

## 2. ОСНОВНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

### § 1. Оптические телескопы.

Наблюдения невооруженным глазом сильно ограничены как по проникающей силе (видны звезды до  $6.0^m$  и не больше 5 протяженных объекта) так и по разрешению ( $\sim 1'$ ). Телескоп улучшает и то, и другое. Телескоп выполняет еще и другие функции, основные перечислены ниже:

- (i) Увеличение угла зрения (увеличение видимых размеров объекта и разрешения близко расположенных объектов) – по существу приближение объекта.
- (ii) Увеличение плотности потока (и, тем самым, проникающей силы).
- (iii) Направление излучения от объекта на приемник,

При астрофизических наблюдениях третья функция является не менее важной, чем две первые.

а) Увеличение телескопа и масштаб камеры.

Рассмотрим (i). Рис.2.1 показывает, что одной линзы, вообще говоря, достаточно для увеличения угла зрения. Пусть  $ss'$  изображение в фокальной плоскости линзы объекта, видимого невооруженным глазом под углом  $\alpha$ . Оно рассматривается глазом с расстояния ясного зрения ( $l = 25 \text{ см}$ ) и видно под углом  $\beta$ . Имеем  $ss' = F \operatorname{tg} \alpha = l \operatorname{tg} \beta$  и  $\operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha = F / l$  (здесь  $F$  – фокусное расстояние линзы). Если  $F > 25 \text{ см}$ , то увеличение

$$G = \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha = F / l > 1.$$

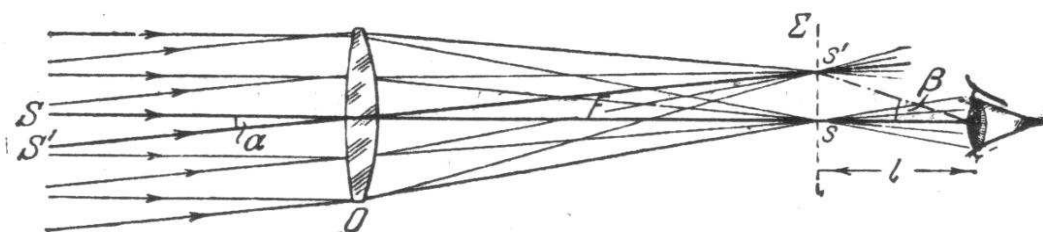


Рис. 2.1. Увеличение одиночной линзы.

Использование одной линзы, однако, неудобно, так как для получения большого увеличения надо иметь большое  $F$  и мало поле зрения. Надо приблизить зрачок к изображению, что достигается с помощью второй линзы (рассматриваем  $SS'$  в лупу). В телескопе первая линза – это объектив телескопа, вторая носит название *окуляр*. Поскольку глаз человека без напряжения хрусталика настроен (аккомодирован) на бесконечность (т.е. на параллельный пучок), окуляр располагают таким образом, чтобы его фокус совпадал с фокусом объектива. Это будет афокальная система.

Телескоп, использующий линзовую оптику, называется рефрактором. Первые рефракторы были созданы в самом начале XVII века. В середине XVIII в. Ньютон указал, что линзовый объектив может быть заменен вогнутым зеркалом, такие телескопы носят название *рефлекторы*. Возможны и комбинированные зеркально-линзовые системы.

На рис 2.2 представлено три типа афокальных систем: рефрактор, рефлектор в классической схеме Ньютона (вторичное плоское зеркало просто выводит пучок из трубы) и система Мерсенна, состоящая из двух софокусных зеркал (второе зеркало играет роль окуляра).

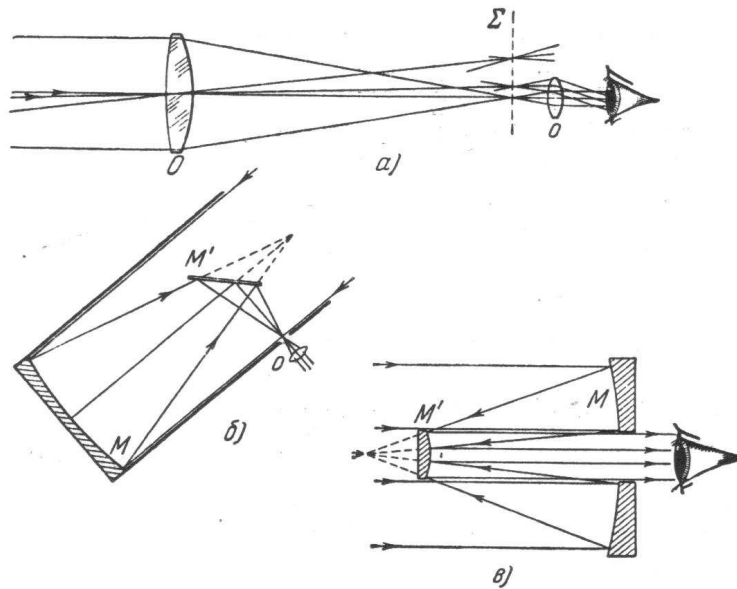


Рис. 2.2. Три типа афокальных систем.

Как видно из рис. 2,2, поле зрения телескопа все же мало, если глаз не располагается вблизи окуляра. Рис.2.3 поясняет, где должен быть расположен глаз для того, чтобы поле зрения имело наибольшие размеры.

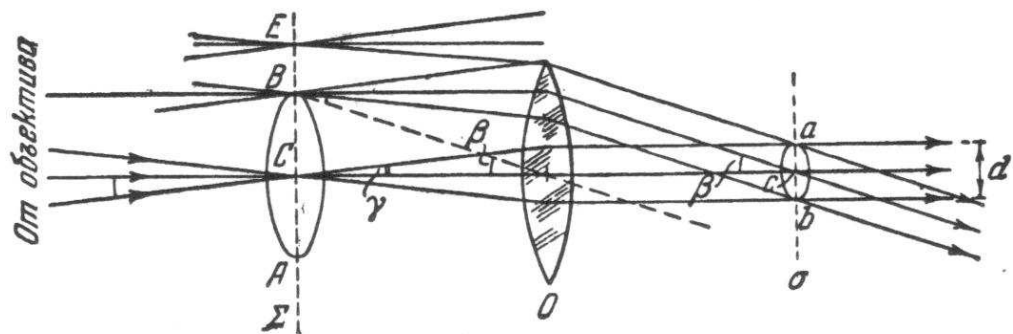


Рис. 2.3. Выходной зрачок.

В плоскости  $\sigma$  в пределах кружка, имеющего диаметр  $ab$ , пересекаются все параллельные пучки, исходящие из точек фокальной плоскости  $\Sigma$  объектива, лежащих внутри круга  $AB$ . Если объектив образует изображение звезды вне этого круга, то часть лучей пройдет мимо окуляра, т. е. будет иметь место *виньетирование* пучка – часть световой энергии, собранной объективом, будет потеряна. Круг  $AB$  определяет размер невиньетированного поля. Здесь можно поставить круглую диафрагму.

Кружок  $ab$  называется *выходным зрачком* телескопа. Из рис.2.3 видно, что он является действительным изображением *входного* зрачка телескопической системы (которым является объектив или зеркало телескопа), освещенного светом всех тех объектов, изображения которых помещаются в поле зрения  $AB$  телескопа. Если в плоскости  $\Sigma$  поставить диафрагму с очень малым отверстием, выделяющим изображение только одного объекта, то количество света в окулярном зрачке будет определяться освещением объектива именно этим объектом и только им. Это обстоятельство используется в электрофотометрии, на входе электрофотометра всегда стоит устройство, позволяющее менять его входную диафрагму.

Обозначим через  $f$  фокусное расстояние окуляра, а через  $R$  и  $D$  – радиус и диаметр объектива. Как видно из рис.2.3, отрезок  $CB$ , как и аналогичный ему отрезок  $ss'$  на рис. 2.1, равен с одной стороны  $F \operatorname{tg} \alpha$ , а с другой  $f \operatorname{tg} \beta$ , и увеличение  $G = F / f$ . Диаметр

окулярного зрачка  $d$  определится как  $2f \operatorname{tg} \gamma$ , но  $\operatorname{tg} \gamma = R / F$  и, следовательно,  $d / D = f / F$ , так что

$$G = F / f = D / d. \quad (2.1)$$

Обозначим диаметр зрачка глаза через  $\delta$ , тогда наименьшее допустимое при данном объективе увеличение будет  $g = D / \delta$  (должно быть  $d \leq \delta$ , иначе свет будет потерян). Увеличение  $g$  называется равнозрачковым. В ночных условиях  $\delta \approx 6 \text{ мм}$ . Окуляр, дающий равнозрачковое увеличение, имеет фокусное расстояние  $f = b \text{ м}$ , где через  $m$  обозначено отношение  $F / D$ . Обратная величина

$$A = D / F \quad (2.2)$$

носит название *относительное отверстие* телескопа. Окуляр в виде простой линзы дает малое поле зрения. Поэтому используются сложные окуляры, позволяющие получить поле зрения до  $40^\circ$  (например, окуляры Гюйгенса, Рамсдена и ортоскопический).

Понятие увеличение имеет смысл только при визуальном использовании телескопа. Во всех остальных случаях важную роль играет масштаб изображения, показывающий какой линейный размер в фокальной плоскости будет соответствовать угловому расстоянию на небе. Из рис. 2.4 следует следующее соотношение

$$l = F \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.3)$$

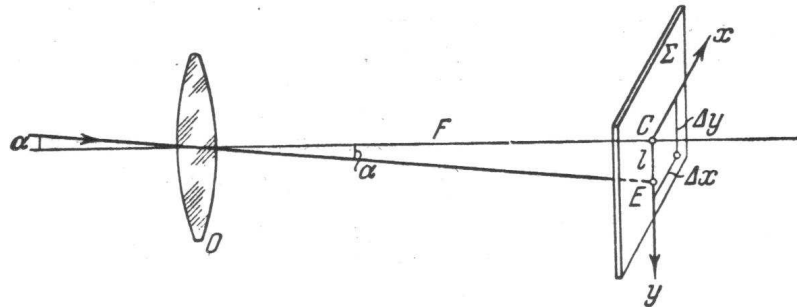


Рис. 2.4. Масштаб камеры.

Поскольку  $\operatorname{tg} \alpha = \alpha'' / 206265$ , из (2.3) следует, что у телескопа с фокусным расстоянием  $F=206$  см масштаб будет  $100''$  в 1 мм. Достаточно запомнить это число. При других значениях фокусного расстояния масштаб будет пропорционален  $206 / F$ .

б) Разрешающая сила телескопа.

Когда плоская волна от бесконечно удаленного источника света попадает на объектив (зеркало), на краю его возникают дифракционные явления, в результате чего в фокусе объектива получается уже не точечное изображение светящейся точки, но сложная дифракционная картина – центральное изображение окружено дифракционными кольцами. Теория дифракции показывает, что радиус первого темного кольца, т.е. размер изображения, будет составлять

$$a \text{ [радиан]} = 1.22 (\lambda / D), \quad (2.4)$$

где  $\lambda$  – длина волны света, а  $D$  – диаметр входного отверстия. Очевидно, линейный радиус кольца в фокальной плоскости объектива будет  $a = Fa = 1.22 \lambda (F/D)$ . Для углового радиуса в секундах дуги получим, если выражать  $\lambda$  в  $\mu\text{м}$ , а  $D$  в  $\text{см}$ :  $\alpha'' = 1/40 (\lambda / D)$ . В идеальном случае в дифракционные кольца уходит около 5% света (см. рис. 2.5).

Явление дифракции кладет предел *разрешающей силе* телескопа. Если угловое расстояние  $\Delta$  между двумя звездами меньше  $2\alpha$ , то их дифракционные диски будут частично накладываться друг на друга. При каком-то  $\Delta$  уже нельзя будет сказать, одиночная ли это звезда или двойная. Опыт показывает, что это будет при  $\Delta = 0.85\alpha$ , т.е. при

$$\Delta'' = 12/D[\text{см}], \quad (2.5)$$

если блеск звезд одинаков и при большем  $\Delta$ , если он неодинаков.

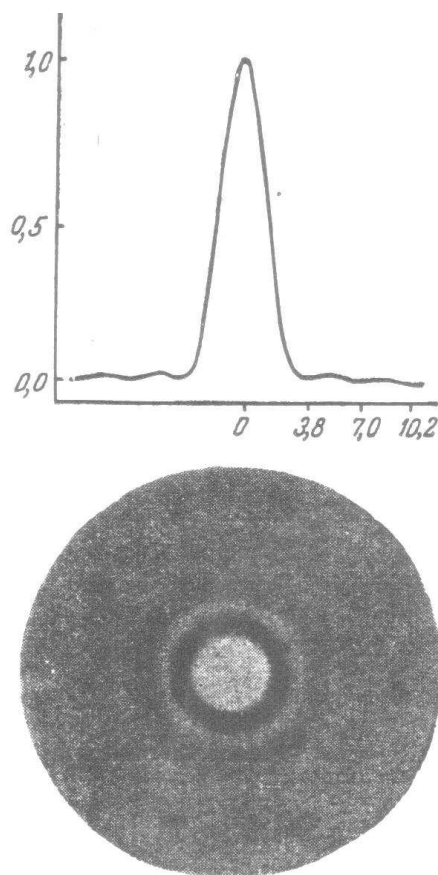


Рис. 2.5. Дифракционная картина от круглого входного отверстия.  
Наверху распределение яркости вдоль диаметра.

Формула (2.5) определяет теоретическую разрешающую силу телескопа. На практике, однако, разрешающая сила сильно ухудшается из-за влияния земной атмосферы. Размеры обусловленного ею турбулентного диска, особенно в случае крупных телескопов, где мал дифракционный диск, часто превышают размеры дифракционного диска. И именно турбулентный диск определяет реальную разрешающую силу. Поэтому так важно устанавливать крупные телескопы в местах с хорошим астроклиматом. Размер турбулентного диска, зависящий от состояния атмосферы, может сильно меняться. На рис.2.6 дается частота встречаемости размеров турбулентного диска для обсерватории Маунт Паломар. В среднем качество изображения  $2''$ - $3''$  и только очень редко оказывается  $<1''$ . Таким образом, астроклиматические условия обсерватории оставляют желать лучшего.

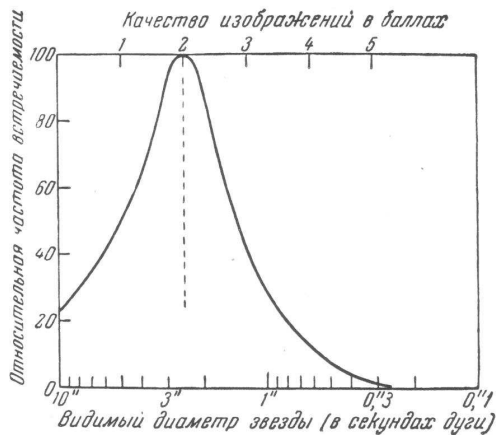


Рис.2.6. Частота встречаемости разных турбулентных дисков в обсерватории Маунт Паломар.

в) Оптическая мощь телескопа.

Рассмотрим теперь (ii) – увеличение проникающей силы телескопа (его оптическую мощь). В случае визуального использования телескопа при рассмотрении звезд можно считать, что размер изображения звезды на сетчатке глаза практически не изменится (уменьшение размера дифракционного диска компенсируется aberrациями глаза). Но поток, попадающий в глаз, увеличится в  $(D/\delta)^2(1-k)$  раз, где множитель  $(1-k)$  учитывает потери света в оптике. Во столько же раз увеличится освещенность на сетчатке. После перехода к звездным величинам получим

$$m_m = m_o - 5 \lg(D/\delta) - 2.5 \lg(1-k),$$

т.е. выигрыш будет  $5 \lg(D/\delta) + 2.5 \lg(1-k)$ . Считая, что для невооруженного глаза предельная звездная величина  $m_o = 6.5^m$ , а  $k = 0.5$  и  $\delta = 6$  мм, получим для 1-м телескопа  $m_{np} = 16.86^m$ , для 5-м -  $m_{np} = 20.35^m$ .

Расчет показывает, что в случае протяженного объекта отношение освещенностей на сетчатке глаза при использовании телескопа и без него дается выражением  $E_m/E_o = (d/\delta)^2(1-k)$ , где  $d$  – диаметр выходного зрачка телескопа. Но всегда  $d \leq \delta$ . В самом выгодном случае ( $d = \delta = 6$  мм) яркость *уменьшается* в  $(1-k)$  раз. При уменьшении  $d$ , что соответствует росту увеличения телескопа, яркость будет уменьшаться. Например, при  $d = 2$  мм будет  $B_m / B_o = 0.055$ . Однако из-за увеличения размеров объекта в телескоп можно увидеть большее количество протяженных объектов, нежели невооруженным глазом.

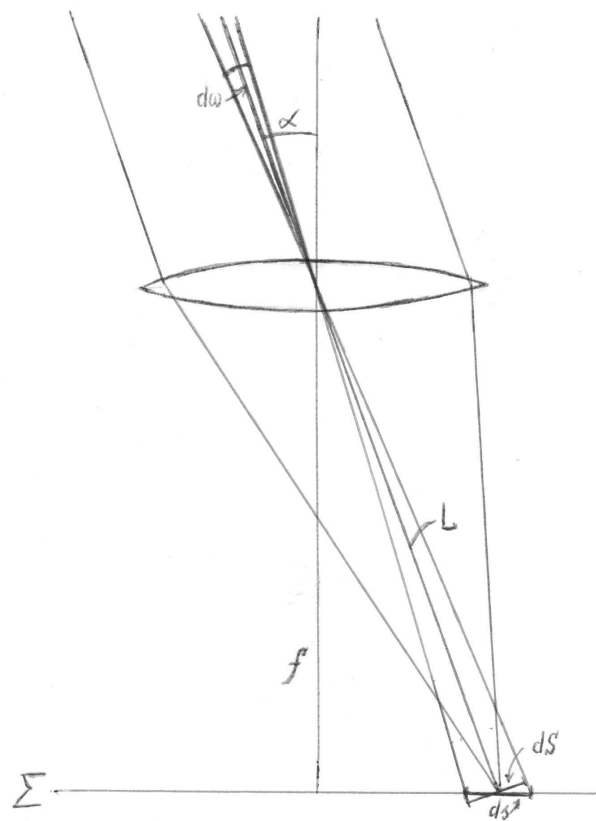


Рис 2.7. К расчету освещенности от протяженного объекта в фокальной плоскости камеры.

Найдем, какова будет освещенность, создаваемая протяженным объектом в фокальной плоскости камеры (см. рис.2.7). Если объект яркости  $B$  виден под углом  $d\omega$ , то освещенность от него на объективе будет  $E_o = B d\omega$ . Пусть объект расположен под углом  $\alpha$  к оптической оси. Тогда площадь входного отверстия для него будет равна  $(\pi D^2/4) \cos \alpha$ , где  $D$  – диаметр телескопа, и поток, вошедший в телескоп, будет  $F = E_o(\pi D^2/4) \cos \alpha$ . С учетом потерь света в оптике полезный поток будет  $F = B d\omega (\pi D^2/4) \cos \alpha (1-k)$ . В

фокальной плоскости  $\Sigma$  поток распределится по площадке  $ds = dS/\cos\alpha$ . Как видно из рисунка,  $dS = L^2 d\omega = (f/\cos\alpha)^2 d\omega$ , где  $f$  – фокусное расстояние камеры. Поэтому будем иметь  $ds = f^2 d\omega / \cos^3\alpha$  и для освещенности в фокальной плоскости камеры  $E = F / ds$  будет:

$$E = B(\pi/4)(D/f)^2 \cos^4\alpha(1-k). \quad (2.6)$$

В центре поля зрения ( $\alpha = 0$ ) будет  $E = B(\pi/4)(D/f)^2(1-k)$ . Таким образом, освещенность пропорциональна квадрату относительного отверстия  $D/f$  и падает с удалением от центра пропорционально  $\cos^4\alpha$ . Величина  $A^2 = (D/f)^2$  называется *светосилой* телескопа. Очевидно, что для наблюдений объектов малой поверхностной яркости нужны как можно более светосильные телескопы.

Для точечных объектов (звезд) количество собираемого объективом света  $\sim D^2$ , размер дифракционного диска  $\sim D^{-2}$ , и казалось бы освещенность должна быть  $\sim D^4$ . Однако не дифракционный диск определяет размер изображения (это либо турбулентный диск, либо рассеяние в эмульсии при фотографических наблюдениях), и сохраняется пропорциональность  $D^2$ .

При фотоэлектрических наблюдениях в фокальной плоскости ставится диафрагма и пропущенный ею свет падает на приемник. Если наблюдается точечный объект, то весь собранный свет падает на приемник и осуществляется пропорциональность  $D^2$ . В случае протяженного объекта в фокальной плоскости ставится диафрагма площадью  $s$ . Освещенность в фокальной плоскости дается формулой (2.6) при  $\alpha = 0$ . Поэтому поток, падающий на приемник, будет равен  $B(\pi/4)(D/f)^2(1-k)s$ . Итак, он пропорционален светосиле и площади диафрагмы. Ее размер следует подбирать оптимальным образом, чтобы не потерять разрешение деталей.

Что касается коэффициента  $k$ , то в рефракторах он определяется отражением света от линз и поглощением света в толще линзы. Последнее сильно зависит от материала линзы, например, тяжелый флинт практически не пропускает ультрафиолетовое излучение. Кривая пропускания света оптикой рефрактора приведена на рис. 2.8. В видимой области пропускание около 80%, но оно очень резко падает в ультрафиолете.

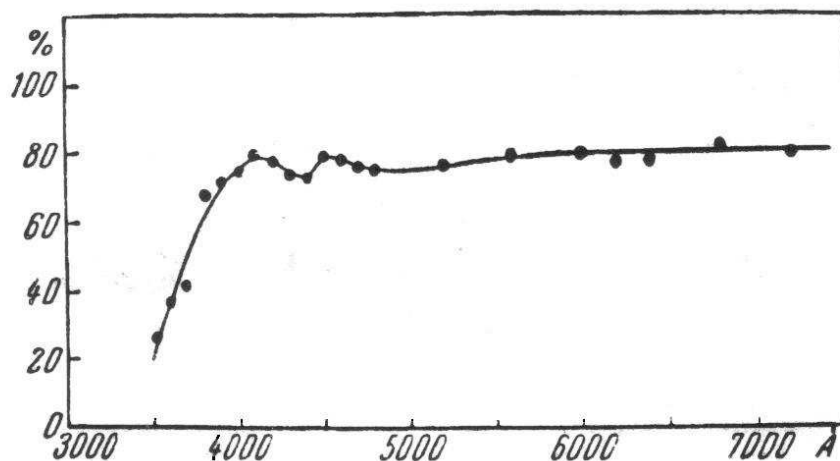


Рис.2.8. Кривая пропускания оптикой рефрактора.

В случае рефлекторов потери связаны с неполным отражением света поверхностью зеркала. Первоначально использовались медные зеркала, затем стеклянная поверхность покрывалась серебряной пленкой, в настоящее время зеркала алюминировуют. Коэффициент отражения у таких зеркал велик, и отражающие свойства мало ухудшаются в течение нескольких лет. Зеркало приходится заново алюминировать примерно раз в 5 лет. Рис.2.9 иллюстрирует кривые отражения от зеркал. Важно, что у алюминированного зеркала коэффициент отражения не падает в ультрафиолетовой области спектра.

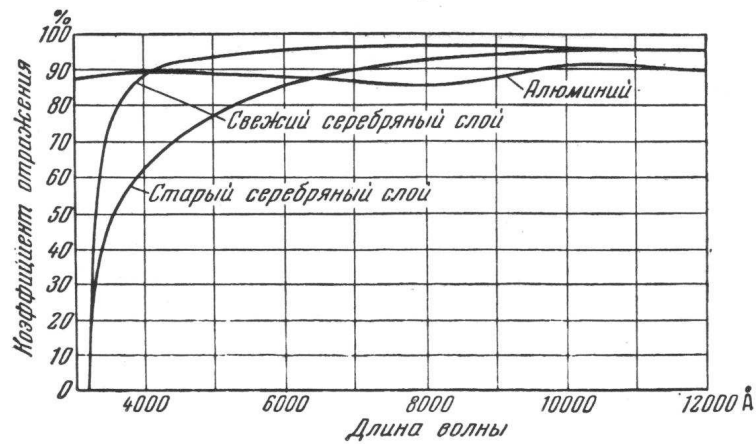


Рис.2.9. Кривые отражения от зеркал.

г) Аберрации оптических систем.

Если отвлечься от дифракционных явлений, то хотелось бы иметь оптическую систему, которая преобразует плоский фронт, идущий от бесконечно удаленного точечного источника, в сферический, сходящийся в одной точке – стигматическое изображение, гомоцентрический пучок (рис 2.10а). Простая линза со сферическими поверхностями не выполняет эту функцию; она преобразует плоский фронт не в сферический, но во фронт с некоторой другой поверхностью (рис.2.10б). В результате лучи, проходящие разные зоны линзы, сходятся в точку на разных расстояниях от нее. Точечного изображения не получается, есть лишь область, где сечение лучей имеет минимальный размер – кружок наименьшего рассеяния  $\gamma$ . Вносимые искажения носят название *аббераций*. Рис. 2.10б иллюстрирует *сферическую аберрацию* одиночной линзы.

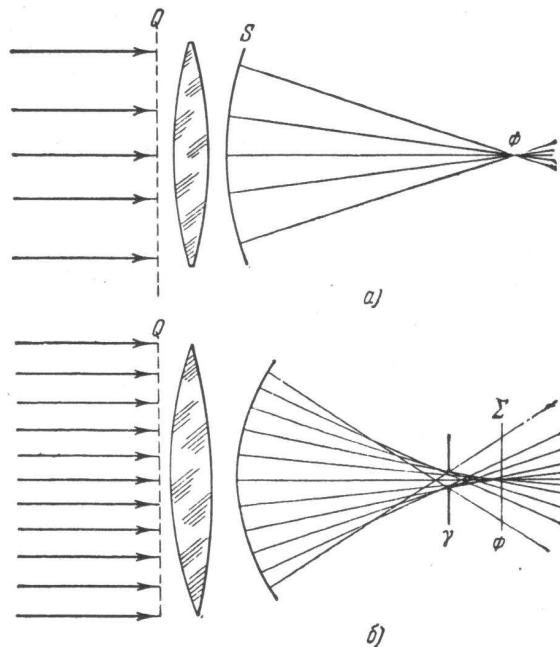


Рис. 2,10. Гомоцентрический (а) и негомоцентрический (б) пучки. Нижний рисунок иллюстрирует сферическую аберрацию простой линзы

Аберрации можно разделить на физические, связанные с особенностями прохождения света через оптическую систему (они есть только у рефракторов) и геометрические, связанные с формой поверхностей оптических деталей. К физическим аберрациям одиночной линзы относится *хроматическая аберрация*, вызванная тем, что коэффициент преломления света в стекле зависит от длины волны. В результате лучи разных длин волн

собираются в точку на разных расстояниях от линзы (рис.2.11). За фокальную плоскость  $\Sigma$  принимается область кружка наименьшего рассеяния, где все лучи перемешены, при смещении от плоскости  $\Sigma$  видно нечеткое окрашенное изображение. Для того, чтобы размер кружка в плоскости  $\Sigma$  не был больше дифракционного кружка необходимо, чтобы фокусное расстояние  $F$  объектива, изготовленного из крона, было не меньше, чем  $F[\text{см}] \approx 18.6 D^2$  ( $D$  в см). Для  $D = 10$  см должно быть  $F = 18.6$  м. Работать с таким телескопом невозможно.

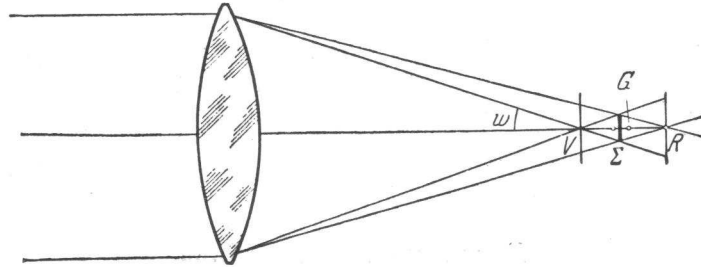


Рис.2.11. Хроматическая aberrация простой линзы.

Способ уменьшения хроматической aberrации (ахроматизация) был предложен в середине XVIII века. Объектив должен содержать две линзы из разных сортов стекла. Это позволяет свести в одно положение фокусы для двух длин волн, тем самым существенно уменьшить хроматизм. Ахроматические дублеты обладают остаточной хроматической aberrацией, но с ними уже можно работать. Соотношение между фокусным расстоянием и диаметром объектива ахромата  $F[\text{см}] \approx 1.12 D^2$  ( $D$  в см). Остаточная aberrация будет еще меньше, если использовать три линзы из разного стекла; такие объективы называются апохроматами. На рис. 2.12 приведены хроматические кривые ахроматов и апохромата.

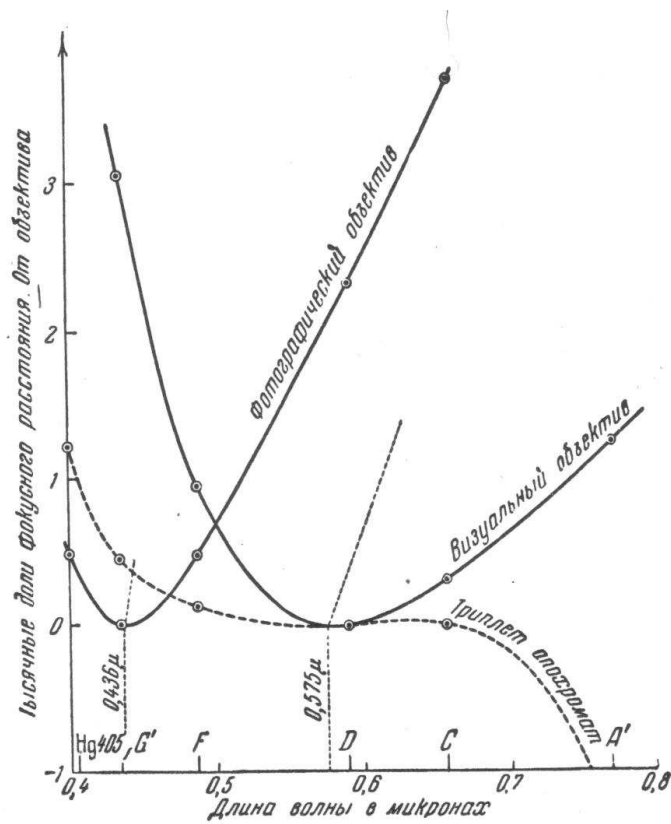


Рис.2.12. Хроматические кривые двух ахроматов и апохромата.



Геометрические aberrации могут быть осевыми (светящаяся точка находится на оптической оси) и внеосевыми (точка не лежит на оптической оси). К осевым относится сферическая aberrация. Ею обладает линза со сферическими поверхностями (см. рис.2.10б) и сферическое зеркало. Разница фокусных расстояний для осевых лучей и лучей, проходящих через края линзы есть продольная сферическая aberrация; она пропорциональна кубу относительного отверстия ( $\sim A^3$ ). В случае линзы устранение aberrации может быть достигнуто ретушью поверхностей (что делается в исключительных случаях). Что касается зеркала, то сферическую aberrацию устраняет переход от сферического зеркала к параболическому. Лучи падающего на параболическое зеркало параллельного пучка от расположенной на оси светящейся точки, собираются в фокусе параболы.

К внеосевым aberrациям относятся кома, астигматизм, кривизна поля и дисторсия. Причина появления комы лежит в том, что после преломления (отражения) сходящийся пучок лишен осевой симметрии, так что лучи, прошедшие разные зоны объектива, сойдутся на разных расстояниях от главного фокуса. Схема образования комы представлена на рис.2.13.

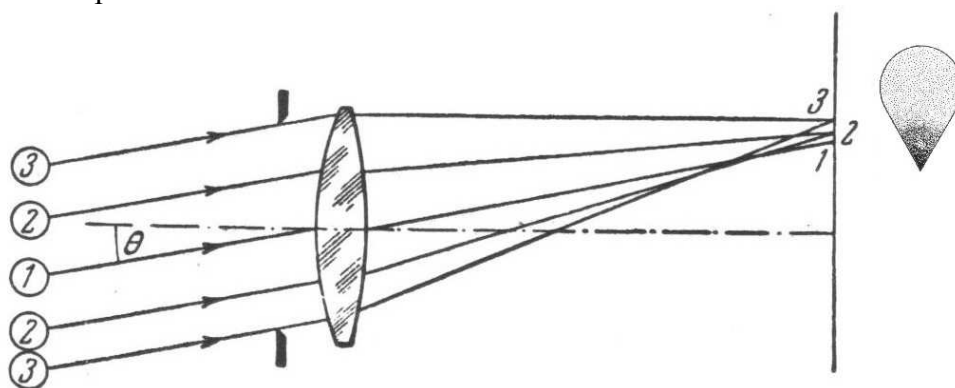


Рис.2.13. К образованию комы; справа вид изображения, отягченного комой.

В результате вместо точечного изображения возникает фигура, изображенная в правой части рис.2.13. Размеры комы пропорциональны квадрату относительного отверстия и углу  $\theta$  между направлением падающего пучка и оптической осью ( $\sim A^2\theta$ ). Исправление комы в рефракторах может быть достигнуто созданием объективов из нескольких линз. Можно рассчитать объективы, в которых будет устранена и сферическая aberrация и кома (разумеется, и хроматизм). Такие объективы называются *апланатами*. На рис.2.14 приведена схема апланата Петцваля, рассчитанного им в 1841 году.

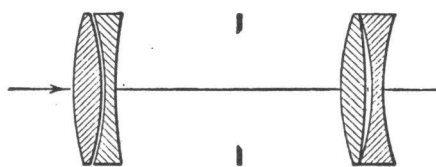


Рис.2.14. Схема объектива Петцваля.

В случае параболического зеркала кома очень велика, так что рабочее поле оказывается малым. Например, у 5-м зеркала телескопа обсерватории Маунт Паломар хорошее поле составляет всего 12 мм ( $\approx 2.5'$ ). Уменьшение комы в рефлекторах достигается введением в пучок вблизи от фокуса (чтобы уменьшить экранирование) афокальных линз Росса, что позволяет значительно увеличить хорошее поле ценой некоторого хроматизма. Россовская пластинка увеличивает поле 5-м телескопа до 15 см. Поскольку кома пропорциональна  $A^2$ , у мало светосильных систем она не вредна.

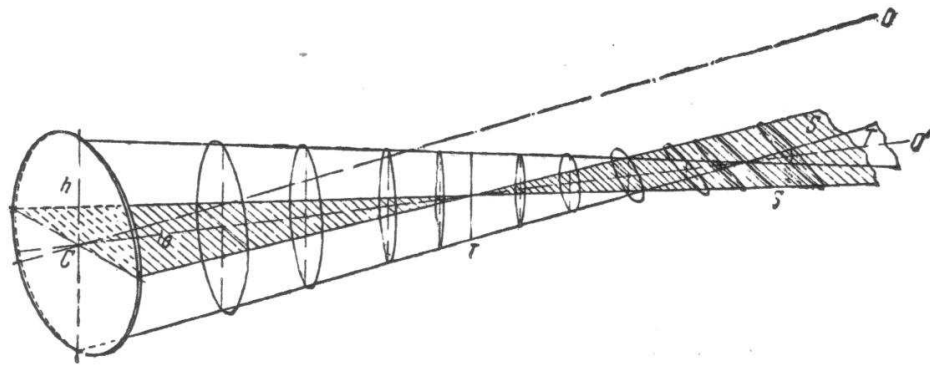


Рис.2.15. Возникновение астигматизма в наклонном пучке

Появление астигматизма иллюстрирует рис.2.15. Здесь оптическая ось объектива  $o$ , свет распространяется вдоль направления  $o'$ , составляющего с направлением  $o$  угол  $\theta$ . Плоскость, содержащую оси назовем меридиональной, перпендикулярную ей плоскость – сагиттальной. После преломления в линзе (или отражения от зеркала) лучи, идущие в меридиональной и сагиттальной плоскостях, сойдутся на разных расстояниях от линзы. Посередине между ними будет кружок наименьшего рассеяния. Кроме того, фокусы для разных углов  $\theta$  будут располагаться на разных расстояниях от объектива (см. рис.2.16),

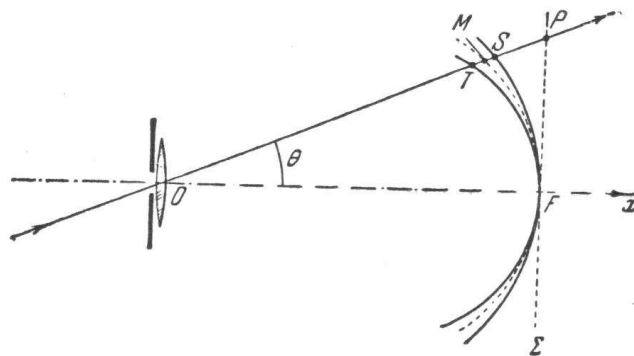


Рис.2.16. Кривизна поля.

Это отклонение носит название кривизны поля. В фокальной плоскости изображения окажутся расфокусированными. И астигматическая разность и кривизна поля пропорциональны относительно отверстию и квадрату угла  $\theta$  ( $\sim A\theta^2$ ). В объективах, состоящих из нескольких линз, могут быть устранены одновременно и кома, и астигматизм. Это осуществлено, например, в триплете Кука, являющимся апланатом-анастигматом. У параболических зеркал астигматизм гораздо меньше комы и существенной роли не играет.

Указанные aberrации носят название aberrаций третьего порядка (по сумме показателей степени в их зависимости от относительного отверстия и угла  $\theta$ ). К aberrациям третьего порядка относится и дисторсия (она  $\sim \theta^3$ ), состоящая в том, что оптическая система собирает лучи в точку, которая, однако, отклонена от направления  $\theta$ . В результате искажается вид изображения (см. рис 2.17), в зависимости от направления отклонения дисторсия бывает подушкообразной (сверху) или бочкообразной (внизу). Посередине дана фигура, не искаженная дисторсией.

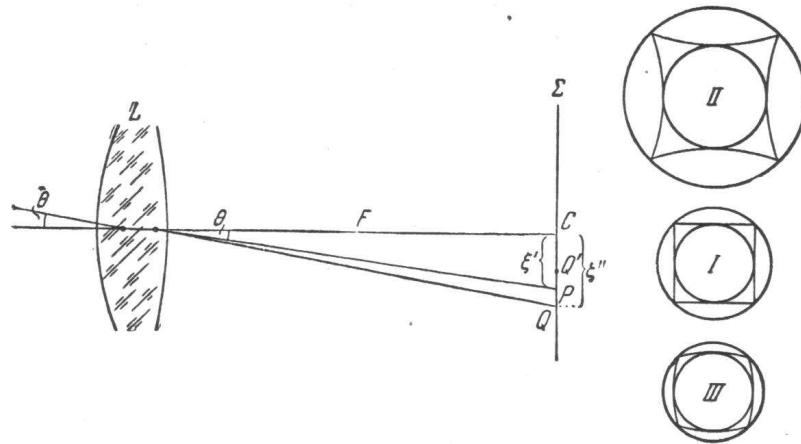


Рис 2.17. Дисторсия; искаженные подушкообразной (сверху) и бочкообразной (снизу) дисторсией изображения объекта, находящегося в середине.

Резюмируем данные об aberrациях линзовых (рефракторов) и зеркальных (рефлекторов) телескопов. К плюсам рефракторов можно отнести возможность осуществления многолинзовых систем с большим хорошим полем. Минусом является наличие хроматизма и невозможность изготовления линзовых объективов большого размера (из-за трудностей стекловарения не удается создать большой однородный блок, что необходимо, поскольку свет проходит сквозь линзы). Самый большой Йеркский рефрактор имеет диаметр 102 см. Громадным преимуществом рефлекторов является отсутствие хроматизма. Вторым важнейшим их преимуществом является возможность изготовления зеркал большого размера. Для зеркала не нужен однородный блок стекла, поскольку свет через материал зеркала не проходит (материал может быть вообще непрозрачным, лишь бы он хорошо поддавался полировке). Имеются телескопы с зеркалами размером в 8 - 9 метров. Минусом рефлекторов является трудность расчета и изготовления телескопов с большим полем.

Мы видели, что основной причиной малого поля у рефлекторов являются внеосевые aberrации. Возникает вопрос, а нельзя ли создать зеркальный телескоп, свободный от них. Очень большое поле, свободное от внеосевых aberrаций дают камеры Шмидта. Основная идея состоит в том, что если в центре кривизны сферического зеркала поставить диафрагму несколько меньшего размера, то все пучки, прошедшие через эту диафрагму и попавшие на зеркало оказываются осевыми и получающееся в фокусе зеркала изображение будет свободно от внеосевых aberrаций. Соотношение между размерами зеркала и входного отверстия определяет неввиньетированное поле.

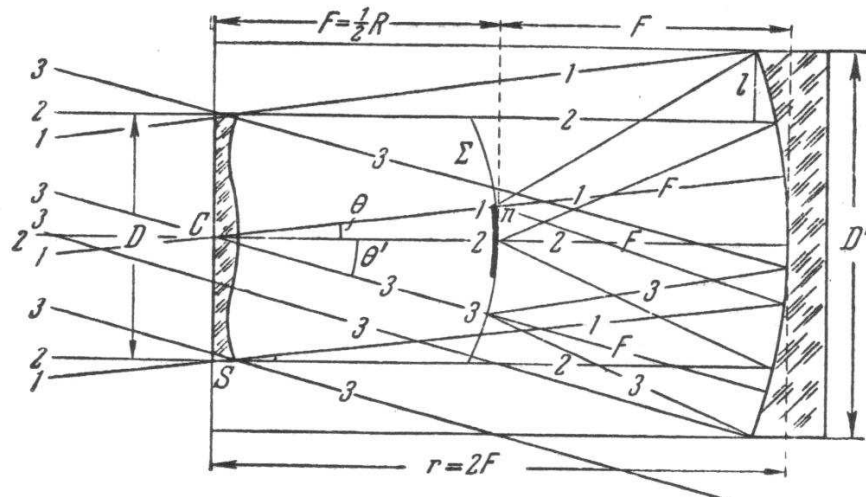


Рис 2.18. Схема камеры Шмидта

Фокальная поверхность  $\Sigma$  (см. рис.2.18) будет сферической, а изображения отягчены сферической аберрацией. Расчет показывает, что поставленная во входном отверстии стеклянная пластинка, одна из поверхностей которой есть поверхность, образованная вращением кривой четвертого порядка, полностью компенсирует сферическую аберрацию, не внося заметного хроматизма, поскольку она очень тонкая и практически афокальная.

Шмидтовские камеры дают хорошее поле размером в несколько градусов. Кривизну поля можно ликвидировать с помощью линзы Пиацци-Смита, расположенной вблизи от фокальной поверхности и также не вносящей заметного хроматизма. Камеру Шмидта можно отнести к зеркально-линзовым системам. (По существу, параболическое зеркало с корректором Росса тоже зеркально-линзовая система.) Основное требование к таким системам состоит в том, чтобы линзовые детали не вносили заметного хроматизма, дабы не уничтожить основное преимущество рефлекторов.

Сферическое зеркало камеры Шмидта изготавливается без особого труда, но изготовить пластину может лишь искусный оптик. Размер пластины ограничивает размеры камер Шмидта. Самый большой шмидтовский телескоп - 48" камера обсерватории Маунт Паломар с размером поля  $6^\circ \times 6^\circ$ . С ней выполнен обзор всего неба, доступного в обсерватории Маунт Паломар (POSS). К недостаткам камер Шмидта относится большая длина трубы, вдвое превышающая фокусное расстояние; достоинством камер является несложность юстировки.

Еще одна возможность осуществления телескопа с большим полем – это менисковый телескоп Максутова, оптическая схема которого приведена на рис.2.19. В нем также используется сферическое главное зеркало, сферическая аберрация которого компенсируется сферической аберрацией мениска, также имеющего сферические поверхности. Расчет радиусов кривизны поверхностей мениска, его толщины и расстояния от зеркала позволяют уничтожить кому. Преимуществом менискового телескопа является простота изготовления оптики, однако юстировка телескопа сложна.

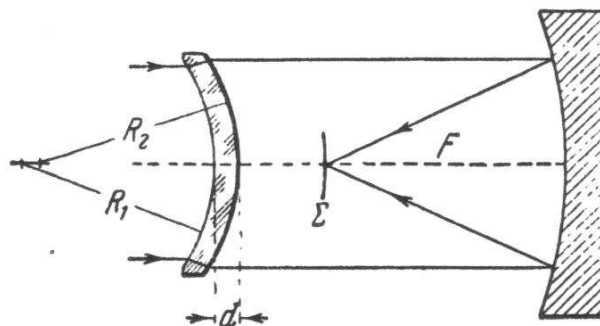


Рис 2.19. Оптическая схема менискового телескопа Максутова.

#### д) Классические схемы зеркальных телескопов.

Как уже отмечалось, параболическое зеркало дает анаберрационное изображение на оси. Поэтому первая классическая схема – это наблюдения в прямом (главном) фокусе параболического зеркала  $\Phi$  (см. рис. 2.20). Недостатком такой системы является трудность доступа к фокусу, находящемуся внутри трубы, и малое поле зрения из-за сильных внеосевых аберраций (комы). Коррекционные россовские пластинки отчасти компенсируют кому, увеличивая поле зрения. Вынесение фокуса за пределы трубы в положение  $\Phi^2$  может быть осуществлено помещением перед фокусом наклонного плоского зеркала (система Ньютона). В обоих случаях центральная часть главного зеркала экранируется, но экранируемая область по площади составляет лишь несколько процентов от полной площади зеркала. В области экранировки в главном зеркале делается отверстие, позволяющее выводить световой пучок при использовании дополнительных (вторичных)

зеркал за пределы трубы. (Экранирования можно избежать слегка наклоняя главное зеркало (система Цукки-Ломоносова-Гершеля). При этом пучок выводится из трубы, но наблюдатель должен находиться у верхней части трубы, что крайне неудобно; кроме того, ось зеркала наклонена к падающему пучку, что порождает внеосевые aberrации. Поэтому сейчас такая система не используется).

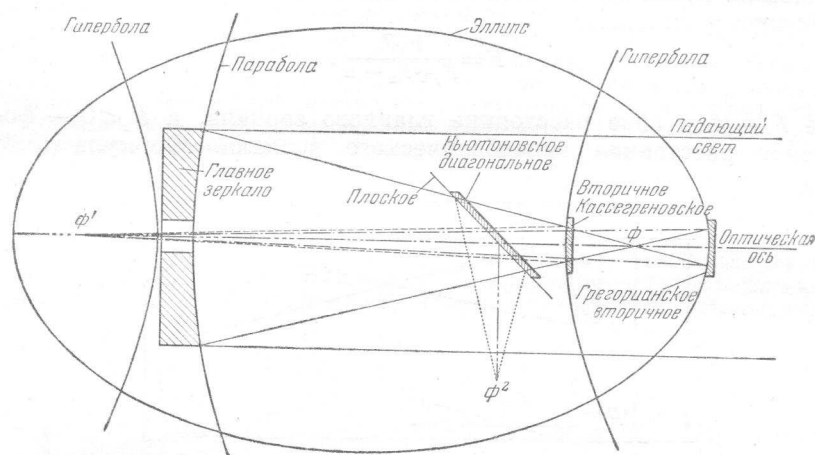


Рис 2.20. Классические схемы зеркальных телескопов.

Имеется две классические схемы выведения фокуса за пределы трубы через центральное отверстие – система Кассегрена и система Грегори. В первом случае перед главным фокусом  $F$  ставится выпуклое гиперболическое зеркало. Если фокус гиперболы совпадает с фокусом параболы, то отраженный пучок собирается в другом фокусе гиперболы  $F^1$ , который подбором ее поверхности может быть помещен на нужном расстоянии за главным зеркалом. В системе Грегори за фокусом параболы ставится вогнутое эллиптическое зеркало. Если один из фокусов эллипса совпадает с фокусом параболы, то отраженный пучок собирается в другом его фокусе  $F^1$ , который также может быть помещен в нужном месте за главным зеркалом. В обоих случаях на оси получается анаберрационное изображение, но сходимость пучка меряется так, что эквивалентное фокусное расстояние увеличивается, что ведет к уменьшению светосилы инструмента. Это, однако, не страшно при наблюдениях точечных объектов.

Вариантами этих двух классических систем являются система Нэсмита, когда на пути отраженного вторичным зеркалом пучка ставится плоское зеркало, направляющее пучок в ось склонения телескопа (она делается полой), и аппаратура может быть расположена сбоку от трубы, что иногда бывает удобнее, чем за главным зеркалом, и система куде, когда отраженный в ось склонения пучок перехватывается в точке пересечения часовой оси и оси склонения еще одним плоским зеркалом, направляющим пучок вдоль оси склонения. В этом случае расположение фокуса не зависит от движения телескопа. В фокусе куде может быть расположен стационарный спектрограф. Поле в фокусе куде вращается, что совершенно безразлично при наблюдениях точечных объектов, но в принципе может быть устранено несложной дополнительной оптикой.

Классические схемы зеркальных телескопов с вторичным зеркалом (кроме системы Ньютона) сильно уменьшают светосилу и не позволяют получить большое поле. Стремление избавиться от этих недостатков привело к созданию системы двузеркального телескопа, в значительной степени смягчающей эти недостатки – системы Ричи-Крэтчена. В этих телескопах оба зеркала (и главное вогнутое и вторичное выпуклое) имеют форму гиперboloидов вращения. У телескопов системы Ричи-Крэтчена умеренная светосила ( $F/D$  порядка 1.6 – 1.8) и хорошее поле порядка  $1^\circ$ . Хотя главное гиперболическое зеркало изготовить сложнее, чем параболическое, многие современные крупные телескопы являются телескопами системы Ричи-Крэтчена.

е) Сочетание оптики с трубой телескопа.

При наблюдениях ось трубы телескопа занимает различное положение относительно направления силы тяжести, а для получения расчетного изображения поверхность зеркала должна оставаться неизменной независимо от его положения. Отсутствие деформаций стеклянного зеркала при изменении его положения требует определенного соотношения между диаметром зеркала и его толщиной, поэтому зеркала крупных телескопов весят десятки тонн (для их облегчения с задней стороны высверливаются углубления с сохранением ребер жесткости, но вес все равно остается очень большим). Сочетание такого зеркала с оправой – непростая задача. Зеркало рефлектора лежит в оправе, опираясь на ряд точек. В случае небольших зеркал (до 1 м в диаметре) часто используются простые коромысла и разгрузка на 9 точек. У больших зеркал количество точек гораздо больше (например у 5-м Паломарского телескопа их число составляет 36), причем каждая точка – это сложная система рычагов (см. рис. 2.21).

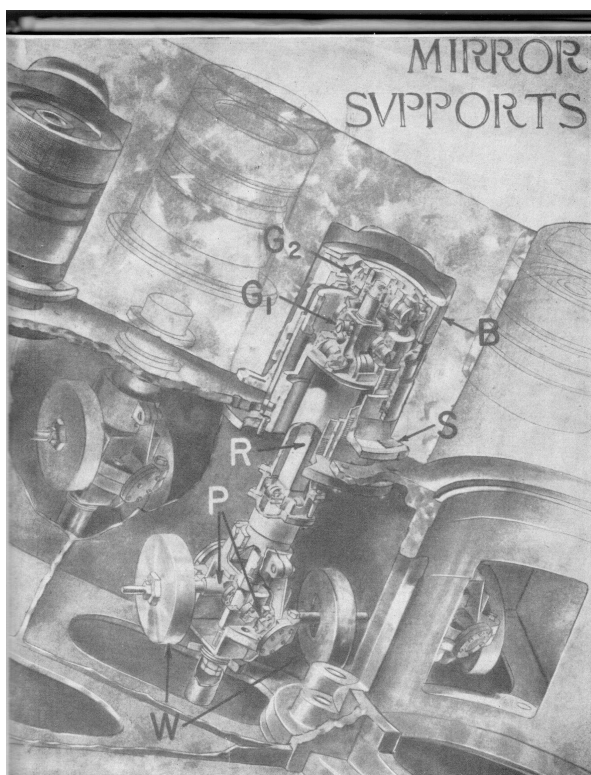


Рис. 2.21. Система разгрузки зеркала 5-м телескопа.

Для сохранения взаимного положения оптических деталей у больших телескопов (их трубы делаются открытыми для уменьшения веса) специальным образом рассчитываются фермы трубы. Труба крепится за средник, с одной стороны от которого находится главное зеркало, с другой – вторичное. Расчет ферм удается сделать так, что при изменении положения трубы относительное положение главного и вторичного зеркал не изменяется, т.е. не нарушается юстировка.

В настоящее время в крупных телескопах для облегчения веса используются тонкие гибкие зеркала, форма которых при изменениях положения телескопа поддерживается постоянной с помощью специально рассчитанной разгрузочной системы, позволяющей менять усилия в разгрузочных точках. Это телескопы с *активной оптикой*.

ж) Монтировки телескопов.

Фундаментальной частью любого телескопа является *монтировка*, на которую навешивается труба. Конструкция монтировки должна обеспечить наведение трубы

телескопа в нужное место небесной сферы и слежение за объектом, смещающимся из-за суточного вращения Земли. Широкое распространение получили параллактические монтировки, в которых вращение вокруг двух взаимно-перпендикулярных осей (полярной оси и оси склонения) позволяет осуществлять наведение, а направление одной из осей в полюс мира позволяет осуществлять слежение за объектом путем вращения телескопа вокруг полярной оси с помощью часового механизма. Полярная ось закрепляется на колонне, изготовленной таким образом, чтобы ось можно было направить в полюс мира. Поскольку высота полюса над горизонтом равняется географической широте места, местоположение телескопа должно быть определено заранее (или он должен быть снабжен сменными деталями для установки по широте).

В *немецкой* монтировке (рис. 2.22) ось склонения закрепляется на конце полярной оси, с одной стороны оси склонения навешивается труба, с другой приходится вешать противовес, чтобы обеспечить легкость вращения телескопа вокруг полярной оси. Центр тяжести подвижных частей телескопа должен совпадать с точкой пересечения осей, что требует наличия смещающихся грузов на трубе и возможности перемещения противовеса вдоль оси склонения; процесс совмещения центра тяжести с точкой пересечения осей называется *балансировкой* телескопа. В немецкой монтировке весь вес телескопа приложен к концу полярной оси. В случае больших широт основная составляющая будет направлена вдоль оси, но на малых широтах – перпендикулярно к ней, что вызовет изгибную деформацию. Поэтому на низких широтах немецкая монтировка непригодна даже для малых телескопов.

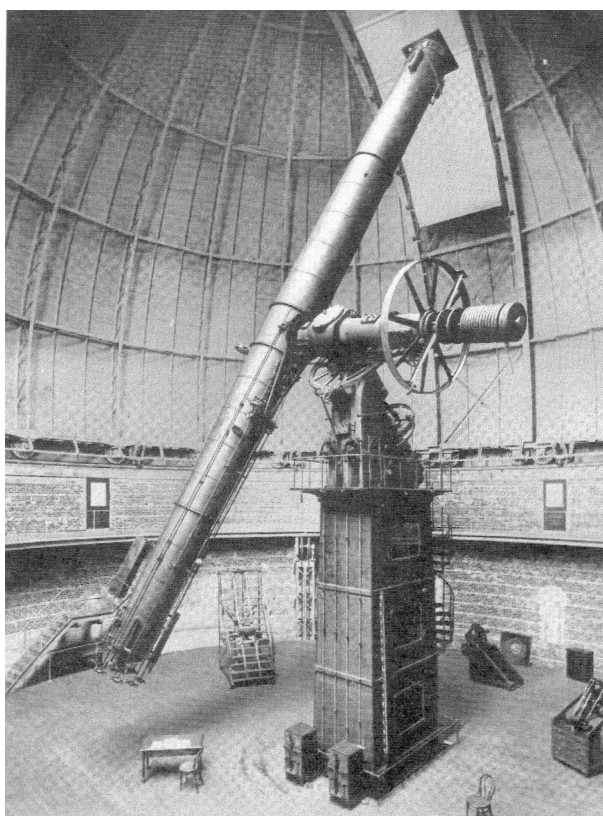


Рис.2.22. Крупнейший в мире Йеркский рефрактор на немецкой монтировке.

Чтобы уменьшить изгибную деформацию, полярную ось устанавливают на двух колоннах (северной и южной), а ось склонения с трубой и противовесом закрепляют на ее середине, Такая монтировка называется *английской* (рис.2.23).

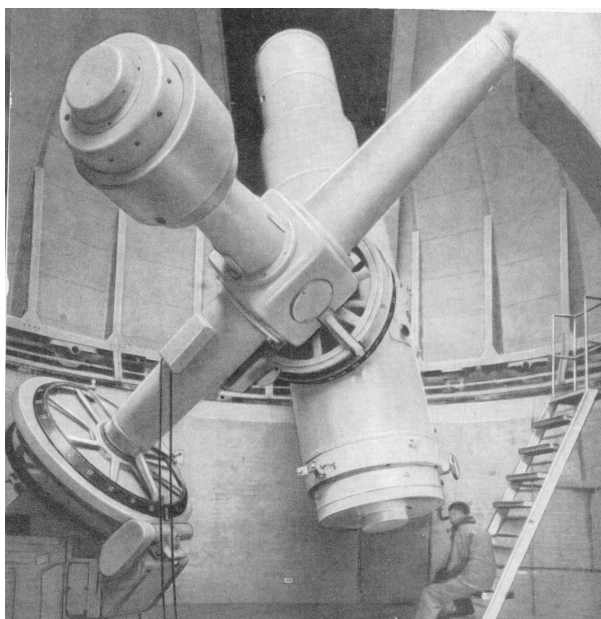


Рис.2.23. 24-36" телескоп системы Шмидта обсерватории Мичиганского университета на английской монтировке.

В обоих этих типах монтировок неприятным является удвоение веса подвижных частей из-за наличия противовеса. От этого недостатка свободна *американская* монтировка, или вилка. В ней полярная ось заканчивается вилкой, на концах которой крепится ось склонения, Труба телескопа помещается на ее середине и оказывается на продолжении полярной оси, что освобождает телескоп от противовеса (рис.2.24).

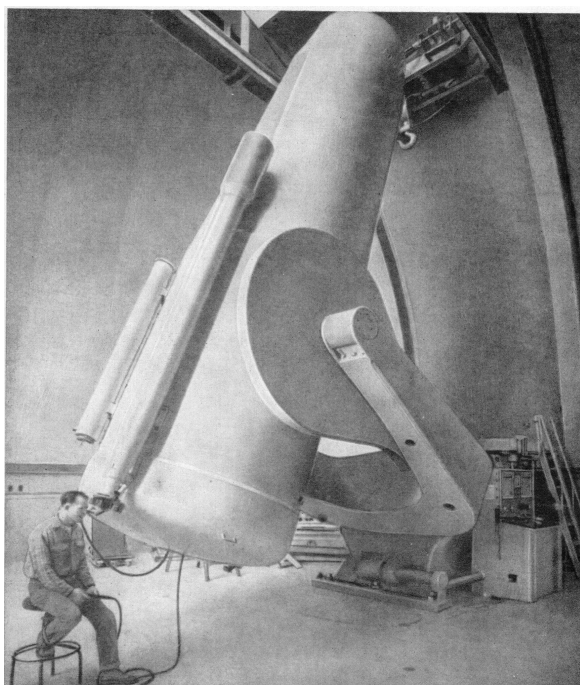


Рис. 2.24. 48-72" телескоп системы Шмидта обсерватории Маунт Паломар на вилочной монтировке.

Недостатком вилки является то, что, как и в немецкой монтировке, весь груз расположен на конце полярной оси. Поэтому при конструировании монтировки крупнейшего когда-то 2.5-м телескопа обсерватории Маунт Вилсон была использована комбинация английской



монтажки и вилки (рис.2.25). Полярная ось была выполнена в виде рамы, опирающейся на две колонны (вилка была замкнута). Ось склонения расположена внутри рамы, и на ней закреплена труба. Явным недостатком такой монтажки («качалки») является невозможность наведения телескопа в область вблизи полюса мира.

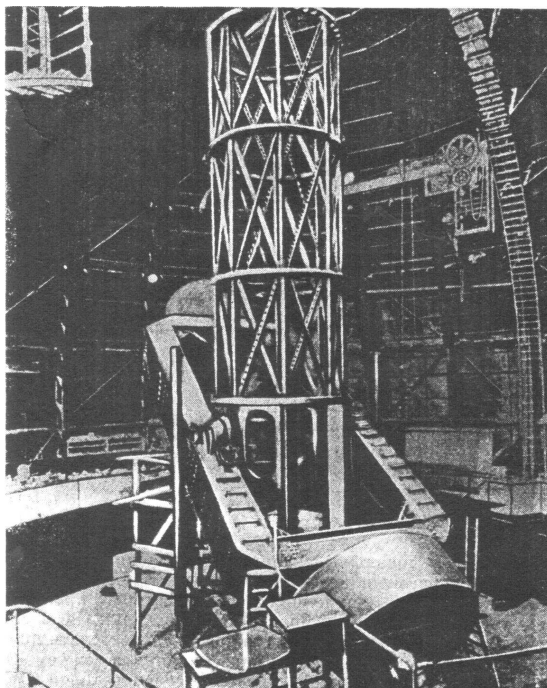


Рис.2.25. 2.5-м телескоп обсерватории Маунт Вилсон на монтажке-качалке.

Этот недостаток был устранен в монтажке 5-м телескопа Паломарской обсерватории, северная часть полярной оси которого выполнена в виде подковы, что открывает для трубы полярную область (рис.2.26).

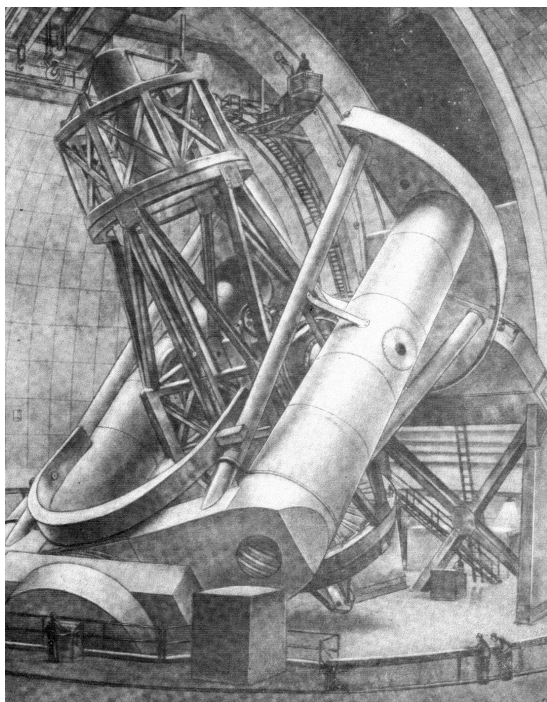


Рис.2.26. 5-м телескоп обсерватории Маунт Паломар на качалке с подковой.

Достоинством параллактической монтировки является возможность слежения за объектами путем вращения телескопа вокруг одной (полярной) оси с помощью часового механизма, недостатком – наклонное положение этой оси, что требует ее утяжеления для исключения изгибных деформаций. Если отказаться от требования вращения вокруг одной оси, то можно одну из осей направить по вертикали, тем самым исключая ее изгибные деформации (вторая ось, естественно, будет направлена по горизонтали). Такая монтировка (вилка, направленная в зенит) носит название *альт-азимутальной* монтировки. Крупнейший в прошлом 6-м телескоп Специальной Астрофизической обсерватории (БТА) использует альт-азимутальную монтировку (рис.2.27). Для слежения за объектом в этом случае требуется непрерывный пересчет экваториальных координат в горизонтальные (что при наличии ЭВМ не составляет труда) и вращения телескопа с помощью моторов вокруг обеих осей. Некоторым недостатком такой системы является наличие «мертвой зоны» вблизи зенита, где азимут меняется очень быстро (да еще со скачком), так что моторы не успевают отслеживать его изменения. Это, однако, не страшно, поскольку область, находящаяся в зените, через несколько минут выходит из «мертвой зоны».



Рис.2.27. 6-метровый телескоп Специальной астрофизической обсерватории (БТА) на альт-азимутальной монтировке.

Дальнейшее увеличение размеров рефлекторов со сплошными зеркалами невозможно из-за их гигантского веса. Об одном из способов преодоления этой трудности мы уже говорили. Это рефлекторы с активной оптикой. Вес гибкого тонкого зеркала не столь велик, и это позволяет использовать параллактические монтировки. Примером таких телескопов могут служить установленные в Чили четыре 8-метровых телескопа, которые могут работать как поодиночке, так и в комплексе (телескоп VLT). Вторая возможность реализована в Кеск телескопах диаметром 10 метров. Зеркала в них не сплошные, а состоят из отдельных сегментов (по 36 штук), каждый из которых представляет внеосевой параболюид; толщина каждого зеркала всего 6.2 см. Составленные вместе они дают параболюид вращения. Схема Кеск телескопа приведена на рис 2.28.

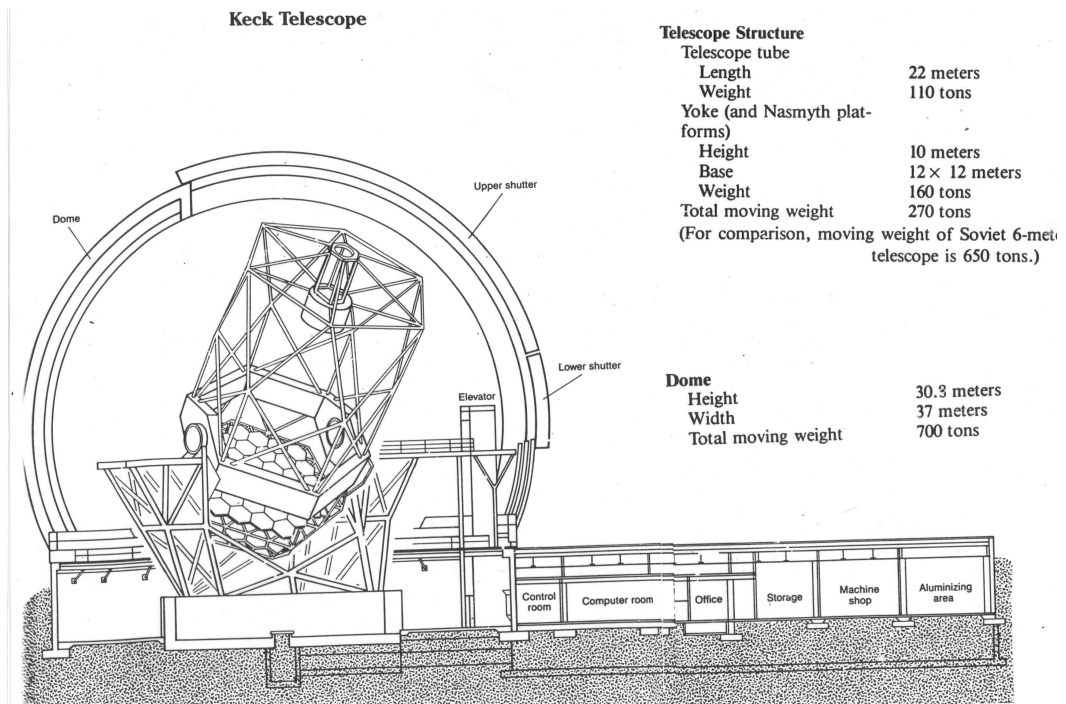


Рис.2.28. Схема Кекс телескопа.

### 3) Солнечные инструменты.

Специфика наблюдений Солнца состоит в том, что в связи с его яркостью не нужны приемные зеркала (или объективы) большого диаметра. С другой стороны изучение отдельных деталей солнечной поверхности требует большого масштаба изображения и, следовательно, строящая изображение оптика должна быть длиннофокусной (во всяком случае фокусное расстояние должно быть существенно больше 10 м). Поэтому осуществлять непосредственное слежение за Солнцем, смещая телескоп, не представляется возможным. Телескоп делается неподвижным, а свет в него направляется с помощью вращающегося плоского зеркала – *целостата*, угловая скорость вращения которого вдвое меньше угловой скорости вращения небесного свода. Направление отраженного луча не меняется, он отражается в горизонтальном направлении и попадает в оптику *горизонтального солнечного телескопа*. Большая турбулентность в приземных слоях атмосферы сильно ухудшает качество изображения, поэтому обычно используется дополнительное плоское зеркало, отражающее пучок в вертикальном направлении. Эти зеркала поднимаются на высоту десятков метров за пределы приземного слоя атмосферы. *Вертикальные солнечные телескопы* дают наилучшее изображение Солнца. На рис. 2.29 приведена фотография вертикального солнечного телескопа обсерватории Мак Мэс.

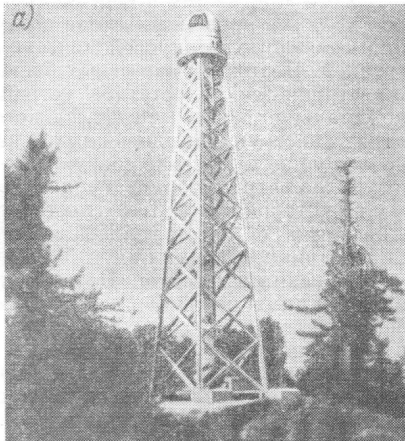


Рис.2.29. Вертикальный солнечный телескоп.

Для исследования физических процессов на Солнце большой интерес представляют наблюдения самых внешних слоев солнечной атмосферы. Однако поверхностная яркость их в миллион раз меньше, чем у солнечного диска, поэтому долгое время наблюдения их велись только во время полных солнечных затмений, поскольку вне затмения свет Солнца, рассеянный в атмосфере и телескопе, в сотни раз превосходит собственное свечение этих слоев. В спектре короны, помимо континуума, имеются сильные эмиссионные линии, и их изучение оказалось возможным вести и вне затмения с помощью изобретенного Лио в 1930 г. *внезатменного коронографа*. В нем «искусственная Луна» в фокусе телескопа перекрывает изображение Солнца, рассеянный в атмосфере свет убирается с помощью системы диафрагм, а свет рассеиваемый объективом сведен к минимуму использованием в качестве объектива одиночной линзы. Большая хроматическая аберрация оказывается несущественной, поскольку наблюдения ведутся с узкополосными фильтрами, центрированными на эмиссионные линии. Схема внезатменного коронографа приведена на рис. 2.30.

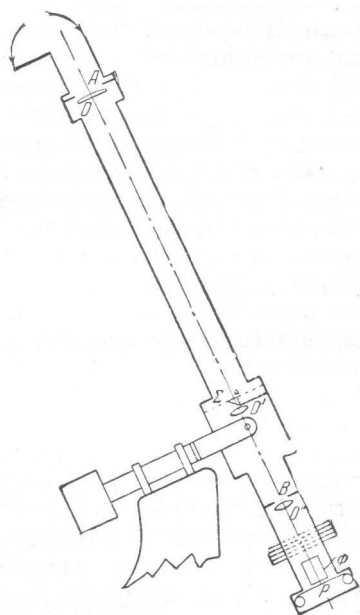


Рис.2.30. Схема внезатменного коронографа Лио.

## § 2. Светофильтры.

Все приемники излучения, с которыми ведутся наблюдения, имеют достаточно широкие кривые чувствительности. Между тем, как мы только что видели, часто наблюдения надо вести в узких спектральных интервалах. Выделение нужных спектральных интервалов осуществляется с помощью *светофильтров*, оптических приспособлений, пропускающих свет определенных длин волн. В качестве светофильтров могут использоваться цветные стекла. Стекланные светофильтры (их разновидностью можно считать жидкие фильтры, осуществляемые с помощью цветных растворов (например, медного купороса), заключенных между стекланными пластинками) пропускают свет в довольно широких участках спектра. *Односторонние* фильтры гасят коротковолновое и пропускают длинноволновое излучение, начиная с некоторой длины волны (в зависимости от марки стекла). *Двусторонние* фильтры могут быть центрированы на разные длины волн и иметь разную ширину полосы пропускания (но всегда порядка нескольких сот ангстрем).

Более узкие полосы выделяются с помощью *интерференционных* фильтров. По существу это интерферометры Фабри-Перо с интерференцией низкого порядка. В таком интерферометре интерференция происходит в слое воздуха между двумя плоскими и

параллельными друг другу поверхностями, покрытыми тонким полупрозрачным слоем серебра. Высокое отражение от серебра позволяет падающему свету отразиться обратно за исключением света тех длин волн, которые удовлетворяют условию  $\lambda/2 = (h \cos\varphi)/k$ , где  $h$  – расстояние между посеребренными плоскостями,  $\varphi$  – угол падения света и  $k$  – целое число. При нормальном падении света пройдут без отражения длины волн  $\lambda = 2h, h, 2/3 h$  и т.д. Уже эти три длины волны далеко отстоят друг от друга в спектре и потому каждые две из них можно задержать с помощью обычных светофильтров. На практике фильтры делают более сложными, состоящими из двух «бутербродов» со специальным покрытием, способствующим пропусканию нужных длин волн. Если их разделить промежутком с оптической толщиной, равной  $\lambda$ , то свет этой длины волны испытывает в разделяющем слое интерференцию, благоприятствующую ее максимальному пропусканию.

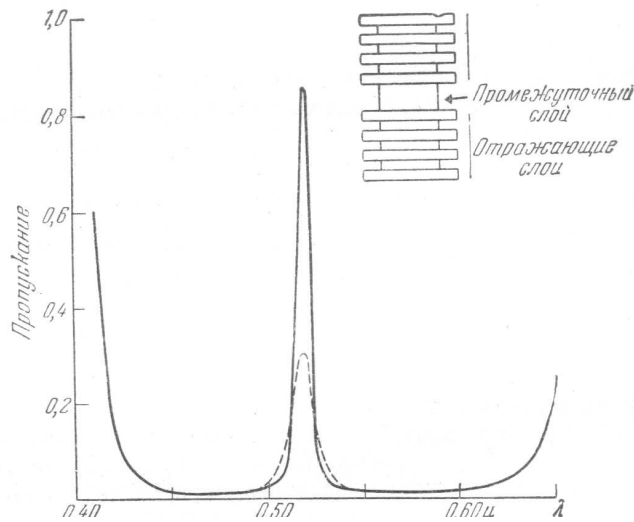


Рис. 2.31. Пропускание интерференционного светофильтра

На рис.2.31 приведена схема 15-слоеного интерференционного фильтра и дается кривая его пропускания. Максимальное пропускание его чуть превышает 80%, а полуширина составляет 65 Å. Наилучшие образцы интерференционных фильтров обладают полушириной пропускания всего лишь 20 Å.

Еще меньшую полуширину пропускания имеют интерференционно-поляризационные фильтры, состоящие из поляроидов и кварцевых кристаллов с последовательно увеличивающейся толщиной. Схема фильтра приведена на рис.2.32. Полуширина пропускания такого фильтра может составлять несколько ангстрем (1.8 Å у фильтра, используемого в Крымской обсерватории). Однако пропускание в максимуме очень мало (всего 1.2% у указанного фильтра, так что он может использоваться лишь при наблюдениях Солнца).

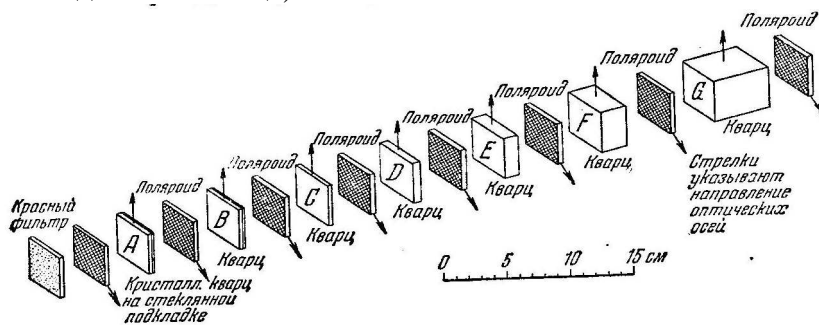


Рис 2.32. Схема интерференционно-поляризационного светофильтра.

### § 3. Электрофотометры.

Собираемый телескопом световой поток должен быть направлен на приемник излучения и зафиксирован. В случае фотографических наблюдений в фокусе телескопа располагается фотопластинка, в случае фотоэлектрических телескоп снабжается специальным прибором – электрофотометром. На рис. 2.33 для примера приведена фотография монтированного на 48-см телескопе Бюраканской наблюдательной станции СПбГУ электрофотометра-поляриметра, использующего в качестве приемника излучения фотоумножитель. Конструкции таких электрофотометров могут быть различными, но они должны удовлетворять некоторым общим требованиям, о которых мы скажем при рассмотрении оптической схемы электрофотометра, изображенного на рис. 2.33.

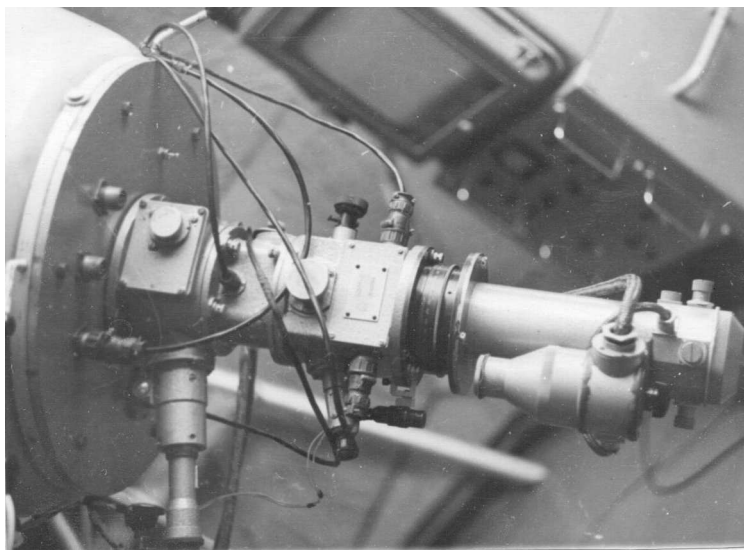


Рис. 2.33. Электрофотометр-поляриметр на 48-см телескопе СПбГУ.

Оптическая схема электрофотометра представлена на рис.2.34. Здесь  $M_1$  – выдвигающийся посмотровый микроскоп поля, позволяющий подвести наблюдаемый объект к центру поля с тем, чтобы он попал в диафрагму  $D$ . Узел диафрагм разного размера (они помещены на револьверном диске) располагается в фокусе телескопа. Выдвигающийся микроскоп  $M_2$  позволяет центрировать объект в диафрагме. Когда он

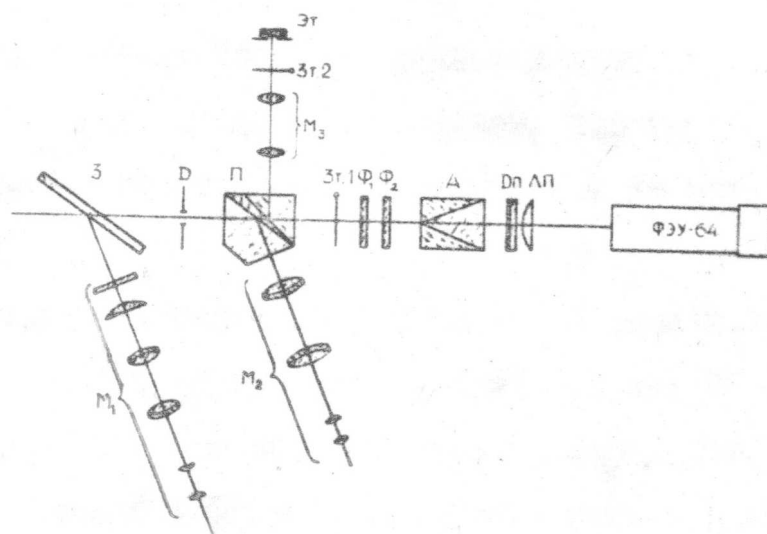


Рис 2.34. Оптическая схема электрофотометра-поляриметра.

введен, призма П при открытом затворе  $Zt2$  вводит в оптический путь радиоактивный эталон яркости Эт. При открытом затворе  $Zt1$  свет поступает на фотоумножитель (в данном случае ФЭУ-64). На пути между затвором и ФЭУ расположены блоки фильтров, поляризационный анализатор А и деполяризатор Дп (которые могут поворачиваться по позиционному углу), и линза Фабри Лп. Назначение линзы Фабри – создание на фотокатоде изображения входного зрачка телескопа. В этом случае положение светового пятна на фотокатоде остается неизменным при смещениях звезды в пределах диафрагмы (из-за атмосферного дрожания, неточности установки полярной оси телескопа или неточного часового ведения), что существенно в связи с неравномерностью чувствительности фотокатода. *Именно эти обстоятельства не позволяют установить катод ФЭУ непосредственно в фокусе телескопа.*

В случае наблюдений с ПЗС приемником матрица устанавливается в фокусе телескопа, поскольку неравномерность ее чувствительности учитывается получением снимка плоского поля. Перед матрицей можно установить фильтры и поляризационный анализатор. На рис. 2.35 приведен снимок ПЗС фотометра-поляриметра, используемого при наблюдениях с 40-см телескопом СПбГУ.

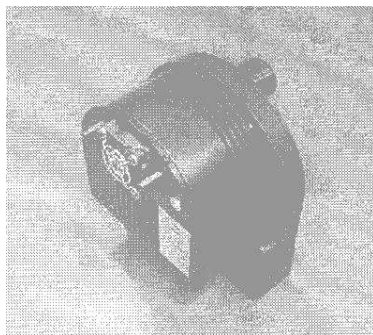


Рис.2.35. Фотометр-поляриметр СПбГУ, использующий ПЗС камеру ST-7 XME.

#### § 4. Спектральные аппараты.

Наиболее важную информацию о природе небесных объектов дает изучение их спектров. В простейшем случае спектр регистрируется с помощью спектрографа, входная щель которого помещается в фокус телескопа. Расходящийся пучок после прохождения щели попадает на объектив коллиматора, назначение которого превратить расходящийся пучок в параллельный, поэтому объектив устанавливается так, чтобы щель оказалась в его фокусе. *Для отсутствия световых потерь и полного использования диаметра объектива его относительное отверстие должно быть равно относительному отверстию телескопа.* Параллельный пучок света, созданный объективом коллиматора, направляется на диспергирующий элемент (призму или дифракционную решетку, которые лучше всего работают при падении на них параллельного пучка лучей), разлагающий свет в спектр. Параллельные световые пучки, разведенные по длинам волн, перехватываются объективом камеры, в фокальной плоскости которой строится спектр (изображение входной щели спектрографа, разнесенное по длинам волн). Принципиальная схема спектрографа (призменного) представлена на рис. 2.36.

Требования, предъявляемые к объективам коллиматора и камеры, различны. Поскольку коллиматор должен создавать параллельный пучок для всех длин волн, у него не должно быть хроматической аберрации. Наряду со сложными линзовыми системами используются зеркальные коллиматоры (полностью свободные от хроматической аберрации) типа обратного Кассегрена. Для объектива камеры хроматизм несущественен,

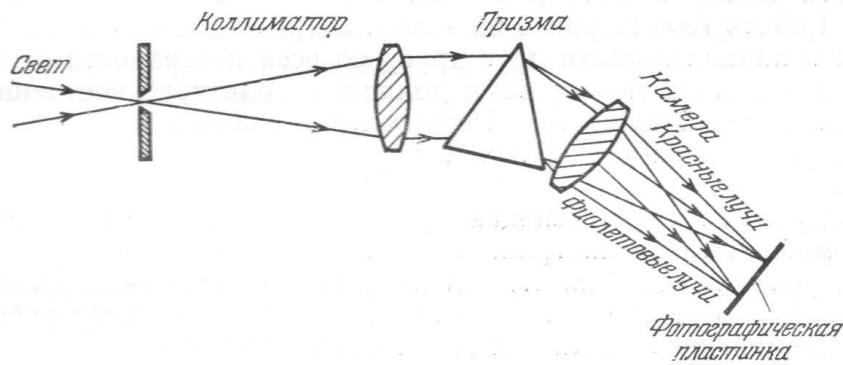


Рис.2.36. Принципиальная схема спектрографа.

так как он легко убирается наклоном приемника. Основные требования к объективу камеры – большое безабберационное поле и хорошая светосила. Яркость спектра в фокальной плоскости спектрографа (при совпадении относительных отверстий телескопа и объектива коллиматора) в случае линейчатого спектра пропорциональна светосиле камеры, в случае непрерывного – ширине входной щели и относительному отверстию камеры. Поэтому часто в спектрографах в качестве камеры используется камера Шмидта.

Степень разнесения спектра по длинам волн в угловой мере (угловая дисперсия  $d\epsilon/d\lambda$ ) определяется диспергирующим элементом, в линейной мере (в фокусе камеры) произведением угловой дисперсии на фокусное расстояние камеры  $f'$ . Часто для выражения дисперсии спектрального прибора употребляют величину  $d\lambda/ds = 1/(f' \cdot d\epsilon/d\lambda)$  в  $\text{А/мм}$ , выражающую количество ангстремов шкалы длин волн, умещающихся в 1 мм вдоль спектра (обратную дисперсию). В случае призмного спектрографа дисперсионная кривая  $s(\lambda) \sim 1/\lambda$  (примерно гипербола), в случае дифракционного связь между  $s$  и  $\lambda$  линейна. Поэтому призмные спектрографы невыгодно использовать для длинноволновой области спектра. Кроме того их эффективность мала из-за больших потерь света при отражениях от поверхностей оптических деталей и поглощения в призме. Поэтому сейчас почти всегда в качестве диспергирующего элемента используются дифракционные решетки, особенно после создания решеток с профилированным штрихом, минимизирующие потери света, уходящие в нерабочие порядки спектра.

При массовых наблюдениях спектров небесных объектов используются призмы с малой угловой дисперсией, устанавливаемые непосредственно перед входным отверстием телескопа (*объективные призмы*). В этом случае каждый объект дает ниточный спектр невысокой дисперсии. При необходимости он может быть расширен (например, расстройством часового механизма, если объективная призма выставлена так, что направление дисперсии ортогонально направлению суточного вращения небесной сферы).

Обычный щелевой спектрограф позволяет получить спектр единственного объекта (или деталей объекта, вырезаемых щелью). В целях экономии наблюдательного времени были разработаны приборы, позволяющие одновременно наблюдать десятки объектов или деталей исследуемого объекта, не попадающих на щель спектрографа. Это стало возможным после изобретения волоконной оптики. В фокальной плоскости устанавливается маска с отверстиями, совпадающими с положением интересующих наблюдателя объектов. Здесь располагаются входы оптических волокон, выходы их приводятся один под другим на щель спектрографа, при этом *одновременно* получают спектры всех объектов, предусмотренных маской. Маска может быть заменена системой малых линз в случае, если наблюдаются близкие участки одного объекта. Подобные мультиобъектные спектрографы существуют на нескольких обсерваториях, в частности, они есть на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории.



Конструкция конкретного спектрографа должна удовлетворять как минимум двум требованиям: она должна быть жесткой и нечувствительной к температурным изменениям. Кроме того, она должна допускать возможность гидирования и получения спектра сравнения для установления шкалы длин волн. Первые два требования идеально удовлетворяются на спектрографах, работающих в фокусе куде телескопа, поскольку спектрограф там неподвижен и его легко термостатировать. При наблюдениях звезд вращение поля, имеющее место в фокусе куде, несущественно. Что же касается протяженных объектов, то в принципе разработаны приспособления, позволяющие компенсировать вращение поля, однако из-за малого поля такие наблюдения ведутся редко.

## § 5. Специализированные телескопы.

Наблюдения в спектральных диапазонах, отличных от оптического, требуют использования специализированных телескопов. Для рентгеновского и далекого УФ диапазонов из-за малой длины волны при стандартной схеме телескопа невозможно изготовление зеркал с необходимой точностью; в далеком ИК диапазоне обычный телескоп дает слишком большое фоновое излучение; в радиодиапазоне используется совершенно отличное от оптических радиотелескопы (о них речь будет идти в курсе радиоастрономии, здесь мы их рассматривать не будем).

В далеком УФ и рентгеновском диапазонах используются телескопы скользящего падения лучей. При малых углах падения от посеребренных поверхностей отражается до 50% падающего на них излучения. Схемы хода лучей в телескопах скользящего падения представлены на рис. 2.37. В реальных телескопах несколько софокусных систем вложены одна в другую для увеличения собирающей площади телескопа.

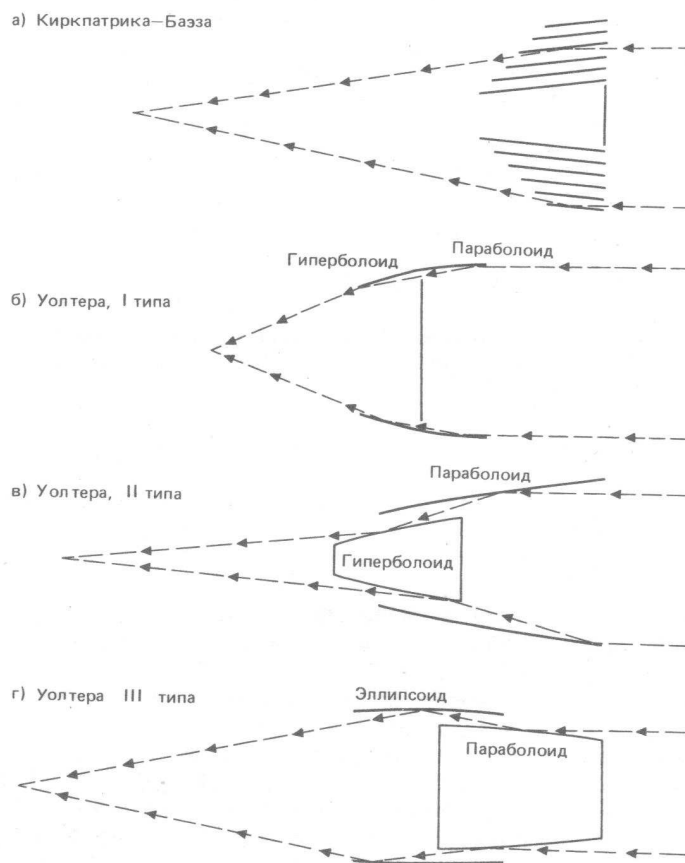


Рис. 2.37. Четыре типа оптических систем скользящего падения для рентгеновских лучей и далекого УФ.

При наблюдениях в далеком ИК диапазоне (при  $\lambda > 5 \text{ мкм}$ ) фоновое ИК излучение от неба и деталей телескопа сравнимо, а часто и превышает полезный сигнал. Поэтому при конструкции и эксплуатации ИК телескопов предпринимаются специальные меры предосторожности для уменьшения фонового сигнала и корректного его учета: размер вторичного зеркала чуть меньше, чем требуется для получения невиньетированного изображения на оси; для отражающих покрытий используется серебро или золото, имеющие меньшую по сравнению с алюминием излучающую способность; центральное отверстие в главном зеркале как раз достаточно для пропускания осевого пучка кассегреновского фокуса, фон неба отсекается коническим зеркалом, установленным в центре вторичного зеркала и закрывающим изображение отверстия в главном зеркале; вводятся охлаждаемые отсекатели и диафрагмы, которые экранируют все неотражающие поверхности в пучке света, собираемого телескопом; используется модулирующее вторичное зеркало с растяжками минимального сечения. Последнее очень важно, поскольку яркость фона неба в ИК области непрерывно меняется, а полезный сигнал часто меньше флуктуаций яркости фона неба. Частым переключением с объекта на ближайший участок неба и накоплением разностного сигнала можно исключить фон и его флуктуации. Частота модуляции достигает  $50 \text{ Гц}$ , а угловое смещение изображения может быть порядка  $2'$ . На рис. 2.38 приведена фотография 4-м ИК телескопа, установленного на Гавайях.

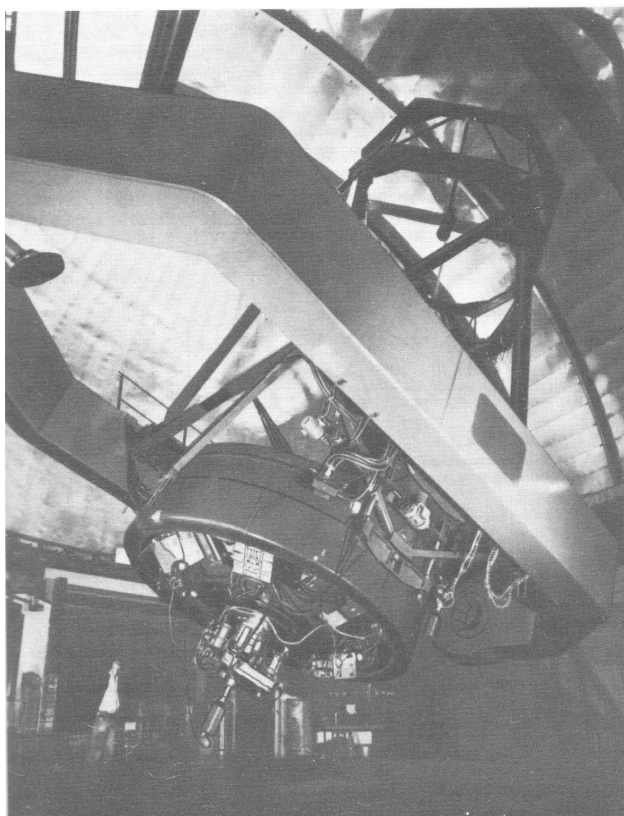


Рис. 2.38. Английский ИК телескоп диаметром 4 м, установленный на горе Мауна Кеа на Гавайях.