

Расчет и изготовление апланатического телескопа Шмидта-Кассегрена в Иркутском астроклубе

Предварительные замечания.

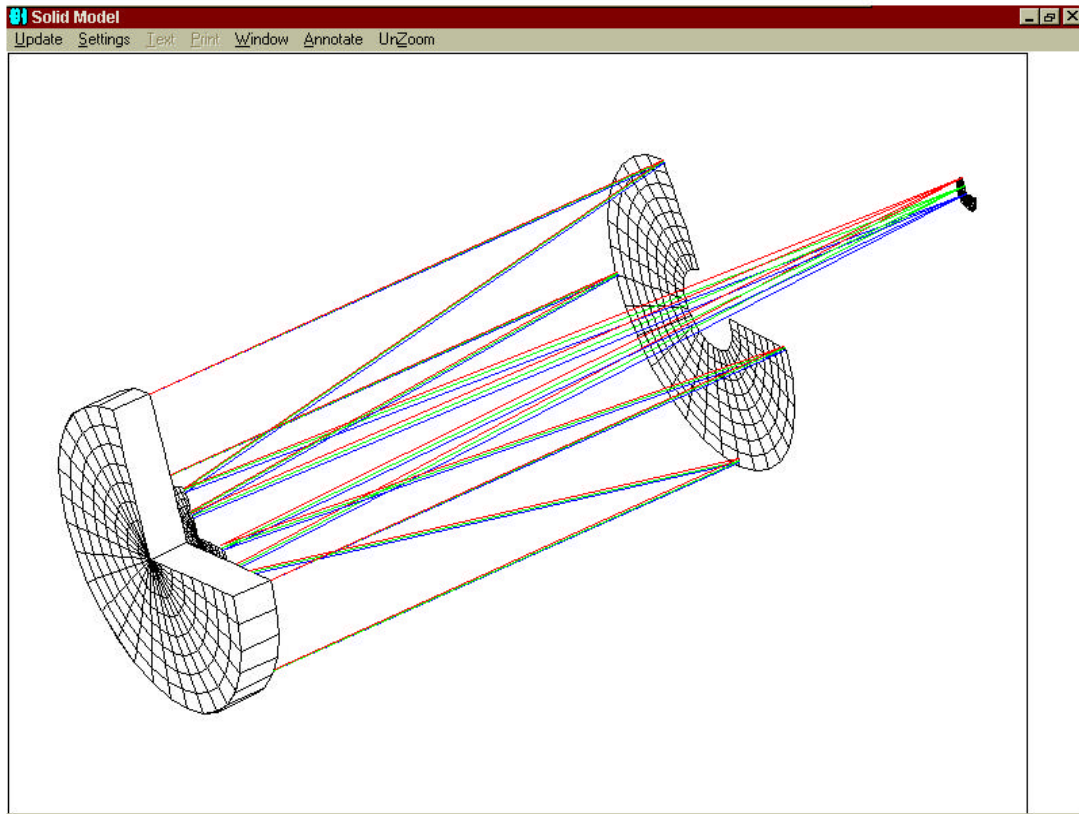
Все, что изложено в этом письме, сначала может показаться слишком сложным, особенно тем, кто впервые берется за изготовление астрономической оптики в любительских условиях. Тем более, что мы намеренно опускаем многие вопросы такие как изготовление сферической поверхности главного и вторичного зеркал, изготовление плоскопараллельной пластинки и т. п. Эта технология подробно описана в книгах, ссылки на которые приведены в конце письма. Тем же, кто имеет опыт изготовления оптики в любительских условиях мы постарались представить *только ту информацию, которой нет в существующей литературе по любительскому телескопостроению*. Кроме того, надо отметить, что описанный нами пример изготовления апланатического Шмидта-Кассегрена относится только к *частному случаю системы со сферическим вторичным зеркалом*. Опыта изготовления «классического» апланатического Шмидта-Кассегрена со сферическим главным зеркалом у нас пока нет, но мы надеемся, что многие затронутые нами вопросы смогут помочь вам если вы возьметесь за его изготовление.

Прежде, чем начать, мы хотим привести свои соображения насчет целесообразности изготовления объектива такой системы в любительских условиях.

Многочисленные замечания по поводу высокого качества изображения по полю, которым обладает Шмидт-Кассегрен конечно справедливы, но вопрос, как ни странно, в том, требуется ли такое качество. Двухзеркальная система с разумными параметрами экранирования и увеличения на вторичном зеркале имеет относительное отверстие, лежащее в пределах 8 - 15. Однако известно, что множество любителей наблюдают в ньютоновские телескопы с куда меньшими относительными отверстиями, причем поля зрения при этом таковы (особенно если речь идет о Добсоне), что должно сказываться уже влияние не комы, а астигматизма!

Также совершенно очевидно, что длиннофокусная двухзеркалка может служить астрографом только в том случае, если у вас есть возможность изготовит (или купить - кому что ближе) экваториальную монтировку хорошего качества, что весьма непросто...

Преимущества компактности в случае двухзеркальной системы достигаются за счет значительного усложнения технологии изготовления зеркал. С другой стороны, Ньютон диаметром 200 мм и фокусным расстоянием 1000 - 1200 мм, дающий превосходные по качеству изображения на поле в пятнадцать-двадцать угловых минут, обладает таким «букетом» разнообразных достоинств, от простоты юстировки до малого времени экспозиции при фотографировании, что единственный его недостаток - большая длина, на их фоне очень незначителен...



1. Расчет системы.

Расчет системы состоит из двух частей. Вначале выбираются параметры зеркальной части. Выбираются, как и при расчете обычной двухзеркальной системы, геометрические параметры q и b . q - параметр положения вторичного зеркала

$$q = \frac{s_2}{f_1} > 0$$

где s_2 - расстояние от вершины вторичного зеркала, f_1 - фокусное расстояние главного зеркала, b - «параметр увеличения» на вторичном зеркале:

$$b = \frac{s_2'}{s_2} = \frac{f_1}{f_{\text{экв}}} > 0$$

где s_2' - последний отрезок системы, равный $d+D$, где d - расстояние между зеркалами, а D - вынос фокальной плоскости за поверхность главного зеркала. Здесь надо заметить, что при вводе в двухзеркальную систему правильно изготовленного корректора, центральная часть которого работает как положительная линза, величина s , а, следовательно и эквивалентное фокусное расстояние системы $f_{\text{экв}}$ несколько уменьшатся. Величина этого смещения зависит от способа изготовления корректора, т. е. от формы его поверхности. Иными словами, сферическая aberrация системы может быть исправлена корректорами различной формы, вплоть до ретушированного

мениска. Здесь как раз и сказывается родство Шмидта-Кассегрена с другой широко известной системой с компенсатором на входном зрачке - с менисковым кассегреном Максудова. Но все это будет более подробно пояснено ниже.

Зеркальная часть Шмидта-Кассегрена с входным зрачком, расположенным на месте корректора, исправляет только кому. Сферическая же абберация исправляется корректором. Для исправления комы в двухзеркальной системе имеется два параметра - квадраты эксцентриситетов зеркал. Естественно, что один параметр является излишним. Поэтому одно из зеркал можно оставить сферическим. В зависимости от того, какое зеркало осталось сферическим, а также от геометрических параметров зеркальной части q и b величина ретуши корректора также изменится. Все необходимые параметры Шмидта-Кассегрена находятся из системы уравнений, описывающих коэффициенты сферической абберации и комы третьего порядка.

$$\sum I = -\frac{1}{4b^3} [e_1^2 - q(1-b)^3 e_2^2 + \tilde{A} - 1 + q(1-b)(1+b)^3] = 0$$

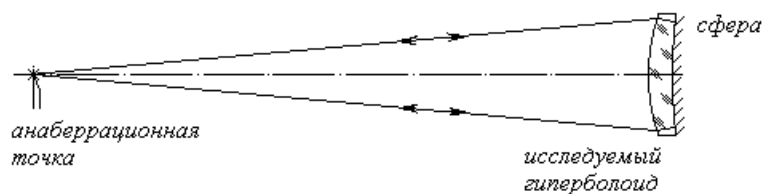
$$\sum II = -\frac{1}{4b^2} \left\{ (1-q)(1-b)^3 e_2^2 + \frac{d_2}{f_1} \tilde{A} + q(1-b)(1+b)^2 - [1+b+b^2-b^3] \right\} = 0$$

Мы намеренно приводим вам уравнения в общем виде, так как ниже получим из них способ расчета коридора допусков на точность изготовления поверхностей зеркал. Здесь d_2 - расстояние от корректора (толщиной корректора пренебрегаем) до главного зеркала. f_1 - фокусное расстояние главного зеркала, Γ - безразмерная величина, характеризующая кривизну поверхности корректора. $\Gamma = 1$ для классической камеры Шмидта, со сферическим главным зеркалом, того же диаметра и относительного отверстия, что и главное зеркало Шмидта-Кассегрена. Если мы оставляем сферическим главное зеркало, то в уравнениях полагаем $e_1^2 = 0$, если вторичное, то $e_2^2 = 0$. Кстати, если $b=1$ (т. е. вторичное зеркало плоское) и $d_2=f_1$, то апланатическая коррекция наступает когда $\Gamma=2$, $e_1^2 = -1$. Мы получаем обычную камеру Райта. Если же $d_2=2f_1$, то $\Gamma=1$, $e_1^2 = 0$ - классический Шмидт.

2. Выбор оптической схемы.

Выбор, какое зеркало оставить сферическим, зависит от того, что вы можете изготовить точнее и проще - вогнутый сфероид или выпуклую гиперболу. Выпуклый гиперболоид в Шмидте-Кассегрене, при обычных для любительской двухзеркалки параметрах q и b имеет небольшой квадрат эксцентриситета. Так, например, если бы наш Шмидт-Кассегрен имел бы главное сферическое зеркало, то квадрат эксцентриситета вторичного был бы 1.506, что меньше, чем в классическом Кассегрене и, тем более, в Ричи-Кретьене, а асферичность пластинки была бы приблизительно 6 микрон. Как видите, параметры, казалось бы, более предпочтительные, чем те, которые мы выбрали. Но как контролировать выпуклое вторичное зеркало? Вот здесь его главное достоинство - малый квадрат эксцентриситета превращается в основной недостаток. Для гиперболоида с радиусом кривизны 346.7 мм и квадратом эксцентриситета 1.506 анаберрационные точки будут расположены на расстояниях 155.67 и 1526.02 мм. Попробуйте-ка рассмотреть и проанализировать теньевую картину

на 45 мм зеркальце с расстояния в полтора метра! Конечно, при изготовлении 254 мм и 300 мм кассегренов мы делали ретушь вторичных гиперboloидов, но там речь шла о 80 и 110 мм зеркалах, да и расстояния там были поменьше, причем работало правило «сразу видим и сразу же исправляем». В случае же Шмидта-Кассегрена, мы делаем зеркальную часть как бы вслепую. Все недостатки изготовления зеркал «всплывают» на последних стадиях обработки пластинки, когда до завершения остаются три-четыре миллиметра продольной aberrации. В самом начале работы они «тонут» в очень большой продольной aberrации зеркальной части. Приходится, уже и так основательно вымотавшись от нанесения основного рельефа, снова «колдовать» над ним - накладывать всевозможные звезды на и без того капризный в работе полировальник. А для исправления одной и той же ошибки с преломляющей поверхности придется снять стекла примерно в два раза больше чем с отражающей. Но мы отвлеклись от темы. Существует, правда, еще один метод контроля выпуклого гиперboloида, который не требует таких больших последних отрезков даже для поверхностей, слабо отличающихся от параболы. Этот метод состоит в нанесении на тыльную поверхность гиперболического зеркала слабой сферической вогнутости, контролировать которую можно по отражению из ее центра кривизны. Общий вид схемы испытания показан на рисунке.



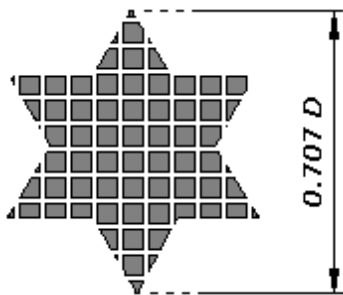
Ретушь выпуклой сферической поверхности до гиперboloида исправляет продольную aberrацию системы. Если радиус на тыльную поверхность нанесен точно, то прибор сам находит автоколлимационную точку, в которой при заданном квадрате эксцентриситета выпуклой поверхности будет «плоская» теневая картина. Но у такой схемы также есть свои недостатки. Во-первых, существенный хроматизм, который при освещении схемы обычной лампочкой накаливания (т. е. для видимого глазом диапазона) и применении для зеркала стекла К8, составит несколько десятых процента от величины расстояния между вершиной гиперboloида и прибором! Эта величина одного порядка с продольной aberrацией схемы, которую необходимо будет исправить! Во-вторых, эта схема контроля исключает наклеивание вторичного зеркала на поверхность корректора. Если у вас есть достаточно мощный источник монохроматического света и вы не собираетесь наклеивать вторичное зеркало на пластинку, то такой метод контроля вам может подойти.

3. Изготовление зеркальной части.

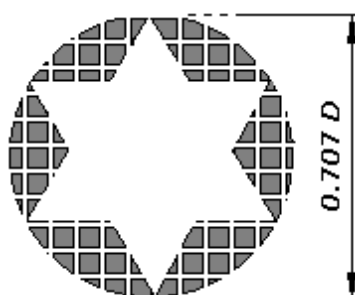
Об изготовлении выпуклого гиперboloида написано много, а в случае Шмидта-Кассегрена, как мы уже отметили, величина ретуши незначительна. Так что мы не будем здесь останавливаться на технологии «гиперboloизации» выпуклого зеркала.

Изготовление главного зеркала в форме сфероида может быть произведено методом, сходным с изготовлением светосильного параболоида. Этот метод хорошо описан у Д.А. Наумова в книге «Изготовление оптики для любительских телескопов».

рефлекторов и ее контроль» в главе 4, в параграфе 3 «Получение и контроль вогнутой параболической поверхности» на стр.133. Только если там для получения параболоида применяется полировальник такой формы



то для получения сплюснутого сфероида применяется полировальник как бы «обратный», т. е. Такой



Там, где у полировальника для параболоида смола, у полировальника для сфероида смолы нет и наоборот. Величина штриха, центральный это штрих или штрих по хорде, выбирается в зависимости от того, какова разница в продольных абберациях между зонами. Если разность недостаточна, то штрих удлиняется, если разность избыточна, то переходим на штрихи по хорде. Всю асферизацию, кроме ее завершающей части, мы делали на машине. Сразу отметим, что мы впервые взялись за сплюснутый сфероид, так как раньше не делали камер Райта (хотя надо было бы сперва попробовать). Поэтому, если у вас есть контакты с людьми изготовившими светосильную камеру Райта, то вполне вероятно, они знают более надежный и простой способ ретуши сферы под сплюснутый сфероид.

4. Допуски на изготовление поверхностей зеркал.

Переходим к наиболее важному на этом этапе вопросу - к допускам. При расчете допусков на форму поверхности асферического зеркала предполагается (обратите внимание!), что во-первых, сферическая поверхность изготовлена идеально, а во-вторых, что корректором полностью скомпенсированы все ошибки формы изготавливаемой вами асферики. Ошибка при изготовлении зеркала скажется теперь только на качестве изображения по полю зрения вашего Шмидта-Кассегрена и, прежде всего, приведет к появлению комы. Астигматизм мы в расчете не учитываем. Примем теперь, что на некоем предельном угле поля зрения w , допустимая длина пятна комы равна $r_{дон}$. Это наложит ограничения на разности продольных аббераций между зонами. При оценке качества поверхности параболического зеркала, таким ограничивающим

фактором был радиус кружка остаточной сферической аберрации. При оценке качества поверхности параболического зеркала, рассчитывался «коридор ошибок» в котором должны лежать значения продольной аберрации зон зеркала. Чем менее жесткие требования к точности поверхности, тем более широкий коридор. Для малосветосильных зеркал коридор ошибок настолько расширяется, что не требуется даже параболизация и зеркало можно оставить сферическим. Если нанести коридор ошибок на график, то получится так называемый график «Милье-Лакруа», подробно описанный во втором издании книги Л.Л.Сикорука «Телескопы для любителей астрономии» на странице 133 в главе «Главное зеркало телескопа-рефлектора» в параграфе 30 «Графическая интерпретация метода Фуко». В нашем случае, мы также рассчитываем «коридор ошибок», причем делаем это почти по тому же принципу, но выводим формулу из выражения для комы двухзеркальной системы с корректором, приведенного нами в самом начале письма. Мы просто дифференцируем выражение для коэффициента комы по квадрату эксцентриситета зеркала и полученные значения подставляем в выражение для длины пятна комы, каждый раз, пересчитывая светосилу из радиуса зоны. Если вы в чем-нибудь засомневаетесь - пишите, мы поясним. Конечные результаты таковы. Для Шмидта-Кассегрена со сферическим вторичным зеркалом, продольная аберрация зоны радиусом h , может лежать в пределах

$$\Delta s'_h = \Delta s_h \left[1 \pm \frac{r_{\text{доп}} f_{\text{экв}} 8b^2}{3hwd} \right]$$

где $f_{\text{экв}}$ - эквивалентное фокусное расстояние Шмидта-Кассегрена, d - расстояние от пластинки до главного зеркала в долях фокусного расстояния главного зеркала (та же величина, что и в уравнениях), w - угол в радианах от центра поля зрения, на котором длина пятна комы не должна превышать $r_{\text{доп}}$, Δs_h - аберрация зоны h , вычисляемая по формуле

$$\Delta s_h = \frac{h^2}{2R} e^2$$

где R - радиус кривизны зеркала при вершине. В случае, если знак «-» для какой-либо зоны приводит к $\Delta s'_h < 0$, то это значит, что *внутренняя* за ней зона может быть сферической.

Для Шмидта-Кассегрена с главным сферическим зеркалом это выражение чуть сложнее:

$$\Delta s'_h = \Delta s_h \left[1 \pm \frac{r_{\text{доп}} f_{\text{экв}} 8b^2}{3h^2 w (1-b)^3 (1-q+dq)} \right]$$

Обозначения в этом случае те же. Последняя формула приведена для того, чтобы исследовать выпуклое зеркало по вогнутому гиперболическому эталону, что, как нам кажется, является более предпочтительным способом контроля выпуклого гиперболоида. Именно таким способом мы собираемся изготавливать выпуклый гиперболоид к нашему следующему Шмидту-Кассегрену с главным сферическим зеркалом.

5. Изготовление пластинки.

Перед началом ретуши, заготовку из которой будет изготовлен корректор, следует отполировать под плоскопараллельную пластинку. Тут мы должны признаться, что у нас уже была готовая плоскопараллельная пластинка, хотя в ходе изготовления корректора мы перешлифовывали и переполировывали под плоскость обе ее стороны. Что касается качества поверхностей, то точность в четверть полосы, или около того, для обеих поверхностей можно считать вполне достаточной - возможные ошибки волнового фронта от недостаточно аккуратно изготовленной зеркальной части будут примерно той же величины. Более того, учитывая, что на пластинку будет наноситься рельеф в десятки колец, можно считать достаточным качество в половину полосы и даже меньше, если речь идет о плавной кривизне всей поверхности в сторону выпуклости или в вогнутости. Для контроля вполне достаточно плоского эталона половинного диаметра. С косиной дело обстоит сложнее. Мы думаем, что вполне достаточно будет контролировать толщину по заготовки по краю микрометром. Для заготовки диаметром от 150 мм вполне достаточно точности в 0.01 мм.

Что касается стекла корректора, то перед началом работы его следует исследовать на свили и внутренние неоднородности, поскольку это все-таки линза, а не зеркало! Для исследования достаточно собрать автоколлиматор с плоским зеркалом и хорошим параболомидом, двухзеркалкой, или качественным линзовым объективом. Поместив плоскопараллельную заготовку между плоскостью и объективом, можно наблюдать внутренние неоднородности стекла на теневой картине.

После того, как зеркальная часть будет полностью изготовлена, собрана, а корректор будет представлять собой плоскопараллельную пластинку, необходимо собрать контрольную схему. Если у вас есть эталонное плоское зеркало, то лучше всего собрать автоколлимационную схему, как показано на фотографии 1. Однако вполне подойдет и коллиматор из хорошего параболоида.. Следует также алюминировать зеркала перед сборкой схемы - в противном случае вы не увидите теневой картины, т. к. в схеме происходят четыре отражения от поверхностей зеркал.

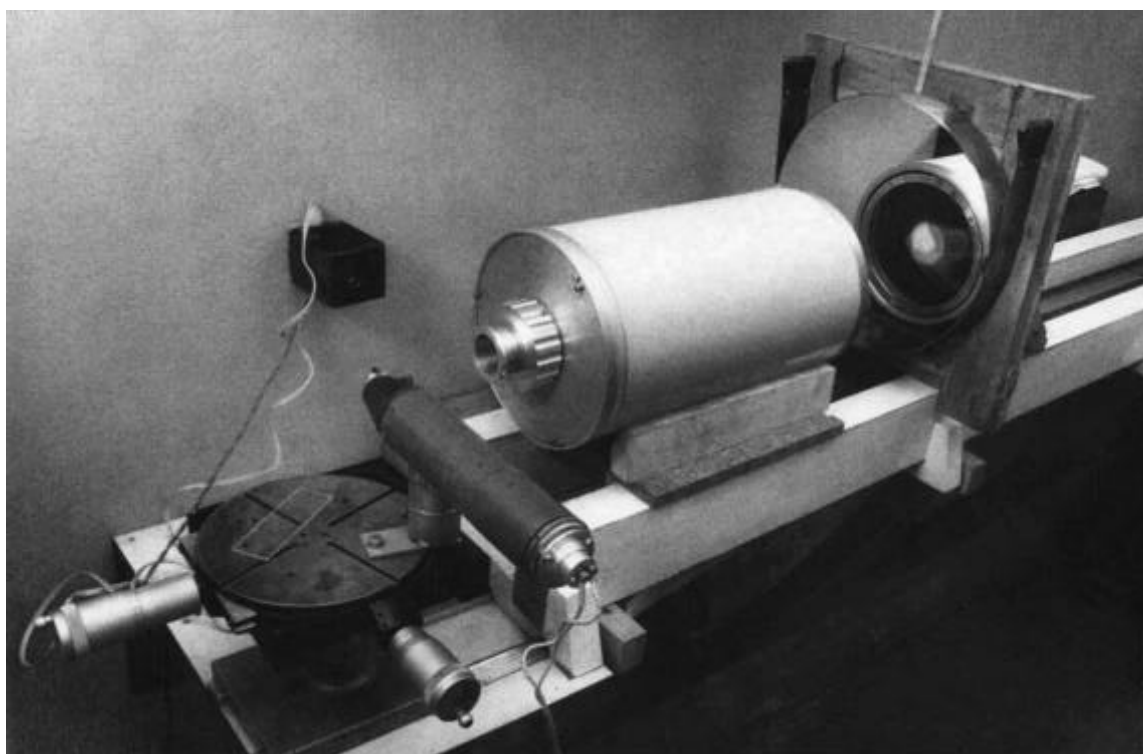


Фото 1

После сборки схемы, если все поверхности изготовлены правильно, то в теневой прибор *вы должны увидеть «подвернутый край и бугор в центре»* - так всегда выглядит, как говорят оптики, «недоисправленная» или положительная сферическая aberrация. Продольная aberrация будет равна

$$\Delta s_{\text{общ}} = \frac{f_{\text{общ}} A_{\text{экв}}^2}{32b^3} \left\{ e_1^2 + q(1-b)(1+b)^2 - 1 \right\}$$

в случае сферического вторичного зеркала и

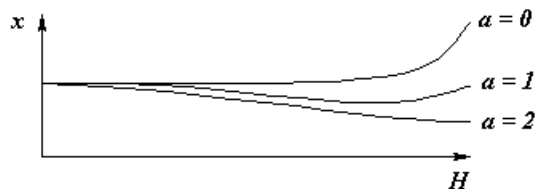
$$\Delta s_{\text{общ}} = \frac{f_{\text{общ}} A_{\text{общ}}^2}{32b^3} \left\{ q(1-b)(1+b)^2 - 1 - q(1-b)^3 e_2^2 \right\}$$

в случае главного сферического зеркала. Здесь $f_{\text{экв}}$ и $A_{\text{экв}}$ соответственно фокусное расстояние и относительное отверстие системы. Величина $Ds_{\text{общ}}$ довольно велика, поэтому сразу убедитесь, что она укладывается в диапазон продольных перемещений вашего прибора. Если щель и нож в вашем приборе связаны, то продольная aberrация будет вдвое меньше, но если вы применяете автоколлимационную схему контроля, то величина продольной aberrации снова удваивается и становится равной $Ds_{\text{общ}}$. Вследствие очень большого значения $Ds_{\text{общ}}$, теневая картина будет очень резкой и отчетливой.

Здесь начинается самое интересное. Как мы уже говорили, сферическую aberrацию зеркальной части можно исправить пластинками различной формы. В общем случае, форма корректора описывается формулой:

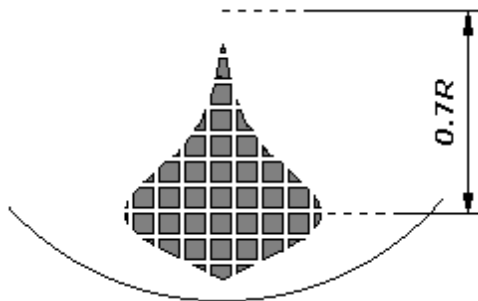
$$x = -\frac{a\bar{h}^2 - \bar{h}^4}{512(1-n)} \tilde{A}A^3 D$$

где \bar{h} - радиус зоны на пластинке, выраженный в единицах полудиаметра пластинки. На краю $\bar{h}=1$. D - диаметр входного зрачка системы. A - относительное отверстие главного зеркала вашего Шмидта-Кассегрена, n - показатель преломления стекла, \tilde{A} - тот самый коэффициент, о котором мы говорили, а вот a - коэффициент, от которого зависит форма пластинки. Вот как выглядит форма поверхности в зависимости от разных a :



Как видите, в зависимости от a , изменяется радиус зоны на корректоре, на которой, образно говоря, рассеивающая часть корректора становится собирающей или та зона, сквозь которую луч будет проходить, не отклоняясь от своего первоначального направления. Если $a=0$ это центр корректора, если $a=2$ это край корректора, а если $a=1$ то это зона 0.707 . То место, где этот луч пересечет оптическую ось и будет являться окончательным фокусом Шмидта-Кассегрена. Лучи, которые идут выше и ниже этого «нулевого» луча, будут приведены пластинкой в фокус системы, то есть в фокус этой «нулевой» зоны. Если вы не хотите, чтобы фокус системы смещался с фокуса для зеркальной части, тогда вам придется изготавливать пластинку с $a=0$, т. е. с плоским центром. Однако изготовление такой пластинки потребует не только большого мастерства, так как в этом случае придется как бы плавно «подвернуть» края, что совсем не одно и то же, что простая вогнутость, но и просто снять очень много стекла. Оптимальным, в смысле изготовления, является профиль, у которого точка перегиба находится на зоне, радиус которой составляет $0.707H$, где H - полудиаметр входного зрачка. Для изготовления такого профиля нужно снять меньше всего стекла, однако в процессе нанесения рельефа необходимо контролировать его соответствие этому профилю, так как в силу множества факторов, нейтральная зона всегда норовит «съехать» к центру пластинки. Абсолютную величину требуемой ретуши можно найти, подставив в выражение, описывающее профиль корректора с учетом \tilde{A} , величину $\bar{h} = 0.707$.

Способ нанесения рельефа может быть как шлифовывание, так и полировка. Мы не пробовали шлифовывать, но этот процесс описан у Л.Л. Сикорука в книге «Телескопы для любителей астрономии» в главе четвертой «Сложные телескопы» в параграфе 6 «Камера Шмидта» на странице 198. В нашем случае, мы пользовались полировальником, состоящим из четырех лепестков, контур которых представляет собой ни что иное, как профиль поверхности корректора с точкой перегиба, расположенной на зоне 0.707 . Лепесток показан на рисунке.



Для контроля за ходом нанесения ретуши, при испытании, мы наклеивали на внешнюю сторону корректора узкие бумажные полоски, отмечающие точку перегиба, зону 0.707 . Если корректор изготавливается правильно и зона перегиба никуда не «съезжает» то продольные aberrации, отсчитанные от края до этой зоны и от центра до этой зоны, должны быть приблизительно равны. То место на пластинке, где aberrация равна половине от $Ds_{\text{общ}}$, покажет, где лежит сейчас нейтральная зона. Для того чтобы объем снимаемого при ретуши корректора стекла был минимальным, нейтральная зона должна находиться на зоне 0.707 . У нашего 150 мм Шмидта-Кассегрена, вторичное зеркало наклеено на поверхность корректора - это решение хорошо для небольшого диаметра. Изготавливается вторичное зеркало, желательно без косины, вытачивается специальный шаблон, в котором за одну посадку делаются два радиуса - один под внешний диаметр пластинки, другой - под внешний диаметр вторичного зеркала и с помощью него мы наклеиваем уже алюминированное зеркало на пластинку. Шаблон очень помогает, так как потом почти не требуется юстировки - вставил все детали в трубу, включил прибор - и вот она - теневая картина. Небольшая юстировка, которая может потребоваться связана с тем, что вторичное зеркало обязательно будет иметь небольшую косину, что равносильно разъюстировке. Но мы поговорим об этом более подробно ниже. Если же крепить зеркало в оправе, то саму оправу придется крепить через отверстие в пластинке, что создаст сложности при ретуши. Мы поступали просто - надевали на готовое вторичное зеркало эбонитовую крышку и обрабатывали внешнюю сторону пластинки.

Стоит упомянуть и о том, что проще - разносить рельеф на обе стороны корректора или оставлять его на одной стороне. Попытки асферизовать обе стороны корректора нам не удалось, так как без вторичного зеркала, внутренняя сторона пластинки контролировалась только пробным стеклом, по которому можно судить о форме поверхности лишь весьма приближенно. Если рельеф имеет уже значительную глубину, но все еще далек от требуемого (как это имеет место при разделении величины рельефа поровну между сторонами корректора), то с одной стороны, в большом количестве интерференционных колец «тонут» неравномерности формы рельефа, с другой - эти неравномерности еще нельзя заметить на теневой картине, так как aberrация всего лишь вдвое меньше, чем была первоначально, т. е. в ней тоже все пока что «тонет». Когда же подходит к концу обработка второй стороны, то все это неравномерности «всплывают» в виде зональных ошибок, удалить которые оказалось чрезвычайно трудно. Поэтому рекомендуем вам обрабатывать одну сторону корректора - так удобнее наблюдать за ходом ретуши и вносить коррективы. И еще одно необходимое замечание. Теневую картину нужно понимать «с точностью до наоборот». Если на картине край «завален», значит на самом деле он на корректоре

«переподвернут» - необходимо снять стекло на краю, Если край «переподвернут», что более вероятно, значит, на корректоре он подвернут недостаточно - необходимо его сильнее «подворачивать». «Яма» сигнализирует о том, что надо понижать центр, а «бугор» - о том, что надо ослабить обработку центральной части (кстати у нас все время лез «бугор»). Если зональная ошибка является собой кольцевую канавку, то необходимо полировальник формировать на понижение этой, на самом деле выпуклой на корректоре, зоны.

При относительно небольшой величине ретуши, мы настоятельно рекомендуем вам *ручную* обработку. На машине, даже отлично изготовленный полировальник «пишет» бесчисленное количество узких и резких зональных ошибок, которые можно убрать только вручную. При машинной и ручной обработке штрих - 5-15 мм не *поворачивая полировальника*. При обработке на машине надо *закрепить полировальник на поводке*, предотвратив проворачивание. Начальный контроль можно вести плоским пробным стеклом, накладывая его на ретушируемую поверхность - картина в этом случае напоминает «граммофонную пластинку» с полосами, «разрезанными» у зоны 0.707. При большой величине рельефа и твердой смоле, может сказаться эффект, при котором полировальник начинает как бы сам *разрушать* наполированный им рельеф. Бороться с этим явлением можно просто - *пропорционально уменьшить размеры лепестков*, т. е. оставив их на своих местах, аккуратно удалить с их краев смолу, не нарушая их формы и плавности контуров. Также можно попытаться применить *более мягкую смолу*.

И в заключении о том, когда же останавливать ретушь. Этот вопрос, на самом деле не так прост, как кажется. Мы просчитывали для этого реальный ход лучей в системе на компьютере и моделировали дифракционное изображение точки на разных стадиях обработки корректора. Первоначальная aberrация у нас была около 26 мм. Когда она стала около 0.4 мм, причем за счет небольшого бугра вокруг вторичного зеркала, мы приблизительно смоделировали такую ситуацию на машине и пришли к выводу что можно заканчивать - изображение, особенно с учетом хроматизма в видимой области, а инструмент у нас, в первую очередь визуальный - практически не отличалось от идеального, т. е. такого, которое было бы, если бы aberrация была бы равна 0. Но надо отметить, что если бы эти 0.4 мм приходились на переподвернутый или заваленный край, то ретушь пришлось бы продолжить, так как плохой край - не то же самое, что плохой центр. Если вы собираетесь делать фотографический инструмент, то здесь ограничивающим фактором будет размер зерна фотоэмульсии - 0.02 мм. Т. е. кружок рассеяния, образующийся в результате недоустранимых зональных ошибок не должен превышать этой величины.

6. Юстировка.

Основная причина, по которой любителю стоит брать за Шмидт-Кассегрен, кроме хорошего качества изображения по полю, состоит в простоте юстировки даже очень светосильного (для двухзеркалки) инструмента. Если в классическом Кассегрене и Ричи-Кретьене, съюстировать инструмент означает не только совместить вершину одного из зеркал с оптической осью другого, но и соблюсти параллельность осей обоих зеркал, то в Шмидте-Кассегрене, так как одно из зеркал сферическое, и не имеет оптической оси, юстировочная задача значительно упрощается. Для того чтобы съюстировать Шмидт-Кассегрен достаточно лишь «посадить» на оптическую ось

сфероида центр кривизны выпуклого вторичного зеркала, в случае, со сферическим вторичным зеркалом, или центр кривизны главного зеркала «посадить» на оптическую ось гиперболоида вторичного зеркала, в случае главного сферического зеркала. Но надо заметить, что после юстировки, центр поля зрения, или, условно говоря, то место, где будет наилучшее, свободное от аберраций изображение, сместится с оси, проходящей через центр входного зрачка и центр кривизны сферического зеркала. Однако при небольших наклонах это смещение будет незначительно. Кроме того, как показывает трассировка лучей на компьютере, изображение осевой точки будет слегка искажено аберрацией, напоминающей астигматизм, но на качестве изображения это не скажется. В конце концов, все вышесказанное относится и к обычным двухзеркальным системам, с той лишь разницей, что требования к юстировке в них более чем на порядок жестче, чем в Шмидт-Кассегрене. Что же касается самого корректора то поскольку он почти плоскопараллельная пластика, то системе не страшны огромные, по сравнению с максимально возможными для зеркал, его смещения и наклоны. *Например, если ваше вторичное зеркало не закреплено на пластинке, то ее можно смещать с оси телескопа на единицы миллиметров и наклонять на единицы градусов, нисколько не опасаясь за качество изображения!*

Способ юстировки Шмидта-Кассегрена - визуальный, по звезде или в автоколлимации с точечным источником. При применении сильного окуляра или окулярного микроскопа видно, как при вращении юстировочных винтов «галочка» комы превращается в точку. И вообще, лучше всего один раз съюстировать инструмент и надолго закрыть юстировочные винты. Тем более что Шмидт-Кассегрен это позволяет!

7. В заключение

Если при чтении этого письма у вас возникнут вопросы, то мы отсылаем к литературе по оптике астрономических телескопов и любительскому телескопостроению. Что касается первого, то наиболее полную информацию вы можете получить из книги *Н.Н.Михельсона «Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета», Москва, издательская фирма «Физико-математическая литература», 1995.* До сих пор не устарела классическая книга *Д.Д.Максутова «Изготовление и исследование астрономической оптики», Москва, «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1984.* Что касается практических советов, очень помогла книга *Л.Л.Сикорука «Телескопы для любителей астрономии», Москва, «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1990.* А также книга *Д.А.Наумова «Изготовление оптики для любительских телескопов-рефлекторов и ее контроль», Москва, «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1988.* Но никакие книги не заменят практического опыта. К началу работы в Иркутском Астроклубе были изготовлены несколько телескопов Ньютона с параболическими зеркалами до 210 мм и 254 мм рефлектор Ньютона-Кассегрена-Несмита, не считая всевозможных «побочных» зеркал и кассегреновских комплектов от 184 до 300 мм в диаметре.

Изготовление Шмидта-Кассегрена дело непростое, но все-таки, при правильном выборе геометрических параметров, светосилы, с учетом опыта и возможностей контроля - вполне возможное. Так что желаем удачи!

С уважением,

*С. Чупраков, Э. Зуев,
Иркутский Астроклуб.*