

D' выходного зрачка телескопа. Таким образом, $E_{\text{фон}} \sim BD'^2 = = BD^2/N^2$, и следовательно,

$$E/E_{\text{фон}} \sim BD^2. \quad (23.9)$$

Эта формула объясняет, почему в телескоп звезды видны и днем.

ЗАДАЧА

С помощью собирательной линзы можно зажечь папиросу, фокусируя на ней прямой солнечный свет. Можно ли, взяв линзу достаточных размеров (например, объектив большого астрономического телескопа), сделать то же самое, используя свет полной Луны?

Решение. Для простоты будем считать, что излучение Солнца подчиняется закону Ламберта. Прямые солнечные лучи, падающие на Землю перпендикулярно, создают на ней освещенность $E_C = \pi B \sin^2 \vartheta_C$, где B — поверхностная яркость Солнца, а ϑ_C — угловой размер его. Из повседневного опыта известно, что такой освещенности для воспламенения папиросы недостаточно. Средняя освещенность поверхности Земли будет в π раз меньше, т. е. $\bar{E}_C = = B \sin^2 \vartheta_C$. Если пренебречь поглощением и рассеянием света, то действие линзы сводится просто к увеличению видимых угловых размеров Солнца. Однако максимальная освещенность не может быть больше πB .

Так как диаметр лунной орбиты пренебрежимо мал по сравнению с расстоянием до Солнца, то средняя освещенность поверхности Луны будет такой же, как и у Земли, т. е. $\bar{E}_C = B \sin^2 \vartheta_C$. Если Луна как источник света подчиняется закону Ламберта, то ее поверхностная яркость будет $B \sin^2 \vartheta_C$. Лучи от Луны, падая на поверхность Земли перпендикулярно, создают освещенность $B \sin^2 \vartheta_C \sin^2 \vartheta_L$, где ϑ_L — угловой радиус Луны. Эта освещенность много меньше, чем $B \sin^2 \vartheta_C$. Поэтому, каковы бы ни были размеры линзы, с помощью лунного света воспламенить папиросу нельзя.

§ 24. Оптические инструменты

1. Лупа. Лупа, как и микроскоп, дает увеличенные изображения предметов, находящихся на небольших расстояниях от глаза. *Увеличение N лупы (и микроскопа) определяется как отношение угла, под которым виден (малый) предмет через лупу, к углу, под которым он был бы виден невооруженным глазом, если бы был помещен от глаза на расстоянии ясного зрения L (см. § 23, пункт 6).* Можно также сказать, что увеличение лупы (и микроскопа) есть отношение линейных размеров изображения предмета на сетчатке при рассматривании его в лупу к линейным размерам изображения того же предмета на сетчатке, когда он рассматривается невооруженным глазом с расстояния ясного зрения. При увеличениях, не превосходящих 5, в качестве лупы обычно применяется простая собирательная линза, при больших увеличениях — система, состоящая из таких линз.

При вычислении увеличения лупы будем для общности рассматривать ее как сложную центрированную систему и воспользуемся

уравнениями такой системы в форме Ньютона (11.16) и (11.17). Предмет помещается между передним главным фокусом и передней главной плоскостью лупы. Лупа дает прямое мнимое изображение его. Пусть X, Y — координаты точки предмета относительно переднего главного фокуса, X', Y' — координаты соответствующей точки изображения относительно заднего главного фокуса, a — координата глаза (точнее — его передней узловой точки) относительно того же заднего главного фокуса. Расстояние глаза от изображения будет $a - X'$. Глаз через лупу видит отрезок Y' под углом $\varphi' = Y'/(a - X')$. Соответствующий отрезок предмета Y был бы виден невооруженным глазом с расстояния ясного зрения под углом $\varphi = Y/L$. Отсюда

$$N = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{Y'}{Y} \cdot \frac{L}{a - X'},$$

или на основании (11.17)

$$N = \frac{f}{X'} \frac{L}{a - X'} = \frac{X'}{f'} \frac{L}{a - X'}.$$

Для лупы $n = n'$, а потому $f' = -f$. Следовательно, с учетом (11.16)

$$N = \frac{L}{f + aX/f}. \quad (24.1)$$

Если глаз помещен в заднем главном фокусе лупы ($a = 0$), то $N = L/f$. То же самое увеличение получится, если предмет поместить в переднем главном фокусе лупы. В этом случае глаз должен быть аккомодирован на бесконечность, т. е. для нормального глаза аккомодирующая мышца должна находиться в расслабленном состоянии. Однако многие наблюдатели ведут наблюдение с напряжением аккомодирующей мышцы, чтобы изображение получалось на привычном для них расстоянии ясного зрения. В этом случае $a - X' = L$, так что

$$N = \frac{X'}{f'} = \frac{a - L}{f'} = \frac{L - a}{f}.$$

Если лупой является тонкая линза, вплотную придвинутая к глазу, то $a = -f$, так что $N = (L/f) + 1$. Рассматриваемый предмет всегда помещается вблизи переднего главного фокуса, т. е. $a/f \ll 1$. Величина aX/f также меньше единицы. Поэтому, независимо от способа наблюдения, увеличение лупы практически всегда определяется формулой

$$N = L/f. \quad (24.2)$$

Подставляя сюда $N = \varphi'/\varphi = (\varphi'/Y) L$, получим $\varphi' = Y/f$. Размер изображения предмета на сетчатке глаза равен $f_{г.л} \varphi' = (f_{г.л}/f) Y$, где $f_{г.л}$ — переднее фокусное расстояние глаза (см. § 21, пункт 5). Этот размер определяется практически только фокусным расстоя-

нием лупы f , так как от глаза к глазу величина $f_{\text{гд}}$ меняется незначительно. Таким образом, действие лупы эквивалентно уменьшению расстояния ясного зрения с величины L до f ; лупа как бы приближает рассматриваемый предмет к глазу на фокусное расстояние f .

Теоретически увеличение лупы ничем не ограничено. Так, лупа с фокусным расстоянием $f = 0,25$ мм имела бы увеличение $N = 1000$. Изготовление луп со столь малыми значениями f , а следовательно и с малыми диаметрами линз, очень затруднительно, а пользование ими крайне неудобно. Кроме того, для таких луп очень велики геометрические и хроматические аберрации. Поэтому увеличение луп, применяемых в действительности, в настоящее время не превосходит 40. Большие увеличения получаются с помощью микроскопа.

Изображение в лупе формируется с помощью сравнительно тонких пучков лучей, выделяемых зрачком глаза. Поэтому требования к лупам в отношении исправления аберраций не очень жесткие. Хроматическая аберрация положения при малых увеличениях не исправляется вовсе. При более значительных увеличениях и необходимости иметь большое поле зрения надо исправить кому и астигматизм, а также хроматическую разность увеличений. Астигматизм исправляется для главных лучей, проходящих через центр вращения глаза.

Простая плоско-выпуклая линза дает хорошие изображения вплоть до восьмикратного увеличения (т. е. когда ее фокусное расстояние f не менее 3 см). Линза должна быть обращена к глазу плоской стороной. В этом случае, так как предмет помещен вблизи фокуса лупы, преломление лучей происходит практически только на выпуклой поверхности лупы, а не распределяется между обеими поверхностями ее. Это несколько увеличивает сферическую аберрацию. Зато в противоположном случае, когда к глазу обращена выпуклая сторона лупы, значительно увеличиваются аберрации изображений периферийных частей предмета.

2. М и к р о с к о п. Микроскоп состоит из двух собирающих систем линз — *объектива* и *окуляра*, расположенных на большом расстоянии друг от друга. Они помещаются на концах трубки (*тубуса*), которая обычно укрепляется вертикально на штативе микроскопа, объектив ввинчивается в нее снизу, а окуляр вставляется сверху. Предмет помещается на малом расстоянии перед передним фокусом объектива. Объектив дает его действительное обратное увеличенное изображение, которое рассматривается через окуляр, действующий как лупа. Пусть f_1 и f'_1 — главные фокусные расстояния объектива, f_2 и f'_2 — окуляра. Тогда фокусные расстояния f и f' всей оптической системы микроскопа определяются формулами (12.3), т. е.

$$f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta}, \quad f' = \frac{f'_1 f'_2}{\Delta}, \quad (24.3)$$

где Δ — оптический интервал между объективом и окуляром. В применении к микроскопу величину Δ называют *оптической длиной тубуса*. Ее следует отличать от *механической длины тубуса* T . Последняя обычно составляет 160 или 190 мм; величина Δ зависит от объектива и окуляра и, как правило, больше T .

Для безиммерсионного микроскопа его увеличение, согласно формуле (24.2), будет

$$N = \frac{L}{f} = - \frac{L}{f_1} \frac{\Delta}{f_2} \quad (24.4)$$

(при наличии иммерсии с показателем преломления n это выражение надо умножить на n). Величину N можно представить в виде $N = N_1 N_2$, где $N_1 = L/f_1$ — увеличение объектива как линзы, $N_2 = \Delta/f_2$ — добавочное увеличение, обусловленное окуляром. При заданном общем увеличении N для устранения ошибок в изображении осевых точек выгоднее делать большим N_1 , а для уменьшения ошибок всего поля зрения выгоднее применять большие N_2 . По этой причине, а также по соображениям, указанным в пункте 1, требуемое общее увеличение N не получают с помощью одних только сильных объективов или одних только сильных окуляров, а идут на компромисс, комбинируя и те и другие.

В микроскопе величина Δ , а также фокусные расстояния f_1 и f_2 положительны. Фокусное расстояние f всей системы, а с ним и увеличение N отрицательны. Это значит, что изображение, получаемое в микроскопе, обратное. Говоря в дальнейшем об увеличении микроскопа, мы обычно будем иметь в виду *абсолютное значение* N .

Величина Δ обычно лежит в пределах 150—200 мм. Фокусное расстояние f_1 объектива при самых больших увеличениях его (100—120) не меньше 1,5 мм, а окуляра — не меньше 8—10 мм. При достаточно больших значениях Δ можно получить увеличение до 2500—3000 раз без чрезмерного уменьшения f_1 и f_2 . (Впрочем, столь большие увеличения бесполезны, как это будет подробно разобрано в § 56.)

Штатив микроскопа обычно имеет револьверное приспособление для смены объективов. Такое же приспособление может применяться для смены окуляров. Это позволяет варьировать увеличение микроскопа в широких пределах.

Со стороны предмета в микроскопе велики углы раскрытия, а со стороны изображения — углы наклона лучей. Вследствие этого у объектива особенно велики сферическая аберрация и кома, а у окуляра — астигматизм. Поэтому к объективу и окуляру предъявляются различные требования.

3. Основные требования, предъявляемые к объективу микроскопа: 1) высокая числовая апертура; 2) исправление сферической аберрации для всего очень широкого пучка лучей; 3) выполнение условия синусов для того же пучка; 4) ахроматизация. Ахроматиза-

ция состоит в выполнении условия синусов по меньшей мере для двух цветов, а также в получении через объектив ахроматических действительных изображений предмета.

Всем этим требованиям в той или иной мере удастся удовлетворить применением довольно сложных конструкций объективов, особенно при больших увеличениях. Наиболее совершенными объективами до настоящего времени являются *апохроматы*, разработанные и рассчитанные Аббе. Впервые апохромат Аббе был выпущен фирмой Цейсса в 1886 г. Это — иммерсионный объектив, состоящий из 10 линз. Он изображен на рис. 90 в увеличенном виде (примерно вдвое). Роль нижней (полусферической) линзы была выяснена в § 18 (пункт 4). Поверхность этой линзы погружена в масло, в котором помещен и предмет. Эта линза обладает весьма сильной хроматической аберрацией, уничтожаемой остальными линзами. Из этих остальных линз рассеивающие изготовлены из различных сортов флинта, собирающие — из крона. Аббе нашел, что, перемещая слегка некоторые из этих линз относительно других, можно достигнуть почти полного уничтожения хроматической аберрации. Апохромат ахроматизован для трех и удовлетворяет условию синусов для двух цветов спектра. Фо-

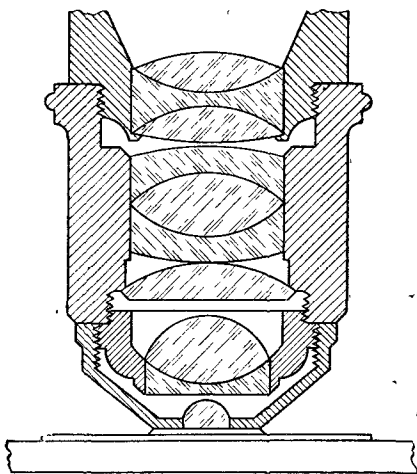


Рис. 90.

кусное расстояние апохромата Аббе $f = 2$ мм, числовая апертура $n \sin \theta = 1,4$, а геометро-оптические качества таковы, что можно считать фактически достигнутыми границы разрешающей способности микроскопа, определяемые волновой природой света (см. § 56). Апохроматы применяются во всех наиболее ответственных микроскопических и микрофотографических исследованиях.

Менее совершенными, но более распространенными являются *ахроматы*, т. е. объективы, ахроматизованные для двух цветов спектра. Если удовлетвориться частичной ахроматизацией объектива, то надо совместить положения передних фокальных точек для двух цветов (*ахроматизация положения*). Иначе положение изображения предмета, помещенного вблизи передней фокальной точки объектива, очень сильно менялось бы с изменением цвета. Фокусные расстояния при этом остаются неахроматизованными, т. е. неравными. Поэтому хроматическая разность увеличений остается. Она исправляется применением особых окуляров, назы-

ваемых *компенсационными*. Такие окуляры всегда применяются и в апохроматах, так как у них разность увеличений для лучей различного цвета исправлена не вполне.

Вообще, ахроматизация положения, т. е. совмещение фокусов, или точек схождения лучей различного цвета, должна производиться во всех оптических системах, предназначенных для получения действительных изображений объектов с малыми угловыми размерами. Например, объективы зрительных труб должны быть ахроматизованы в смысле совмещения задних фокальных точек для лучей разного цвета.

Свет от объекта попадает в объектив, проходя через *покровное стекло*. В сухих объективах толщина покровного стекла влияет на сферическую aberrацию. Поэтому все расчеты объективов производят в предположении, что толщина покровного стекла равна 0,17 мм (0,15—0,20 мм). Все сильные сухие объективы в настоящее время снабжены *коррекционной оправой*, с помощью которой можно немного менять расстояние между верхней и нижней линзами объектива и тем самым уничтожать сферическую aberrацию, вносимую покровным стеклом несоответствующей толщины. В объективах с однородной иммерсией, когда показатели преломления покровного стекла, иммерсионной жидкости и фронтальной линзы объектива одинаковы, толщина покровного стекла не имеет значения, так как ее можно компенсировать слоем иммерсионной жидкости между покровным стеклом и объективом.

4. Основные требования, предъявляемые к окуляру: 1) устранение астигматизма в косых пучках; 2) устранение дисторсии; 3) ахроматизация.

Кривизна поверхности изображения обычно невелика и существенно не мешает визуальным наблюдениям. Если объектив дает изображение, свободное от хроматической aberrации, то достаточна уже частичная ахроматизация окуляра. Однако теперь существенна не ахроматизация положения, а *ахроматизация увеличения*, т. е. равенство фокусных расстояний для лучей различного цвета. Действительно, благодаря значительной длине тубуса микроскопа лучи попадают на окуляр под малыми углами наклона к главной оптической оси микроскопа. В этом случае угловое увеличение, даваемое окуляром, определяется формулой (24.2), независимо от того, как аккомодирован глаз: на бесконечность или на расстояние ясного зрения. Если фокусные расстояния окуляра ахроматизованы, то угловое увеличение будет одинаковым для всех цветов. Поэтому изображения предмета на сетчатке глаза во всех цветах совместятся между собой, т. е. окончательное изображение получится неокрашенным, даже если положения главных фокусов и главных плоскостей окуляра не ахроматизованы. Если же изображение, даваемое объективом, не свободно от хроматической aberrации, то ее можно компенсировать хроматической aberrацией противоположного знака,

которую дает окуляр. Так, апохроматы дают хроматическую разность увеличений: синее изображение увеличивается сильнее красного. Аббе комбинирует их с такими компенсированными окулярами, у которых фокусное расстояние для синих лучей больше, а следовательно, увеличение меньше, чем для красных лучей.

В § 16 (пункт 5) было показано, что фокусное расстояние системы из двух тонких линз, изготовленных из стекла одного и того же сорта будет одним и тем же для всех цветов спектра, если расстояние l между линзами равно полусумме ее фокусных расстояний: $l = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$. Составлением окуляров из двух линз одновременно можно достигнуть устранения астигматизма косых пучков, а потому окуляры и конструируются по этому принципу. Линза, обращенная к объективу, называется *коллективом*, или *собирающей линзой*, а обращенная к глазу — *глазной линзой*. Коллектив выполняет ту же роль, что и конденсор проекционного аппарата; он собирает все лучи, участвующие в образовании изображения, направляя их в зрачок глаза наблюдателя. При отсутствии специальной диафрагмы поля зрения роль этой диафрагмы выполняет оправа коллектива. Вот почему коллектив часто называют также *полевой линзой*. Увеличение окуляра определяется главным образом *глазной линзой*. Простейшими окулярами описанного типа, применяемыми в микроскопах и телескопах, являются *окуляр Гюйгенса* и *окуляр Рамсдена* (1735—1800).

5. Окуляр Гюйгенса состоит из двух плоско-выпуклых или двояковыпуклых линз, обращенных более выпуклыми поверхностями в сторону падающих лучей (рис. 91). Для уменьшения сферической aberrации Гюйгенс выбрал фокусные расстояния и взаимное расположение линз так, чтобы отклонение луча, первоначально направленного параллельно главной оптической оси, при преломлении распределялось поровну между обеими линзами. Нетрудно подсчитать (что рекомендуется сделать читателю), что в параксиальном приближении это будет достигнуто при условии $l = f_1 - f_2$, где f_1 — фокусное расстояние собирающей, а f_2 — *глазной* линзы.

Комбинируя это уравнение с условием $l = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$, находим: $f_1 = 3f_2$, $l = 2f_2$. Таким образом, в окуляре самого Гюйгенса $f_2 : l : f_1 = 1 : 2 : 3$ (в современных конструкциях окуляра Гюйгенса чаще пользуются отношением 2 : 3 : 4). Оптический интервал

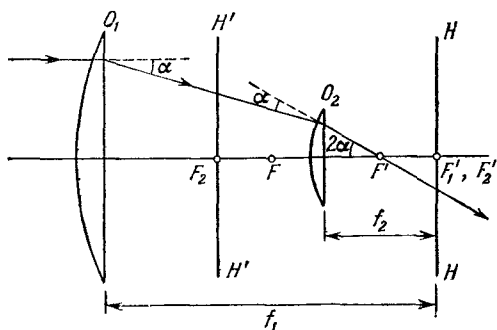


Рис. 91.

между линзами окуляра $\Delta = -2f_2$. По формулам (12.2), (12.3) и (12.4) нетрудно рассчитать положение главных фокусов, главных плоскостей и фокусные расстояния окуляра Гюйгенса. Результаты расчета приведены на рис. 91 (положение переднего фокуса F_1 коллектива не показано).

На рис. 92 приведен ход лучей в окуляре Гюйгенса. Предположим, что глаз аккомодирован на бесконечность, а потому окончательное изображение, даваемое микроскопом, должно получаться в бесконечности. Значит, объектив должен давать перевернутое изображение AB предмета в передней фокальной плоскости окуляра. Этого можно добиться, перемещая весь микроскоп вверх или вниз

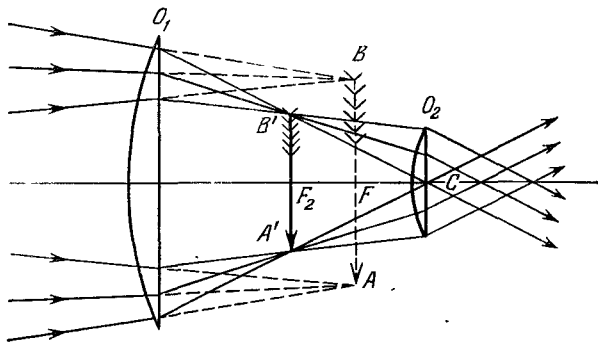


Рис. 92.

под предметным столиком. Изображение AB для коллектива O_1 играет роль *мнимого предмета*. Коллектив даст его действительное уменьшенное изображение $A'B'$ в передней фокальной плоскости глазной линзы O_2 , так как окончательное изображение должно получиться в бесконечности (в этом можно убедиться и непосредственным расчетом). Изображение $A'B'$ увеличивается глазной линзой O_2 , действующей как лупа. Угол $A'CB'$ определяет поле зрения. Его можно изменить, поместив в фокальной плоскости F_2 глазной линзы диафрагму поля зрения.

Окуляр Гюйгенса мало пригоден для точных измерений. Действительно, в этом окуляре шкалу микрометра следовало бы располагать между линзами окуляра. Но тогда шкала микрометра сравнилась бы с изображением предмета, даваемым объективом микроскопа, которое искажено первой линзой окуляра. Аберрации этой линзы, и прежде всего ее дисторсия, вносили бы в измерения значительные ошибки, не поддающиеся точному учету. Окуляр Гюйгенса не может быть использован и в качестве обыкновенной лупы, предназначенной для непосредственного рассматривания мелких предметов, так как рассматриваемый предмет надо было бы опять помещать между

линзами окуляра. Окуляр Гюйгенса применяется в качестве компенсационного окуляра в комбинации с объективами-ахроматами. В этом случае, однако, глазную линзу изготовляют из двух склеенных сферических стекол различного сорта.

6. Окуляр Рамсдена состоит из двух плоско-выпуклых линз с одинаковыми фокусными расстояниями ($f_1 = f_2$), обращенных

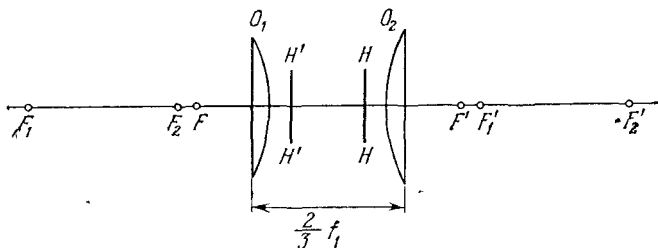


Рис. 93.

выпуклыми поверхностями одна к другой (рис. 93). В первоначальном варианте окуляра расстояние между линзами $l = f_1 = f_2$, что обеспечивает ахроматизацию фокусного расстояния f всего окуляра. Но в таком варианте собирающая линза находится в передней фокальной плоскости глазной линзы. Поэтому глазная линза отчетливо изображает каждую пылинку, грязь и царапину на поверхности собирающей линзы, что, конечно, портит изображение предмета. Чтобы это устранить, расстояние между линзами

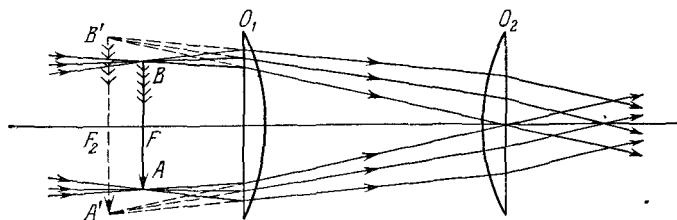


Рис. 94.

уменьшают, выбирая обычно $l = \frac{2}{3} f_1$. Это, конечно, нарушает ахроматизацию окуляра. Однако возникающие хроматические явления мало заметны. Их можно устранить, применяя ахроматическую глазную линзу, склеенную из собирающей (крон) и рассеивающей (флинт) линз. Это делается в *окулярах типа Кельнера*. Рассеивающая линза должна быть обращена к глазу. Желательно также ахроматизовать и коллектив окуляра, но этого почти никогда не делают.

Положение фокальных точек и главных плоскостей в окуляре Рамсдена показано на рис. 93, а на рис. 94 приведен ход лучей

в этом окуляре. Сравнивая их с рис. 91 и 92, видим невыгоду окуляра Рамсдена: он удлиняет всю систему микроскопа, так как передняя фокальная плоскость окуляра, в которой объектив должен давать действительное изображение AB , лежит перед передней линзой окуляра на расстоянии $1/4 f_1$ (а не между линзами окуляра, как в случае окуляра Гюйгенса).

Но в этой особенности окуляра Рамсдена есть и его преимущество. В фокальной плоскости F можно поместить микрометр (шкалу на стеклянной пластинке или нити, перемещаемые микрометрическим винтом) и таким путем измерить размеры действительного изображения, даваемого объективом микроскопа. При этом микрометр и действительное изображение, даваемое объективом, оба находятся перед окуляром, и aberrации полевой линзы окуляра искажают их одинаково. Тем самым в окуляре Рамсдена устраняется основной недостаток окуляра Гюйгенса как измерительного прибора. Зная линейное увеличение объектива микроскопа, легко вычислить и размеры самого предмета. Поэтому в микроскопах, служащих для измерения длин и углов, применяются окуляры Рамсдена с окулярными микрометрами.

В зависимости от назначения применяются и более сложные окуляры, состоящие не из двух, а из большего количества линз.

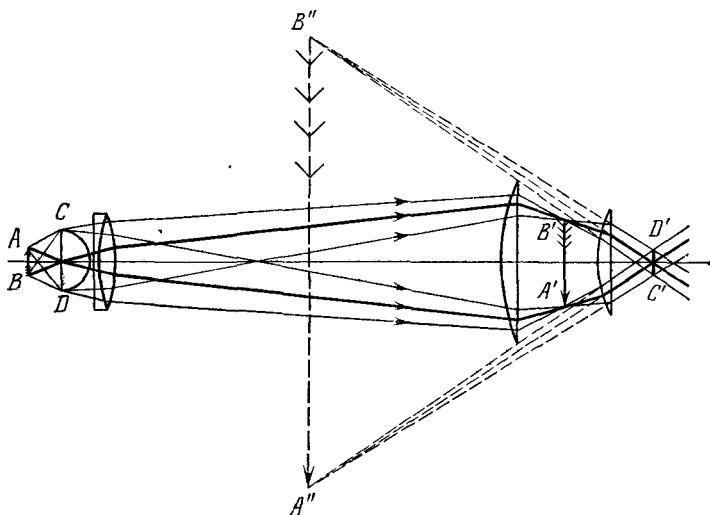


Рис. 95.

7. На рис. 95 изображен ход лучей в микроскопе с окуляром Гюйгенса. Главные лучи, исходящие из крайних точек предмета AB , начерчены толстыми, крайние лучи, исходящие из тех же точек, — тонкими линиями. Если увеличение меньше нормального,

то зрачок глаза наблюдателя служит апертурной диафрагмой, а его изображение, даваемое всем микроскопом, — входным зрачком этого прибора. Если же увеличение больше нормального, то апертурной диафрагмой и входным зрачком является диафрагма или края полушаровой линзы CD . Ее изображение $C'D'$ будет выходным зрачком микроскопа. Диафрагма поля зрения должна быть помещена в том месте, где получается изображение $A'B'$, даваемое объективом и собирающей линзой окуляра. Изображение $A''B''$, которое видит наблюдатель, можно получить на любом расстоянии, что достигается небольшим поднятием или опусканием всего микроскопа. Обычно его получают на расстоянии ясного зрения (25 см для нормального глаза) или в бесконечности. Перемещая окуляр, можно менять оптическую длину тубуса, а с ней и увеличение микроскопа.

Из рисунка видно главное преимущество микроскопа перед лупой. Оно состоит в том, что в микроскопе задача получения изображения распадается на две части, из которых одна решается объективом, другая окуляром. Объектив дает изображение предмета при максимально возможной числовой апертуре. Окуляр, как и лупа, при большом поле зрения дает изображение точек предмета с помощью узких пучков лучей, так как эти пучки ограничены выходным зрачком микроскопа.

Объекты, рассматриваемые в микроскоп, обычно не самосветящиеся, а освещаются посторонним источником. Для этой цели употребляется *конденсор*, состоящий из одной или нескольких короткофокусных линз, помещаемый под предметным столиком микроскопа. Чтобы полностью использовать высокую числовую апертуру объектива микроскопа, наклон освещающих лучей к оптической оси должен быть большим. Вот почему для конденсора берут короткофокусные линзы. Конечно, конденсор не может повысить поверхностную яркость источника света, его действие эквивалентно приближению источника к освещаемому объекту.

8. Зрительные трубы и телескопы. Главными частями зрительной трубы являются *объектив* и *окуляр*. Объектив дает в задней фокальной плоскости обратное уменьшенное изображение AB удаленного предмета, рассматриваемое в окуляр как в лупу (рис. 96). Для нормального глаза, аккомодированного на бесконечность, задний фокус объектива должен быть совмещен с передним фокусом окуляра. Это совмещение нарушается, но незначительно, для близорукого и дальнозоркого глаза. Таким образом, параллельный пучок лучей после прохождения через трубу, установленную на бесконечность, остается параллельным, т. е. зрительная труба является *телескопической оптической системой*. Увеличение (угловое) таких систем равно отношению ширины падающего пучка лучей к ширине соответствующего выходящего пучка, или отношению фокусного расстояния объектива f_1 к фокус-

ному расстоянию окуляра f_2 (см. § 11, пункт 10). О нормальном увеличении подробно говорилось в пункте 4 предыдущего параграфа.

Лучи, падающие на объектив зрительной трубы, наклонены под малыми углами к главной оптической оси. Поэтому нет надобности в тщательном исправлении аберраций, зависящих от этих углов. Объективом служит ахроматическая двойная линза, исправленная на сферическую аберрацию. Кома, т. е. отступление от условия синусов, может быть исправлена не столь тщательно. Ахроматизация окуляра должна удовлетворять тем же условиям, что и в случае микроскопа: если главный луч падает на окуляр под небольшим углом к главной оптической оси, то можно ограничиться ахроматизацией только фокусного расстояния. Поэтому для микроскопов и зрительных труб можно пользоваться одними и теми же окулярами.

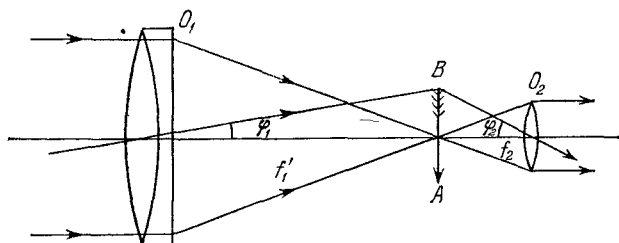


Рис. 96.

Если требуются микрометрические измерения изображения (как в астрономических трубах), то предпочтительнее пользоваться окуляром Рамсдена, а не Гюйгенса.

На рис. 96 изображен ход лучей в зрительной трубе Кеплера (для простоты сложный окуляр заменен простой собирающей линзой). Эта труба дает перевернутое изображение. Чтобы устранить этот недостаток, за изображением AB , даваемым объективом, на двойном фокусном расстоянии помещают добавочную ахроматизованную собирающую линзу, которая переворачивает изображение AB , не меняя его величины. Полученное изображение и рассматривается в окуляре. Окончательное изображение, которое видит глаз, получается прямым.

В трубе Галилея окончательное изображение получается прямым без введения промежуточной линзы. Это достигается тем, что в качестве окуляра применяется простая двояковогнутая линза, передний фокус которой F_2 совпадает с задним фокусом объектива F'_1 (рис. 97). Поле зрения галилеевой трубы невелико. Зато при том же объективе галилеева труба значительно короче кеплеровой. Поэтому труба с отрицательным окуляром применяется только в театральные биноклях.

В обыкновенном бинокле, состоящем из двух зрительных труб, переворачивание изображений, даваемого объективом, достигается

в каждой трубе с помощью четырехкратного полного отражения от гипотенузных поверхностей двух прямоугольных стеклянных призм A и B , расположенных, как показано на рис. 98. Луч выходит из

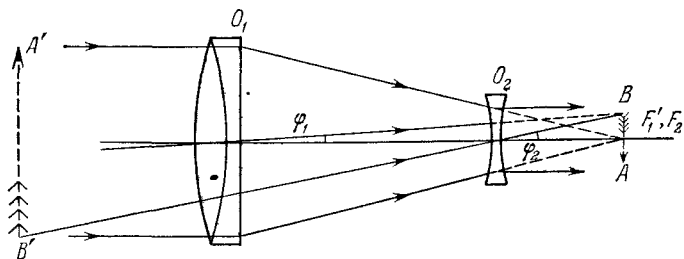


Рис. 97.

призмы B параллельно падающему лучу, но получает боковое смещение. В остальном устройство зрительной трубы не отличается от устройства трубы Кеплера. Так как луч проходит расстояние между призмами трижды, то можно значительно уменьшить длину трубы, раздвигая призмы A и B друг относительно друга. При несколько иной конструкции можно получить бинокулярную трубу,

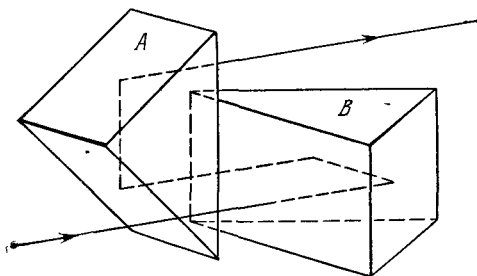


Рис. 98.

у которой расстояние между объективами во много раз превышает расстояние между глазами наблюдателя. В такой «стереотрубе» сильно увеличивается *стереоскопический эффект*, обусловленный зрением двумя глазами.

9. *Астрономические трубы, или телескопы*, бывают двух типов: преломляющие (*рефракторы*) и

отражающие (*рефлекторы*). В преломляющих объективом служит линза, в отражающих — вогнутое зеркало, называемое *главным зеркалом*.

Изготовление объективов для телескопов-рефракторов представляет большие трудности, быстро возрастающие с увеличением размеров объектива. Главная трудность состоит в получении большого диска стекла с вполне однородным показателем преломления и отсутствием натяжений. Последние снимаются медленным *отжигом стекла*, длящимся месяцами. Необходима большая точность в изготовлении сферических поверхностей, в центровке и сборке линз. Влияние неизбежных небольших случайных отклонений от полной однородности показателя преломления стекла устраняется дефор-

мацией точных сферических поверхностей объектива путем *местной полировки — ретуши*. Изготовление объектива для рефракторов больших обсерваторий тянется годами. Самым крупным рефрактором в настоящее время является телескоп Иеркской обсерватории в США. Диаметр его объектива составляет 40 дюймов (1 м). Диаметр объектива рефрактора Главной астрономической обсерватории АН СССР в Пулкове равен 30 дюймов (75 см).

Значительно легче изготовить главное зеркало телескопа, так как свет не проходит сквозь стекло, и последнее может быть менее высокого качества, но должно быть лишь хорошо отожжено. Такое стекло может быть отлито в диски огромного размера. Поэтому крупнейшими являются отражательные телескопы (рефлекторы). Самый крупный телескоп с диаметром главного зеркала 6 м недавно установлен в СССР на северных отрогах Кавказского хребта вблизи станции Зеленчукской. До этого самым крупным был телескоп в обсерватории Маунт Паломар (Калифорния, США) с диаметром главного зеркала 5 м.

Отражающая поверхность главного зеркала телескопа-рефлектора шлифуется на стекле. Ей придают форму параболоида, чтобы лучи, параллельные главной оптической оси, собирались в фокусе параболоида. При изготовлении поверхности зеркала сначала придают форму сферы, радиус которой R почти в точности равен удвоенному фокусному расстоянию F параболоида. Затем производят параболлизацию этой поверхности путем снятия шлифовкой (ретушью) тонкого слоя стекла на центральной части зеркала. В наиболее толстом месте, как нетрудно подсчитать, толщина слоя должна составлять $\frac{1}{8} (r/R)^4 R$, где r — радиус кривизны зеркала. При $r = 50$ см, $F = 5$ м для этой толщины получаем $7,8 \cdot 10^{-4}$ см, т. е. примерно 15 длин волн желто-зеленого света. Отражающая поверхность зеркала покрывается тонким слоем серебра, алюминия или родия. С течением времени под действием воздуха отражательная способность металлического слоя постепенно уменьшается. Серебряный слой должен обновляться примерно каждые полгода. Алюминиевый слой более устойчив и держится годами. Еще лучшие результаты дает покрытие зеркала слоем родия.

Важное преимущество зеркального телескопа перед рефрактором состоит в том, что этот телескоп абсолютно ахроматичен. Это позволяет не только работать со светом любой окраски, но и значительно повысить светосилу телескопа с соответствующим уменьшением его длины.

Свет должен дважды пройти трубу рефлектора, прежде чем он соберется в фокусе. Поэтому требуется небольшое вспомогательное зеркало (или призма), чтобы сместить фокальную плоскость в более удобное положение для наблюдения глазом или помещения фотографической пластинки. В зеркальном телескопе Ньютона плоское вспомогательное зеркало s смещало фокус F вбок, как указано

на рис. 99 (на этом и последующих рисунках окуляр не изображен, указано только смещенное положение F фокуса оптической системы).

В телескопе Вильяма Гершеля (рис. 100) вспомогательного зеркала нет, главный фокус F смещается вбок трубы путем небольшого

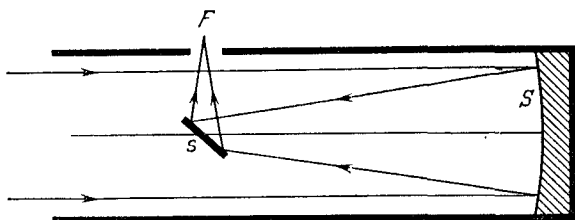


Рис. 99.

наклона главного зеркала S . За несколько лет до Гершеля такой телескоп был изобретен Ломоносовым, но его изобретение оставалось неизвестным вплоть до начала XX века. Недостаток системы Ломоносова — Гершеля состоит в том, что изображение получается не на

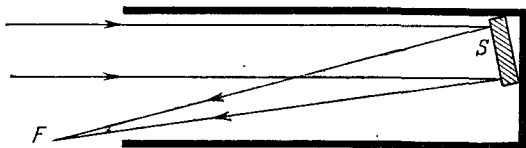


Рис. 100.

главной оптической оси. Это ухудшает качество изображения. Впрочем, сам Гершель пользовался столь длиннофокусными зеркалами, что требовались лишь небольшие углы наклона, и ухудшение изображения было незначительным.

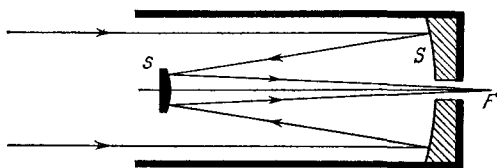


Рис. 101.

В системе Кассегрена (рис. 101) применяется выпуклое гиперболическое зеркало s , располагающееся на главной оптической оси несколько ближе фокуса главного зеркала S . Фокус гиперболической поверхности вспомогательного зеркала s совпадает с фокусом

главного зеркала S . После отражения лучей от зеркала s образуется новый фокус F оптической системы, совпадающий со вторым фокусом гиперболической поверхности зеркала s . Лучи выходят из системы через отверстие в центре главного зеркала S и попадают в окуляр или на фотопластинку.

Сходное устройство имеет телескоп Грегори (рис. 102). Здесь вспомогательным зеркалом s служит вогнутое эллиптическое зеркало, располагающееся на главной оптической оси несколько дальше фокуса главного зеркала S . Фокус зеркала S совмещается с первым фокусом эллиптического зеркала s . Смещенный фокус F всей оптической системы получается в точке нахождения второго фокуса эллиптической поверхности зеркала s . Лучи также выходят из

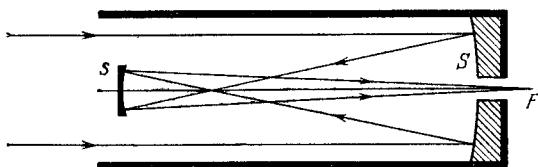


Рис. 102.

системы через отверстие в центре главного зеркала S и попадают в окуляр или на фотопластинку. По качеству изображения телескоп Грегори несколько превосходит телескоп Кассегрена. Но для него требуется гораздо более длинная труба. По этой причине система Грегори почти никогда не применяется.

10. Камера Шмидта и менисковые системы Максудова. Придание отражающей поверхности главного зеркала телескопа параболической формы, а также использование в качестве вспомогательных эллиптических и гиперболических зеркал устраняет сферическую aberrацию, но сохраняет все прочие геометрические aberrации, так как геометрические фокусы параболоида, эллипсоида и гиперболоида являются *только анаберрационными, но не апланатическими точками*. Зеркальным объективам телескопов всегда свойственны значительные aberrации комы и астигматизма. Вследствие этого поле зрения, где получаются четкие изображения, у этих приборов невелико и измеряется минутами, а в лучших случаях — десятками минут. В 1930 г. Б. Шмидт, сотрудник Гамбургской обсерватории в Бергдорфе, предложил новый тип телескопа, получивший название камеры Шмидта. Короткофокусная камера Шмидта с относительным отверстием $D/f = 1$ может давать резкие изображения при поле зрения $\approx 25^\circ$. Параболическое же зеркало при таком же относительном отверстии может иметь полезное поле зрения, измеряемое только несколькими дугами минутами.

Рис. 103 поясняет основную идею камеры Шмидта. На этом рисунке S_1S_2 — вогнутое сферическое зеркало с центром в точке C , а D_1D_2 — отверстие диафрагмы с центром в той же точке, введенной только для лучшего уяснения указанной идеи. Пучок лучей A , параллельных главной оптической оси зеркала, после отражения пройдет через кружок с центром в главном фокусе F . Размеры кружка определяются сферической аберрацией. Параллельный пучок A_1 , падающий наклонно, пройдет через аналогичный кружок с центром в побочном фокусе F_1 . Геометрическим местом всех таких фокусов будет сфера, радиус которой вдвое меньше радиуса зеркала S_1S_2 .

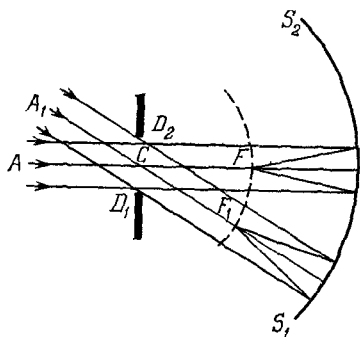


Рис. 103.

Она изображена пунктиром. Таким образом, бесконечно удаленные точки в результате отражения света от сферического зеркала S_1S_2 изобразятся кружками, расположенными на этой пунктирной сфере.

Размеры кружков почти одинаковы, так как они образуются параллельными пучками лучей практически одинакового поперечного сечения. Наклон пучков влияет лишь на положение кружков на пунктирной сфере, но не на их величину. Впрочем,

полная одинаковость кружков несущественна. Существенно, что единственными геометрическими аберрациями будут сферическая аберрация и искривление поверхности изображения. Комы, астигматизма и дисторсии не будет.

В обычных зеркальных телескопах сферическая аберрация устраняется параболизацией отражающей поверхности зеркала. Но такой способ годится только для точек, лежащих на главной оптической оси зеркала. Шмидт предложил устранять сферическую аберрацию коррекционной стеклянной пластинкой, помещаемой перед сферическим зеркалом S_1S_2 . Одна поверхность пластинки плоская, вторая — поверхность вращения надлежащей формы, мало отклоняющаяся от плоскости. Это отклонение настолько мало, что оно совершенно незаметно невооруженному глазу.

Сечение коррекционной пластинки P_1P_2 представлено на схематическом рис. 104 в преувеличенном виде. Центральная часть пластинки более толстая — действует как собирающая линза, приближая фокус центральных лучей к зеркалу. Края пластинки более тонкие и, подобно рассеивающей линзе, удаляют от зеркала фокусы наклонных пучков лучей.

Помещение коррекционной пластинки вплотную к зеркалу не может дать никаких преимуществ по сравнению с параболизацией его поверхности. Однако коррекционная пластинка, если пра-

вильно рассчитать ее форму, помещенная на определенном расстоянии от зеркала, устраняет сферическую aberrацию не только для пучков лучей, параллельных главной оптической оси, но и для пучков, наклоненных к ней. Обычно коррекционную пластинку помещают в центре сферического зеркала и для этого положения рассчитывают ее форму. При этом другие aberrации практически не возникают. Изготовление коррекционных пластинок Шмидта — очень трудная задача.

В 1941 г. Д. Д. Максутов (1896—1964) для исправления aberrаций сферического зеркала предложил применять *мениски*, значительно более легкие в изготовлении, чем коррекционные пластинки Шмидта с несферическими поверхностями. Системы Максутова быстро получили широкое распространение. При определенном соотношении между радиусами кривизны сферических поверхностей мениска и его толщиной мениск ахроматизован (для двух требуемых цветов спектра).

На рис. 105, а приведена простейшая система Максутова, состоящая из сферического зеркала S и мениска B , обращенного к нему

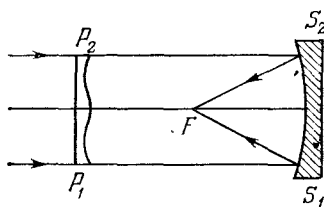


Рис. 104.

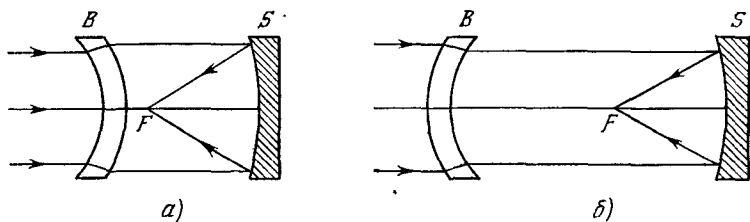


Рис. 105.

выпуклой стороной. Если мениск ахроматизован, то в фокусе F образуется ахроматическое изображение. Сферическая aberrация мениска подбирается так, чтобы компенсировать сферическую aberrацию зеркала S . При правильно выбранном расстоянии l между мениском и зеркалом оказывается исправленной и кома, т. е. система становится апланатической. Если при том же расстоянии l мениск повернуть к зеркалу вогнутой стороной, то апланатизм нарушается. Его можно восстановить, увеличивая расстояние l (рис. 105, б). Первая ориентация мениска более выгодна, так как при ней телескоп получается вдвое короче, чем при второй. Однако для некоторых целей предпочтительнее вторая ориентация.

Астигматизм менисковой системы может быть сделан ничтожно малым, а в частных случаях и вполне устранен. Искривление поверхности изображения остается. Но из всех aberrаций эта aberrация

является наименее вредной, и существуют способы ее устранения. Соединение камеры Шмидта или менисковых систем Максудова с окуляром производится так же, как в телескопах Ньютона, Кассегрена и Грегори.

§ 25. Электрические и магнитные линзы

1. Допустим, что показатель преломления n меняется в пространстве непрерывно. Проведем поверхности равного показателя преломления и притом настолько часто, что показатели преломления между каждыми соседними поверхностями можно будет считать величинами постоянными. Тогда непрерывное изменение величины n заменится скачкообразным, происходящим на границах между слоями. Если среда обладает осевой симметрией, то эти границы будут поверхностями вращения, вершины которых лежат на оси симметрии системы. В малой окрестности вокруг оси симметрии их можно аппроксимировать сферами, центры которых также лежат на той же оси. Таким путем мы приходим к центрированной системе тонких сферических линз, у которой ось симметрии служит главной оптической осью и к которой применимы все результаты оптики параксиальных лучей. Увеличивая число слоев бесконечно и одновременно устремляя к нулю их толщины, мы восстановим в пределе первоначальное непрерывное распределение показателя преломления. Отсюда следует, что *осесимметричную среду с непрерывно изменяющимся в пространстве показателем преломления можно рассматривать как предельный случай центрированной системы линз и применять к ней законы и методы оптики параксиальных лучей. Такая среда обладает способностью давать оптические изображения.*

Оптические системы с непрерывно изменяющимися показателями преломления принципиально возможны, но из-за трудностей их изготовления в световой оптике они не встречаются. (Исключение составляет хрусталик глаза, показатель преломления которого возрастает от периферии к центру.) Аналогом таких систем являются электронные и ионные приборы (электронный микроскоп, электронный осциллограф, электронно-лучевая трубка в телевидении и пр.), в которых роль лучей играют электроны или ионы, движущиеся в электростатических или магнитных полях, создаваемых заряженными электродами или катушками, по которым текут электрические токи. Эти электроды называются *электрическими*, а катушки — *магнитными линзами*. Получение изображений в таких системах изучается в *электронной и ионной оптике*.

2. Возможность фокусировки заряженных частиц и получения изображений в осесимметричных системах электростатических линз непосредственно следует из формальной аналогии между геометрической оптикой и классической механикой, отмеченной нами в пункте 1 параграфа 4. Действительно, согласно этой аналогии, траектория частицы в потенциальном силовом поле совпадает со световым лучом в непрерывной среде, показатель преломления которой пропорционален скорости (а в релятивистской механике — импульсу) частицы, однозначно определяющейся ее положением в пространстве. Например, можно положить

$$n = \sqrt{2(W - eV)}, \quad (25.1)$$

где W — полная энергия частицы, e — ее заряд, V — потенциал электростатического поля.

3. Несколько труднее понять действие магнитных линз и комбинаций таких линз с электростатическими линзами. Для исследования вопроса рассмотрим статическое электромагнитное поле, обладающее симметрией вращения вокруг некоторой оси. Эту ось примем за ось X цилиндрической системы координат. Расстояние до оси X будем обозначать через r , а азимутальный угол — через φ . Ввиду симметрии вращения, электрическое и магнитное поля не могут зависеть от φ . Предположим кроме того, что всякая плоскость, проходящая через ось