

Юстировка Ньютона.

В интернете полным-полно руководств по методам юстировки телескопов системы Ньютона. Теперь и я решил написать ещё одно, т.к. в попытках разобраться почему используются именно такие последовательности действий, а не другие, я окончательно запутался. Надо ли, как советуют все методики, выставлять вторичное зеркало так, чтобы его центр совпадал с центром окулярной трубки? Что за такое смещение вторичного зеркала на светосильных Ньютонах? Как подобрать диагональное зеркало для того, чтобы получить некое наперёд заданное невиньетированное поле зрения, и что вообще значит «невиньетированное»?.. И как же всё-таки отъюстировать ньютон не просто для визуальных, но и фотографических наблюдений?

Думаю, начать следует с оптической схемы. Все телескопы системы Ньютона имеют два зеркала, нехитро называемые «первичным» и «вторичным». Первичное зеркало для не особо светосильных телескопов делают сферическим, однако со светосил больших $f/6$ гораздо лучше будет иметь параболическое зеркало. Простейшая схема Ньютона выглядит следующим образом:

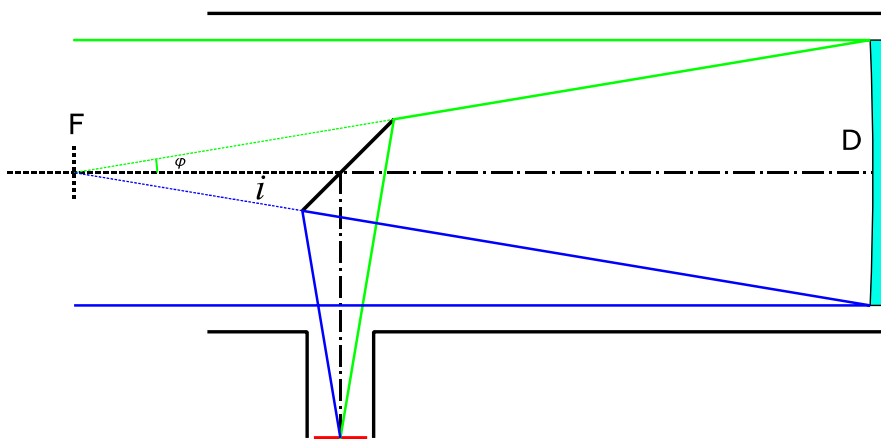


Рисунок 1 Оптическая схема телескопа системы Ньютона.

Видно, что основная цель главного зеркала — сбор света, а вторичного — вывести собранный пучок за пределы трубы так, чтобы его можно было сфокусировать либо на светочувствительной матрице, либо разглядывать в окуляр. Вторичное, или также называемое диагональное, зеркало стоит под углом в 45° относительно исходной оптической оси, а размер его подбирается таким, чтобы в него полностью было видно главное зеркало, иначе пучки света, приходящие с его краёв, просто не попадут в фокус. Именно это срезание световых пучков и называется виньетированием.

Чтобы труба давала максимально качественное изображение — необходимо, чтобы положения и углы первичного и вторичного зеркал были именно такими, как их предусмотрел производитель. Особое внимание стоит уделить именно углам. А для астрофотографов также будет крайне важно, чтобы оптическая ось после отражения от вторички была строго перпендикулярна матрице камеры/фотоаппарата, поскольку имеющиеся перекосы приведут к тому, что часть поля зрения окажется вне фокуса.

Внимательный читатель, возможно заметит, что на рисунке 1 оптическая ось, идущая от первичного зеркала, делит вторичное — не на равные части. И это так и есть. Чем более светосильный в нашем распоряжении телескоп, тем сильнее будет проявляться этот эффект.

Для того чтобы оценить, насколько велико должно быть это смещение рассмотрим интересующий нас участок более подробно, но сначала отметим, что лучи света, изначально падающие на главное зеркало параллельно оптической оси, после отражения формируют конус, с точкой схождения в фокусе главного зеркала. Этим обстоятельством мы воспользуемся, так как задача о форме, размерах и положении вторичного зеркала теперь

$$\frac{\sin \varphi}{A} = \frac{\sin(45^\circ - \varphi)}{i} \quad 4$$

И соответственно для нижнего:

$$\frac{\sin \varphi}{a} = \frac{\sin(135^\circ - \varphi)}{i} \quad 5$$

Таким образом, поскольку мы выбрали излом оптической оси самостоятельно – она нам известна (или же нам её задал производитель нашего телескопа, проделав отверстие для фокусёра на определённом расстоянии от главного зеркала), и мы можем вычислить полную длину диагонального зеркала взяв сумму $A + a$:

$$A + a = i \sin \varphi \left(\frac{1}{\sin(45^\circ - \varphi)} + \frac{1}{\sin(135^\circ - \varphi)} \right) \quad 6$$

Или, пользуясь формулой приведения:

$$A + a = i \sin \varphi \left(\frac{1}{\sin(45^\circ - \varphi)} + \frac{1}{\sin(45^\circ + \varphi)} \right) \quad 7$$

Воспользовавшись формулами для суммы/разности углов синуса, а также с учётом того, что $\sin 45^\circ = \sqrt{2}/2$ можно упростить выражение до вполне простой формулы:

$$A + a = i\sqrt{2} \tan 2\varphi \quad 8$$

Или, воспользовавшись формулой для двойного угла для тангенса и тем, что тангенс и арктангенс обратные друг для друга функции:

$$A + a = i\sqrt{2} \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi} = i\sqrt{2} \frac{2 \tan \varphi}{1 - \tan^2 \varphi} = \frac{4\sqrt{2}DFi}{4F^2 - D^2} \quad 9$$

Видно, что большая ось нашего диагонального зеркала изменяется пропорционально излому. И также пропорционально будет изменяться и смещение центра зеркала относительно оптической оси, поэтому смещение было бы гораздо удобнее выразить не в абсолютных, а в относительных единицах. Чтобы это сделать необходимо найти отношение:

$$r = \frac{d}{A + a} = \frac{A - a}{2(A + a)} \quad 10$$

Величину $A + a$ мы уже получили в формуле 9. Теперь найдём значение $A - a$:

$$A - a = i \sin \varphi \left(\frac{1}{\sin(45^\circ - \varphi)} - \frac{1}{\sin(45^\circ + \varphi)} \right) \quad 11$$

Или после упрощения:

$$A - a = i \left[\frac{\sqrt{2} \sin^2 \varphi}{\cos 2\varphi} \right] \quad 12$$

Подставляя в уравнение 10 значения из выражений 8 и 12 получим:

$$r = \frac{A - a}{2(A + a)} = \frac{i\sqrt{2} \sin^2 \varphi}{\cos 2\varphi} \cdot \frac{\cos 2\varphi}{2i\sqrt{2} \sin \varphi \cos \varphi} = \frac{\tan \varphi}{2} \quad 13$$

А с учётом выражения 1, вообще получаем, что:

$$r = \frac{D}{4F} \quad 14$$

То есть смещение вторичного зеркала в долях от его большей оси равно светосиле главного зеркала, делённой на четыре. Вне зависимости от величины излома.

Или, если мы всё-таки хотим получить формулу для абсолютного значения d :

$$d = r(A + a) = \frac{\sqrt{2}D^2i}{4F^2 - D^2} \quad 15$$

В окулярную трубку же, при взгляде из точки фокуса, мы увидим, что диагональное зеркало будет выставлено строго концентрично трубке фокусёра, а наклон его необходимо будет подобрать таким, чтобы в нём полностью отражалось главное зеркало. Однако есть тонкость: допустим, что наш фокусёр немножечко кривоват и он стоит не перпендикулярно к трубе телескопа, а под небольшим углом. При этом трубка фокусёра сама по себе при движении не перекашивается, и матрица фотоаппарата по-прежнему остаётся ей

перпендикулярна. Значит ли это, что фокусёр надо выбросить/менять/допиливать? В принципе — нет некую свободу мы всё-таки имеем. Если это отклонение не превышает одного двух градусов — это конечно неприятно, но вполне поправимо: можно просто изменить наклон диагонального зеркала, сделать его равным не 45 градусов, а чуть больше или меньше, по ситуации, как на рисунке 3.

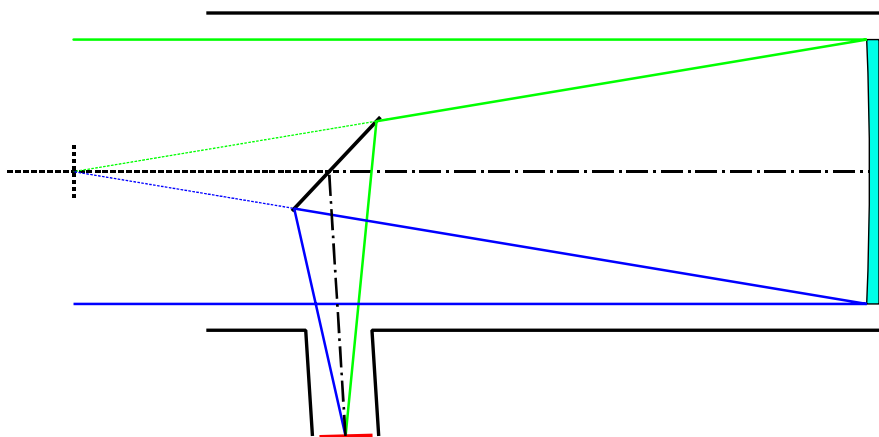


Рисунок 3 Иллюстрация возможной корректировки ошибки в изготовлении фокусёра.

При этом, конечно, наш Ньютон превращается в некий гибрид то ли с системой Гершеля, то ли гибрид с брахитом. Естественно для иллюстрации был взят откровенно плохой фокусёр с отклонением в три с половиной градуса, что приводит к отклонению вторичного зеркала от расчётного положения на 1.75 градуса соответственно. При этом видно, что требование к концентричности вторички и окулярной трубки при взгляде из точки фокуса сохраняется. Вторичное зеркало просто сместилось из расчётной точки чуть дальше от главного зеркала, уменьшив излом оптической оси. Отсюда можно сделать вывод: главное — это не сам угол вторички относительно главного зеркала, а правильность его положения относительно узла фокусёра. Хотя очевидно, что нормальный фокусёр как минимум не усложняет процесс юстировки.

Тут, правда, необходима оговорка! Такой способ исправления погрешности фокусёра работает только для одного типа перекоса. Если фокусёр имеет заклон **только** в сторону главного зеркала или от него — такой метод корректировки с коррекцией угла вторичного зеркала сработает. Если же мы ориентировали трубу торцом к себе, а продолжение оси фокусёра проходит не по диаметру трубы, а по хорде, то это требует однозначного исправления, так как никакой заклон вторичного зеркала не поможет исправить перекося фокальной плоскости в таком случае. Именно поэтому многие руководства по юстировке рекомендуют начинать юстировку даже не с зеркал, а с выставления фокусёра таким образом, чтобы его ось пересекла ось трубы телескопа. Проще это понять со схемой:

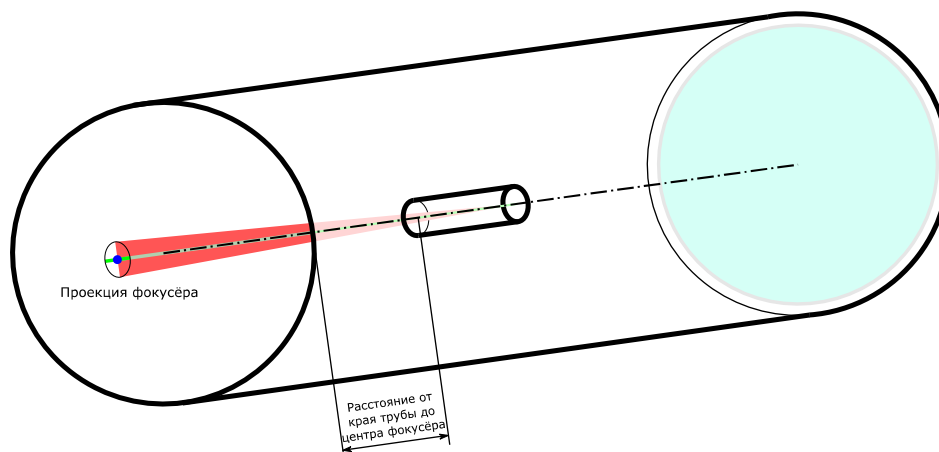


Рисунок 4 Иллюстрация того, какие заклоны фокусёра можно исправить вторичным зеркалом.

Зелёным на рисунке 4 отмечены исправимые заклены фокусёра. Как видно — они обязаны лежать в плоскости, в которой находится оптическая ось главного зеркала. Красным, соответственно — недопустимые.

Именно отсюда и растут ноги у следующего совета по юстировке: многие любители предварительно снимают вторичное зеркало, да и фокусёр тоже, и отмечают геометрический центр оставшегося отверстия от фокусёра по обратную сторону трубы. Порой, даже путём просверливания маленькой дырочки! Эта точка на рисунке 4 отмечена синим цветом. И всё это чтобы направление перемещения фокусёра строго совпадало с диаметром основной трубы. Как говорится: перфекционировать — так уж по полной программе! Раз уж мы всё равно пытаемся минимизировать заклены фокусёра — так почему бы не сделать это полностью. Достигается эта цель путём кручения юстировочных винтов фокусёра, если таковые имеются, либо подкладывания шайбочек или любых других прокладок между посадочной площадкой фокусёра и трубой. Хотя, как я показал, заклены фокусёра параллельные оптической оси главного зеркала поддаются корректировке.

Прежде чем перейти, собственно, к юстировке я бы хотел отметить, что все те выкладки, что были проведены для расчёта формы, размеров и положения вторички были сделаны в предположении нулевого невиньетированного поля. И это очевидно. Рисунок 2 наглядно демонстрирует, что, например для верхнего луча любое отклонение выше диагонального зеркала приводит к тому, что он перестаёт отражаться и в построении изображения больше не участвует. Некоторые планетчики проектируют свои ньютоны именно для нулевого невиньетированного поля, поскольку это позволяет максимально уменьшить размеры вторички, а, следовательно, и уменьшить величину центрального экранирования, что ведёт к небольшому ослаблению дифракционных эффектов. Обычно же телескопы имеют вторичное зеркало таких размеров, чтобы невиньетированное поле было в пределах 5-15 мм, что вполне достаточно для визуальных и фотографических целей и ещё не сильно сказывается на деградации картинки. Чтобы пересчитать наши формулы для этого случая, как оказывается, изменить нужно совсем немного.

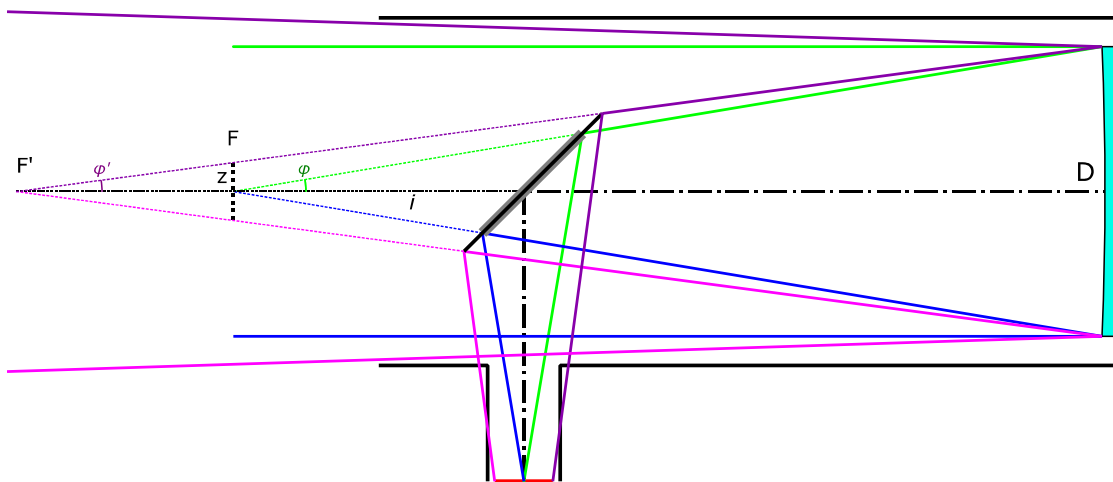


Рисунок 5 Расчёт диагонального зеркала для ненулевого невиньетированного поля.

На рисунке 5 видно, что для выбранного нами невиньетированного поля z часть лучей банально не пролезла в фокусёр: то есть оно было выбрано настолько большим, что либо нужно поумерить аппетиты, либо менять оборудование. Оно и понятно: в двухдюймовом фокусёре никак не могло поместиться 40 мм невиньетированного поля (не с таким изломом). Принципиально же для расчёта нужно лишь задать размер желаемого поля z , и найти, где будут теперь сходиться наши лучи, формируя фиктивную точку фокуса имея таким образом новый угол φ' . Чтобы его найти, воспользуемся подобием полученных треугольников. А дальше — всё то же самое. Рассчитываем угол, для новой фиктивной светосилы:

$$\tan \varphi' = \frac{z}{2(F' - F)} = \frac{D}{2F'} \quad 16$$

Выражая из двух последних равенств F' :

$$\begin{aligned} F'z &= F'D - FD \\ F'D - F'z &= FD \\ F' &= \frac{FD}{D-z} \end{aligned} \quad 17$$

Новый угол будет равен:

$$\tan \varphi' = \frac{D-z}{2F} \quad 18$$

Соответственно новый размер вторичного зеркала будет равен:

$$A + a = i'\sqrt{2} \frac{2 \tan \varphi}{1 - \tan^2 \varphi} = i'\sqrt{2} \frac{2 \frac{D-z}{2F}}{1 - \left(\frac{D-z}{2F}\right)^2} = i'\sqrt{2} \frac{4F(D-z)}{4F^2 - (D-z)^2} \quad 19$$

Где i' — это фиктивный излом: то расстояние, от «новой точки фокуса» до диагонального зеркала. Очевидно, что реальный излом меньше фиктивного на величину $F' - F$, что надо учесть в формуле:

$$\begin{aligned} i' &= i + F' - F = i + \frac{Fz}{D-z} \\ A + a &= \left(i + \frac{Fz}{D-z}\right) \sqrt{2} \frac{4F(D-z)}{4F^2 - (D-z)^2} \\ A + a &= \frac{4\sqrt{2}F[iD + z(F-i)]}{4F^2 - (D-z)^2} \end{aligned} \quad 20$$

Наше новое r при этом по-прежнему рассчитывается строго из угла, только уже не φ , а φ' , поэтому для него у нас остаётся крайне простое выражение:

$$r = \frac{\tan \varphi'}{2} = \frac{D-z}{4F} \quad 21$$

Или, если мы всё-таки хотим найти смещение сразу в миллиметрах:

$$d = r(A + a) = \frac{\sqrt{2}[iD + z(F-i)](D-z)}{4F^2 - (D-z)^2} \quad 22$$

Самое компактное выражение для невиньетированного поля, если в качестве размера диагоналки мы берём её большую ось мне удалось получить вот в таком виде:

$$z = D - \frac{2F \left[\sqrt{2}(F-i) - \sqrt{B(B - \sqrt{2}D) + 2[F-i]^2} \right]}{B} \quad \text{где } B = A + a \quad 23$$

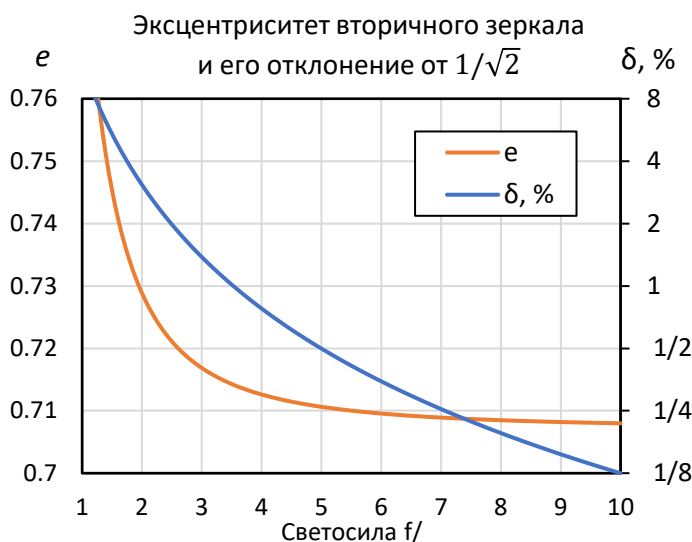
Но что будет если мы попробуем записать его исходя не из большой оси эллипса, а малой? Оказывается, что если мы предположим, что малая ось нашего эллиптического зеркала в корень из двух раз меньше, чем большая $b = B/\sqrt{2}$, то выражение 23 можно дополнительно сократить:

$$\begin{aligned} z &= D - \frac{2F \left[\sqrt{2}(F-i) - \sqrt{b\sqrt{2}(b\sqrt{2} - \sqrt{2}D) + 2[F-i]^2} \right]}{b\sqrt{2}} \\ z &= D - \frac{2F \left[(F-i) - \sqrt{[F-i]^2 - b(D-b)} \right]}{b} \end{aligned} \quad 24$$

Внимательный читатель, однако, может задать правомерный вопрос: «А почему мы решили, что соотношение сторон нашего эллиптического зеркала равно корню из двух? Да, оно стоит под углом в 45 градусов, но ведь в формуле 2, которая как раз нам даёт эксцентриситет мы можем получить и другие значения.»

Замечание правомерное, но давайте посмотрим, какие реальные значения эксцентриситетов мы можем получить для наших вторичных зеркал. Как уже говорилось ранее, ψ —

угол наклона зеркала в нашем случае всегда равен 45 градусов, а φ — угол, определяемый светосилой главного зеркала.



$$e_{f/2} = 0.728868987$$

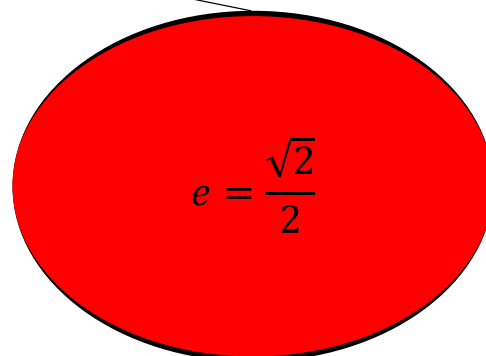


Рисунок 6 Оценка эксцентриситета диагонального зеркала.

Слева показан график, на котором отложены значения эксцентриситета вторичного зеркала в зависимости от светосилы телескопа, а справа — демонстрационная картинка того насколько слабо отличается расчётная форма зеркала для светосилы $f/2$ от тех зеркал, что обладают стандартным соотношением сторон $1:\sqrt{2}$. Видно, что даже для заоблачных светосил больших $f/2$ отклонения не превышают нескольких процентов. А на практике во всех телескопах вторичные зеркала установлены такого размера, чтобы присутствовало невиньетированное поле. От того что зеркало на полмиллиметра короче по одной из полуосей у нас просто виньетирование по одной оси будет нарастать больше, чем по другой на те самые доли процента, что абсолютно невозможно будет заметить. Значит можно считать нашу формулу 24 верной с высокой степенью точности.

Также, пользуясь упрощённой формулой 24 можно вывести формулу для относительного смещения диагоналки, содержащую только размеры зеркал и расстояния между ними:

$$r = \frac{(F - i) - \sqrt{[F - i]^2 - b(D - b)}}{2b} \quad 25$$

Однако же вернёмся к юстировке. Допустим, что этап выставления фокусёра мы либо выполнили, либо понадеялись на честность изготовителя. Первое, что мы должны сделать дальше — это выставить вторичное зеркало так, чтобы при взгляде из точки фокуса оно было концентричным с окулярной трубкой и в то же самое время в нём бы полностью отражалось первичное зеркало. При этом, требование того, что мы должны смотреть при юстировке именно из точки фокуса, или хотя бы с оптической оси — довольно строгое. Так как тут уже **любое** смещение с оси неминуемо приведёт к неконцентричности вторички относительно фокусёра, и как следствие, неправильному углу фокальной плоскости — она станет неортогональна оси фокусёра. Что приведёт к уже описанному эффекту: получить резкость по всему кадру станет невозможно — при движении фокусёра фокус на фотографии будет перекашиваться с одного места на другое. Поэтому для юстировки настоятельно рекомендуется использовать чеширский окуляр. Ну а чтобы дополнительно повысить точность установки — я бы рекомендовал на само вторичное зеркало нанести махонькую метку, которая бы показывала не его геометрический центр, а ту точку, через которую проходит оптическая ось, и которую мы вычислили с учётом смещения по формуле 14, или, для реального случая с невиньетированным полем — 21. Тогда, имея либо чеширский окуляр с перекрестьем, либо лазерный коллиматор, мы могли бы без труда по этой метке

выставить вторичное зеркало в нужную позицию, а далее — нам бы оставалось только подбрав такой его наклон, чтобы увидеть полностью отражение главного зеркала.

До этого момента я как-то опускал способ крепления вторички прямо по центру трубы. Но любой владелец ньютона знает, что висит оно там не само по себе, а удерживает его на месте специальное крепление, в простонародье также известное как паук. По факту это четыре (иногда три) тонкие стальные пластины. Вращая винты, которыми они крепятся к трубе, можно в некоторых пределах перемещать диагональное зеркало по горизонтали. А по вертикали это позволяет делать так называемый «стакан», к которому диагоналка просто приклеена. Наклон контролируется через три юстировочных винта, проходящих насквозь втулки, находящейся в самом пауке, и упирающихся в «стакан».

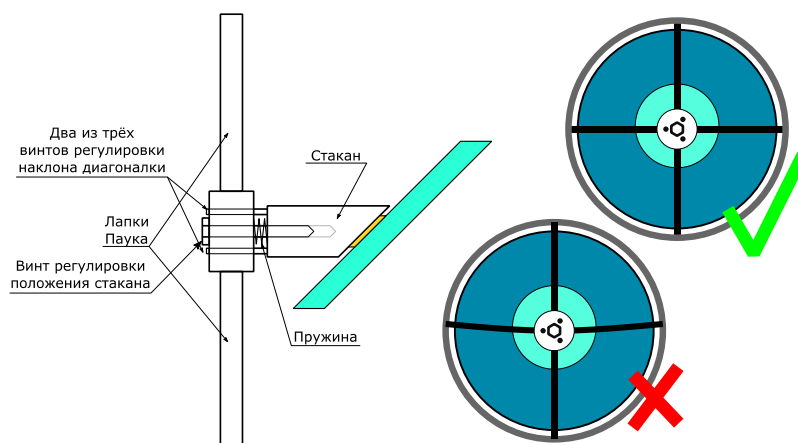


Рисунок 7 Схема крепления вторичного зеркала с правильной и неправильной юстировкой паука. Слева приведён вид с торца трубы, показывающий два варианта выравнивания вторички.

При взгляде на рисунок сразу понятно, что хотя лапки паука и позволяют перемещать вторичку по горизонтали — делать это в больших пределах настоятельно не рекомендуется, поскольку кривые лапы приведут к двоению и усилению лучей от звёзд из-за эффекта дифракции, который в ньютонах присутствует абсолютно всегда. И что лучше сделать их одинаковыми, а вторичку заранее правильно клеить к стакану с учётом формулы смещения, которой был посвящён весь текст ранее.

Ну и в завершение нашей юстировки, если все предыдущие условия были выполнены, нам нужно будет загнать метку на главном зеркале в отражение чёрного глазка чеширского окуляра, пользуясь юстировочными винтами главного зеркала, естественно. То есть по итогам юстировки мы должны будем получить вот такую картину:

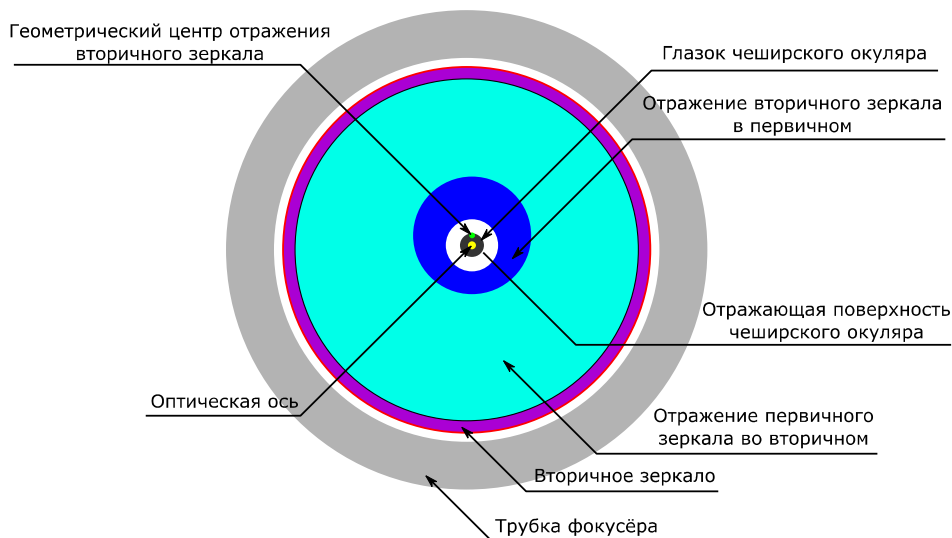


Рисунок 8 Схема вида при взгляде в чеширский окуляр при правильной юстировке. Растяжки паука, лапки удерживающие главное зеркало, и центральные метки обоих зеркал не показаны.

Видно, что отражение вторички в первичке оказывается смещено, но это не ошибка юстировки. Так и должно быть! И чем более светосильный ньютон в вашем распоряжении, тем сильнее будет это смещение. Собственно величину этого смещения мы и рассчитывали по формуле 14. Хотя больше чем на картинке оно может быть только в двух случаях:

1. Вы обладатель телескопа со светосилой больше, чем $f/3$, т.к. рисунок показывает идеальную коллимацию именно для такой светосилы.
2. Вторичное зеркало было приклеено производителем неправильно, и он руководствовался не формулами, а лепил на глазок. Тогда я бы настоятельно рекомендовал его срезать и переклеить самостоятельно. Может быть для визуальных наблюдений это и не будет сильно мешать, но вот на астрофотографиях это выльется в то, что самая яркая часть кадра будет смещена к краю матрицы. Кадры плоского поля, конечно, могут поправить ситуацию, но соотношение сигнал/шум для наиболее тёмных участков будет хуже, чем могло бы быть. Плюс ко всему, если вторичка изначально приклеена со значительным отклонением от расчётного смещения, то, когда мы выставим её концентрично в трубке фокусёра, а потом будем играть с её наклоном, чтобы увидеть главное зеркало целиком — мы выставим не её расчётный угол, а какой-то другой. Что опять-таки приведёт к перекосу фокальной плоскости. Насколько это критично для юстировки будет рассмотрено далее.

Считаю важным это повторить, что на светосильных ньютонах мы никогда не получим такую картинку:

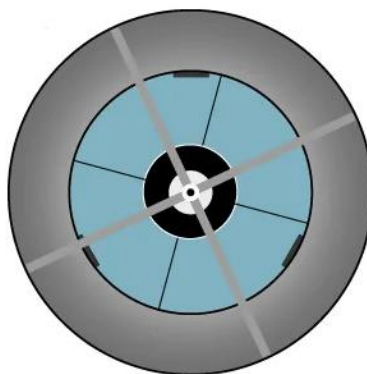


Рисунок 9 Демонстрируемый во многих руководствах пример правильной юстировки, недостижимый на светосильных ньютонах ни при каких обстоятельствах. Чёрный на этом рисунке силуэт вторички будет смещён, как уже говорилось ранее.

Для «тёмных» (светосила меньше $f/6$) ньютонов смещение вторички и правда может быть незначительно и незаметно глазу, но, когда в руководствах для начинающих показывают эту картинку, как по мне — это однозначно ведёт лишь к заблуждениям.

Теперь, когда основные шаги разобрали, можно попытаться прикинуть, а с какой точностью нам вообще надо проводить всю эту юстировку? Может один/два миллиметра/градуса и не приведут к какой-либо катастрофе? Это и попытаемся оценить.

Первый шаг юстировки — это, как мы выяснили, выставление вторичного зеркала концентрично трубке фокусёра. Но что, если оно изначально было приклеено к стакану неправильно? Без вычисленного нами смещения или вообще со смещением в обратную сторону? Попробуем сначала оценить это визуально на схеме, а потом и «начертить пару формул». Все расчёты я буду делать по формулам для случая нулевого невиньетированного поля, т.е. как будто у нас диагональное зеркало минимального размера. Это сильно упростит выкладки, но качественно на результате это никак не отразится, поскольку, например смещение диагонального зеркала даёт величины r отличающиеся всего на:

$$\delta r = \frac{r - r'}{r} = \frac{z}{D} \sim 10 \div 15\%$$

При этом нужно помнить, что это поправка 10% это не на сами углы, а на их **допуски**.

Также по мере возможности я теперь буду пользоваться приближением, что тангенс малого угла примерно равен углу **в радианах**. Начиная со светосил меньших $f/3$ такое приближение тоже не внесёт в расчёты погрешность больше процента:

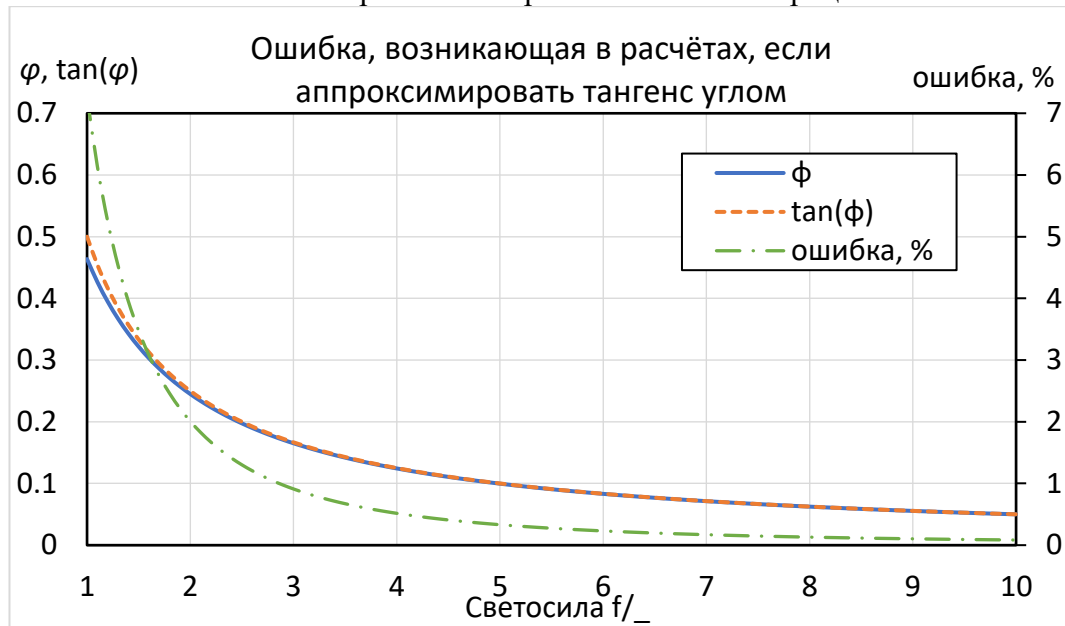


Рисунок 10 Оценка ошибки замены значения тангенса на угол в радианах.

Предположим, что наш производитель откровенно криворукий и наклеил диагоналку не то, что без смещения, а ещё и со смещением не в ту сторону. К чему это приведёт? К тому, что эффективно она сместится дальше от главного зеркала и ближе к фокусёру. Правда при этом, если мы сместим её передвижением стакана обратно, чтобы она встала концентрично трубке фокусёра, и сохраним угол её наклона в 45 градусов, а, напомним, мы его заранее не знаем — мы увидим, что отражение главного зеркала во вторичке режется... Мы попробуем откорректировать наклон так, чтобы отражение первички влезло, и стало концентрично вторичке, как нам говорят все руководства, вот тут-то перекося фокальной плоскости и вылезет! Именно поэтому я и потратил столько времени на вывод формулы, вычисляющей правильное положение диагоналки — поскольку это очень важный параметр.

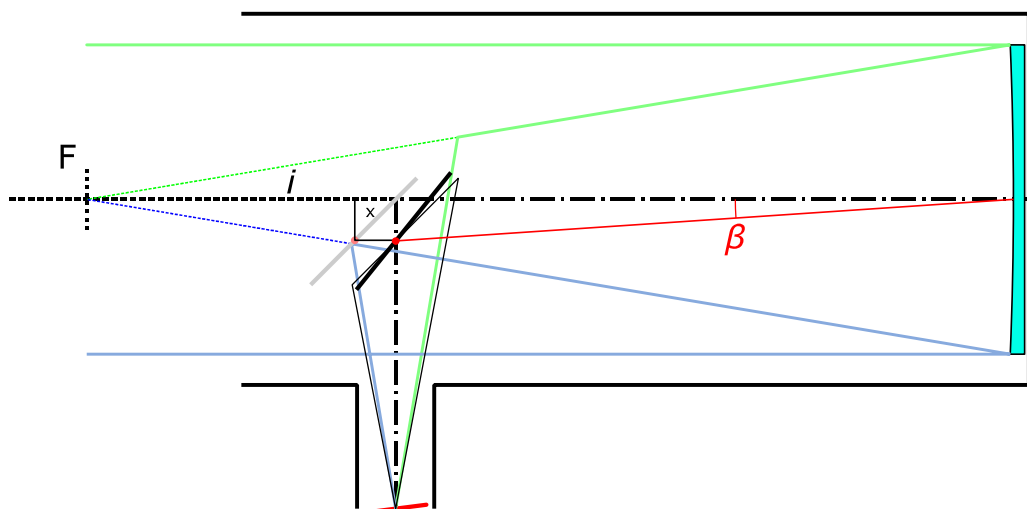


Рисунок 11 Юстировка Ньютона с неправильно приклеенной вторичкой. Показано положение, где она должна была бы стоять (с кривой приклейкой) — серым. Положение после выставления концентрично трубке фокусёра — тонкие линии. Положение после доворота таким образом, чтобы полностью отражалось главное зеркало — жирная линия. Красным показана метка, соответствующая корректному смещению d .

Все обозначения на рисунке 11 соответствуют введённым ранее кроме двух: первая новая переменная — x , величина отклонения положения вторичного зеркала относительно расчётного смещения d . Если бы оно было приклеено правильно — она была бы равна нулю. И вторая — угол β , сформированный треугольником, в котором один из катетов равен расстоянию от точки правильной приклейки вторичного зеркала до оптической оси главного зеркала, а второй катет — это расстояние от проекции центра фокусёра на оптическую ось главного зеркала до центра главного зеркала. Формула, задающая угол β , представляет эти расстояния более наглядно:

$$\tan \beta = \frac{\frac{x}{\sqrt{2}}}{F - i} = \frac{x}{\sqrt{2}(F - i)} \approx \beta \quad 27$$

Нетрудно сообразить, и как видно из рисунка, вторичное зеркало нужно будет повернуть на половину этого угла, чтобы соблюсти иллюзию правильной юстировки вторички. И именно на этот же самый угол β у нас повернётся фокальная плоскость, относительно её исходного положения.

А насколько это вообще критично? Какую точность угла нам необходимо получить?

Самую простую качественную оценку можно получить из следующих соображений: на каждый пиксель лучи приходят в виде конуса, с уже знакомым нам углом раствора, соответствующему светосиле нашего телескопа. Правда сейчас нам нужна не половина этого угла, а он весь целиком:

$$\text{atan } 2\varphi = \frac{D}{F} \Rightarrow 2\varphi \approx \frac{D}{F} \quad 28$$

Также нам не помешает узнать разрешающую способность нашего телескопа, которая определяется диаметром зеркала. По критерию Рэля имеем:

$$\alpha = \frac{140''}{D(\text{мм})} = \frac{6.8 \cdot 10^{-4} \text{ рад}}{D(\text{мм})} \quad 29$$

Теперь предположим, что мы сфокусировали центр изображения, но при этом у нас есть перекося матрицы относительно фокальной плоскости, то есть наблюдается такая картина:

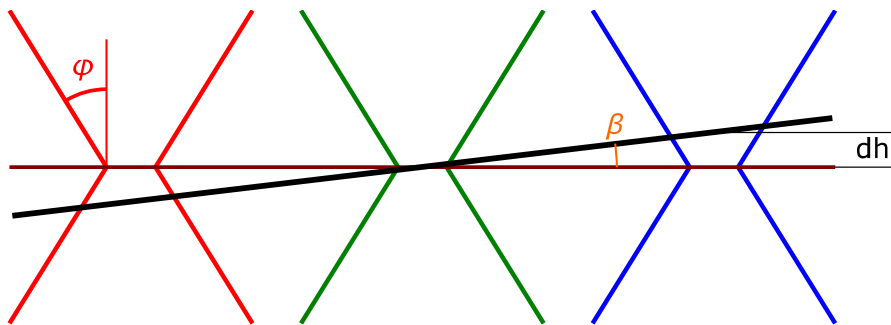


Рисунок 12 Лучи света, приходящие на матрицу, стоящую под углом β относительно фокальной плоскости.

Лучи на рисунке 12 не сходятся в идеальную точку по причине дифракции. Дифракционный предел мы определили по формуле 29. Зная фокусное расстояние телескопа, можно оценить линейный размер этих дифракционных пятен (хотя более корректно тут было бы сказать, что это не размер пятен, а размер диска Эйри — центрального максимума дифракционной картины):

$$s_{diff} \approx \alpha F \quad 30$$

Отклонение от фокальной плоскости как в положительную, так и в отрицательную сторону приводит лишь к увеличению наших пятен. Также мы знаем, что минимальный размер пятна равен s_{diff} , и он растёт пропорционально отклонению от фокальной

плоскости dh , а коэффициентом пропорциональности у нас служит угол $2\varphi \approx D/F$. Из этого можно получить следующие качественные выкладки:

$$dh \approx l\beta/2$$

$$s(h) = s_{diff} + \frac{D}{F}|h| \quad 31$$

$$s(\beta) = s_{diff} + \frac{D}{F}\left|\frac{l\beta}{2}\right|$$

Где $l/2$ половина размера нашей матрицы (в миллиметрах) по длинной стороне, если мы сфокусировались в её центре. Как же нам отсюда вывести допуск на угол β ?

Для начала попробуем оценить нашими качественными формулами допуск на фокусировку. Предположим, что самые слабые звёзды оставили на матрице след 2×2 пикселя. Если на краю самые маленькие звёзды будут уже в виде кружка 3×3 пикселя, то скорее всего мы это заметим. Примем за величину допустимого распухания звёзд за $t = 0.5$:

$$\frac{D}{F}|h| \leq ts_{diff} \Rightarrow |h(\mu\text{м})| \leq 6.8 \cdot 10^{-1}t \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad 32$$

Для светосилы $f/6$ отклонение $|h| \leq 12\mu\text{м}$ а для $f/4$ — уже $5.5\mu\text{м}$. Однако всё-таки ниши формулы не учитывают эффекты дифракции, ведь свет, отражённый от главного зеркала, формирует не просто сходящийся пучок, а ещё и дифракционную картину.

Не вдаваясь в математические детали, в двух словах можно сказать, что рассчитывается дифракционная картина исходя из принципа Гюйгенса, который гласит, что каждая точка фронта (или поверхности, достигнутой волной) является вторичным источником сферических волн. Все эти волны суммируются и дают суммарную интенсивность света в искомой точке. А для вычисления этой суммы на сцену выходит принцип суммирования Френеля, когда исследуемая поверхность разбивается на множество небольших сегментов, границы между которыми выбираются таким образом, чтобы разность хода лучей между соседними сегментами была равна половине длины волны.

Существует формула для ошибки волнового фронта, сформированного главным зеркалом при отражении не в фокус (F), а мимо ($F_d = F + \Delta$):

$$W_d = \left[\frac{1}{F_d} - \frac{1}{F}\right] \frac{D^2}{8} = \frac{D^2}{8} \left[\frac{F - F_d}{FF_d}\right] = -\frac{D^2}{8} \frac{\Delta}{FF_d} \quad 33$$

Для малого дефокуса, когда $\Delta \ll F$ можно сказать, что $F \approx F_d$, а если мы вспомним, что F — это расстояние до точки фокуса, а D — апертура главного зеркала, то получается, что из-за дефокуса ошибка волнового фронта прямо пропорциональна отклонению от точки фокуса и квадрату светосилы:

$$W_d = -\frac{D^2}{8} \frac{\Delta}{FF_d} \sim \frac{D}{8} \left(\frac{D}{F}\right)^2 \quad 34$$

За допустимую величину дефокуса принимается такое расстояние, Δ на котором искажение волнового фронта не превышает $W_d < \lambda/4$. Подставляя это значение в формулу 34:

$$\frac{D}{8} \left(\frac{D}{F}\right)^2 \lesssim \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \Delta \lesssim 2\lambda \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad 35$$

Принимая длину волны света за 500 нм получаем, что смещение от точки фокуса в микронах допустимо на величину обратно пропорциональную квадрату светосилы. То есть почти в 3 раза больше, чем согласно 32. Напомню только, что величина Δ , рассчитанная таким образом подразумевает суммарное перемещение: по $\lambda/8$ в каждую сторону. При дальнейшем отходе от оптимального положения мы будем наблюдать, как происходит перераспределение энергии в дифракционной картине: ослабление центрального максимума и усиление окружающих его колец.

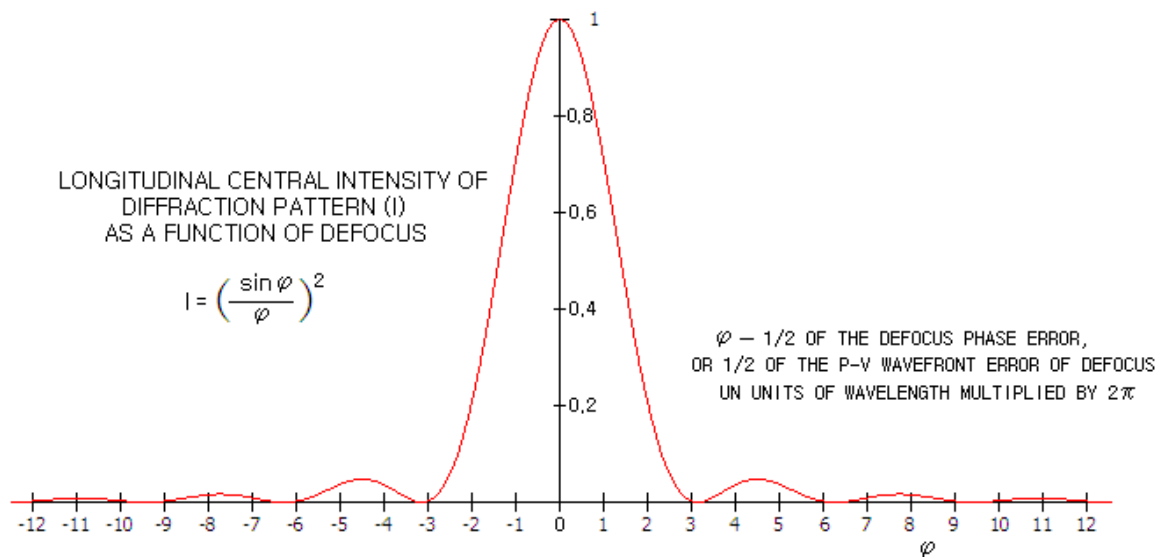
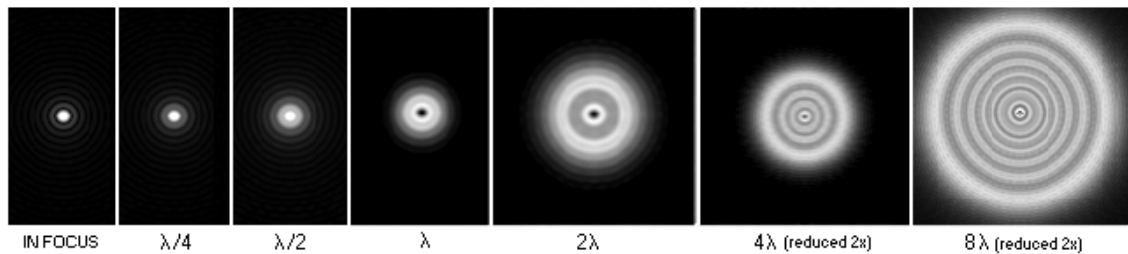
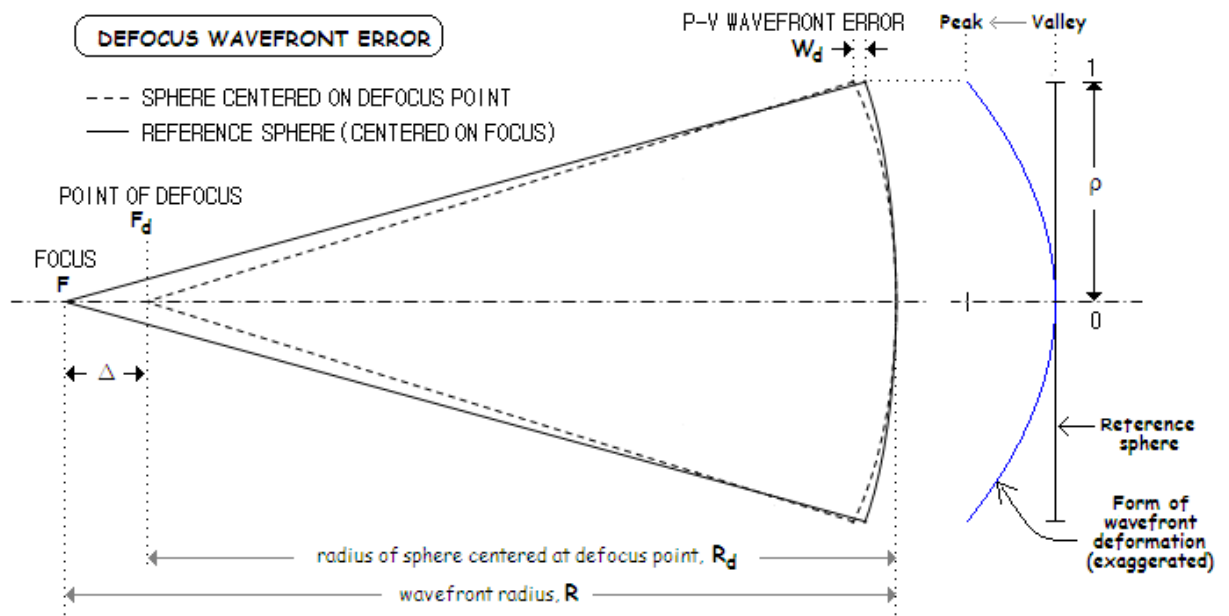


Рисунок 13 *Иллюстрация* дифракционных эффектов, возникающих из-за дефокуса.

Существуют программы, которые позволяют рассчитать данные эффекты. Например, бесплатный [aberrator](#). Возможности этой программы, со скромным на сегодняшний день объёмом в три мегабайта, довольно высоки. Она способна моделировать эффекты, которые можно наблюдать в телескоп, такие как дифракционную картину, симулировать размытие изображения из-за дрожания атмосферы или дефектов оптики: сферической aberrации различных порядков, комы, астигматизма и других. А также в ней можно построить срез дифракционной картины при проходе из дофокала в зафокал, в том числе с учётом центрального экранирования вторичного зеркала. Картинки, получающиеся в результате таких расчётов, можно увидеть ниже.

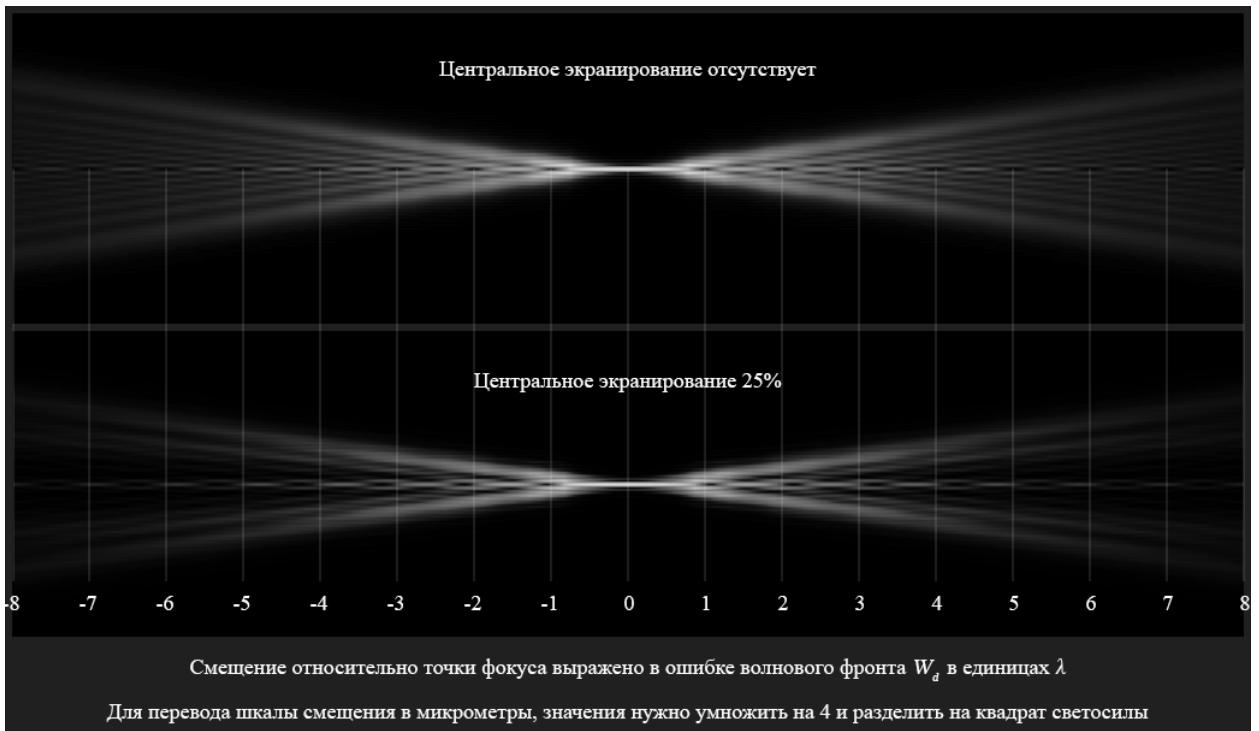


Рисунок 14 Сечение дифракционной картины при проходе через фокус.

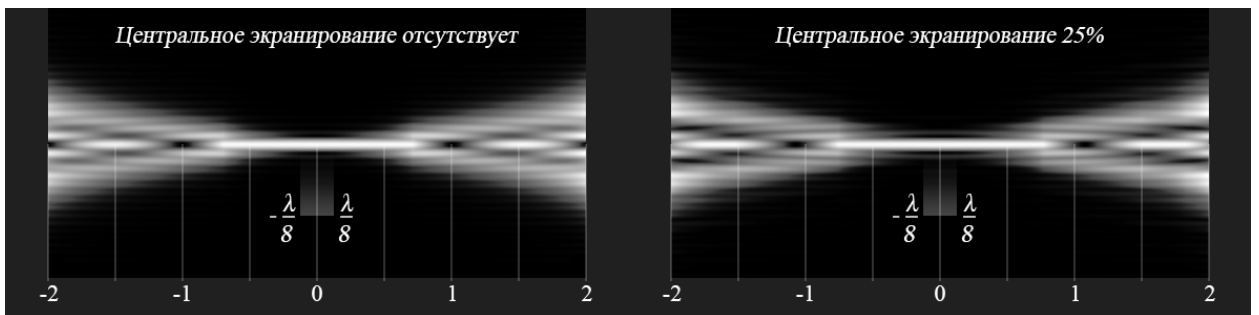


Рисунок 15 Детальное сечение вблизи фокуса. Отмечен желаемый диапазон фокусировки, где качество ограничено лишь дифракцией.

На рисунке 15 можно заметить, что если в системе присутствует центральное экранирование, то второе дифракционное кольцо будет уже чуть поярче. Плюс к этому — полезная площадь зеркала, способная собирать свет, также уменьшается. Поэтому гнаться за большим размером невиньетируемого поля, так, чтобы вся матрица находилась в его пределах, даже в случае астрографа, не стоит.

Теперь, когда мы определили необходимый допуск на дефокус, вычисление максимального угла наклона фокальной плоскости — тривиально:

$$dh \approx l\beta/2 \Rightarrow |\beta| \leq \frac{2\Delta}{l} \quad 36$$

То есть допуск на наклон вторички будет равен значению из формулы 36:

$$|\beta_{\text{рад}}| \lesssim \frac{2 \cdot 10^{-3}}{l(\text{мм})} \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad |\beta_{\text{град}}| \lesssim \frac{0.114}{l(\text{мм})} \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad 37$$

Теперь можно получить некоторые цифры, от которых уже можно отталкиваться. Например, на моём телескопе со светосилой, определяемой как 150/1000 на полнокадровой матрице (36 × 24 мм) мне нужно выставить диагональное зеркало и фокусёр с точностью примерно девять угловых минут, чтобы итоговый перекося фокальной плоскости не вносил по краям поля ощутимого размытия. А на светосиле $f/4$ для полного кадра эта точность уже должна быть лучше трёх минут. Для матриц формата APS-C с размерами 22.2 × 14.8 можно увеличить эти величины пропорционально кроп-фактору: в 1.6 раза. Вот с такой точностью нам необходимо юстировать телескоп.

Отсюда, например видно, что если вторичка наклеена криво, и по формуле 27, если излом оптической оси $i \approx F/4 \div F/5$, то чтобы угол β не превышал трёх с половиной угловых минут, или 1 миллирадиана:

$$x \lesssim \beta\sqrt{2}(F - i) \approx 1.1F\beta \quad 38$$

Для типичного фокусного расстояния в 1 метр имеем допустимое смещение вторичного зеркала от расчётного на миллиметр, а желательно — лучше. Очевидно, что если ослабить допуск на распухание звёзд (что я бы не рекомендовал), то пропорционально увеличатся и все остальные оценки, но порядок величин останется: точность поворотов зеркал порядка нескольких угловых минут, а точность приклейки и позиционирования вторички должна быть миллиметровой.

Приклеить вторичку со смещением к стакану, выдержав миллиметровую точность, не является архисложной задачей. Но выставить её в нужное положение с такой же точностью будет уже посложнее. Также не следует забывать, что к перекосу фокальной плоскости может привести и заклон фокусёра, обсуждавшийся ранее (Рисунок 4). Поэтому точность его юстировки должна быть сопоставимой с точностью положения вторичного зеркала, или даже выше. Так, если посадочная площадка фокусёра имеет расстояние между отверстиями для крепления к трубе, скажем 80 миллиметров, то миллиметровая разница по высоте приведёт к углу $\beta \approx 43'$! Поэтому к юстировке фокусёра нужно отнестись со всей серьёзностью, максимально устранив все возможные перекосы ещё до процедуры подбора положения вторичного зеркала. Это, если можно так сказать — нулевой этап юстировки.

После того, как фокусёр отъюстирован, а вторичное зеркало либо переклеено, либо мы убедились, что производитель всё сделал верно, наступает этап подбора его положения в трубе. Как мы уже убедились, на глаз с требуемой точностью это будет сделать однозначно невозможно. Как первым приближением, можно воспользоваться чеширским окуляром. Он ограничит свободу перемещения глаза наблюдателя и заставит нас смотреть пусть и не строго с оси симметрии фокусёра, но хотя бы не позволить отклониться дальше, чем 2-3 мм от неё... Здесь можно пойти двумя путями: первый предполагает, что мы стараемся соблюсти концентричность и полагаемся на наш глазомер.

При этом **крайне** желательно смотреть не с абы какого расстояния, а из точки фокуса, т.к. рассчитанное нами смещение было рассчитано именно для этого положения. Погрешность положения глаза относительно центра фокусёрной трубки в 1-2 миллиметра для излома 250 мм выльется в ошибку угла примерно равного:

$$\beta = \frac{(1 \div 2)\text{мм}}{i(\text{мм})} \approx 15' \div 25' \quad 39$$

Этот результат можно немного улучшить, если мы пойдём по второму пути. Здесь мы, как я предлагал ранее, ставим небольшую метку на вторичное зеркало, отмечающую его смещение от геометрического центра, а потом, либо пользуясь штатным перекрестьем чеширского окуляра, либо делая в нём своё собственное перекрестье из подручных материалов, ставим вторичку так, чтобы метка и перекрестье совпадали. При этом, поскольку мы уже не пользуемся таким параметром, как концентричность вторички и фокусёра — можно дополнительно увеличить расстояние от точки наблюдения. Однако ясно, что таким способом угол β вряд ли удастся уменьшить больше чем в полтора-два раза, так как это уже будет предполагать удлинительные втулки ещё почти 25 см в длину. И при этом у нас не должно быть провисания фокусёра под таким рычагом... Хотя даже уменьшение угла β до $10'$ уже позволит получить весьма приличное поле даже на полнокадровой матрице со светосилой до $f/6.7$, а с кропнутыми матрицами и до $f/5$.

Если же мы доверим задачу визирования не глазу, а лазерному коллиматору, то неопределённость в положении лазера относительно оптической оси можно будет уже принять как минимум вдвое меньшей, что дополнительно уменьшает ошибку в угле β . Естественно, если до этого мы убедились, что направление луча коллиматора соосно с трубкой фокусёра. Если коллиматор имеет погрешность в изготовлении, то при вращении лазера в фокусёре точка не будет оставаться на одном и том же месте, а будет описывать окружность

на стенке трубы, или на нашем вторичном зеркале... Это конечно печально, но можно очертить этим лазером полную окружность, понять, где у неё центр и загнать метку на вторичке в это, теперь уже виртуальное, положение. Хотя конечно это потенциальный проигрыш в точности.

Дальше, после того как корректное положение вторички установлено — подбираем такой её наклон, чтобы можно было целиком видеть отражение первичного зеркала во вторичном. Естественно — концентрично. Ориентироваться можно как по контуру самого зеркала, так и по лапкам, удерживающим главное зеркало в его оправе. Причём, если мы будем смотреть не из точки фокуса F , а из нашего виртуального фокуса F' , соответствующему точке, где у нас пропадает невиньетированное поле, то соблюсти концентричность вторичного зеркала и искомого отражения, будет ещё проще, чем при наблюдении из точки фокуса. Ну и как третий способ — можно загнать лазерную точку от нашего коллиматора опять же в центр первичного зеркала. Все три способа тут эквивалентны.

И в качестве финального этапа — юстировочными винтами главного зеркала нужно загнать отражение чёрного глазка чеширского окуляра в центральную метку на главном зеркале. Или, если мы пользуемся лазерным коллиматором — то пятнышко от лазера должно вернуться туда, откуда стартовало.

Оценка виньетирования и о метке на вторичке.

Попробуем сначала оценить, насколько быстро происходит спад освещённости для случая нулевого невиньетированного поля, а потом будем увеличивать размеры вторичного зеркала и смотреть что от этого будет меняться. Величину излома при этом выберем единицы в самом начале и изменять её не будем в ходе расчётов.

Как уже было показано ранее, можно с высокой степенью точности ($< 1.5\%$ для светосилы меньше $f/3$) пользоваться приближением, что наше вторичное зеркало представляет из себя эллипс с соотношением сторон: $1:\sqrt{2}$. Виньетирование при этом будет возникать, когда конус света идёт от главного зеркала не прямо в точку фокуса, а под некоторым углом. Удобнее всего это проиллюстрировать, посмотрев на наш телескоп как бы сверху: так чтобы окулярный узел смотрел строго вниз, а мы, представив, что труба у нас прозрачная, увидели бы тыльную сторону диагонального зеркала в виде окружности:

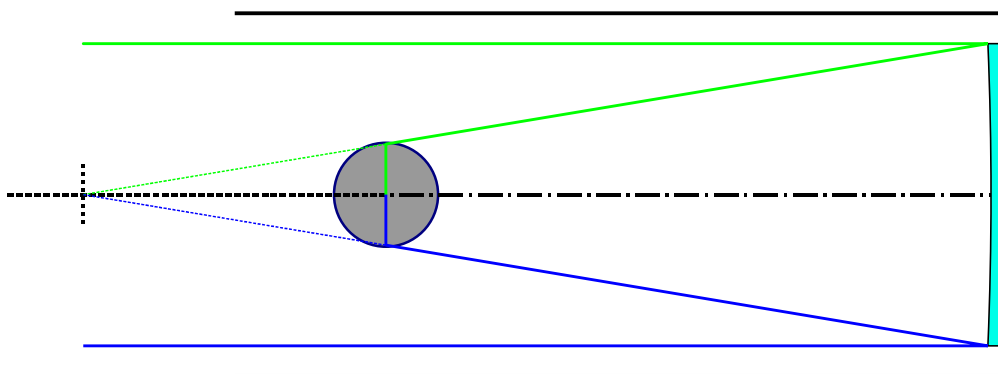


Рисунок 16 Иллюстрация хода лучей при виде сверху.

В таком случае можно свести задачу о виньетировании к задаче о площади пересечения двух окружностей, одна из которых формируется главным зеркалом, а вторая — собственно рабочая площадь вторички.

Схема для данного случая показана на рисунке 17. Для получения оценки виньетирования нас интересует площадь, закрашенная зелёным цветом. Для того чтобы найти координаты точки пересечения проще всего воспользоваться алгебраическими уравнениями:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = d_s^2/4 \\ (x - p)^2 + y^2 = d_l^2/4 \end{cases} \quad 40$$

Где d_s — поперечный диаметр вторичного зеркала, $d_l = iD/F$ — диаметр светового пучка, сформированного главным зеркалом на расстоянии, соответствующем координатам излома i оптической оси, а p — расстояние между центрами окружностей.

Точка пересечения, относительно первой окружности будет иметь горизонтальную координату:

$$x = \frac{d_s^2 - d_l^2 + 4p^2}{8p} \quad 41$$

Только не следует забывать, что найденное таким способом значение будет иметь смысл только когда расстояние либо меньше полусуммы диаметров, либо больше половины их разности. Поскольку для первого случая окружности находятся настолько далеко, что не пересекаются, а для второго — одна полностью лежит внутри другой. Вычитая одно уравнение из другого мы просто исключили возможность появления мнимых корней, а они там есть. Ну а поскольку нам нужны реальные решения — работать надо в области, где $p \in \left(\frac{d_s - d_l}{2}, \frac{d_s + d_l}{2}\right)$.

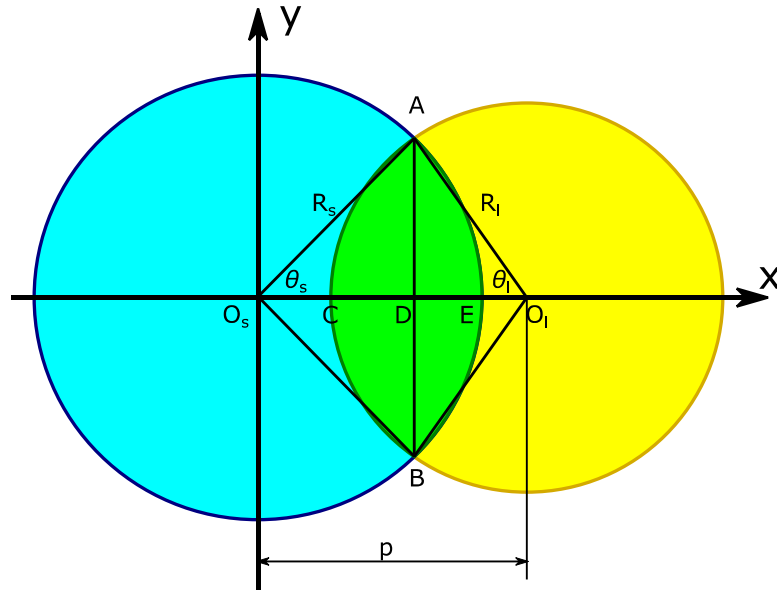


Рисунок 17 Схема пересечения двух окружностей.

Для угла θ_s имеем выражение:

$$\theta_s = \arccos \frac{x}{d_s/2} = \arccos \frac{d_s^2 - d_l^2 + 4p^2}{4pd_s} \quad 42$$

Чтобы найти площадь, ограниченную окружностью вторичного зеркала над осью Ox и вертикальной прямой AD надо найти разность площадей соответствующего сектора O_sAE и треугольника O_sAD :

$$S_1 = \frac{\pi d_s^2}{4} \cdot \frac{\theta_s}{2\pi} - \frac{1}{2} x \frac{d_s}{2} \sin \theta_s = \frac{\theta_s d_s^2}{8} - \frac{d_s}{4} \cdot \frac{d_s^2 - d_l^2 + 4p^2}{8p} \sin \theta_s \quad 43$$

Пользуясь основным тригонометрическим тождеством и тем, что косинус и арккосинус обратные друг для друга функции:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\theta_s d_s^2}{8} - \frac{d_s}{4} \cdot \frac{d_s^2 - d_l^2 + 4p^2}{8p} \sqrt{1 - \left(\frac{d_s^2 - d_l^2 + 4p^2}{4pd} \right)^2} = \\ &= \frac{\theta_s d_s^2}{8} - \frac{d_s^2 - d_l^2 + 4p^2}{128p^2} \sqrt{16p^2 d_s^2 - (d_s^2 - d_l^2 + 4p^2)^2} \end{aligned} \quad 44$$

Для второй окружности ситуация со смещением будет выглядеть аналогичной:

$$\begin{cases} (x+p)^2 + y^2 = d_s^2/4 \\ x^2 + y^2 = d_l^2/4 \\ x = \frac{d_s^2 - d_l^2 - 4p^2}{8p} \end{cases} \quad 45$$

Однако следует помнить, что здесь, поскольку точка пересечения лежит левее от её центра — мы должны взять значение x с обратным знаком!

Для угла θ_l имеем выражение:

$$\theta_l = \arccos \frac{-x}{d_l/2} = \arccos -\frac{d_s^2 - d_l^2 - 4p^2}{4pd_l} = \pi - \arccos \frac{d_s^2 - d_l^2 - 4p^2}{4pd_l} \quad 46$$

По аналогии с первой окружностью для S_2 имеем:

$$S_2 = \frac{\theta_l d_l^2}{8} + \frac{d_s^2 - d_l^2 - 4p^2}{128p^2} \sqrt{16p^2 d_l^2 - (d_s^2 - d_l^2 - 4p^2)^2} \quad 47$$

Знак плюс во втором слагаемом появляется как раз из-за того, что x у нас отрицателен, и чтобы «вычесть» площадь треугольника — мы должны её «прибавить».

Для того, чтобы оценить именно величину виньетирования — мы должны получившуюся сумму, которая на самом деле половина от искомой площади пересечения, разделить на половину же площади светового пучка:

$$\frac{1}{2} \pi \frac{d_l^2}{4} = \frac{\pi d_l^2}{8} \quad 48$$

Последней неизвестной величиной остаётся величина смещения наклонного пучка p . Получить её можно следующим образом. При смещении из точки фокуса в другую точку, всё ещё находящуюся в фокальной плоскости и находящуюся на расстоянии u , при взгляде из центра главного зеркала угол этого перемещения будет равен:

$$\xi = \text{atan} \frac{u}{F} \quad 49$$

Соответственно смещение центра окружности будет видно под этим же углом, но соответствующее расстояние будет пропорционально меньше u на величину:

$$p = u \frac{(F - i)}{F} \quad 50$$

Теперь у нас есть все переменные, чтобы посмотреть, как выглядит виньетирование для случая различных систем. Для иллюстрации я выбрал два случая с одинаковой апертурой в 200 мм и светосилами $f/8$ и $f/4$, которая будет копить свет на матрице в 16 раз быстрее первой. Излом оси в обоих схемах был 200 мм, что вполне оправдано, т.к. 100 мм потребуется на вывод пучка за пределы главного зеркала, пять сантиметров для хода лучей через трубу, фокусёр, возможно — колесо фильтров и ещё пять — ход лучей внутри цифровой камеры, будь то зеркалка или специализированная астрокамера.

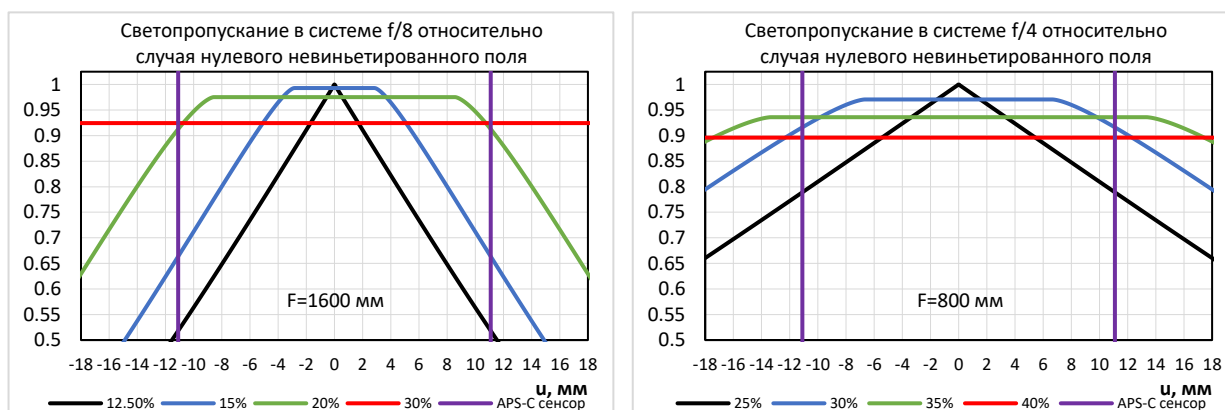


Рисунок 18 Виньетирование для различных светосил и разных размеров вторичных зеркал. Соответствующие им значения линейного центрального экранирования показаны в процентах в легенде графика.

Видно, что у светосильных ньютонов есть проигрыш по величине центрального экранирования — минимальный размер вторичного зеркала, при котором используется вся апертура для них выше. Что ведёт к усилению дифракционных эффектов. Для длиннофокусного же ньютона при весьма скромном центральном экранировании в 15-20% уже эффективно используется вся площадь главного зеркала. В то время как на светосильном ньютоне эта величина начинается только с 25%. Не следует, однако, думать, что изображение при этом сильно теряет в яркости, так как экранируется только небольшая доля от площади: при $R = 15 \div 40\%$ теряется всего лишь $R^2 \approx 2 \div 16\%$ света.

Степень нарастания дифракционных эффектов из-за центрального экранирования можно оценить на рисунке 19:

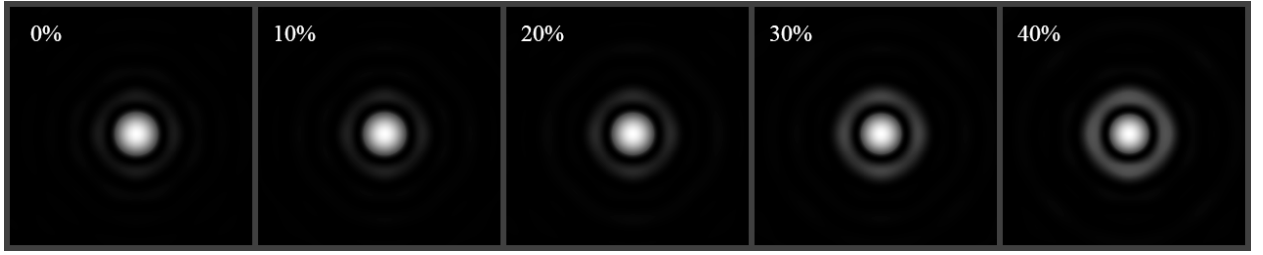


Рисунок 19 Степень выраженности первого дифракционного кольца для различных значения центрального экранирования.

В итоге для «длинных-тёмных» ньютонов имеем выигрыш в чистоте дифракционной картинке, а с другой стороны, для «быстрых-светосильных» — в разы более быстрое накопление сигнала.

А теперь сделаем оценку на то, какая часть вторичного зеркала в центре реально нерабочая из-за центрального экранирования. За счёт того, что отражённый от главного зеркала пучок сходится в точку фокуса, тень, формируемая вторичкой успевает уменьшиться пропорционально величине i/F . То есть диаметр тени равен:

$$d_{sh} = \frac{id_s}{F} \quad 51$$

Выразив размер тени через светосилу телескопа k и величину центрального экранирования R мы будем иметь:

$$d_{sh} = \frac{id_s}{F} = \frac{iDR}{F} = ikR \quad 52$$

Подставляя в формулу 52 величину излома $200 \div 250$ мм и центральное экранирование $20 \div 30\%$ получим поперечник тени на вторичке $5 \div 9$ мм для светосилы $f/8$, и $10 \div 19$ мм — для $f/4$. А если мы вспомним, что это диаметр тени, а радиус — вдвое меньше, то на матрице фотоаппарата это будет соответствовать расстояниям от центра кадра:

$$u = \frac{pF}{2(F-i)} = \frac{pF}{2F\left(1-\frac{i}{F}\right)} = \frac{p}{2(1-c_i)} \quad 53$$

Где c_i — излом, выраженный в долях от фокусного расстояния. Если излом составляет примерно $1/5$ от фокусного расстояния, то это будет соответствовать координатам на матрице $3 \div 6$ мм для светосилы $f/8$ и $6 \div 12$ мм — для $f/4$. Оценить положение этих точек, попадают ли они в невиньетированное поле, можно посмотрев на графики с рисунка 18. Из чего можно сделать вывод, что если мы хотим нанести центральную метку на вторичное зеркало — делать её нужно как можно меньше, т.к. почти все внеосевые пучки будут ею экранироваться. Особенно критично это для «тёмных» ньютонов со светосилой меньше $f/6$. И, более того, каждая площадь вторичного зеркала, что не отражает свет — равна экранированию главного зеркала в F/i раз больше! То есть если наша метка — это окружность, скажем в 5 мм, и если $c_i = 1/5$ — это будет эквивалентно затенению главного зеркала окружностью в 25 мм. Которая, при этом, не будет совпадать с уже существующей тенью от самой вторички, а будет добавляться к ней. После того, как я расписал, насколько установка метки портит нам жизнь — надо оценить количественно «а насколько?». Не стоит забывать, что это будет добавка вида $\pi d_{mark}^2/4$. Если мы выразим её в рамках нерабочей площади первичного зеркала, то это будет:

$$S_{eff} = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d_s^2}{4} - \pi \frac{d_{mark}^2}{4c_i} \quad 54$$

Удобнее, как всегда, выразить это в относительных единицах, где за основу для сравнения мы принимаем, что у нас никакой метки нет:

$$\frac{S_{mark}}{S_{eff}} = \frac{\pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d_s^2}{4} - \pi \frac{d_{mark}^2}{4c_i}}{\pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d_s^2}{4}} = 1 - \frac{d_{mark}^2}{c_i(D^2 - d_s^2)} \quad 55$$

Подставив сюда значения для своего телескопа, например $c_i = 0.23$, $D = 150$ мм, $d_s = 44$ мм и $d_{mark} = 5$ мм я получу для внеосевых пучков виньетирование на уровне полпроцента — то есть совершенно незаметную величину. Поэтому, хотя вывод о том, что чем меньше метка на вторичке — тем лучше: дополнительные 5 мм не сыграют особо большой роли. Но почему я взял такой большой размер в пять миллиметров? Дело в том, что, если мы хотим использовать для юстировки лазерный коллиматор — нам необходимо, чтобы в центре метки оставалась рабочая площадь диагонального зеркала. Иначе луч просто не будет отражаться дальше — на первичку. Поэтому нам нужен такой же «прицел», как обычно приклеивают на центр главного зеркала: окружность с дырочкой посередине. Причём, поскольку эта вторая метка уже находится гораздо ближе к точке фокуса — лучше её зачернить, чтобы не создавать дополнительную засветку, если в поле зрения телескопа будут находиться какие-либо яркие объекты. Так наша метка не будет мешать наблюдениям ночью, а днём, при свете, её легко можно будет увидеть в виде чёрного контура на зеркале.

Выжимка формул полезных для юстировки

Светосила телескопа: отношение диаметра главного зеркала к его фокусному расстоянию:

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

Минимальный размер малой оси диагонального зеркала, когда апертура главного зеркала ещё не обрезается. Соответствует нулевому невиньетированному полю $z = 0$.

$$b = \frac{4[D - k(F - i)]}{(4 - k^2)}$$

Смещение главного зеркала относительно его геометрического центра в долях от его большой оси:

$$r = \frac{\tan \varphi'}{2} = \frac{D - z}{4F}$$

Величина этого же смещения в миллиметрах:

$$d = r(A + a) = \frac{\sqrt{2}[iD + z(F - i)](D - z)}{4F^2 - (D - z)^2}$$

Размер невиньетированного поля зрения как функция поперечного размера (малой оси) вторичного зеркала b :

$$z = D - \frac{2F \left[(F - i) - \sqrt{[F - i]^2 - b(D - b)} \right]}{b}$$

Погрешность, допустимая при фокусировке:

$$\Delta(\text{мкм}) \approx \left(\frac{F}{D}\right)^2 = \left(\frac{1}{k}\right)^2$$

Общая требуемая точность юстировки фокусирующего узла и диагонального зеркала в зависимости от размера желаемого линейного поля l :

$$|\beta_{\text{град}}| \approx \frac{0.114}{l(\text{мм})} \left(\frac{1}{k}\right)^2$$

Список ссылок по теме:

<http://astro-talks.ru/forum/viewtopic.php?f=8&t=302#p1460>

<https://www.telescope-optics.net/defocus1.htm>

<http://prozarium.ru/TextDetails.aspx?TextID=2112>