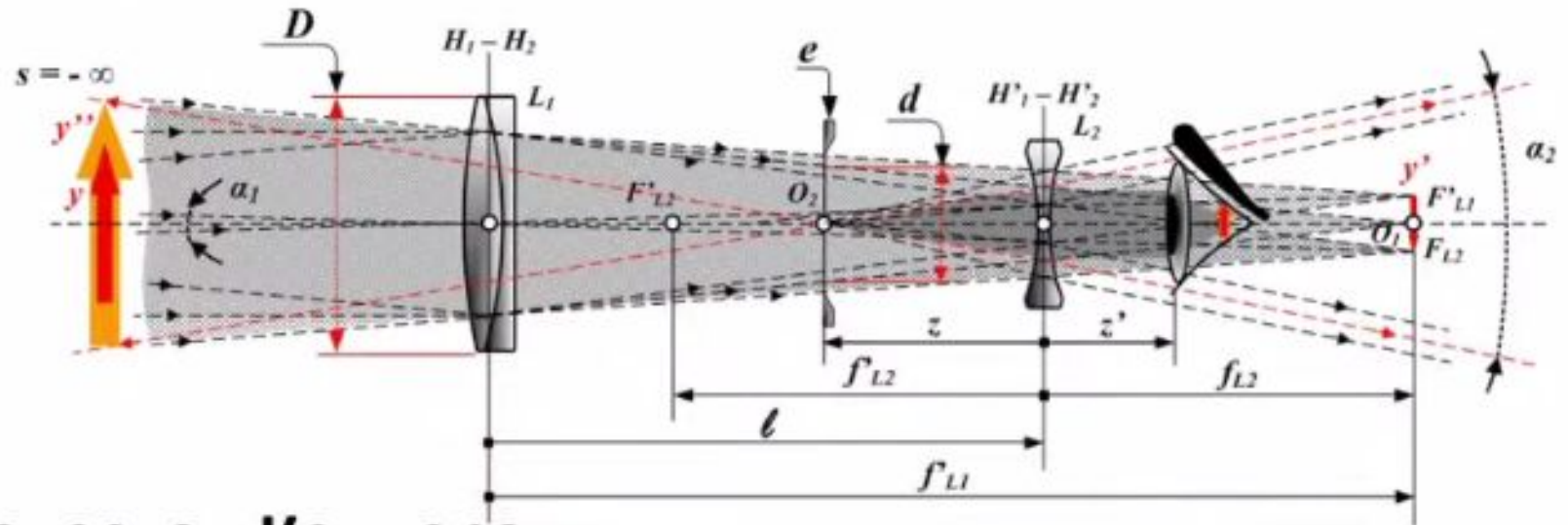


# Занятие 11

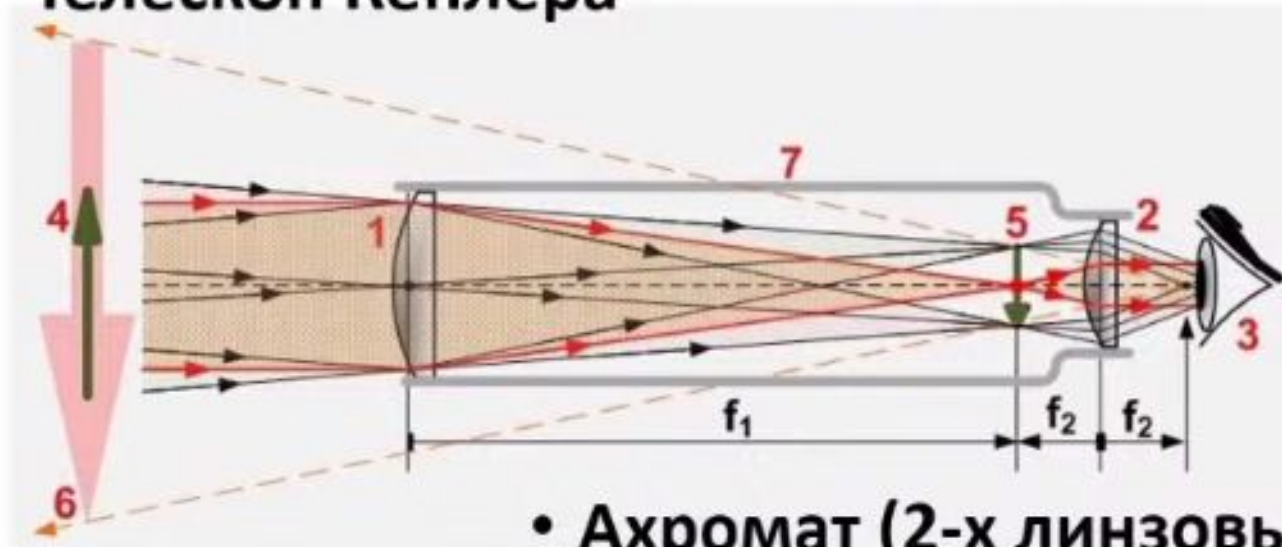
Методы астрофизических  
исследований

- Телескоп Галилея

# Рефракторы



- Телескоп Кеплера



- Ахромат (2-х линзовый объектив)

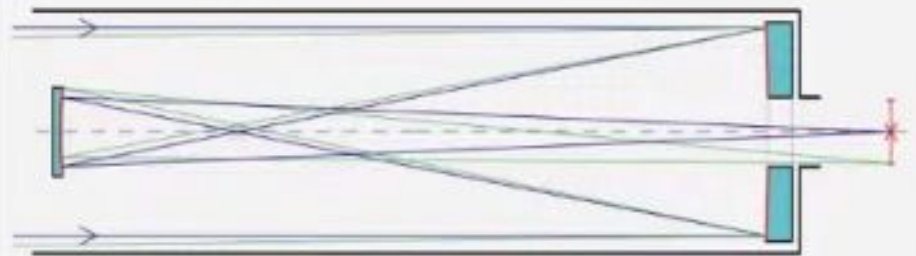
- Апохромат (3-х линзовый объектив)

# Рефлектор

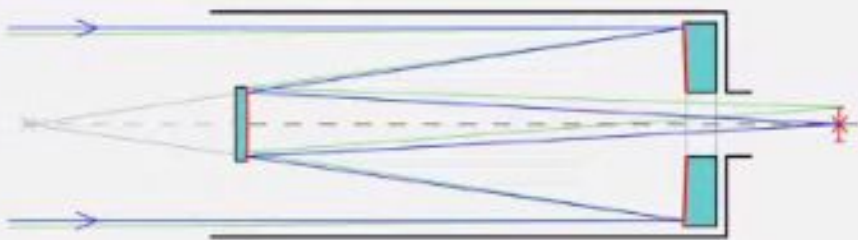
Newton-Teleskop



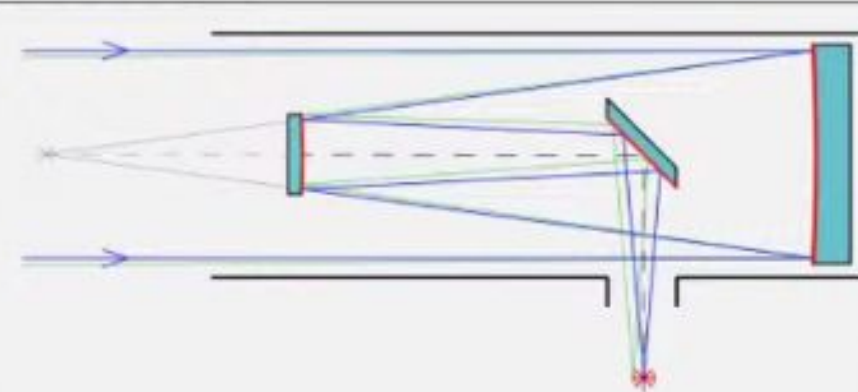
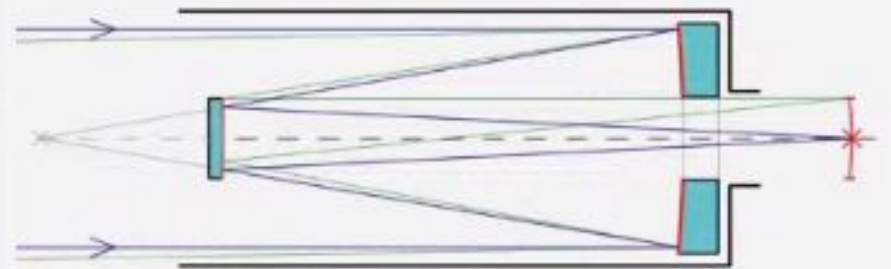
Gregory-Teleskop



Cassegrain-Teleskop



Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop



# Параметры телескопа

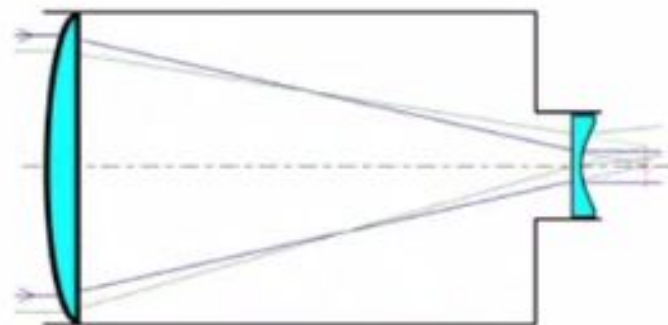
- Разрешающая способность

$$\theta \approx 1.22 * \frac{\lambda}{D} \approx \frac{1.22 * 206265 * 5.5 * 10^{-7}}{D * 1000 \text{мм}} \approx \frac{138''}{D_{\text{мм}}}$$

- Увеличение

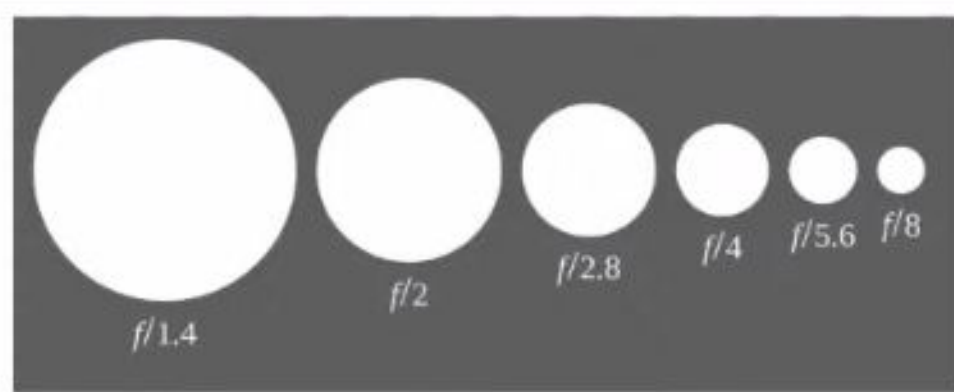
$$\Gamma = \frac{F}{f} \equiv \frac{D}{d}$$

- Равнозрачковое увеличение



$$\Gamma = \frac{D_{\text{мм}}}{6 \text{мм}} \Rightarrow f = \frac{F}{D_{\text{мм}} / 6 \text{мм}} = 6 \cdot \frac{F_{\text{мм}}}{D_{\text{мм}}}$$

# Параметры телескопа



- Относительное отверстие и светосила телескопа:

$$A = \frac{D}{F} \quad \forall = \frac{E}{B} = \left(\frac{D}{F}\right)^2 = (A)^2, \quad E - \text{освещенность}, \quad B - \text{яркость}$$

- Масштаб изображения в 1"

$$a = F \cdot \sin 1'' = \frac{F \cdot 1''}{206265''}$$

- Предельная звездная величина для наблюдения глазом в телескоп:

$$m = 2,1^m + 5 \lg D$$

$$m_T = m_{\Gamma} - 2^m + 2,5 \lg(D \cdot P \cdot t)$$

D – диаметр мм

P – величина увеличения

t – коэффициент пропускания (0,8-0,95)



# Задача №1

- Хаббл – 2.5 м

- $\frac{S_{ELT}}{S_H} = \frac{D_{ELT}^2}{D_H^2} = 264$

- $E \sim \frac{1}{R^2}, V \sim R^3 \Rightarrow$

$$\frac{V_n}{V_0} = (\sqrt{264})^3 = 4300$$

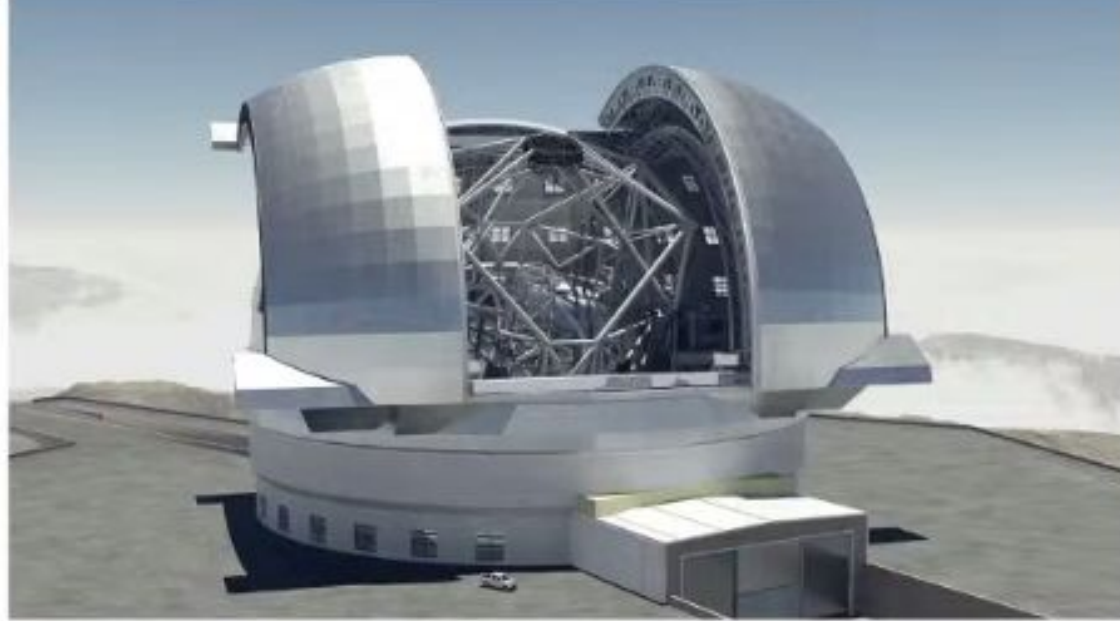
- $\frac{S_{KEK}}{S_H} = \frac{D_{KEK}^2}{D_H^2} = 15$

- $E \sim \frac{1}{R^2}, V \sim R^3 \Rightarrow$

$$\frac{V_n}{V_0} = (\sqrt{15})^3 = 58$$

R -

расстояние



- **Задача.** Во сколько раз светособирающая площадь 39-метрового телескопа ELT больше площади объектива космического телескопа «Хаббл»? А 10-метрового телескопа «Кек»? Во сколько раз возрастёт объём пространства, в котором ELT сможет наблюдать те же типы объектов, что телескопы «Хаббл» и «Кек»?

- **Ответ:** в 264 раза; в 15 раз; в 4300 раз; в 58 раз.

# Задача №3



- **Задача.** Определите величину углового поля зрения телескопа с фокусным расстоянием объектива 2 м при использовании приёмника света с матрицей диагональю 10 мм. Ответ выразите минутах дуги.

- Ответ: 17,2'.

- **Решение:**

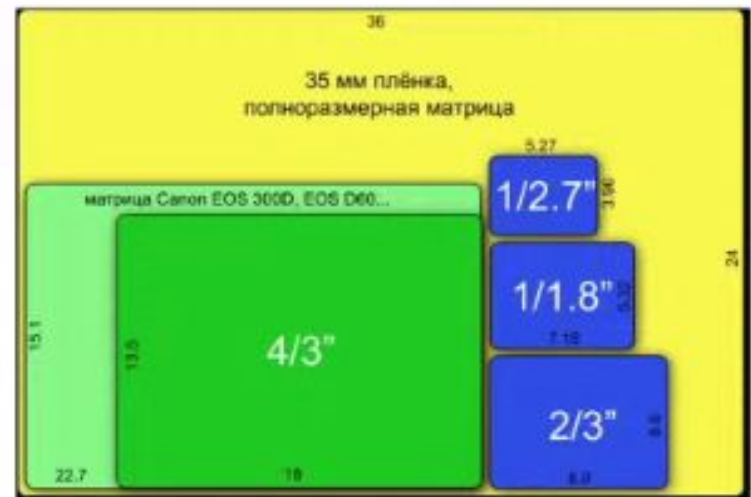
- Размер 1' в фокальной плоскости:

- $a = F \cdot$

- $\sin 1' = 5.8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

- Количество угловых минут на диагонали приемника:

- $\theta = \frac{d}{a} = \frac{10^{-2}}{5.8 \cdot 10^{-4}} = 17.2'$



# Задача №5

- **Задача.** Чему равна теоретическая разрешающая способность космического инфракрасного телескопа IRAS (диаметр зеркала 57 см, рабочие длины волн 12, 25, 60 и 100 мкм)?
- **Ответ:** 5.3", 11", 26", 44".
- Решение:
- Разрешение телескопа составляет:
- $\theta = 1.22 \cdot 206265'' \frac{\lambda}{D}$
- $\theta_{12} = 1.22 \cdot 206265'' \frac{12 \cdot 10^{-6}}{0.57} \approx 5.3''$
- $\theta_{25} = 1.22 \cdot 206265'' \frac{25 \cdot 10^{-6}}{0.57} \approx 11''$
- $\theta_{60} = 1.22 \cdot 206265'' \frac{60 \cdot 10^{-6}}{0.57} \approx 26''$
- $\theta_{100} = 1.22 \cdot 206265'' \frac{100 \cdot 10^{-6}}{0.57} \approx 44''$





# Фотометрия

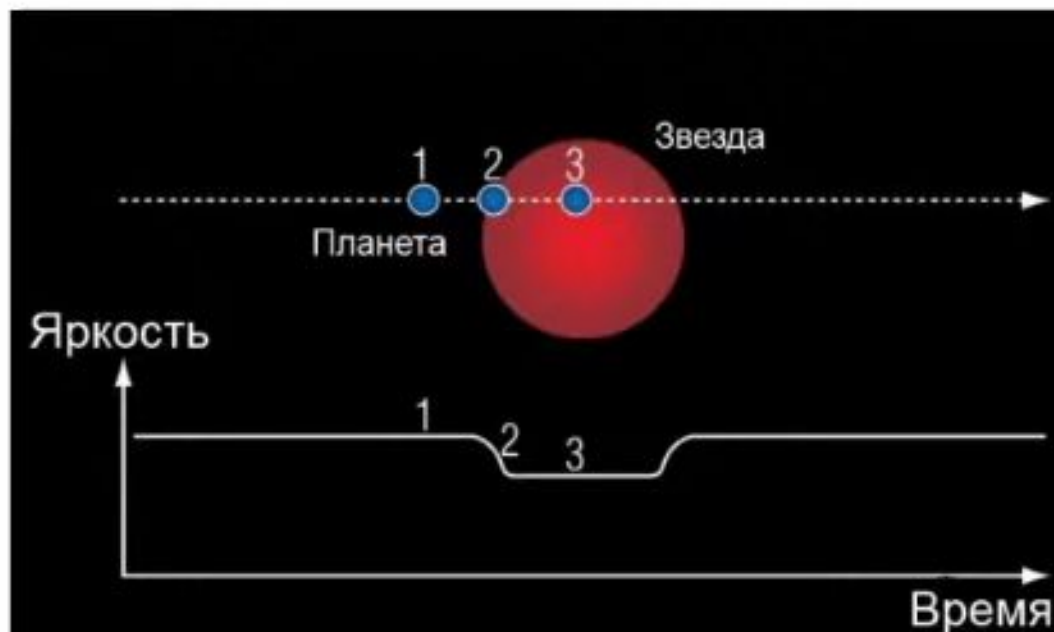
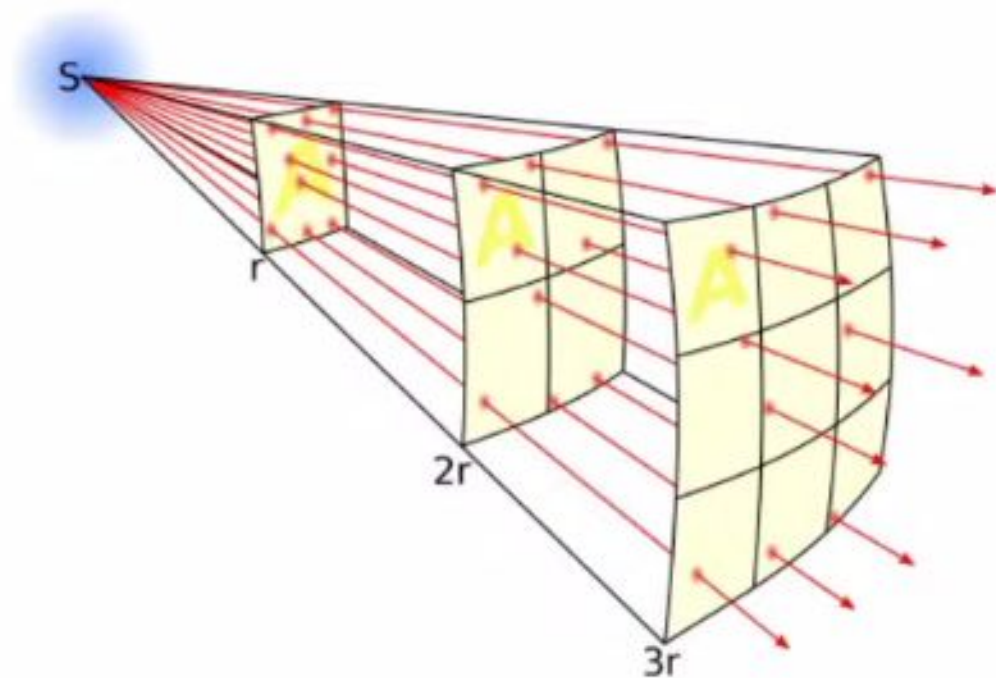
- Величины:
- $L$  – Светимость – полная мощность излучения во всех направлениях
- $E$  – освещенность – приходящая энергия на данном расстоянии, через единичную площадь
- $F$  – поток, приходящая мощность на данном расстоянии, через единичную площадь в единицу времени

- Точечный источник

$$E = Ft = \frac{L}{4\pi R^2} \quad E \sim \frac{1}{R^2}$$

- Протяженный источник

$$E = Ft = \frac{L}{2\pi R} \quad E \sim \frac{1}{R}$$



# Задача №6



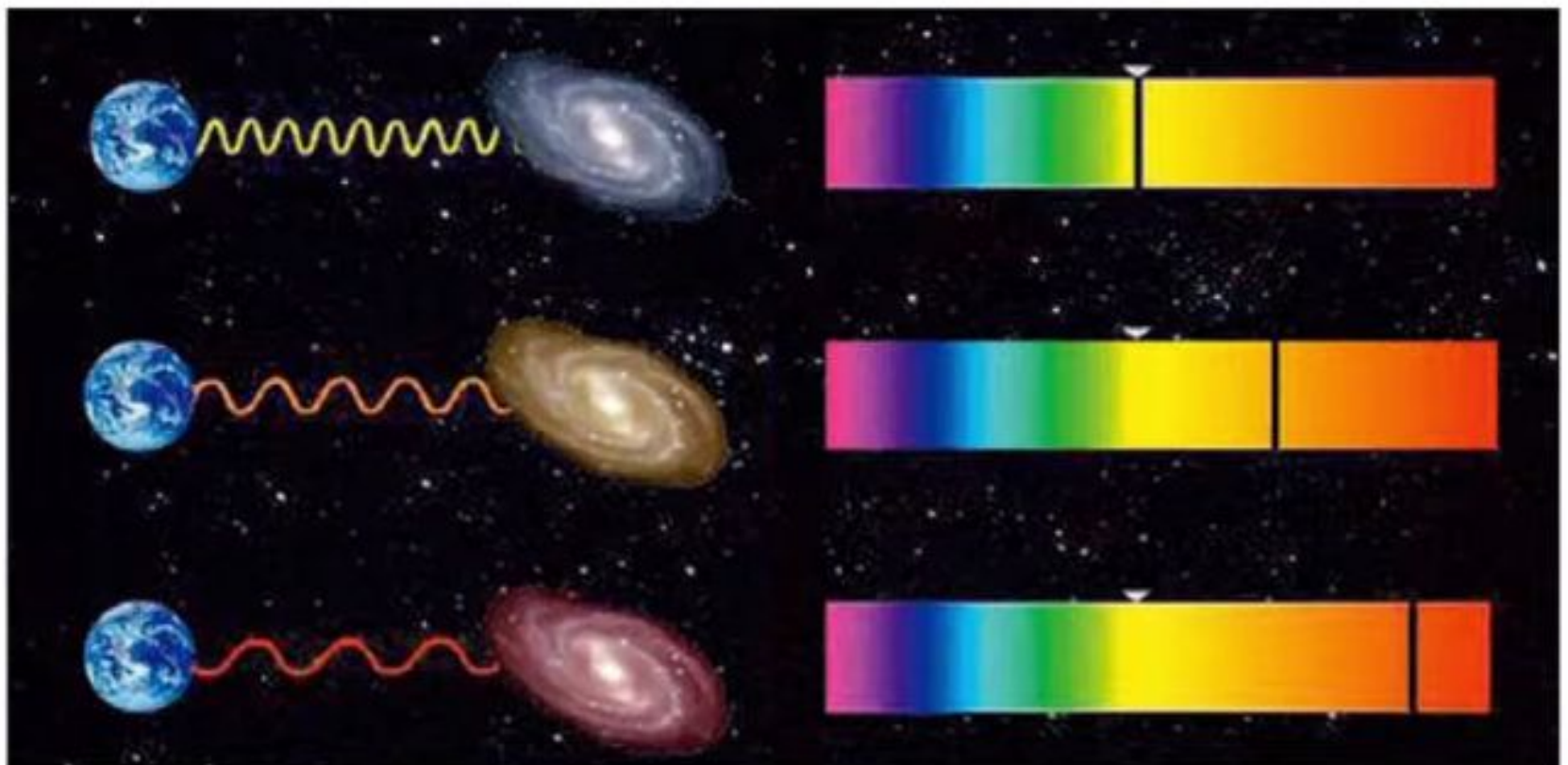
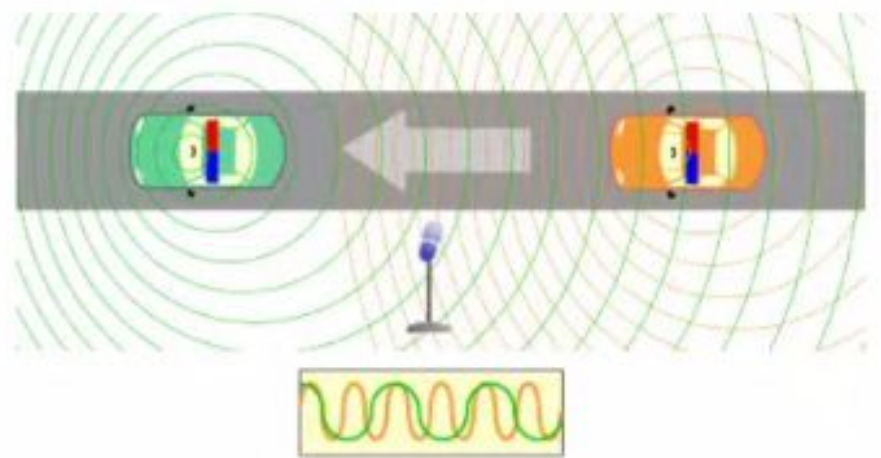
- **Задача.** На астрографе за 10 секунд накопления света регистрируются звёзды до  $15^m$ . Сколько времени надо копировать свет, чтобы зарегистрировать звёзды  $18^m$ ? Фоном неба пренебречь.
- **Ответ:** примерно 160 с.

- **Решение.** Разница в яркости предельно наблюдаемых объектов составляет  $18^m - 15^m = 3^m$
- Что составляет  $10^{0.4 \cdot 3} = 15.8 \approx 16$
- Следовательно, необходимо увеличить в 16 раз продолжительность накопления света – 160 секунд
- **Ответ:** примерно 160 с.

# Эффект Доплера

- Для скоростей много меньше  $c$

- $$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$



# Задача №9

• **Задача.** Длина волны линии излучения водорода  $H\alpha$  из-за красного смещения в спектре некоторой галактики увеличилась на 56 нм. На сколько изменилась длина волны излучения линии водорода  $H\beta$ ? А линии  $H\delta$ ?

• **Ответ:** 41,5 нм; 35 нм.

• Решение:

• Эффект Доплера

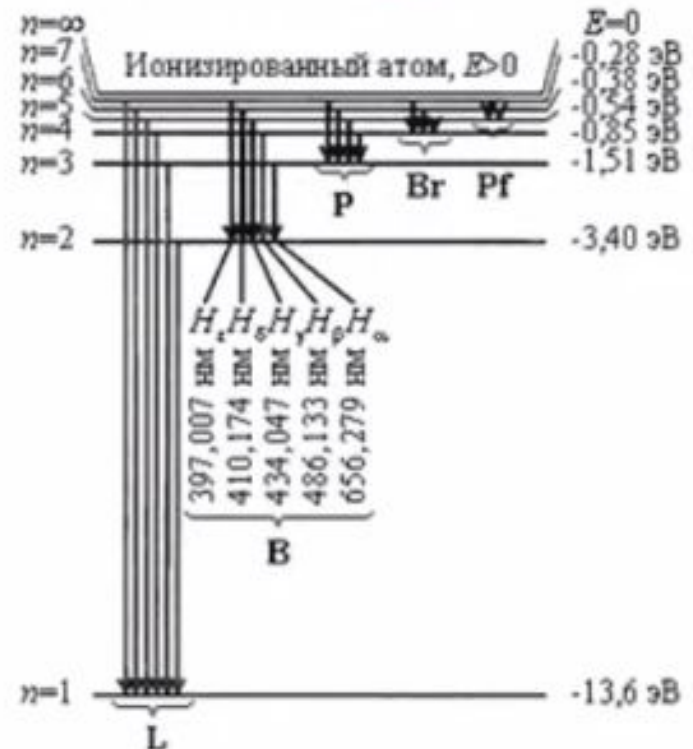
$$\frac{V}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

• Следовательно

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} \Rightarrow \Delta\lambda_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \Delta\lambda_1$$

$$\Delta\lambda_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \Delta\lambda_1 = \frac{486.1}{656.3} 56 = 41.5 \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \Delta\lambda_1 = \frac{410.2}{656.3} 56 = 35 \text{ нм}$$



- **Решение.** От звезды на пылинке будет следующая освещенность:

$$E = \frac{L}{4\pi a^2} = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi a^2} = \frac{R^2 \sigma T^4}{a^2}$$

- Пылинка поглотит из этого:

$$E \cdot (1 - A) \cdot \pi r_{\Pi}^2$$

- Эта энергия распределится по пылинке и уйдет из нее как светимость пылинки:

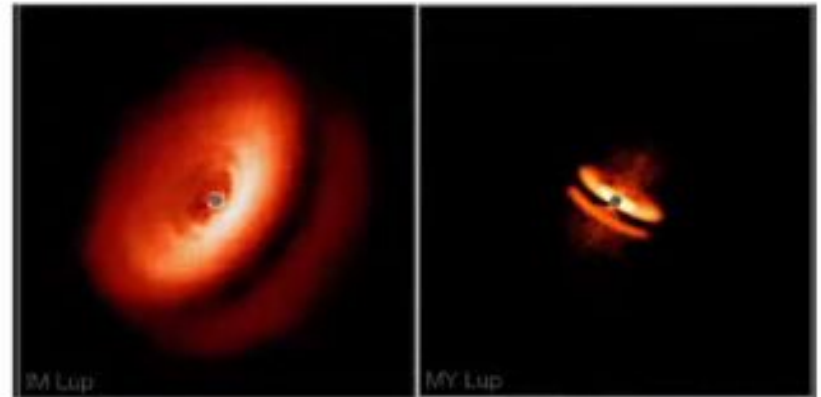
$$E \cdot (1 - A) \cdot \pi r_{\Pi}^2 = L_{\Pi}$$

- Следовательно

$$\frac{R^2 \sigma T^4}{a^2} (1 - A) \cdot \pi r_{\Pi}^2 = 4\pi r_{\Pi}^2 \sigma T_{\Pi}^4$$

$$T_{\Pi} = T \cdot \sqrt{\frac{R}{2a}} \cdot \sqrt[4]{1 - A}$$

## Задача №12



- **Задача.** Оцените температуру чёрной пылинки, расположенной на расстоянии  $a$  от звезды с температурой поверхности  $T$  и радиусом  $R$ . А если альbedo пылинки равно  $A$ ? Считать, что размеры пылинки много больше длины волны излучения.

- **Ответ:**  $T \cdot \sqrt{\frac{R}{2a}}; T \cdot \sqrt{\frac{R}{2a}} \cdot \sqrt[4]{1 - A}.$

## § 1.27. ЗРИТЕЛЬНЫЕ ТРУБЫ. ТЕЛЕСКОПЫ

Оптические приборы, предназначенные для рассмотрения удаленных предметов, к которым мы не можем приблизиться, называют зрительными трубами. С помощью объектива зрительной трубы получают изображение предмета вблизи глаза. После этого изображение рассматривается в окуляре как в лупу. К зрительным трубам относятся: подзорные трубы, бинокли, телескопы и другие более специальные приборы.

### Труба Кеплера

К наиболее часто применяемым зрительным трубам относится труба Кеплера, созданная И. Кеплером в 1630 г.

Труба Кеплера состоит из двух собирающих линз (или систем линз). Объектив — это длиннофокусная линза, дающая действительное уменьшенное, перевернутое изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$ . Изображение удаленного предмета получается в фокальной плоскости объектива (рис. 1.115). Окуляр находится от этого изображения на своем фокусном расстоянии.

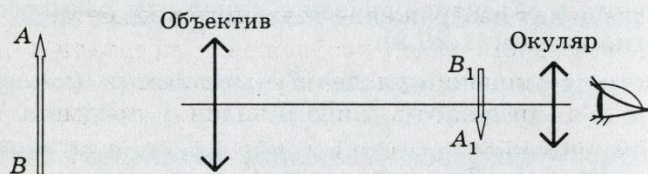


Рис. 1.115

Рассмотрим ход лучей в трубе Кеплера от верхнего и нижнего краев какого-либо удаленного предмета (дерева, Луны и т. д.). Из-за удаленности предмета лучи, идущие от любой его точки, можно считать параллельными. От нижнего края предмета на линзу объектива  $L_1$  падает параллельный пучок лучей  $AA$ , а от верхнего — пучок  $BB$ . Параллельно этим лучам проведем побочные оптические оси  $OA_1$  и  $OB_1$  через оптический центр  $O$  объектива (рис. 1.116). Угол  $\varphi$  между этими осями — это угол зрения, под которым виден предмет невооруженным глазом.

После преломления в объективе (линзе  $L_1$ ) лучи  $AA$  дадут изображение  $A$ , точки  $A$ , а лучи  $BB$  — изображение  $B$ , точки  $B$ .

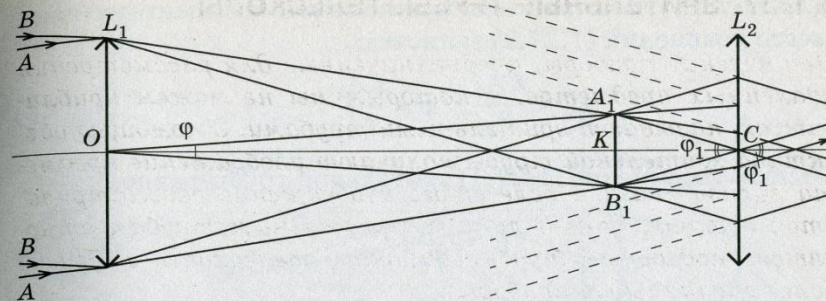


Рис. 1.116

Окуляр (линза  $L_2$ ) располагается (для нормального глаза изображения предмета  $A_1B_1$  на расстоянии, равном фокусному расстоянию окуляра  $F_2$ .

Проходящие через точки  $A_1$  и  $B_1$ , лучи после преломления в окуляре становятся параллельными. Если провести через оптический центр окуляра  $C$  побочные оптические оси  $A_1C$  и  $B_1C$ , то угол  $\varphi_1$  между этими осями окажется равным углу, под которым глаз видит изображение реального предмета.

Для нормального глаза изображение предмета в окуляре оказывается бесконечно удаленным и мнимым (как в лупе). Близорукие люди для отчетливого видения предмета должны несколько приближать окуляр к объективу, а дальтоники — напротив, удалять. Для этого окуляр делается подвижным.

В фокальной плоскости объектива, где получается действительное изображение предмета, можно поместить измерительную шкалу на прозрачной пластинке или перекрестки нитей для фиксации трубы на определенной точке предмета.

Угловым увеличением зрительной трубы называют отношение угла зрения  $\varphi_1$ , под которым мы видим изображение предмета в трубе, к углу зрения  $\varphi$ , под которым виден тот же предмет непосредственно:

$$\Gamma_{\text{т}} = \frac{\varphi_1}{\varphi}. \quad (1.2)$$

Согласно рисунку 1.116

$$\text{tg } \frac{\varphi_1}{2} = \frac{KA_1}{2} \frac{1}{CK} = \frac{KA_1}{2F_2}, \text{ а } \text{tg } \frac{\varphi}{2} = \frac{KA_1}{2} \frac{1}{OK} = \frac{KA_1}{2F_1}. \quad (1.2)$$

Труба Кеплера состоит из двух собирающих линз (или систем линз). Объектив — это длиннофокусная линза, дающая действительное уменьшенное, перевернутое изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$ . Изображение удаленного предмета получается в фокальной плоскости объектива (рис. 1.115). Окуляр находится от этого изображения на своем фокусном расстоянии.

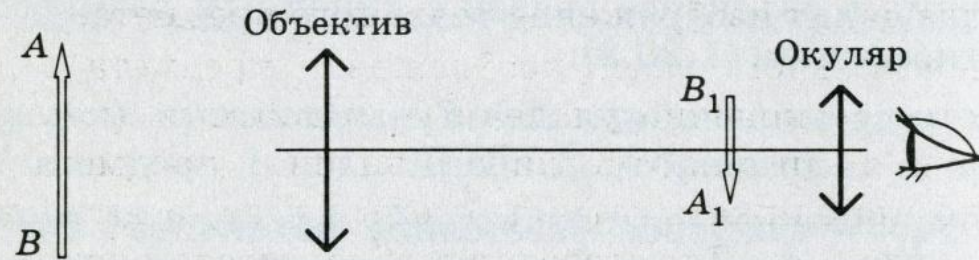


Рис. 1.115

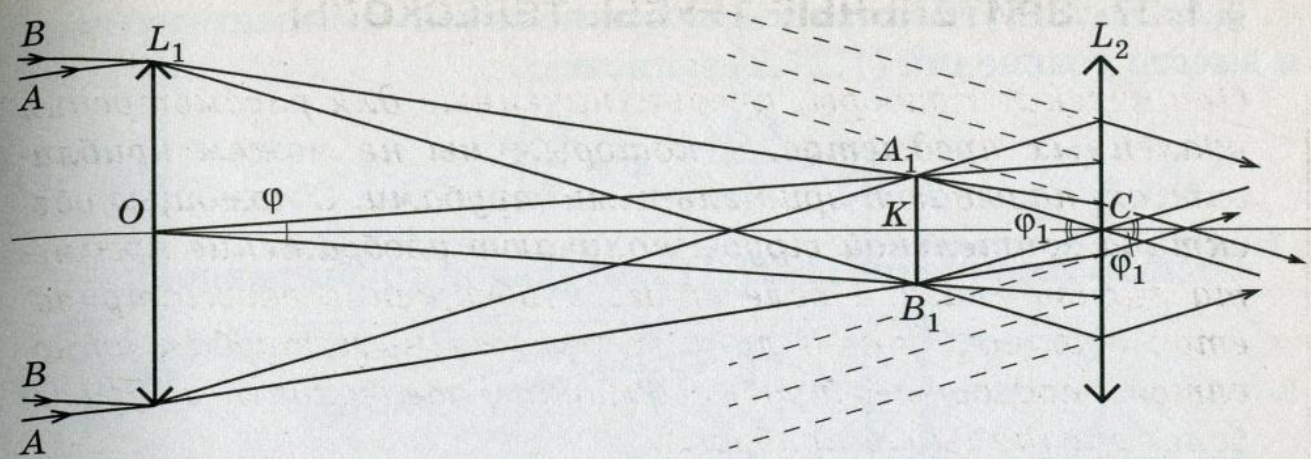


Рис. 1.116

Для малых углов тангенсы можно заменить самими углами и вместо уравнений (1.27.2) записать:

$$\varphi_1 \approx \frac{KA_1}{F_2}, \quad \varphi \approx \frac{KA_1}{F_1}. \quad (1.27.3)$$

Отсюда увеличение (1.27.1) зрительной трубы равно:

$$\Gamma_T = \frac{F_1}{F_2}. \quad (1.27.4)$$

Увеличение зрительной трубы равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра. Зрительные трубы для наблюдения удаленных земных предметов имеют увеличение, не превышающее нескольких десятков.

Труба Кеплера дает перевернутое изображение. Если это необходимо, то используют дополнительную переворачивающую изображение линзу или систему призм.

### Бинокль

Две зрительные трубы, соединенные вместе для наблюдения предмета двумя глазами, представляют собой *бинокль*. В полевом бинокле для уменьшения размеров применяемых в нем труб Кеплера и переворачивания изображения применяются прямоугольные призмы полного отражения. Такие бинокли называются *призменными*. Внешний вид призмного бинокля изображен на рисунке 1.71, а ход лучей в нем показан на рисунке 1.117.

### Труба Галилея

Первая зрительная труба была изобретена Галилеем в 1609 г. В трубе Галилея окуляр, в отличие от трубы Кеплера, представляет собой рассеивающую линзу. Ход лучей в трубе Галилея показан на рисунке 1.118. Лучи, идущие от предмета  $AB$ , проходят через собирающую линзу (объектив  $O_1$ ) и становятся сходящимися. Эти лучи дали бы перевернутое, уменьшенное изображение  $ab$ . Но еще до его образования они попадают на рассеивающую линзу (окуляр  $O_2$ ) и вновь становятся расходящимися. При попадании в глаз они дают мнимое, прямое, увеличенное изображение  $A, B$  предмета  $AB$ .

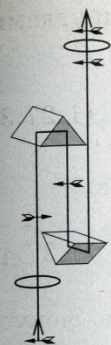


Рис. 1.117

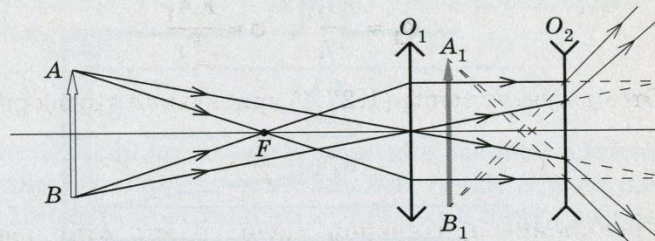


Рис. 1.118

С помощью своей трубы с 30-кратным увеличением Галилеи сделал ряд астрономических открытий: обнаружил горы на Луне, пятна на Солнце, открыл четыре спутника Юпитера, Венеры, установил, что Млечный Путь состоит из множества звезд. В наше время трубы Галилея применяются довольно редко, в основном в театральных биноклях.

### Телескопы

*Телескоп* — это оптический прибор (большая зрительная труба) для наблюдения небесных тел и звезд. По своей оптической схеме телескопы разделяются на линзовые (*рефракторы*) и зеркальные (*рефлекторы*).

Оптическая схема рефрактора точно такая же, как у зрительной трубы Кеплера. Крупнейший рефрактор (США) имеет объектив диаметром 1,02 м.

В телескопе-рефлекторе объективом служит параболическое (для уменьшения сферической aberrации) зеркало большого диаметра. Зеркало лишено хроматической aberrации в этом отношении рефлектор имеет преимущество перед рефрактором. Кроме того, изготовление зеркала большого диаметра несравненно проще, чем изготовление линзы. Поэтому все современные большие телескопы являются рефлекторами. Крупнейший в мире рефлектор с диаметром зеркала 6 м сооружен в СССР и установлен на Северном Кавказе.

Ход лучей в зеркальном телескопе показан на рисунке 1.119. Свет от небесного тела идет практически параллельно пучком и после отражения от зеркала  $Z_1$  сходится в его фокальной плоскости. При помощи плоского зеркала  $Z_2$  свет



## Труба Галилея

Первая зрительная труба была изобретена Галилеем в 1609 г. В трубе Галилея окуляр, в отличие от трубы Кеплера, представляет собой рассеивающую линзу. Ход лучей в трубе Галилея показан на рисунке 1.118. Лучи, идущие от предмета  $AB$ , проходят через собирающую линзу (объектив  $O_1$ ) и становятся сходящимися. Эти лучи дали бы перевернутое, уменьшенное изображение  $ab$ . Но еще до его образования они попадают на рассеивающую линзу (окуляр  $O_2$ ) и вновь становятся расходящимися. При попадании в глаз они дают мнимое, прямое, увеличенное изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$ .

110

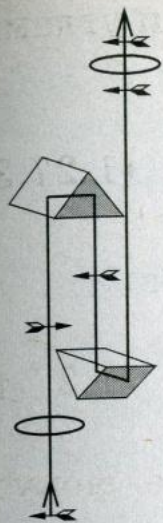


Рис. 1.117

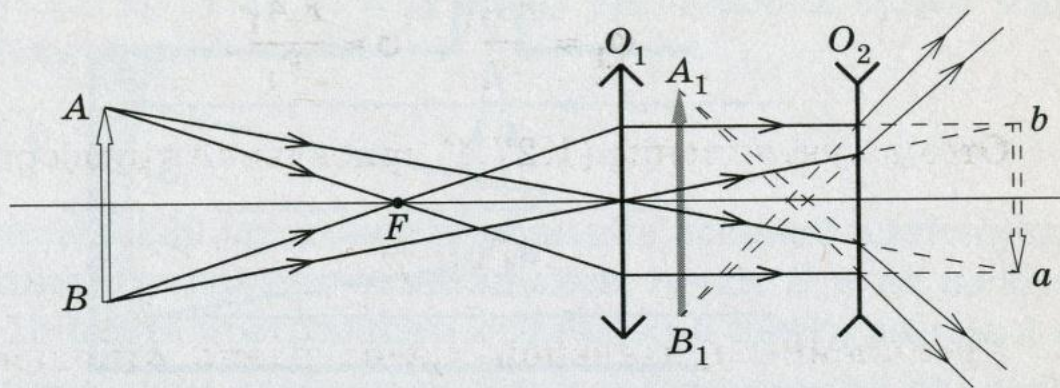


Рис. 1.118

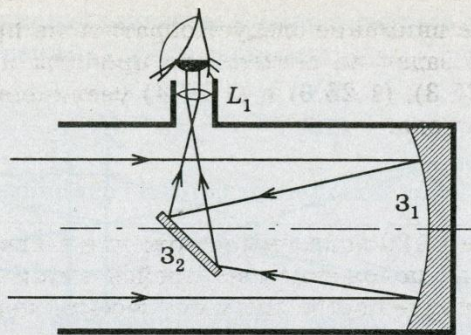


Рис. 1.119

лучи направляются в окуляр  $L_1$ . Через окуляр рассматривается изображение тела.

Увеличение больших телескопов превышает 500 за счет большого фокусного расстояния объектива. С помощью телескопа можно различать на Луне предметы размером менее 1 м, а на Марсе около 100 м. Звезды находятся на столь больших расстояниях, что и после увеличения в телескопе угол зрения оказывается меньше  $1'$ , т. е. меньше минимально разрешаемого глазом угла. Изображение звезды попадает на один чувствительный элемент сетчатки, и звезда в любом телескопе воспринимается как светящаяся точка. Но за счет огромного по сравнению со зрачком глаза поперечного сечения объектива освещенность изображения, даваемого объективом, возрастает в миллионы раз. Поэтому с помощью телескопов наблюдаются очень слабые или удаленные звезды, а также звездные скопления — внегалактические туманности.

Волновая природа света налагает ограничения на возможности различения двух близких звезд. Об этом будет рассказано в дальнейшем.

## § 1.28. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на применение линз и оптических приборов надо уметь строить изображения, даваемые линзами. При решении расчетных задач нужно в основном пользоваться формулой (1.19.1) для фокусного расстояния линзы, формулой (1.19.3) тонкой линзы, формулой (1.20.1) для линейного увеличения линзы. При применении формулы тонкой линзы

(1.19.3) особое внимание следует обратить на правило знаков. Для решения задач на оптические приборы надо еще знать формулы (1.25.3), (1.26.6) и (1.27.4) увеличения линзы, микроскопа, телескопа.

### Задача 1

На рисунке 1.120 показаны положение главной оптической оси  $MN$  линзы, положение светящейся точки  $S$  и ее изображение  $S_1$ . Найдите построением оптический центр линзы, фокусы. Определите, собирающей или рассеивающей является эта линза, действительным или мнимым является изображение.

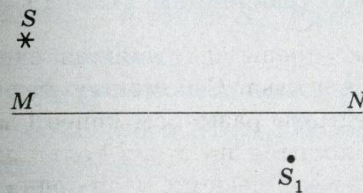


Рис. 1.120

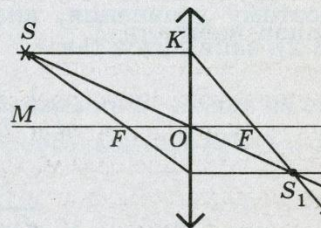


Рис. 1.121

**Решение.** Луч, проходящий через оптический центр линзы не отклоняется от своего направления. Поэтому оптический центр  $O$  совпадает с точкой пересечения прямых  $SS_1$  и  $SK$  (рис. 1.121). Проведем луч  $SK$ , параллельный главной оптической оси. Преломленный луч  $KS_1$  пройдет через фокус. Считая  $S_1$  как источник, а  $S$  как изображение, найдем логичным образом второй фокус. Линза является собирающей, а изображение действительным.

### Задача 2

Линза дает действительное изображение предмета, увеличенное в  $\Gamma_1 = 3$  раза. Если линзу отодвинуть на расстояние  $L = 80$  см, то действительное изображение предмета окажется уменьшенным в 3 раза. Определите фокусное расстояние линзы  $F$ .

**Решение.** Пусть в первом случае предмет находится от ли

В телескопе-рефлекторе объективом служит параболическое (для уменьшения сферической аберрации) зеркало большого диаметра. Зеркало лишено хроматической аберрации, и в этом отношении рефлектор имеет преимущество перед рефрактором. Кроме того, изготовление зеркала большого диаметра несравненно проще, чем изготовление линзы. Поэтому все современные большие телескопы являются рефлекторами. Крупнейший в мире рефлектор с диаметром зеркала 6 м был сооружен в СССР и установлен на Северном Кавказе.

Ход лучей в зеркальном телескопе показан на рисунке 1.119. Свет от небесного тела идет практически параллельным пучком и после отражения от зеркала  $Z_1$  сходится в его фокальной плоскости. При помощи плоского зеркала  $Z_2$  световые

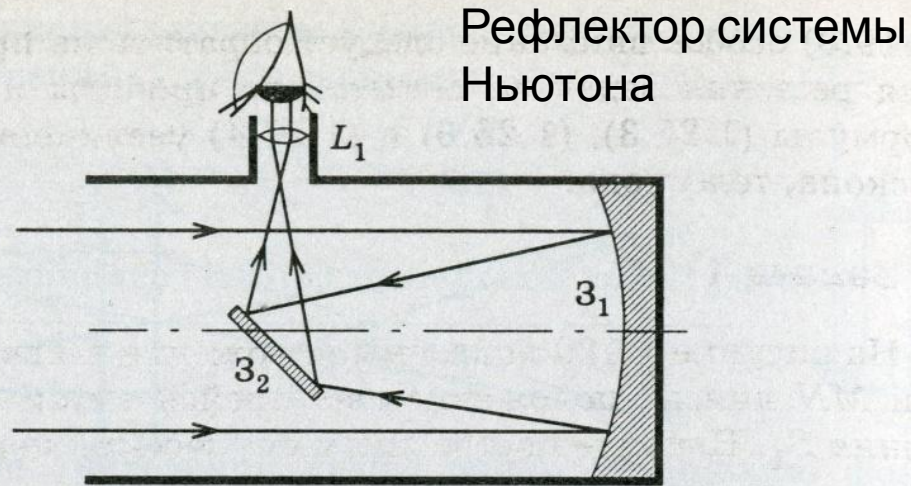


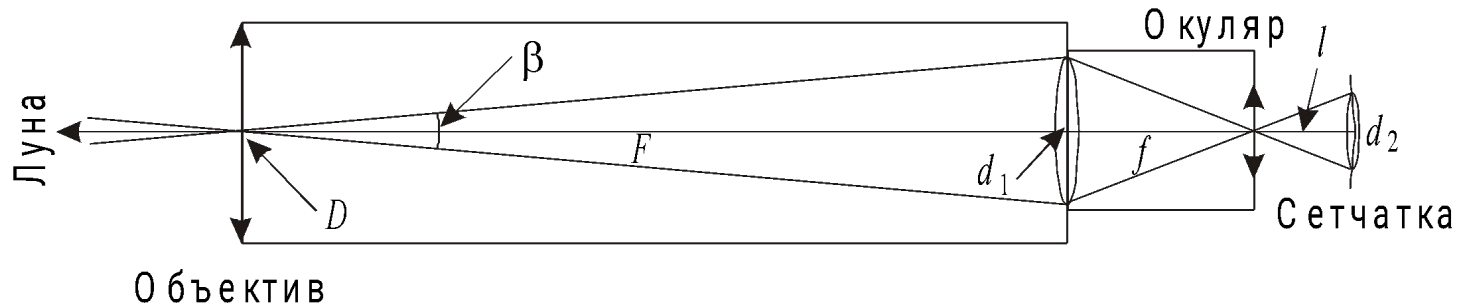
Рис. 1.119

лучи направляются в окуляр  $L_1$ . Через окуляр рассматривается изображение тела.

# Задача 1

- Астроном наблюдает полную Луну в два телескопа с одинаковыми окулярами с фокусным расстоянием 2.5 см. Объектив первого телескопа имеет диаметр 5 см и фокусное расстояние 1 метр. Второй телескоп имеет объектив диаметром 50 см с фокусным расстоянием 5 метров. Центр диска Луны совпадает с центром поля зрения. Сравните освещенность центральной части глазного дна наблюдателя в обоих случаях.

- Построим оптическую схему системы «телескоп – глаз наблюдателя».



- Обозначим диаметр объектива через  $D$ . На него в единицу времени будет падать световая энергия от Луны в количестве  $I_0 \frac{\pi D^2}{4}$ ,
- где  $I_0$  – поток энергии от полной Луны на Земле.

- Захваченное объективом излучение будет передаваться на фокальную плоскость, в которой получится изображение диска Луны диаметром  $d_1 = \beta F$ ,

где  $\beta$  – угловой диаметр Луны, а  $F$  – фокусное расстояние объектива.

- Освещенность в центре изображения будет равна  $\frac{4J_D}{\pi d_1^2} = 4I_0 \frac{D^2}{\beta^2 F^2}$ .

- Далее свет проходит систему из окуляра с фокусным расстоянием  $f$  и глаза с фокусным расстоянием  $l$ . Чтобы весь свет попал в глаз, диаметр выходного пучка  $d$  не должен превышать диаметр зрачка глаза, равный 6 мм. Для диаметра выходного пучка справедливо выражение
$$\delta = D \frac{f}{F}.$$
- Для двух рассматриваемых телескопов диаметр выходного пучка получается равным соответственно 1.25 и 2.5 мм, что удовлетворяет указанному условию.

- В этом случае на сетчатке формируется еще одно изображение диска Луны с размером

$$d_2 = \frac{d_1 l}{f} = \frac{\beta F l}{f}$$

- и освещенностью в центре

$$S_2 = \frac{4J}{\pi d_2^2} = 4I_0 \frac{D^2 f^2}{\beta^2 F^2 l^2}.$$

- Так как речь идет о центре поля зрения, данная величина не зависит от величины поля зрения окуляра. Отношение величин освещенности сетчатки для первого и второго телескопов составит

$$\frac{S_{21}}{S_{22}} = \frac{D_1^2 F_2^2}{D_2^2 F_1^2} = \frac{1}{4}.$$

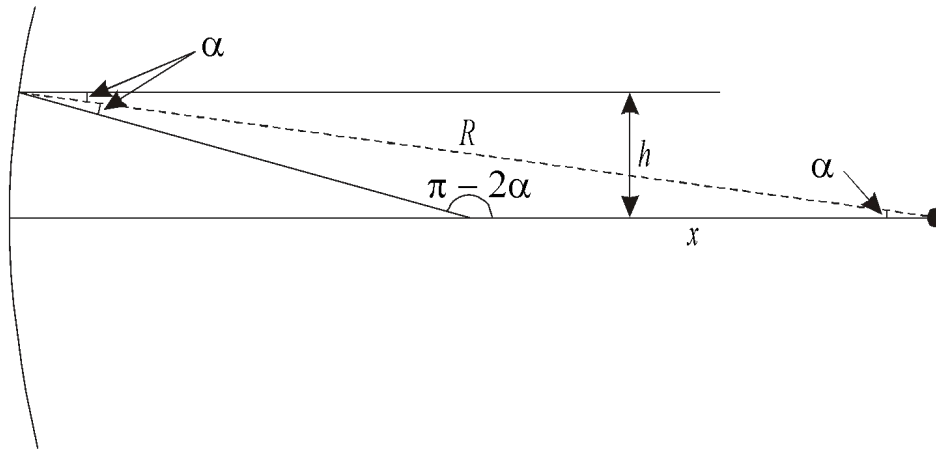
- Освещенность при использовании второго телескопа будет вчетверо больше, чем при использовании первого телескопа.



## Задача 2

- Световой пучок падает вдоль оптической оси на сферическое зеркало диаметром  $d$  с радиусом кривизны  $R$ . Определите расстояние фокуса зеркала от центра кривизны, если  $d \ll R$ .

- Рассмотрим луч, идущий вдоль оптической оси на расстоянии  $h$  от нее. Этот луч отразившись от зеркала пересечет оптическую ось на искомом расстоянии  $x$  от центра кривизны. Пусть угол отражения равен  $\alpha$ . Тогда  $\sin \alpha = h/R$ .



- Обратим внимание, что угол между оптической осью зеркала и радиусом в точке касания также равен  $\alpha$ . Воспользуемся теоремой синусов:

$$\frac{x}{\sin \alpha} = \frac{R}{\sin(\pi - 2\alpha)},$$

$$x = R \frac{\sin \alpha}{\sin 2\alpha} = \frac{R}{2 \cos \alpha} = \frac{R}{2} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}$$

- Таким образом, если диаметр зеркала много меньше, чем его радиус кривизны, то синус будет равен нулю, вторая дробь обратится в единицу, и лучи, параллельные оптической оси, будут собираться на расстоянии  $R/2$  от центра кривизны зеркала.