворачивают изображение.

- **Зрительная труба Галилея**, предназначенная для земных наблюдений, дающая увеличенные **прямые** изображения. Окуляром в трубе Галилея служит рассеивающая линза.

На рис. 2 изображен ход лучей в астрономическом телескопе. Предполагается, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность, поэтому лучи от любой точки удаленного предмета выходят из окуляра в виде параллельного пучка. Такой ход лучей называется ***телескопическим***. В астрономической трубе телескопический ход лучей достигается при условии, что расстояние между объективом и окуляром равно сумме их фокусных расстояний $l = F_1 + F_2$.

Зрительная труба (телескоп) принято характеризовать **угловым увеличением** γ. В отличие от микроскопа, предметы, наблюдаемые в телескоп, всегда удалены от наблюдателя. Если удаленный предмет виден невооруженным глазом под углом ψ, а при наблюдении через телескоп под углом φ, то угловым увеличением называют отношение

$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi}.$$

Угловому увеличению γ, как и линейному увеличению Г, можно приписать знаки плюс или минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Угловое увеличение астрономической трубы Кеплера отрицательно, а земной трубы Галилея положительно.

Угловое увеличение зрительных труб выражается через фокусные расстояния:

$$\gamma = -\frac{F_1}{F_2}.$$

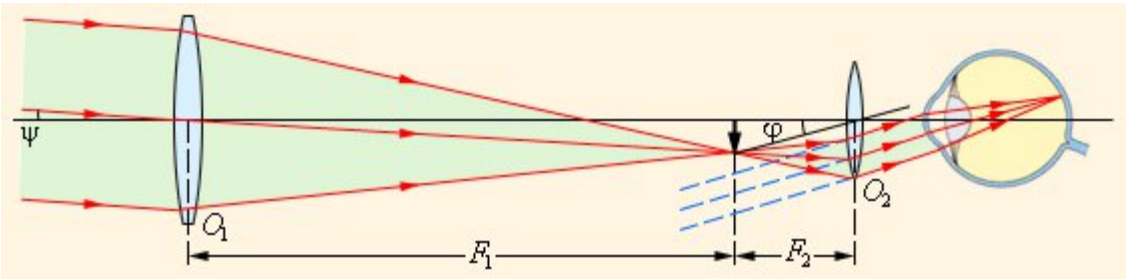


Рисунок 4.

Телескопический ход лучей

В качестве объективов в больших астрономических телескопах применяются не линзы, а сферические зеркала. Такие телескопы называются ***рефлекторами***. Хорошее зеркало проще изготовить, кроме того, зеркала, в отличие от линз, не обладают хроматической аберрацией.

У нас в стране построен самый большой в мире телескоп с диаметром зеркала 6 м. Следует иметь в виду, что большие астрономические телескопы предназначены не только для того, чтобы увеличивать угловые расстояния между наблюдаемыми космическими объектами, но и для увеличения потока световой энергии от слабосветящихся объектов.

Галилей изобрёл свой телескоп в 1609 году, и его астрономические открытия потрясли современников. Он обнаружил спутники Юпитера и фазы Венеры, разглядел лунный рельеф (горы, впадины, долины) и пятна на Солнце, а сплошной с виду Млечный Путь оказался скоплением звёзд.

Окуляром трубы Галилея служит рассеивающая линза; задняя фокальная плоскость объектива совпадает с задней фокальной плоскостью окуляра (рис. 5).

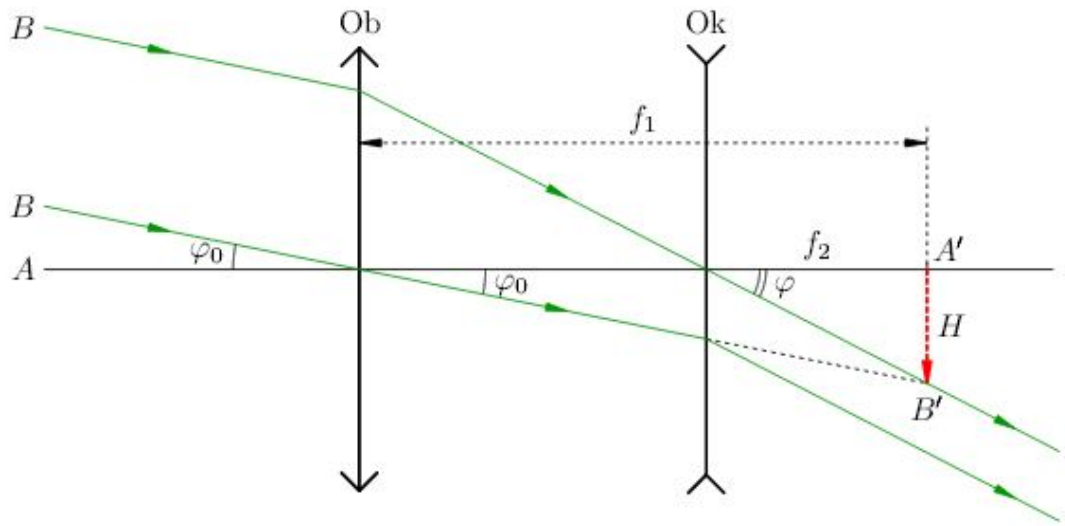


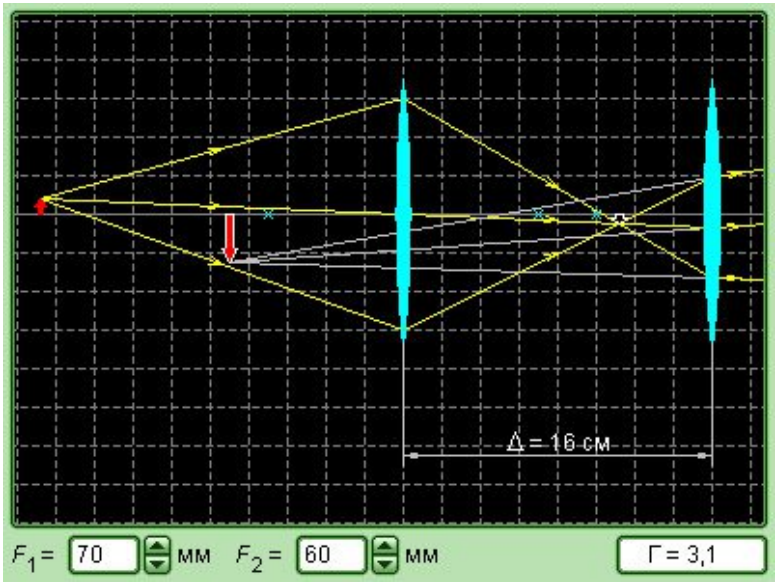
Рис. 5.

Если бы окуляра не было, то изображение удалённой стрелки находилось бы в фокальной плоскости объектива. На рисунке это изображение показано пунктиром - ведь в реальности его там нет!

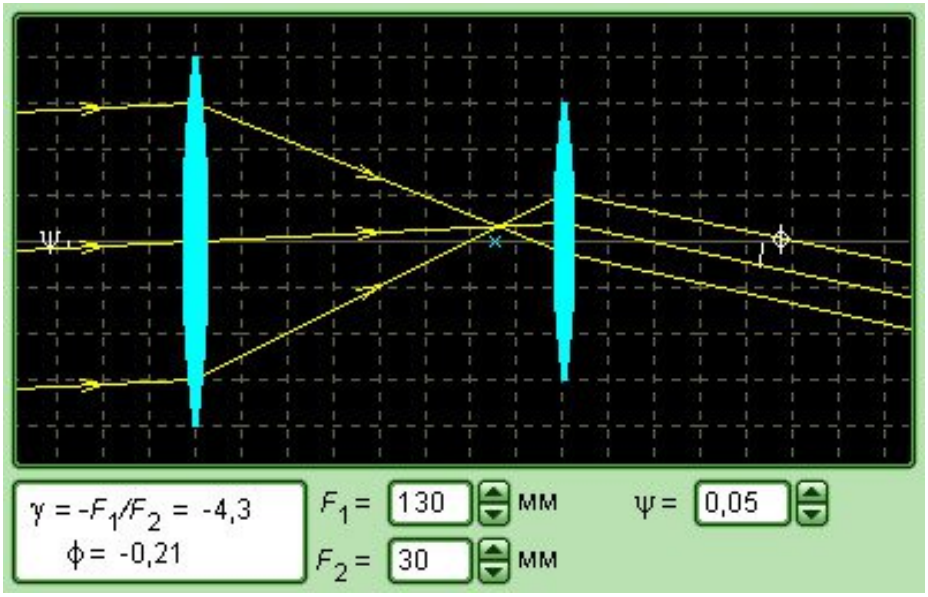
А нет его там потому, что лучи от точки, которые после прохождения объектива стали сходящимися к точке , не доходят до и попадают на окуляр. После окуляра они вновь становятся параллельными и поэтому воспринимаются глазом без напряжения. Но теперь мы видим изображение объекта под углом , который больше угла зрения при рассматривании объекта невооружённым глазом.

Заметьте, что при том же увеличении труба Галилея меньше размером, чем труба Кеплера. Поэтому одно из основных применений трубы Галилея - театральные бинокли.

В отличие от микроскопа и трубы Кеплера, в трубе Галилея мы видим объекты неперевёрнутыми.



Модель. Микроскоп



Модель. Зрительная труба Кеплера