

Широкоугольные оптические телескопы

В.Ю. Теребиж¹

*Гос. астрономический институт им. П.К. Штернберга,
Московский гос. университет, 119992 Москва,
Университетский просп. 13, Российская Федерация*

Телескопы с большим полем зрения нужны для изучения космологической эволюции активных галактик, построения шкалы межгалактических расстояний с помощью переменных и сверхновых звезд, поисков гравитационных линз и черных дыр, исследования преходящих событий в галактиках, в частности, γ -всплесков, обнаружения астероидов, а также многих других астрономических задач. В последние годы к ним добавился ряд проблем, возникших в ходе околоземной деятельности человечества. Для решения этих задач планируется обновление информации о *всех небесных объектах ярче $\sim 24^m$ за время порядка одной недели*. Реализация программы предусматривает создание сети телескопов с полем зрения $2^\circ - 3^\circ$ и эффективным диаметром вплоть до 6.5 м. Цель настоящего обзора – пояснить общие принципы разработки широкоугольных телескопов и дать представление о существующих и планируемых таких системах. Обсуждение теоретических положений иллюстрируется примерами реальных телескопов и разрабатываемых сейчас проектов, в частности, SNAP, SDSS, Pan-STARRS, LAMOST и LSST.

1. Введение

Предложение рассказать о широкоугольных оптических телескопах я принял не без сомнений. Дело в том, что около года тому назад был опубликован очерк (Теребиж 2005а), часть которого по-

¹vterebizh@yandex.ru

священа обзорным телескопам¹. Разработка широкоугольных оптических систем признана сейчас приоритетным направлением в экспериментальной астрономии, эта область исследований интенсивно развивается, однако не настолько быстро, чтобы радикально обновиться за год. Тем не менее прогресс в реализации проектов обзорных телескопов вполне ощутим, появились идеи новых таких систем. Все это побуждает вернуться к теме и обсудить ее более подробно с тем, чтобы стали яснее основы прогресса астрономии в ближайшее десятилетие.

1.1. Принятая терминология

Подобно многим другим понятиям, термин *широкоугольный телескоп* претендует скорее на удобство, чем на точность. В СОТ (стр. 12) таковыми считаются телескопы, обеспечивающие качество изображений не хуже одной угловой секунды ($1''$) в пределах поля зрения не менее одного углового градуса: $2w \geq 1^\circ$. Это определение, в свою очередь, нуждается в пояснениях, касающихся понятия *качество изображений* и выбранного граничного значения – $1''$.

В рамках геометрической оптики идеально изготовленный телескоп должен давать точечное изображение звезды, удаленной на бесконечно большое расстояние. Однако геометрическая оптика – лишь приближение к физической модели световых явлений, годящееся в случае пренебрежимо малой длины волны (см., например, Ландсберг 1976, Максудов 1946). При наблюдениях в узкой полосе длин волн вблизи λ идеальный телескоп с полностью открытой круговой апертурой диаметром D строит изображение звезды в виде *картины Эри* (*G.B. Airy*), пример которой показан на рис. 1. Картина обусловлена дифракцией света на апертуре, а потому изображение, даваемое совершенной оптикой, называют *дифракционно-ограниченным* (*diffraction-limited*). В пределах яркого центрального пятна – *диска Эри* – содержится около 84% полного светового потока от звезды. Линейный диаметр диска Эри равен

$$\Delta_A \simeq 2.44\lambda\phi, \quad (1)$$

где $\phi \equiv F/D$ – отношение эквивалентного фокусного расстояния телескопа к диаметру апертуры². Очевидно, размерность Δ_A в (1)

¹Ввиду частого упоминания этой книжки удобно ввести сокращенную ссылку на нее в виде «СОТ» с добавлением, при необходимости, номера страницы или рисунка.

²В технической литературе фокальное отношение называют *f/number* или *f/#*. Использовать такие обозначения в формулах крайне неудобно. Символ \forall , при-

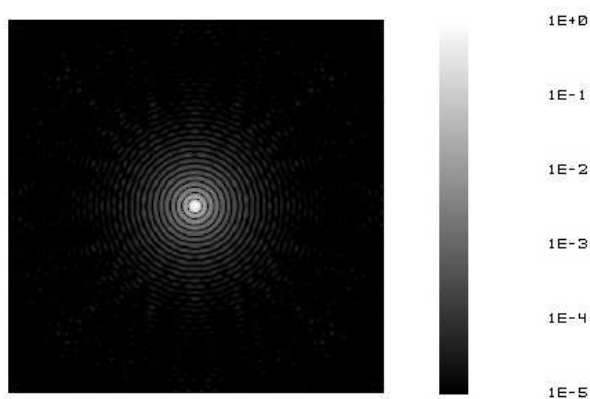


Рис. 1. Изображение точечного источника света, расположенного на оси идеального парабооида. Диаметр апертуры – 4 м, фокусное расстояние – 12 м ($\phi = 3.0$), длина волны – 0.5 мкм. Изображение показано в логарифмической шкале яркостей (градация справа). Сторона квадрата, охватывающего изображение, равна 96 мкм ($1''.7$), диаметр диска Эри составляет 3.7 мкм $\simeq 0''.06$.

совпадает с размерностью длины волны; мы будем измерять λ в микронах. Из (1) нетрудно получить и значение Δ_A , выраженное в угловых секундах:

$$\Delta_A'' \simeq \frac{\lambda_{\mu m}}{2D_m}, \quad (2)$$

где диаметр апертуры измеряется в метрах.

До сих пор мы полагали телескоп и условия наблюдения идеальными, тогда как при наземных наблюдениях атмосфера случайным образом искажает приходящие от объектов световые волны, а оптика телескопа зачастую несовершенна – обладает *абберациями*. Ухудшаются изображения и при центральном экранировании света, характерном для рефлекторов. При описании качества изображений в реальных условиях удобно использовать Δ_{80} – диаметр круга, в пределах которого содержится 80% светового потока от звезды. Для дифракционно-ограниченного изображения $\Delta_{80} \simeq \Delta_A$,

меняемый в отечественных работах, имеет устоявшийся в математике смысл. Возможно, обозначение ϕ окажется более удачным.

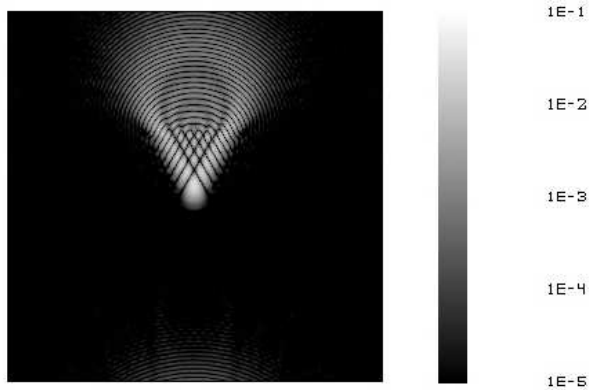


Рис. 2. Изображение точечного источника света, расположенного на угловом расстоянии $1'$ от оси идеального параболоида. Характеристики зеркала указаны в подписи к рис. 1. Сторона квадрата, охватывающего изображение, равна 136 микрон ($2''.3$).

но на практике Δ_{80} зачастую превосходит Δ_A , причем неравенство усиливается по мере возрастания роли негативных факторов.

Параметр Δ_{80} можно применять и как одну из характеристик качества атмосферных изображений, типичных для данного пункта земной поверхности. Наилучшие из исследованных в смысле *астроклимата* места на Земле – Чилийские Анды, Гавайские и Канарские острова, где Δ_{80} колеблется вблизи $0''.6$. Астроклимат считается приемлемым, если Δ_{80} большую часть времени не превосходит $1''$. Обычно при широкоугольных наблюдениях с полем зрения диаметром в несколько градусов телескоп должен лишь не ухудшить изображений, обусловленных земной атмосферой, так что принятое здесь задание границы поля зрения значением $\Delta_{80} = 1''$ представляется оправданным. Заметим, что это условие исключает даже совершенные инструменты диаметром менее ~ 250 мм: согласно (2), для них поперечник круга Эри в оптическом диапазоне спектра превосходит $1''$.

1.2. Аберрации телескопов

Создание всякой оптической системы, а тем более – широкоугольной, во многом сводится к устранению ее аберраций, поэтому мы должны хотя бы вскользь описать основные из них.

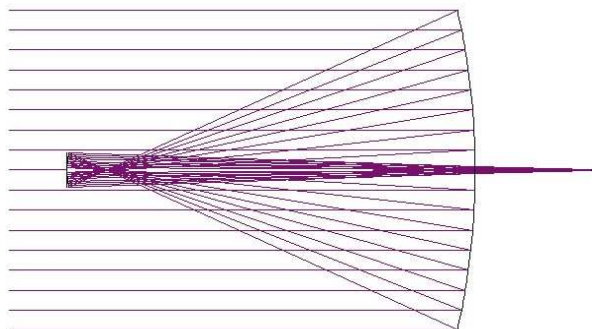


Рис. 3. Классическая система Грегори, принятая для каждого из пары телескопов диаметром 8.4 м ($\phi \simeq 15.0$), составляющих Большой бинокулярный телескоп (ЛБТ). Светосила главного зеркала очень высока: $\phi_1 \simeq 1.1$, поэтому зеркала отстоят друг от друга лишь 10.64 м.

Прежде всего следует добиться того, чтобы *осевые* световые пучки разного диаметра сходились к общему фокусу. Этого легко достичь для пучков, идущих вблизи оптической оси, но в астрономической оптике, стремящейся обеспечить по возможности большую апертуру, положение фокальной точки для узкого кольцевого пучка света может существенно зависеть от радиуса пучка. Этот недостаток изображений называется *сферической aberrацией*.

Еще в XIII веке было доказано, что параболическое зеркало свободно от сферической aberrации; только дифракция света на апертуре не позволяет получить точечного изображения звезды, расположенной на оси парабоида. Реальное изображение представляет собой картину Эри типа той, что показана на рис. 1. Заметим, что длина телескопа, которому отвечает рис. 1, нежелательно велика – 12 м, хотя зеркало достаточно светосильно. Кроме того, как показывает рис. 2, уже на расстоянии одной угловой минуты от оси размер изображения в этом телескопе достигает $1''$. Ухудшение внеосевых изображений обусловлено, в основном, *комой* – доминирующей aberrацией, препятствующей разработке широкоугольных систем. Влияние комы для парабоида пропорционально ϕ^{-2} , так что мы могли бы получить поле диаметром $20'$ при $\phi \simeq 9$, но длина такого телескопа достигла бы 36 метров!

Уменьшение габаритов телескопа при сохранении большого эффективного фокусного расстояния, препятствующего росту комы, достигается в *классических* телескопах Грегори (J. Gregory) и Кассегрена (N. Cassegrain), предложенных в XVII веке. Главное зеркало классических систем остается достаточно светосильным параболоидом, а нужное значение ϕ обеспечивается вторичным зеркалом. В системе Грегори (рис. 3) оно представляет собой вогнутый эллипсоид, в системе Кассегрена – выпуклый гиперboloид. Все же поле зрения классических систем невелико, обычно оно не превосходит $10'$.

Дальнейшего уменьшения комы удалось добиться в *апланатических* версиях систем Кассегрена и Грегори. Первая из них получила название *системы Ричи–Кретьена* (G.W. Ritchey, H. Chrétien), вторая – *апланата Грегори*³. В системе Ричи–Кретьена (RC) кома уменьшается путем замены параболоидального главного зеркала гиперboloидом, так что оба зеркала становятся однотипными коническими сечениями (рис. 4). Апланат Грегори достигает той же цели путем замены главного зеркала эллипсоидом, здесь оба зеркала – тоже конические сечения одного типа. Вследствие сферической аберрации главные зеркала апланатов не дают хороших изображений даже на оси; нужное качество изображений достигается *компенсацией* аберраций главного и вторичного зеркал. Поле зрения наземных апланатов, определяемое условием $\Delta_{80} \leq 1''$, обычно составляет около $20'$ (см. СОТ, рис. 7), что примерно вдвое больше размеров поля классических телескопов, однако еще недостаточно велико, чтобы телескоп можно было отнести к широкоугольным системам в принятом нами смысле.

Помимо сферической аберрации и комы имеются другие монохроматические аберрации: *астигматизм*, *кривизна поля*, *дисторсия*, а также более сложные аберрации высших порядков. Так, вследствие совместного действия кривизны поля и астигматизма RC-система обладает двумя фокальными поверхностями – *тангенциальной* (ее называют также *меридиональной*) и *сагиттальной*. На этих поверхностях, вогнутых в ту же сторону, что и поверхность главного зеркала, внеосевые изображения звезд вытянуты во взаимно перпендикулярных направлениях. Между тангенциальной и сагиттальной поверхностями расположена *медиа́льная* поверхность, на которой изображения имеют круговую форму (кривизну медиа́льной поверхности нетрудно заметить на рис. 4). В систе-

³Впервые апланатическое обобщение системы Грегори предложил Д.Д. Максудов в 1932 г.

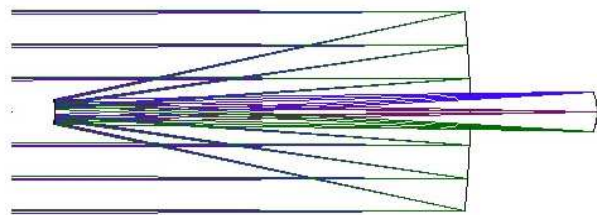


Рис. 4. Космический телескоп имени Хаббла системы Ричи-Кретьена. Диаметр апертуры 2.4 м; поле зрения $2w \simeq 30'$ обеспечивается большим значением фокального отношения телескопа: $\phi = 24.0$.

мах с линзовой оптикой важна еще и *хроматическая абберация*. Приведенных выше пояснений достаточно, чтобы уловить суть последующего изложения; подробное обсуждение теории аббераций можно найти в книгах Максудова (1946), Ландсберга (1976), Шредера (2000), Рэттена и ван Венруйжа (1999).

1.3. Эффективность обзора

Мы конкретизировали понятия, используемые в рассматриваемой области, но нужно еще указать характеристики телескопа, предпочтительные с точки зрения обзорных наблюдений. Скажем, что выгоднее: иметь большой диаметр апертуры D или значительный размер поля зрения $2w$ при умеренной апертуре? Объем пространства, изучаемый телескопом в течение одной экспозиции, пропорционален произведению телесного угла $\Omega = \pi w^2$, охватывающего поле зрения, и эффективной площади апертуры $A = \pi D_e^2/4$, где D_e – эффективный диаметр телескопа, учитывающий экранирование света. Параметр $E = A \cdot \Omega$ называют *эффективностью* или *производительностью*⁴ обзорного телескопа. Определим *коэффициент центрального экранирования* η как отношение диаметров экранирующего элемента и свободного отверстия телескопа. Тогда эффективный диаметр телескопа $D_e = D \sqrt{1 - \eta^2}$, и мы находим:

$$E = \left(\frac{\pi}{2} w D_e \right)^2 = (1 - \eta^2) \left(\frac{\pi}{2} w D \right)^2. \quad (3)$$

⁴Соответствующие английский и французский термины – *throughput* и *étendue*.

В качестве примера рассмотрим RC-телескоп, считавшийся во второй половине истекшего века широкоугольным в классе больших рефлекторов. Пусть его диаметр $D = 4$ м, как у известных рефлекторов им. Мэйалла (N.U. Mayall, Kitt Peak National Observatory) и Бланко (V. Blanco, Cerro Tololo Inter-American Observatory), а диаметр поля зрения $2w = 20'$. Полагая $\eta = 0.30$, мы приходим к значению $E \simeq 1.0 \text{ м}^2 \text{ гр}^2$, которое легко запомнить в качестве референтного.

Параметр E употребляется сейчас очень широко, но его нельзя считать универсальной характеристикой мощности обзорного телескопа. В некоторых случаях изучаемые объекты распределены в пространстве неоднородно, в других – мы отдаем предпочтение какой-либо специфической стороне программы наблюдений. Заметим также, что в определении E качество изображений учитывается лишь заданием размеров поля зрения, так что этот параметр предназначен, в основном, для сопоставления наземных телескопов. При тех же размерах поля зрения, которые обеспечивают наземные телескопы, внеатмосферные наблюдения позволяют достичь дифракционно-ограниченных изображений, тем самым существенно увеличив глубину обзора (см. ниже п. 4.1).

Если связывать мощность широкоугольного телескопа со значением E , то мы в равной мере заинтересованы в увеличении размеров апертуры телескопа и его поля зрения. Многочисленные оптические схемы и технологические новшества по-разному достигают этих целей, и обсуждение соответствующих путей – увлекательная задача, которой мы, по необходимости бегло, займемся далее. Стоит, однако, уже сейчас обрисовать достигнутый уровень и планируемые результаты в разработке широкоугольных систем. Из работающих телескопов назовем SDSS (Sloan Digital Sky Survey Telescope), наблюдения на котором ведутся в США с 2000 г. (Ганн и др. 2006). Для этого телескопа $D = 2.5$ м, $2w = 3^\circ.0$, $\eta \simeq 0.44$, и по формуле (3) мы получаем: $E \simeq 28 \text{ м}^2 \text{ гр}^2$. Это – высокое значение, отвечающее одновременному использованию 28-ми RC-телескопов диаметром 4 м каждый, но в течение ближайшего десятилетия предполагается заполнить различными системами на порядок величины более широкий интервал значений E ! В частности, программа Академии наук США предусматривает создание телескопа с эффективным диаметром 6.5 м и полем зрения около 3° , чему отвечает $E \simeq 235 \text{ м}^2 \text{ гр}^2$.

Ориентироваться в незнакомом городе легче, если имеется его карта, пусть даже во многом еще не привязанная к реальным объектам. Такой «картой» для нас будет рис. 5, на котором представлены некоторые типичные для каждой оптической системы телескопы –

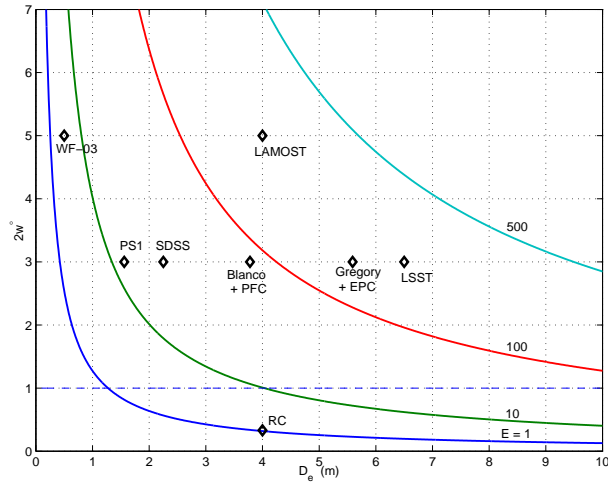


Рис. 5. Диаграмма *поле зрения* (градусы) – *диаметр апертуры* (м). Пунктир отделяет область широкоугольных телескопов, кривые соответствуют фиксированным значениям E . Обозначения: RC – типичная система Ричи-Кретьена диаметром 4 м; WF-03 – система, описываемая ниже в п. 4.5; PS1 – одиночный телескоп сети Pan-STARRS (п. 5.2); SDSS – Sloan Digital Sky Survey Telescope (п. 5.2); Blanco+PFC – телескоп Бланко с корректором в прямом фокусе (п. 5.1); LAMOST – отражательная система Шмидта (п. 6.2); Gregory+EPC – система Грегори с корректором в выходном зрачке (п. 5.3); LSST – Large Synoptic Survey Telescope (п. 6.1).

действующие или находящиеся в процессе изготовления – в зависимости от эффективного диаметра их апертуры D_e и диаметра поля зрения $2w$. Краткое описание этих систем дано в последующих разделах; затронуть все существующие и разрабатываемые телескопы с полями зрения в диапазоне $1^\circ - 3^\circ$ здесь нет возможности.

Рассматривая общие черты рис. 5, обратим внимание на ход кривых постоянной эффективности обзора. Как и следовало ожидать из определения (3), движение вдоль одной из координатных осей немного добавляет к эффективности обзора; оптимальным представляется движение в направлении нормалей к семейству кривых, проходящих вблизи начала координат. В этом смысле, скажем, гипотетический телескоп диаметром 5 м и полем зрения

4° характеризуется практически тем же значением E , что и весьма сложные в техническом отношении системы LAMOST и LSST.

Создание сети широкоугольных телескопов требует значительных усилий и огромных расходов, поэтому возникает вопрос: оправдывают ли их уже полученные и ожидаемые результаты широкоугольных наблюдений?

2. Задачи наблюдений с широкоугольными телескопами

Астрономические задачи, требующие изучения большого поля зрения, чрезвычайно многообразны, поэтому мы ограничимся здесь их общим описанием и несколькими примерами. Подробная сводка и обсуждение работ обзорного характера даны Решетниковым (2005). Соответственно решаемым задачам, обзорные работы можно условно разделить на два класса: специальные и глобальные. Приведем сначала примеры программ первого рода.

После открытия квазаров было затрачено много усилий на построение функции светимости галактик с активными ядрами. Данные, как будто, указывали на быструю эволюцию светимостей с космологической эпохой, однако по мере добавления даже небольшого количества новых объектов выводы менялись столь сильно, что их шаткость стала очевидной. Для получения надежных результатов нужна достаточно объемная выборка слабых объектов. Существенный шаг в этом направлении был сделан Б.Е. Маркаряном в рамках Бюраканского обзора неба с 1-м камерой Шмидта. Дальнейшее продвижение стало возможным только сейчас. Так, с помощью упомянутого выше телескопа SDSS создана выборка примерно двух тысяч сейфертовских галактик типа I, что на порядок увеличивает объем прежней выборки. Анализ новых данных еще предстоит сделать.

В общей задаче восстановления истории расширяющейся Вселенной мы сталкиваемся с необходимостью изучить эволюцию объектов самого разного рода. В этой связи выяснилась важность сверхновых типа Ia: ввиду небольшого разброса светимостей они претендуют на роль «стандартных свечей», поиски которых всегда были первоочередными для наблюдателей. Достаточно представительная выборка сверхновых Ia в диапазоне красных смещений $z < 1.7$ даст оценки расстояний и светимостей многих удаленных от нас объектов и в значительной мере ограничит произвол теоретических моделей эволюции. Такое ограничение представляет особый интерес для широко обсуждаемой сейчас проблемы *темного вещества* во Вселенной. Особые надежды в создании выборки

сверхновых Ia связывают с проектом широкоугольного космического телескопа SNAP (SuperNova Acceleration Probe, Лэмптон и др. 2002), о котором будет сказано ниже.

В качестве дальнейших примеров специальных задач упомянем построение кривых блеска слабых переменных звезд и основанное на этих данных уточнение шкалы межгалактических расстояний; поиски особо интересных объектов, в частности, гравитационных линз и черных дыр; изучение вспышек звезд и других преходящих событий в галактиках; регистрацию послесвечения γ -всплесков; обнаружение новых астероидов и слежение за всей их совокупностью, а также за чрезвычайно разросшимся в последние годы роем околоземных тел.

Первой программой глобального типа был обзор неба методом «черчков», предпринятый Вильямом Гершелем (W. Herschel) в конце XVIII века. Наиболее известной программой этого типа явился Паломарский обзор неба. Он был выполнен в 50-е годы истекшего века с помощью камеры Шмидта диаметром 1.22 м и полем зрения $6^\circ.5$. Достаточно сказать, что бурный прогресс радиоастрономии во второй половине XX века, в ходе которого были открыты квазары и пульсары, опирался на отождествление радиоисточников с оптическими объектами на Паломарских картах. Совокупность почти тысячи карт содержит гигантский объем информации об астрономических объектах вплоть до примерно 20-й звездной величины. Однако проведение Паломарского обзора заняло много лет, тогда как сейчас поставлена задача обновления информации о *всех небесных объектах ярче $\sim 24^m$ за время порядка одной недели!* Ясно, что при этом попутно будут решены многие конкретные астрономические задачи, а также проблемы, возникшие в ходе околоземной деятельности человечества.

Уже приведенный выше беглый перечень программ наблюдений убеждает нас, что ответ на вопрос, поставленный в конце предыдущего раздела, определенно положителен⁵.

3. Рефлекторы

Деформация под действием собственного веса ограничивает диаметр линз значением ~ 1.5 м, поэтому крупные телескопы пред-

⁵Тем более странно слышать высказываемое иногда мнение, что российским астрономам новые телескопы не нужны, поскольку они могли бы наблюдать за границей. Для того чтобы продуктивно наблюдать, необходимо принимать участие в разработке новых телескопов и сопутствующих им приборов.

ставляют собой либо чисто рефлекторы, либо *катадиоптрические* системы – так называют оптические приборы, в которых роли линз и зеркал сопоставимы.

Как мы выяснили, вследствие комы поле зрения однозеркального телескопа не превосходит нескольких угловых минут. Редукция комы в двухзеркальных RC-системах и апланате Грегори позволяет достичь поля диаметром $20' - 30'$; дальнейшее продвижение требует введения линзового или зеркального корректора аберраций. В первом случае мы приходим к катадиоптрической системе, во втором – к многозеркальному телескопу. Катадиоптрические системы мы обсудим в последующих разделах, а сейчас сосредоточим внимание на вопросе: исчерпаны ли возможности зеркальных телескопов указанным выше размером поля зрения?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно вернуться к обсуждению аберраций телескопов (п. 1.2). Конечно, хроматизм совершенно отсутствует в рефлекторах. Монохроматические аберрации, указанные Зайделем (L. Seidel) в середине XIX века, – сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля и дисторсия – представляют собой аберрации лишь *третьего порядка*. Они соответствуют удержанию двух первых слагаемых в разложениях типа $\sin \varphi = \varphi - \varphi^3/3! + \varphi^5/5! - \dots$, то есть приближенной теории, справедливой при невысокой светосиле оптических систем. Термин *апланатизм* отвечает устранению двух первых аберраций 3-го порядка из перечисленных выше (таковы RC-телескоп и апланат Грегори), устранение еще и астигматизма 3-го порядка приводит к *анастигматам*. Естественно уменьшать остальные аберрации 3-го порядка путем введения в систему дополнительных зеркал, обладающих оптической силой. В этом направлении выполнено много исследований (см. книги, указанные в п. 1.2). Мы рассмотрим сначала схему трехзеркальной системы Дитриха Корша (1991), а в разделе 6, обсудив предварительно идею камеры Шмидта, вернемся к трехзеркальным системам.

3.1. Анастигмат Корша

Оптическая схема этого телескопа включает в себя три соосных зеркала, форма которых задается коническими сечениями. Оказывается, при надлежащем выборе параметров коникоидов можно исправить все пять аберраций 3-го порядка⁶, добившись тем самым

⁶ Систему, в которой исправлены все аберрации 3-го порядка, следовало бы именовать уже не анастигматом, но, насколько мне известно, соответствующего термина нет.

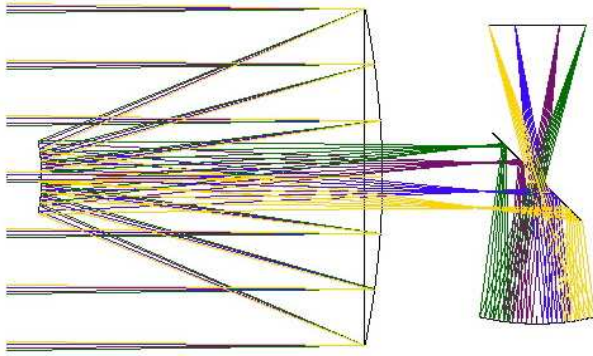


Рис. 6. Телескоп SNAP – пример трехзеркального анастигмата Корша. Диаметр апертуры – 2 м, фокальное отношение $\phi = 10.7$, поле зрения $2\omega = 1^\circ.5$, центральная зона диаметром $0^\circ.7$ виньетирована.

дифракционно-ограниченных изображений в пределах плоского поля зрения большого диаметра. Однако при соосном расположении зеркал виньетировается недопустимо много света, поэтому в систему вводят дополнительные плоские зеркала, выносящие изображение в сторону. Такое зеркало имеется в схеме космического телескопа SNAP (рис. 6), о котором упоминалось в разделе 2. Главная задача проекта – поиск сверхновых типа Ia. Превосходные изображения обеспечиваются здесь в поле зрения диаметром $1^\circ.5$ (568 мм) при полностью виньетированной центральной зоне диаметром $0^\circ.7$. Сравнительно небольшая апертура телескопа компенсируется известными преимуществами внеатмосферных наблюдений, что позволит реализовать предельную звездную величину обзора $\sim 27^m.5$.

Несколько лет тому назад на околоземную орбиту высотой 680 км был выведен телескоп IKONOS диаметром 0.7 м и полем зрения $\sim 1^\circ$. Это был первый коммерческий спутник, предназначенный для регистрации земной поверхности с разрешением около 3 метров⁷. IKONOS представляет собой трехзеркальный анастигмат Корша с двумя плоскими вспомогательными зеркалами.

⁷Разрешение давно используемых космических телескопов *Keyhole-12* (США) с апертурой 3.8 м составляет 10–15 см, что близко к теоретическому пределу при наблюдениях Земли сквозь атмосферу в видимом диапазоне спектра.

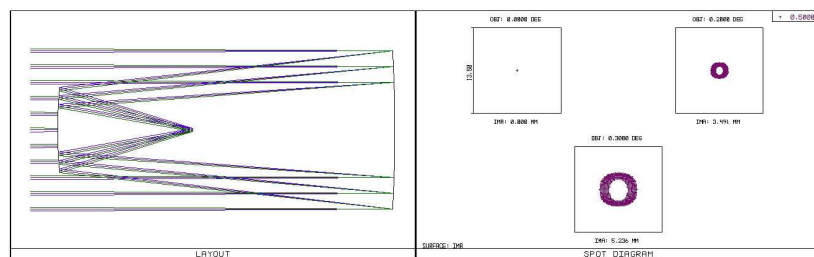


Рис. 7. Телескоп Шварцшильда при $F = 1$ м и $\phi \simeq 1.7$. Точечные диаграммы для медиальной поверхности отвечают положению источника на оси и полевым углам $0^\circ.2$ и $0^\circ.3$. Сторона квадрата равна 13.5 мкм ($2''.8$).

Необходимость согласования разрешений оптики и детектора света обусловила в описываемых системах сравнительно большие фокальные отношения: $\phi = 10.7$ в SNAP и 14.3 – в IKONOS. Апертуры наземных телескопов существенно больше таковых у космических собратьев, тогда как размеры пикселей детектора, а тем самым и необходимое для согласования эффективное фокусное расстояние F , изменяются мало. Поэтому наземные телескопы обычно более светосильны. Исправление aberrаций в таких системах представляет собой трудную задачу, в решение которой важный вклад внес Карл Шварцшильд.

3.2. Двухзеркальный апланат Шварцшильда

В начале XX века проблема согласования разрешений оптики и приемников света еще не стояла так остро, как сейчас. Более важным представлялось то обстоятельство, что фотоэмульсии были малочувствительны, и потому регистрация даже ярких объектов требовала светосильной оптики.

Шварцшильд (1905) рассмотрел компактную систему из двух вогнутых зеркал, в которой вторичное зеркало расположено перед фокусом главного зеркала (рис. 7). Он потребовал выполнения двух условий: *стигматичности* системы на оптической оси и соблюдения *условия синусов*. Первое требование означает, что осевые пучки света произвольной ширины сходятся к одной и той же точке на оси, то есть в системе исправлена сферическая aberrация не только третьего, но всех порядков. Выполнение условия синусов влечет за собой устранение комы 3-го порядка в достаточно обширной области вблизи оптической оси (см. Ландсберг 1976, §85; Борн

и Вольф 1970, §4.5). Согласно принятому в оптике определению, два указанных выше условия означают *строгую апланатичность* оптической системы.

Шварцшильд элегантно свел задачу построения апланатичной системы из двух вогнутых зеркал к нелинейному дифференциальному уравнению, а затем нашел его точное решение в замкнутом виде. Хотя выражения, задающие форму зеркал, содержат лишь элементарные функции, они столь сложны, что рассчитать численно ход лучей в телескопе Шварцшильда удалось только недавно (Теребиж 2005б). В последней работе подход Шварцшильда распространяется на произвольные апланатические системы, состоящие из двух зеркал, в частности, схемы Грегори и Кассегрена (СОТ, рис. 23). Поверхности зеркал во всех строго апланатических системах удалось представить едиными выражениями, так что конкретным системам отвечают частные значения параметров. Это обстоятельство позволяет считать разнообразные строгие апланаты конкретизациями одной общей системы – *двухзеркального апланата Шварцшильда*.

В случае $\phi \gg 1$, когда светосила зеркал в апланатическом телескопе невелика, их форма существенно упрощается; соответствующие разложения по степеням ϕ^{-1} приведены в той же работе Шварцшильда 1905 г. Он показал, что зеркала с малой светосилой допустимо аппроксимировать коническими сечениями. В 1922 г. Анри Кретьен применил теорию Шварцшильда к случаю кассегреновского расположения зеркал при $\phi \gg 1$, а Георг Ричи изготовил в 1927 г. первый телескоп, апланатичный в рамках теории аббераций 3-го порядка. Во второй половине XX века система Ричи–Кретьена применялась для большинства стройившихся телескопов диаметром более 2 м.

Модельные примеры свидетельствуют, что строгие апланаты Шварцшильда обеспечивают субсекундное поле зрения $2w \simeq 0^\circ.7$ в области $\phi < 2$, где о качестве изображений апланатов Ричи–Кретьена и Грегори уже не приходится говорить. Справа на рис. 7 показаны точечные диаграммы для оригинальной системы Шварцшильда (характерное для внефокальных изображений проявление центрального экранирования обусловлено наличием в системе астигматизма). Вполне вероятно, что в ходе дальнейших исследований будут найдены примеры систем с полем $\sim 1^\circ$. Важно отметить, что строгие апланаты сочетают возможность широкоугольных наблюдений с компактностью телескопа, обладающего всего лишь двумя зеркальными поверхностями. Эти черты особенно полезны при внеатмосферных исследованиях.

4. Катадиоптрические системы с полноразмерным корректором

Как было сказано, *катадиоптрическими* называются системы, в которых линзы и зеркала играют сравнимые роли. Введение линз в зеркальный телескоп представляет собой принципиальный шаг уже в том отношении, что мы лишаемся совершенной ахроматичности системы: неизбежная для преломляющей оптики дисперсия света приводит к зависимости качества изображений от длины волны излучения. Более того, лишь немногие стекла, подобно плавленому кварцу, хорошо пропускают свет в широком спектральном диапазоне, так что катадиоптрические системы обычно работают в заданной области длин волн. Положительная сторона, связанная с применением линз – возможность устранить аберрации при малых потерях света вследствие виньетирования. (Установка неплоских зеркал в световом пучке почти наверняка сопряжена с заметным экранированием потока.)

Рассматриваемые в настоящем разделе системы с полноразмерным корректором по нынешним меркам недостаточно велики. Так, диаметр коррекционной пластины в наибольшей из существующих камере Шмидта равен 1.35 м, тогда как апертура обычных рефлекторов достигла 10 м. Нужно, однако, иметь в виду, что эффективность (не только в узком смысле этого термина) систем с полноразмерным корректором весьма высока благодаря присущему им широкому полю зрения. Для некоторых важных задач обзорного характера это свойство приобретает решающее значение.

4.1. Общий принцип построения катадиоптрических систем

Анализируя удачные зеркально-линзовые системы, найденные в астрономической оптике за долгий период ее развития, можно заметить соблюдение некоторого общего принципа, касающегося хроматизма линзовой компоненты системы. Поскольку хроматическая аберрация быстро увеличивается с ростом оптической силы линз, желательно, чтобы линзовая составляющая была как можно ближе к *афокальной* системе, то есть имела как можно большее эффективное фокусное расстояние. Таким образом,

силовые функции желательно возлагать на зеркальные элементы, тогда как основное назначение близкой к афокальной линзовой оптики – устранить монохроматические аберрации системы, по возможности не внося собственного хроматизма.

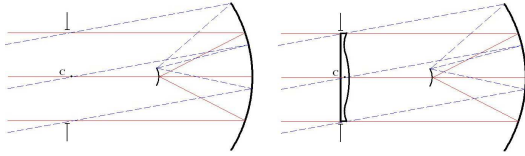


Рис. 8. Слева: отражение коллимированных пучков, проходящих через центр кривизны сферического зеркала. Справа: камера Шмидта (кривизна коррекционной пластины преувеличена).

Продуктивность такого подхода нетрудно проследить не только в системах астрономического назначения, но и в разработках оптических систем самого разного рода.

4.2. Камера Шмидта

Может быть, наиболее прозрачным образом роль приведенного выше принципа прослеживается в системе, открытой Бернхардом Шмидтом (1930). Реализованная в ней идея не раз обсуждалась, однако к ней стоит вернуться, поскольку она лежит в основе многих современных разработок.

Шмидт исходил из очевидного факта: световые пучки от далеких источников, проходящие под разными углами сквозь диафрагму, помещенную в центр кривизны вогнутого сферического зеркала, строят, отражаясь от поверхности зеркала, идентичные изображения (рис. 8). Здесь просто работает симметрия системы при ее вращении вокруг центра кривизны зеркала. Нужно подчеркнуть, что углы падения пучков не предполагаются малыми. Симметрия системы обуславливает также кривизну фокальной поверхности: она представляет собой сферу с центром кривизны, совпадающим с таковым у зеркала. Радиус фокальной поверхности вдвое меньше радиуса зеркала. Итак, *сферическое зеркало, освещаемое коллимированными пучками света из его центра кривизны, обладает единственной внеосевой аберрацией – кривизной поля зрения.* Это – замечательное свойство при расчете широкоугольной системы, но остается неисправленной осевая – сферическая аберрация зеркала. Вследствие сферической аберрации лучи от зон с различным удалением от (произвольной ввиду симметрии) оси сходятся к разным точкам на этой оси. Именно, фокусные расстояния краевых зон зеркала *меньше* такового для центральной зоны. Шмидт

уравнял зональные фокусные расстояния, поместив в центр кривизны зеркала C стеклянную пластину, мало отличающуюся от плоскопараллельной (рис. 8). Центральная часть коррекционной пластины Шмидта действует как слабая положительная линза, а краевая часть – как слабая отрицательная линза. Говоря точнее, форма одной из поверхностей пластины описывается уравнением 4-го порядка относительно радиальной координаты.

Таким образом, оптическую силу камере Шмидта придает зеркало, тогда как коррекционная пластина призвана компенсировать его сферическую aberrацию. Хроматизм камеры невелик ввиду малой оптической силы коррекционной пластины. Кривизну поля раньше либо устраняли, вводя невдалеке от фокуса плоско-выпуклую линзу Пиацци-Смита (C. Piazzzi-Smyth), либо компенсировали путем соответствующего изгиба фотопластинки. В наше время при значительных размерах фокальной поверхности есть возможность покрыть ее сравнительно малыми плоскими фотоэлектронными детекторами света. Диаметр поля зрения камеры Шмидта при субсекундном качестве изображений достигает нескольких градусов, а фокальное отношение ϕ – значений, меньших 1. К недостаткам камеры Шмидта следует отнести, прежде всего, сложность формы поверхности коррекционной пластины, а также большую длину системы, вдвое превосходящую эквивалентное фокусное расстояние.

4.3. Система Максутова

Если не требовать от телескопа светосилы и размеров поля зрения, достижимых с камерой Шмидта, то сферическую aberrацию сферического зеркала⁸ можно компенсировать не столь сложным элементом, как в камере Шмидта. В 1941 г. Д.Д. Максутов обнаружил, что при ϕ примерно больше 3 вполне удовлетворительные результаты получаются при использовании в качестве корректора *мениска* – сферической линзы с близкими значениями радиусов кривизны поверхностей (см. Максутов 1946). От одиночной линзы естественно было ожидать большой хроматической aberrации, но Максутову удалось найти такое сочетание радиусов кривизны поверхностей и толщины мениска, что хроматизм стал приемлемым в широком спектральном интервале. *Ахроматический мениск* Максутова и обеспечил создание системы, все поверхности которой имеют сферическую форму.

⁸Мы еще раз убеждаемся в неудачности термина *сферическая aberrация*. Максутов (1946) справедливо полагал уместным название *зональная aberrация*.

Последнее обстоятельство, а также тот факт, что менисковый телескоп заметно короче камеры Шмидта, не свидетельствуют о легкости изготовления достаточно светосильных менисковых систем. Причина кроется в том, что ахроматический мениск обязан обладать заметной оптической силой, т.е. в системе не вполне соблюдается принцип, сформулированный в п. 4.1. Это негативно сказывается на качестве изображений, ширине спектрального диапазона и других характеристиках телескопа, но более всего – на допусках параметров мениска: они несравненно более жестки, чем у практически афокального корректора Шмидта. В светосильном менисковом телескопе для достижения нужного качества изображений приходится отступать от строго сферической формы поверхностей – наносить на них *ретушь* (Белороссова, Максутов и др. 1961).

4.4. Система Рихтера–Слефогта и ее модификация

Интуитивно легко понять, что тесный дублет из положительной и отрицательной тонких линз, сделанных из одного сорта стекла, суммарная оптическая сила которых равна нулю, обладает слабым хроматизмом. В самом деле, такой дублет мало отличается от тонкой плоскопараллельной пластины. Тем не менее он вполне способен компенсировать некоторые aberrации сферического зеркала, и прежде всего – кому. Сочетание афокального двухлинзового корректора с силовым элементом в виде сферического зеркала и приводит к схеме Рихтера–Слефогта (1941)⁹, близко следующей требованию п. 4.1. Все оптические поверхности в схеме представляют собой сферы.

Расчитанный нами пример системы Рихтера–Слефогта (RS) показан на рис. 9. Поскольку значение имеет лишь одинаковость материала линз, естественно выбрать наиболее распространенный и устойчивый сорт стекла, скажем, отечественный К8 или равноценный ему ВК7 фирмы Schott. В данном случае диаметр диска Эри составляет около 4 мкм, одной угловой секунде соответствует на детекторе линейный размер 4.2 мкм, а среднеквадратический диаметр изображений равен ~ 3 мкм. Таким образом, система обеспечивает превосходное качество изображений в поле зрения диаметром $0^\circ.5$. Однако этого еще недостаточно, чтобы по принятому нами критерию систему можно было отнести к широкоугольным; при больших полевых углах сказывается *хроматизм увеличения*,

⁹В 1942-43 гг. эту систему независимо предложили Д.С. Волосов, Д.Ю. Гальперн и Ш.Я. Печатникова (см. Волосов 1948, стр. 383), а в 1944 г. – Хаугтон (J.L. Houghton) в США.

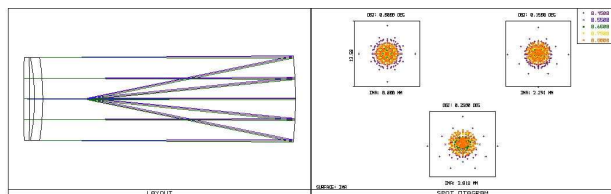


Рис. 9. Система Рихтера–Слефогта диаметром 350 мм при фокальном отношении $\phi = 2.5$. Точечные диаграммы для плоского поля отвечают интегральному диапазону длин волн 0.45–0.80 мкм, положению на оси и полевым углам $0^\circ.15$ и $0^\circ.25$. Сторона квадрата равна 13.5 мкм ($3''.2$).

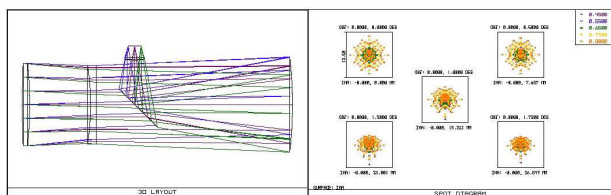


Рис. 10. Система WF-01 диаметром 350 мм при $\phi = 2.5$. Точечные диаграммы для плоского поля отвечают интегральному диапазону длин волн 0.45–0.80 мкм, положению на оси и полевым углам $0^\circ.5$, $1^\circ.0$, $1^\circ.5$ и $1^\circ.75$. Сторона квадрата равна 13.5 мкм ($3''.2$).

обусловленный зависимостью коэффициента увеличения системы от длины волны.

Радикального расширения поля зрения (примерно на порядок величины по диаметру) удалось добиться путем модификации системы Рихтера–Слефогта, заключающейся в существенном увеличении расстояния между линзами корректора и добавлении небольшой сферической линзы невдалеке от фокальной поверхности (Тербиж 2001). Назовем эту систему для краткости WF-01 (от Wide-Field). Первый из указанных шагов ведет к уменьшению монохроматических аберраций. Что касается второго, то еще Волосов (1948, стр. 388) рекомендовал «... установку вблизи поверхности изображения положительной линзы, корригирующей кривизну изображения». Эта мера, предложенная шотландским астрономом Пиацци-Смитом в 1874 г. для знаменитого объектива Петцваля (J.M. Petzval), оказалась полезной во многих оптических при-

борах. В системе WF-01 роль третьей линзы лишь отчасти сводится к спрямлению поля зрения; ее основная задача – компенсировать хроматизм увеличения, несколько возросший при расширении промежутка между компонентами корректора. В совокупности модификация RS-системы позволила добиться плоского поля зрения диаметром вплоть до 6° .

Рис. 10 дает пример системы WF-01 с теми же апертурой и светосилой, что у показанной на рис. 9 системы RS. Как видно, при сохранении качества изображений диаметр поля возрос в 7 раз. Плоское диагональное зеркало позволяет вынести изображение наружу и устранить нежелательную засветку поля при умеренном экранировании полезного потока. Аналогичное качество изображений на плоском поле поперечником $3^\circ.5$ можно получить с камерой Шмидта диаметром 350 мм и $\phi = 2.5$, если ввести в нее фокальный корректор в виде двух сферических линз, сделанных из специальных сортов стекла.

В системе WF-01 сочетаются, казалось бы, противоречивые свойства: компактность телескопа, крайняя нетребовательность к сортам стекла, отсутствие асферических поверхностей, мягкие допуски и широкое поле зрения дифракционного качества. Причина заключается в том, что в многомерном пространстве параметров системы достигнут *глобальный* минимум функции качества: именно ширина глобального минимума обеспечивает возможность значительных отклонений параметров при сохранении предельно высокого качества изображений. Благодаря мягкости допусков расчетные характеристики реализованы в действующих сейчас нескольких системах WF-01.

4.5. Новые системы

Выше отмечалось, что общий принцип построения катадиоптрической оптики выполняется в системе Рихтера–Слефогта благодаря практической афокальности двухлинзового корректора. Казалось бы, убрав одну из линз корректора, мы вынуждены будем вернуться к менисковой системе, однако имеется иная возможность: объединить вторую линзу корректора с зеркалом, так что последнее принимает вид, известный как *зеркало Манжеса* (A. Mangin). В результате получается система WF-03¹⁰. Все поверхности в ней остаются сферическими, сохраняются и другие достоинства систе-

¹⁰Расчет выполнен в 2004 г., описание приводится впервые. Системе WF-02 отвечает промежуточный шаг: повторное прохождение отраженного от зеркала света через еще более сдвинутую к зеркалу вторую линзу корректора. При

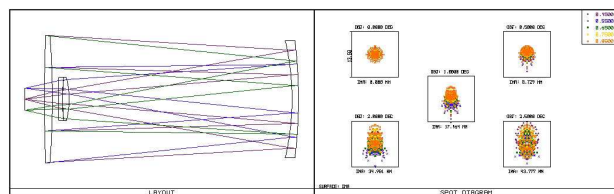


Рис. 11. Система WF-03 диаметром 500 мм при $\phi = 2.0$. Точечные диаграммы для плоского поля отвечают интегральному диапазону длин волн 0.45–0.85 мкм, положению на оси и полевым углам 0°.5, 1°.0, 1°.5, 2°.0 и 2°.5. Сторона квадрата равна 13.5 мкм (2".8).

мы WF-01. Пример телескопа WF-03 с полем зрения 5°.0 дифракционного качества показан на рис. 11. Невдалеке от фокуса введен двухлинзовый корректор; для телескопов с небольшой апертурой изображение можно вынести в сторону по способу Ньютона.

Система WF-03 снимает известный недостаток как схемы Рихтера–Слефогта, так и ее модификаций вида WF-01 и WF-02: наличие трех полноразмерных оптических элементов при том, что телескопы Шмидта и Максудова включают в себя только два таких элемента. Схожая с WF-03 по составу элементов система была предложена Хэмилтоном (W.F. Hamilton) еще в 1814 г. с намерением, прямо противоположным тому, которого требует общий принцип (см. Вилсон 1996, стр. 213). Силовым элементом в схеме Хэмилтона была одиночная входная линза, а небольшое зеркало Манжена служило, главным образом, для коррекции хроматизма. Как следствие, о большом поле зрения не приходилось говорить. Между тем площадь обзора системы WF-03, показанной на рис. 11, на два порядка превосходит площадь обзора даже классической RS-системы, считающейся телескопом с широким полем зрения (см. рис. 9).

Поле зрения еще больших размеров достигается в новых наших системах, принципиально отличных от рассмотренных выше¹¹. В качестве примера на рис. 12 приведены точечные диаграммы для прототипа этого семейства – системы WF-05 с полем зрения 14°.1.

этом длина телескопа по сравнению с WF-01 заметно сокращается, а качество изображений остается прежним.

¹¹Описание находится в печати.

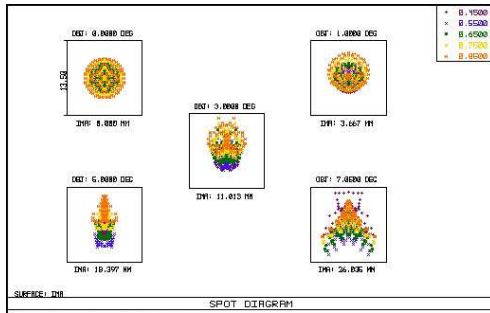


Рис. 12. Точечные диаграммы для плоского поля в системе WF-05 диаметром 115 мм при $\phi = 1.8$. Диаграммы отвечают интегральному диапазону длин волн 0.45–0.85 мкм, положению на оси и полевым углам $1^\circ.0$, $3^\circ.0$, $5^\circ.0$ и $7^\circ.05$. Сторона квадрата равна 13.5 мкм ($13''.3$).

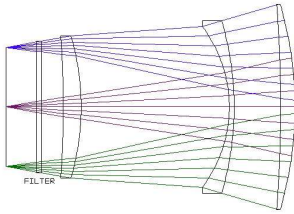


Рис. 13. Корректор Винна с полем зрения $50'$ в прямом фокусе 4-м рефлектора обсерватории Китт Пик.

5. Линзовые корректоры поля в рефлекторах

Габариты систем с полноразмерным линзовым корректором ограничены максимальным диаметром линз, при котором еще можно пренебречь их прогибом под действием собственного веса. Сейчас этот диаметр приближается к 1.5 м. Очевидно, системы с большей апертурой можно создать, располагая линзовый корректор умеренных размеров не вдалеке от фокальной поверхности большого зеркального телескопа.

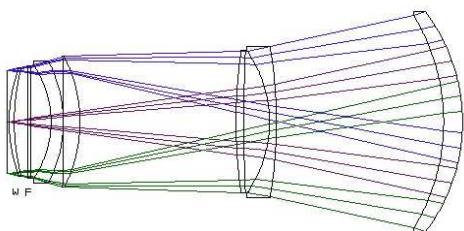


Рис. 14. Пятилинзовый корректор с полем зрения 3° , предложенный автором. F – фильтр, W – окно детектора, обладающее оптической силой.

5.1. Корректор в прямом фокусе

Для наиболее простого такого телескопа – одиночного параболического зеркала – первые корректоры были рассчитаны Сэмпсоном (R.A. Sampson) в 1913 г. и Россом (F.E. Ross) в 1935 г. Компенсация комы, вносимой зеркалом, потребовала трех сферических линз; в соответствии с условием, указанным в п. 4.1, эти корректоры почти афокальны. Поле зрения корректора Росса составляет около $15'$. Примерно вчетверо больший диаметр плоского поля зрения субсекундного качества изображений обеспечивает трехлинзовый корректор Винна (1968) со всеми сферическими поверхностями. Версии корректора Винна для гиперболического и параболического зеркал установлены на многих ныне действующих телескопах; одну из них иллюстрирует рис. 13.

При переходе к телескопам диаметром более 3 м основное ограничение ставит допустимый размер линз корректора. Поле зрения диаметром 3° для четырехметрового телескопа при сохранении сферической формы всех поверхностей корректора достигается в схеме, показанной на рис. 14 (Тербиж 2003). Диаметр звездных изображений Δ_{80} с этим корректором не превосходит $0''.80$ при наблюдениях в интегральном свете с длинами волн $0.32\text{--}1.1$ мкм. Материалом для линз служит стекло одного – практически любого – типа; если выбрать плавленый кварц, то обеспечивается высокая прозрачность системы в широком спектральном диапазоне. При необходимости нетрудно достичь еще более высокого качества изображений путем асферизации некоторых поверхностей линз. Эта схема лежит в основе проводящегося сейчас преобразования 4-м телескопа Бланко в систему DEC (Dark Energy Camera).

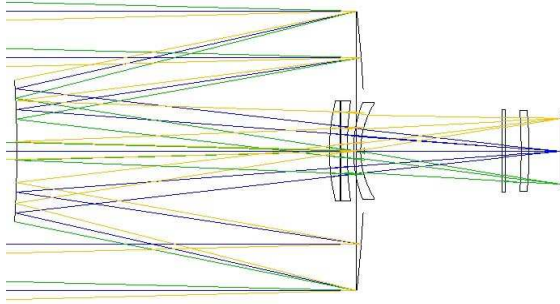


Рис. 15. Оптическая схема телескопа Pan-STARRS диаметром 1.8 м. Диаметр поля зрения – $3^{\circ}.0$.

Обычно линзовые корректоры рассчитываются для уже существующих телескопов. Недавно началось строительство нескольких широкоугольных телескопов, в которых форма зеркала оптимизирована совместно с линзовым корректором в прямом фокусе. Два таких телескопа диаметром 4 м, включающие в себя линзовые корректоры с асферическими поверхностями – DCT (Discovery Channel Telescope, ранее именуемый NGLT) и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) – должны обеспечить поле зрения диаметром около 2° .

5.2. Корректор в касегреновском фокусе. Телескопы Pan-STARRS и SDSS

При установке линзового корректора в касегреновском фокусе двухзеркальной системы достигается компактность телескопа, однако получение широкого поля зрения в таких системах сопряжено со специфической трудностью, подчеркнутой Линден-Беллом и Уиллстромом (2004). Дело в том, что для каждого из падающих на телескоп под разными углами пучков света вторичное зеркало должно иметь свою форму, а потому вынужденная фиксация формы вторичного зеркала влечет за собой существенное усложнение всех оптических поверхностей широкоугольного телескопа.

На рис. 15 показана оптическая схема базового телескопа сети Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System). Оба его зеркала – гиперboloиды с полиномиальными асфериками 6-го порядка, причем эксцентриситет вторичного зеркала

очень велик: $\epsilon_2^2 \simeq 18.3$; некоторые поверхности трехлинзового корректора тоже асферичны (Кайзер и др. 2002).

В проекте Pan-STARRS учитывается тот факт, что стоимость телескопа нелинейным образом быстро растет с увеличением его диаметра (COT, п. 9.8). Поэтому сравнительно небольшой по современным меркам диаметр базового телескопа Pan-STARRS позволяет создать распределенную по долготе их сеть, и в совокупности достичь не менее высокой эффективности обзора неба, чем при использовании одного телескопа с эффективным диаметром порядка 6 м. Другие достоинства сети телескопов Pan-STARRS обсуждаются в упомянутой выше статье создателей проекта и в COT, п. 7.6.

Столь же сложен упоминавшийся в п. 1.3 телескоп SDSS. Его гиперболоидальные зеркала дополнены асфериками вплоть до 8-го порядка, квадрат эксцентриситета вторичного зеркала $\epsilon_2^2 \simeq 12$, две поверхности трехлинзового корректора асферичны до 8-го порядка включительно. Сложность оптических схем затрудняет изготовление и эксплуатацию телескопов с кассегеновским корректором, что существенно сказывается на их стоимости. Однако все это окупается востребованностью широкоугольных систем. SDSS явился первым крупным телескопом с полем зрения 3° , и за несколько лет его работы многочисленные группы наблюдателей получили ценные результаты, касающиеся широкого спектра астрономических проблем.

5.3. Корректор в выходном зрачке системы Грегори

В оптике, включая и астрономические ее разделы, важную роль играют понятия *апертурной диафрагмы*, *входного* и *выходного зрачков* системы. Проще всего объяснить эти понятия на примере двухзеркального телескопа, в котором входящий от звезды световой пучок ограничивается оправой главного зеркала (рис. 16). Она и является в этом случае апертурной диафрагмой телескопа. Входной зрачок есть изображение апертурной диафрагмы предшествующей ей частью системы. Поскольку в нашем примере апертурная диафрагма совпадает с оправой главного зеркала, там же расположен и входной зрачок телескопа. Выходной зрачок – изображение апертурной диафрагмы последующей оптической системой. В рассматриваемом примере такой системой является вторичное зеркало. Выпуклое вторичное зеркало системы Кассегрена аналогично отрицательной линзе; оно строит мнимый выходной зрачок, расположенный «за спиной» вторичного зеркала. В схеме Грегори вогнутое вторичное зеркало строит действительное изображение оправы главного зеркала вблизи фокуса последнего, иначе говоря, выходной зрачок телескопа находится вблизи его первичного фокуса.

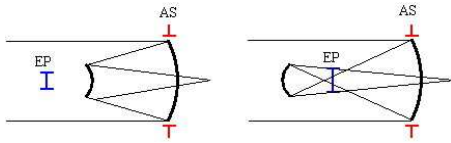


Рис. 16. Положение апертурной диафрагмы (AS) и выходных зрачков (EP) в системах Кассегрена и Грегори.

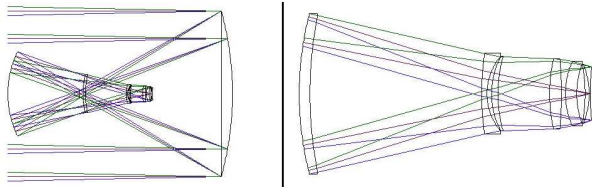


Рис. 17. Оптическая схема телескопа диаметром 6.5 м (слева) и его корректор в увеличенном масштабе (справа). Эффективное фокусное расстояние телескопа – 12.4 м, длина системы – 8.8 м, поле зрения – 3° .

Использование выходного зрачка оказалось особенно полезным в адаптивной оптике, имеющей целью быструю коррекцию волнового фронта, искаженного при прохождении сквозь земную атмосферу. Вместо того чтобы вносить коррекцию фронта путем изменения формы локальных участков огромного главного зеркала, проще построить с помощью вспомогательной оптики сравнительно небольшое изображение этого зеркала – выходной зрачок – на элементе с деформируемой поверхностью.

То обстоятельство, что выходной зрачок телескопа Грегори действителен, позволяет *без дополнительной оптики* разместить в нем корректирующий элемент, обеспечивая тем самым эффективное исправление aberrаций двухзеркальной системы. Казалось бы, установке линзового корректора в системе Грегори препятствует наложение широких световых пучков вблизи первичного фокуса (см. рис. 3), однако дополнительного виньетирования света можно избежать, если в центре первой линзы корректора сделать отверстие, а остальную часть корректора разместить в области, примыкающей к главному зеркалу (Теребиж 2006).

Пример схемы телескопа Грегори с корректором приведен на рис. 17. Главное и вторичное зеркала представляют собой эллипсоиды, близкие, соответственно, к параболюиду и сфере. Поле зрения

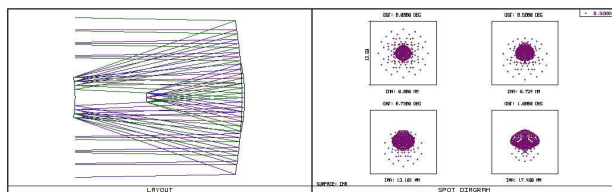


Рис. 18. Система Пола–Бэкера диаметром 500 мм при $\phi = 2.0$. Точечные диаграммы для плоского поля отвечают длине волны 0.55 мкм, положению на оси и полевым углам $0^\circ.5$, $0^\circ.75$ и $1^\circ.0$. Сторона квадрата равна 13.5 мкм ($2''.8$).

субсекундного качества с угловым диаметром около $2^\circ.5$ обеспечивается в ней уже при всех сферических линзах корректора. По сути мы пришли к широкоугольной катадиоптрической системе, сочетающей компактность с простотой оптических поверхностей. Умеренная асферизация некоторых поверхностей корректора позволяет достичь поля диаметром 3° . Примечательно, что оптимальный сферический корректор для системы Грегори близок к корректору, предложенному нами ранее для одиночного гиперболического зеркала (рис. 14).

6. Строящиеся телескопы максимальной эффективности

6.1. Система Мерсенна–Шмидта. Проект LSST

Вероятно, наиболее сложным современным проектом большого широкоугольного телескопа следует считать LSST (Large Synoptic Survey Telescope). Его эффективная апертура составляет 6.5 м, поле зрения субсекундного качества – около 3° . С оптической точки зрения LSST представляет собой последовательное развитие системы Мерсенна (Marin Mersenn) в направлении, заданном Шмидтом; важными вехами на этом пути явились работы Пола (1935), Бэкера (1969), Уиллстропа (1984), Эйнджела и др. (2000).

Система Мерсенна, предложенная в 1636 г., состоит из двух конфокальных параболоидов. В ее версии, отвечающей схеме Кассегрена, выпуклое вторичное зеркало преобразует сходящийся к фокусу пучок света от удаленного осевого объекта в коллимированный пучок; в схеме Грегори–Мерсенна аналогичное преобразование выполняет вогнутое вторичное зеркало. Поскольку система Мерсенна уменьшает диаметр коллимированного светового пучка,

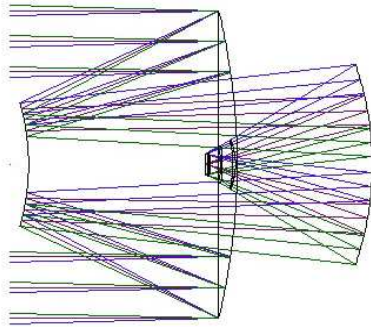


Рис. 19. Оптическая схема LSST.

приходящего от бесконечно удаленного объекта, ее можно трактовать как афокальный компрессор световых пучков. Немаловажно, что такая система свободна от сферической аберрации, комы и астигматизма.

Ограничимся рассмотрением более компактного расположения зеркал согласно Кассегрену. Идея Пола и Бэкера заключалась в том, чтобы осветить выходящим из телескопа Мерсенна коллимированным пучком света *сферическое* зеркало, центр кривизны которого совмещен с вершиной вторичного зеркала (рис. 18). Почему для третьего зеркала системы выбрана именно сферическая форма? Ответ связан с принципом построения камеры Шмидта: широкоугольный телескоп получается при освещении сферического зеркала коллимированными световыми пучками, проходящими через центр кривизны этого зеркала. Как и в оригинальной системе Шмидта, здесь нужно исправить сферическую аберрацию, вносимую третьим зеркалом, для чего Пол предложил сделать вторичное зеркало тоже сферой. Таким образом, входная пара зеркал типа параболаид + сфера в телескопе Пола–Бэкера сжимает входной пучок, обеспечивая телескопу большую апертуру, и главное – имитирует корректор Шмидта, позволяя реализовать широкое поле зрения. В рассчитанном нами примере такой системы, показанном на рис. 18, зеркала описываются коническими сечениями, близкими к сочетанию параболаида с двумя сферами.

Все же двухзеркальная версия корректора Шмидта не вполне соответствует ее исходному варианту в виде ретушированной к поверхности 4-го порядка стеклянной пластины, поэтому в оптимизированной системе Пола–Бэкера по мере увеличения поля зрения форма всех трех зеркал все далее отступает от сочетания парабо-

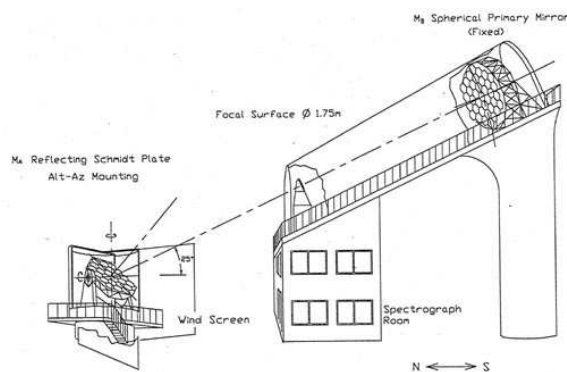


Рис. 20. Зеркальная камера Шмидта, создаваемая в рамках проекта LAMOST.

лоид + сфера + сфера для осевого объекта. Уиллстроп предложил удлинить систему, сделав отверстие в главном зеркале, а также добавил в уравнения поверхностей всех зеркал асферики высокого порядка. Он назвал получившуюся систему *телескопом Мерсенна-Шмидта*.

Схема LSST (рис. 19) дополняет телескоп Мерсенна-Шмидта трехлинзовым корректором поля диаметром 1.34 м с существенно асферическими поверхностями (Эйнджел и др. 2000, Сеппала 2002). В целом изготовление и эксплуатация телескопа представляются исключительно сложным делом.

6.2. Проект LAMOST

Схема Мерсенна-Шмидта имеет целью создать *осевую* зеркальную версию оригинальной камеры Шмидта; как мы видели, для этого необходимо не менее трех зеркал. Между тем давно известна двухзеркальная такая версия, непосредственно воплощающая принцип Шмидта. Прозрачная коррекционная пластина заменяется в ней planoидным зеркалом, поверхность которого по-прежнему задается асферикой 4-го порядка. Однако при этом, во избежание экранирования поля зрения сферическим главным зеркалом, приходится наклонять коррекционное зеркало и придавать ему форму, не обладающую круговой симметрией. Несмотря на столь сложный рельеф поверхности коррекционного зеркала, небольшие такие системы были изготовлены (Эпштейн 1967).

Находящийся в стадии реализации китайский проект LAMOST (Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope) предусматривает создание зеркальной камеры Шмидта с эффективной апертурой 4 м и полем зрения диаметром 5° . Как показывает рис. 20, неподвижное главное зеркало «смотрит вниз» на расположенное в его центре кривизны коррекционное зеркало. При смещении объектов вследствие суточного вращения Земли коррекционное зеркало должно не только поворачиваться как целое, но и менять свою форму: система является не просто внеосевой, но в ней со временем изменяется угол между осями обоих зеркал! Поэтому коррекционная пластина состоит из 24-х гексагональных управляемых элементов; большие размеры сферического главного зеркала побудили сделать его также многоэлементным. В результате простая по заложенной в ней идее оптическая схема воплощается в технически очень сложный телескоп.

7. Заключительные замечания

Вернемся к диаграмме *поле зрения – диаметр апертуры*, представленной на рис. 5. Теперь нам понятны трудности, с которыми приходится сталкиваться по мере увеличения эффективности обзора. Проекты LSST и LAMOST с примерно одинаковой эффективностью оптических систем $E \simeq 240 \text{ м}^2 \text{ гр}^2$ бросают вызов возможностям современной технологии, что в конечном счете определяет весьма высокую стоимость телескопов. Поэтому аргументы в пользу сети телескопов с апертурой ~ 1.8 м, выдвигаемые авторами проекта Pan-STARRS, представляются достаточно убедительными. Однако и выбранная в Pan-STARRS оптическая схема телескопа, состоящая из элементов с существенно асферическими поверхностями, представляется нам не оптимальной: допуски системы столь жестки, что ее изготовление и эксплуатация исключительно трудны. По-видимому, в ряде отношений предпочтительнее строить обзорные телескопы диаметром 4–6 м согласно схемам с линзовым корректором в прямом фокусе и в выходном зрачке, примеры которых приведены в пп. 5.1 и 5.3. Эти системы позволяют реализовать поле зрения диаметром $2^\circ - 3^\circ$ достаточно простыми средствами, а телескоп Грегори с корректором в выходном зрачке вдобавок к простоте оптических поверхностей и компактен.

Приношу благодарность В.В. Бирюкову за стимулирующее суждение и полезные предложения.

Литература

- Белороссова Т.С., Максутов Д.Д., Мерман Н.В. и Соснина М.А., Изв. ГАО АН СССР No. 169, 114 (1961).
- Борн М., Вольф Э., Основы оптики (М.: Наука, 1970).
- Бэкер (J. Baker), IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. **5**, 261 (1969).
- Вилсон (R.N. Wilson), Reflecting Telescope Optics (Springer: 1996), v. I.
- Винн (C.G. Wynn), Astrophys. J. **152**, 675 (1968).
- Волосов Д.С., Методы расчета сложных фотографических систем (М.-Л.: ГИТТЛ, 1948).
- Ганн и др. (J.E. Gunn, W.A. Siegmund, E.J. Mannery, et. al), astro-ph/0602326 (2006).
- Кайзер и др. (N. Kaiser, H. Aussel, B. Burke, et. al.), SPIE Proc. 4836, 154 (2002).
- Корш (D. Korsch), Reflective Optics (San Diego: Academic Press, 1991).
- Ландсберг Г.С., Оптика (М.: Наука, 1976).
- Линден-Белл и Уиллстроп (D. Linden-Bell, R.V. Willstrop), Monthly Not. R.A.S. **351**, 317 (2004).
- Лэмpton и др. (M. Lampton, C. Akerlof, G. Aldering, et. al), SPIE Proc. No. 4849 (2002).
- Максутов Д.Д., Астрономическая оптика (М.-Л.: Гостехиздат, 1946).
- Пол (M. Paul), Rev. Opt. Theor. Instrum. **14**, 169 (1935).
- Решетников В.П., Успехи физ. наук **175**, 1163 (2005).
- Рэттен и ван Венруйж (H.G.J. Rutten, M.A.M. van Venrooij), Telescope Optics (Richmond: Willmann-Bell, 1999).
- Рихтер и Слефогт (R. Richter, H. Slevogt), German Patent Application 1941, No. Z 26592 IXa 42h.
- Сеппала (L.G. Serrala), Proc. SPIE 4836-19 (2002).
- Теребиж В.Ю., Изв. Крымской астрофиз. obs. **97**, 101 (2001).
- Теребиж В.Ю., AURA-СТИО Report No. C10430A (2003); Письма в Астрон. журн. **30**, 200 (2004).
- Теребиж В.Ю., Современные оптические телескопы (М.: Физматлит, 2005а).
- Теребиж В.Ю., Письма в Астрон. журн. **31**, 129 (2005б).
- Теребиж В.Ю., astro-ph/0605361 (2006); Астрон. журн. **84**, No. 2 (2007).

- Уиллстроп (R.V. Willstrop), *Monthly Not. RAS* **210**, 597 (1984).
- Ходапп и др. (K.W. Hodapp, U. Laux, W. Siegmund), Pan-STARRS Document Control PSDC-300-001-00 (2003).
- Шварцшильд (K. Schwarzschild), *Astronomische Mittheilungen der Koniglichen Sternwarte zu Gottingen* **10**, 3 (1905, Part II). Reprinted: *Selected Papers on Astronomical Optics*, D.J. Schroeder (ed.), SPIE Milestone Series **73**, 3 (1993).
- Шмидт (B. Schmidt), *Mitteilungen Hamburger Sternwarte in Bergedorf* **7**(36), 15 (1930). Reprinted: *Selected Papers on Astronomical Optics*, D.J. Schroeder (ed.), SPIE Milestone Series **73**, 165 (1993).
- Шредер (D.J. Schroeder), *Astronomical Optics* (San Diego: Academic Press, 2000).
- Эйнджел и др. (J.R.P. Angel, M. Lesser, R. Sarlot, T. Dunham) *ASP Conf. Ser.* **195**, 81 (2000).
- Эпштейн (L.C. Epstein), *Sky and Telescope* **33**, April, p. 204 (1967).