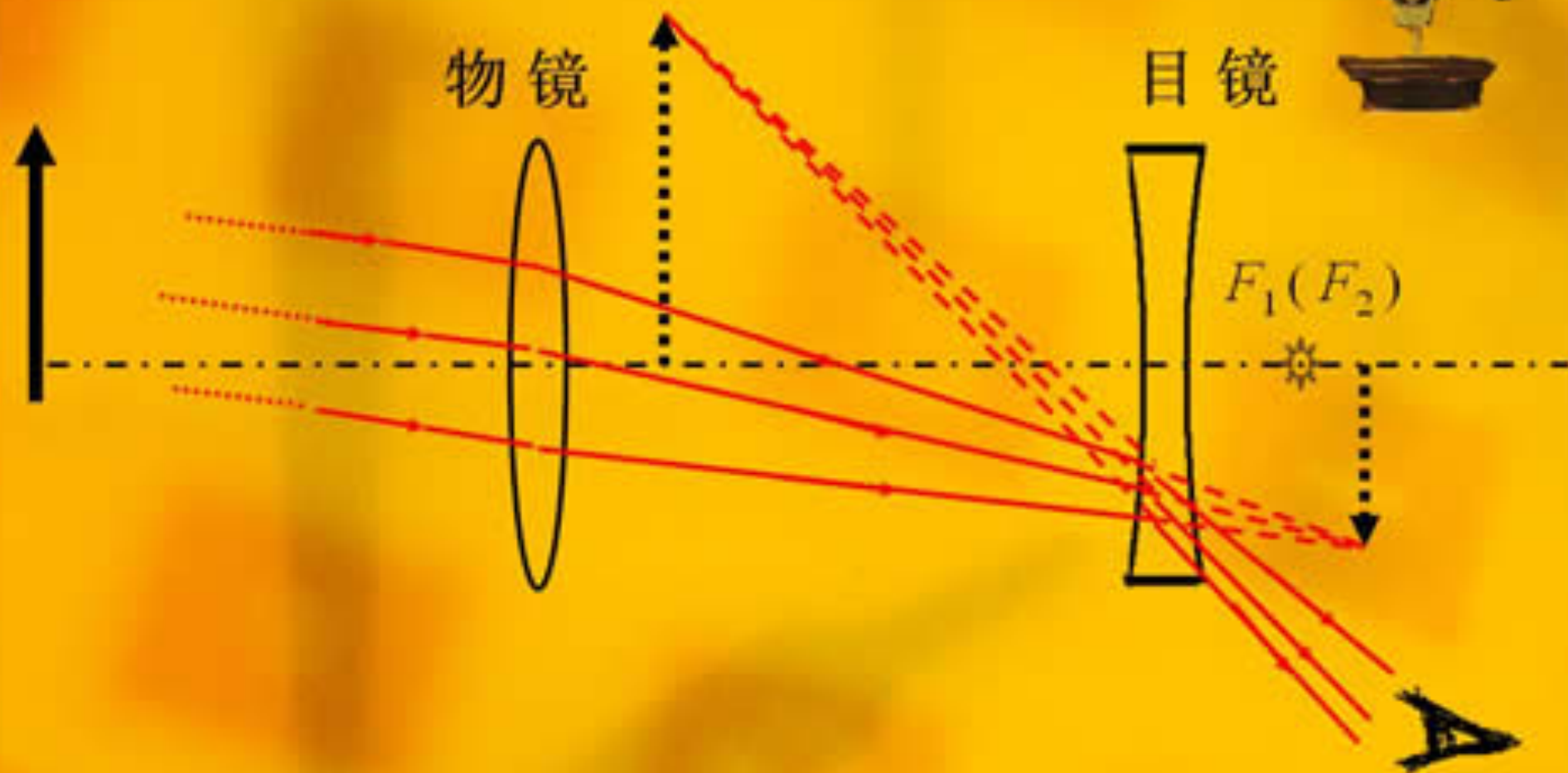
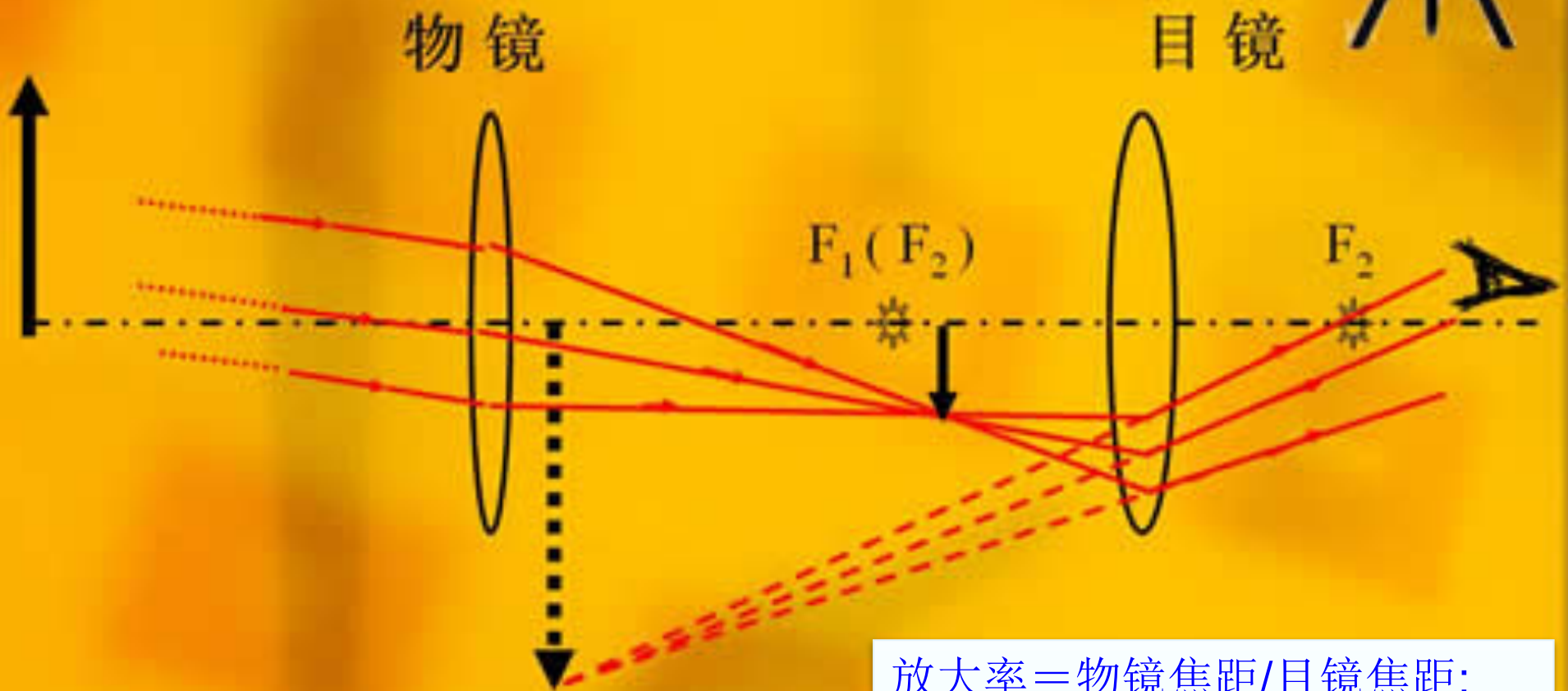


# 伽利略望远镜



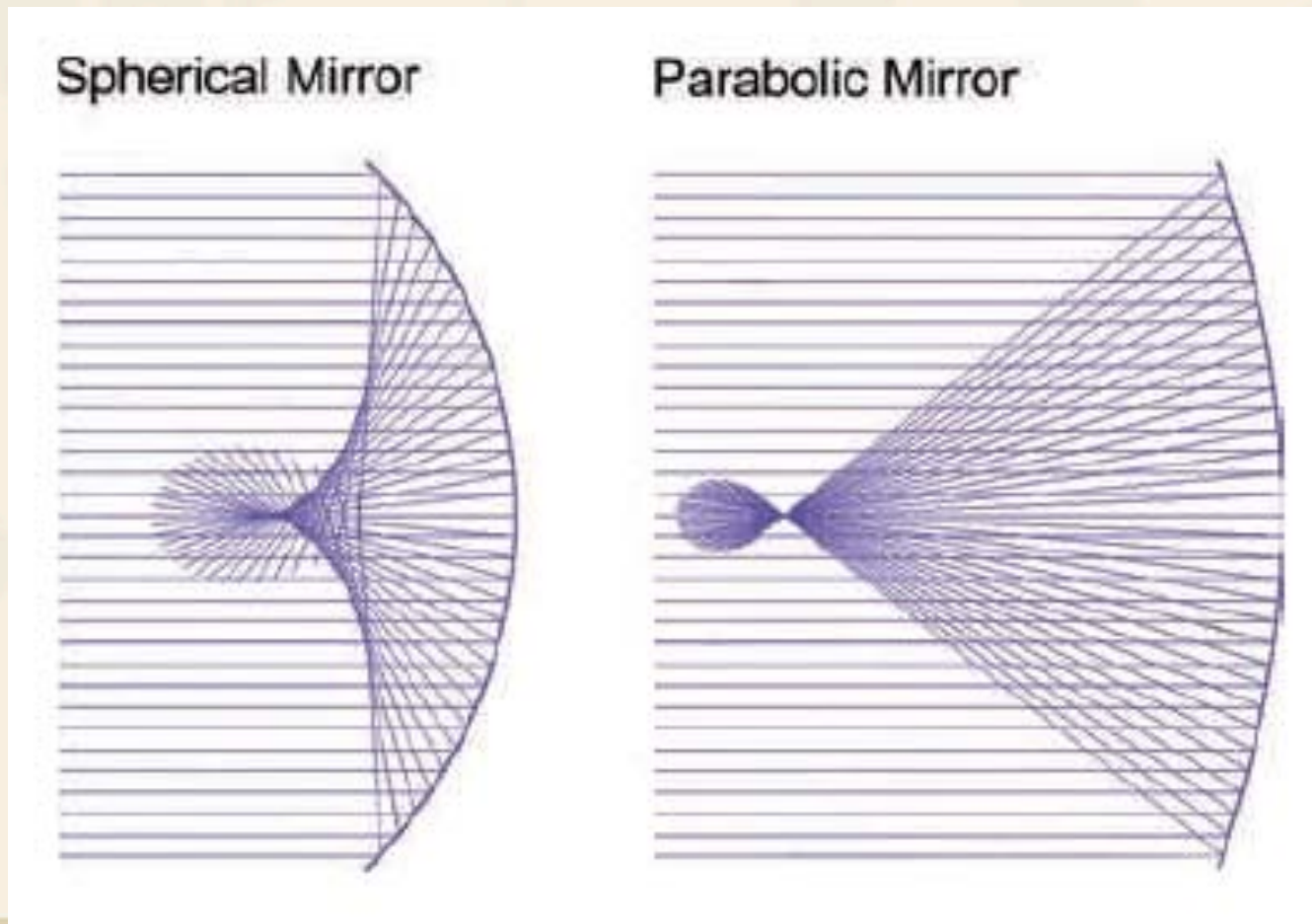
# 开普勒望远镜



放大率=物镜焦距/目镜焦距;  
焦比 $f/x$ =物镜焦距/物镜口径( $x$ );  
一般来说,  $f/x$ 越小, 视场越大;  
观测视场=目镜视场/放大率。

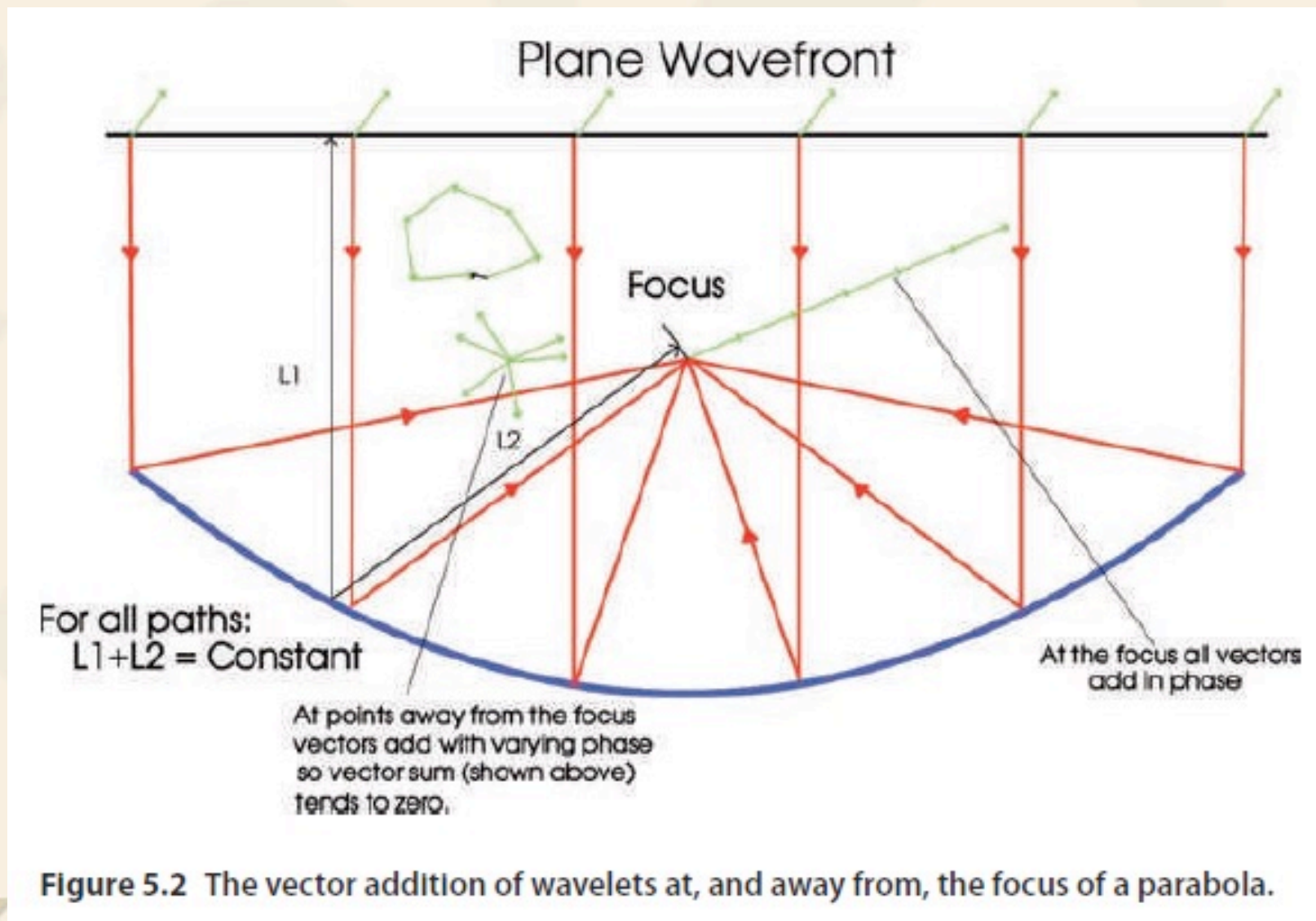
# 光学原理

❖ 光波：强度和位相，矢量叠加

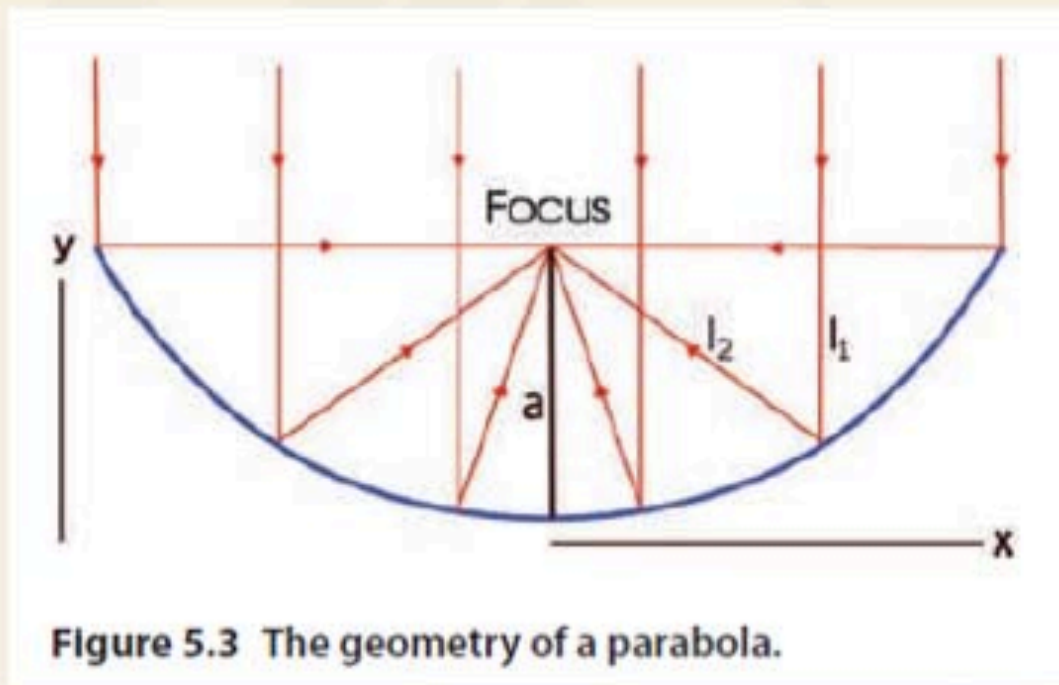




❖ 焦点：光线相干叠加（射电望远镜为例）



## ❖ 旋转抛物反射镜面为什么存在“好的”焦点？



$$y = (1/4a) x^2$$

$$l_1 = a - y$$

$$l_2 = [x^2 + (a - y)^2]^{1/2}$$

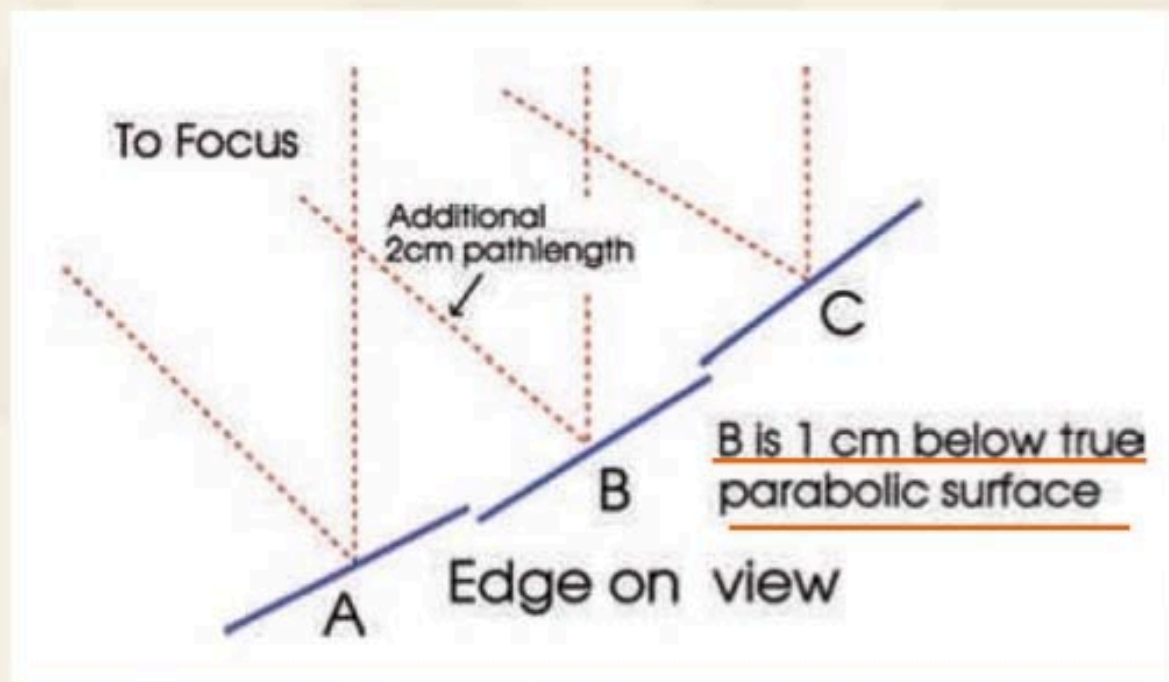
$$\begin{aligned} l_2 &= (4ay + a^2 - 2ay + y^2)^{1/2} \\ &= (a^2 + 2ay + y^2)^{1/2} \\ &= [(a + y)^2]^{1/2} \\ &= (a + y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_1 + l_2 &= (a - y) + (a + y) \\ &= 2a \end{aligned}$$





## ❖ 对镜面的要求:



假设波长为:

8cm

位相差:

90度

对镜面的要求:  $< 1/20$  波长

存在的问题: 离开轴向, 彗形像差, 点光源变成彗星形状

# 薄透镜：焦距与镜面曲率半径的关系

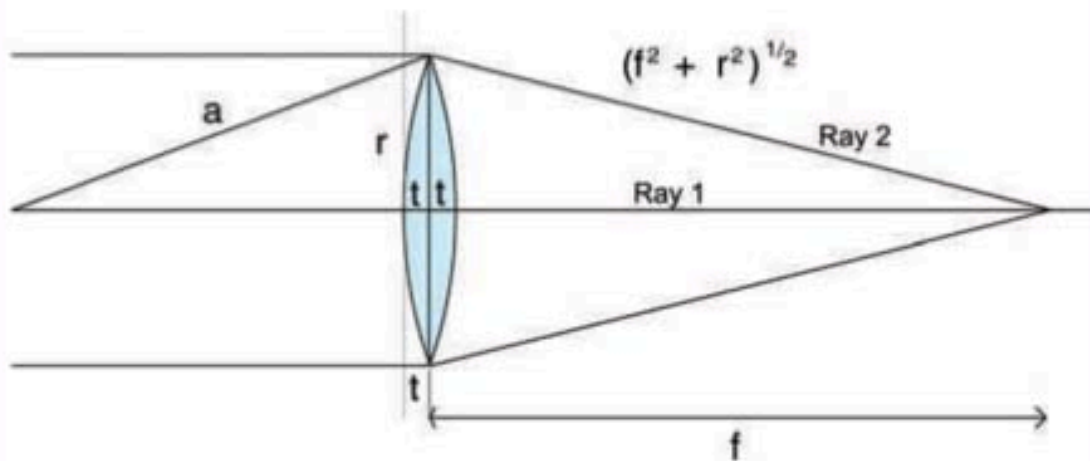


Figure 5.5 The geometry of imaging with a biconvex lens.

$$\begin{aligned}(f^2 + r^2)^{1/2} + t &= (f - t) + 2nt \\ &= f + t(2n - 1) \\ (f^2 + r^2)^{1/2} &= f + t(2n - 2) \\ (f^2 + r^2)^{1/2} &= f + 2t(n - 1)\end{aligned}$$

$$f^2 + r^2 = f^2 + 4ft(n - 1) + [2t(n - 1)]^2$$

$$\begin{aligned}r^2 &= 4ft(n - 1) \\ f &= r^2 / 4t(n - 1)\end{aligned}$$

$$a^2 = (a - t)^2 + r^2$$

$$a^2 = a^2 - 2at + t^2 + r^2$$

(忽略 $t^2$ 项)

$$2at = r^2$$

$$a = r^2 / 2t$$

$$f = a / 2(n - 1)$$

透镜设计方程



## ❖ 色差

$$f = a/2(n - 1)$$

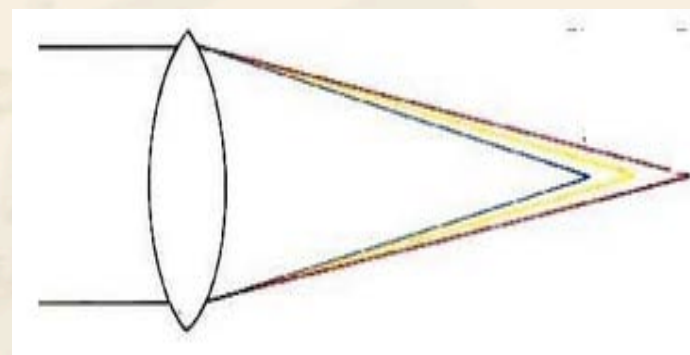
**Table 5.1** The refractive indices of crown and flint glass at three wavelengths.

	Blue 486.1 nm	Green-yellow 589.3 nm	Red 656.3 nm
Crown 冕牌	1.524	1.517	1.515
Flint 燧石	1.639	1.627	1.622

波长（色）不同，折射率不同：

设  $a=1000\text{mm}$   
(Crown)

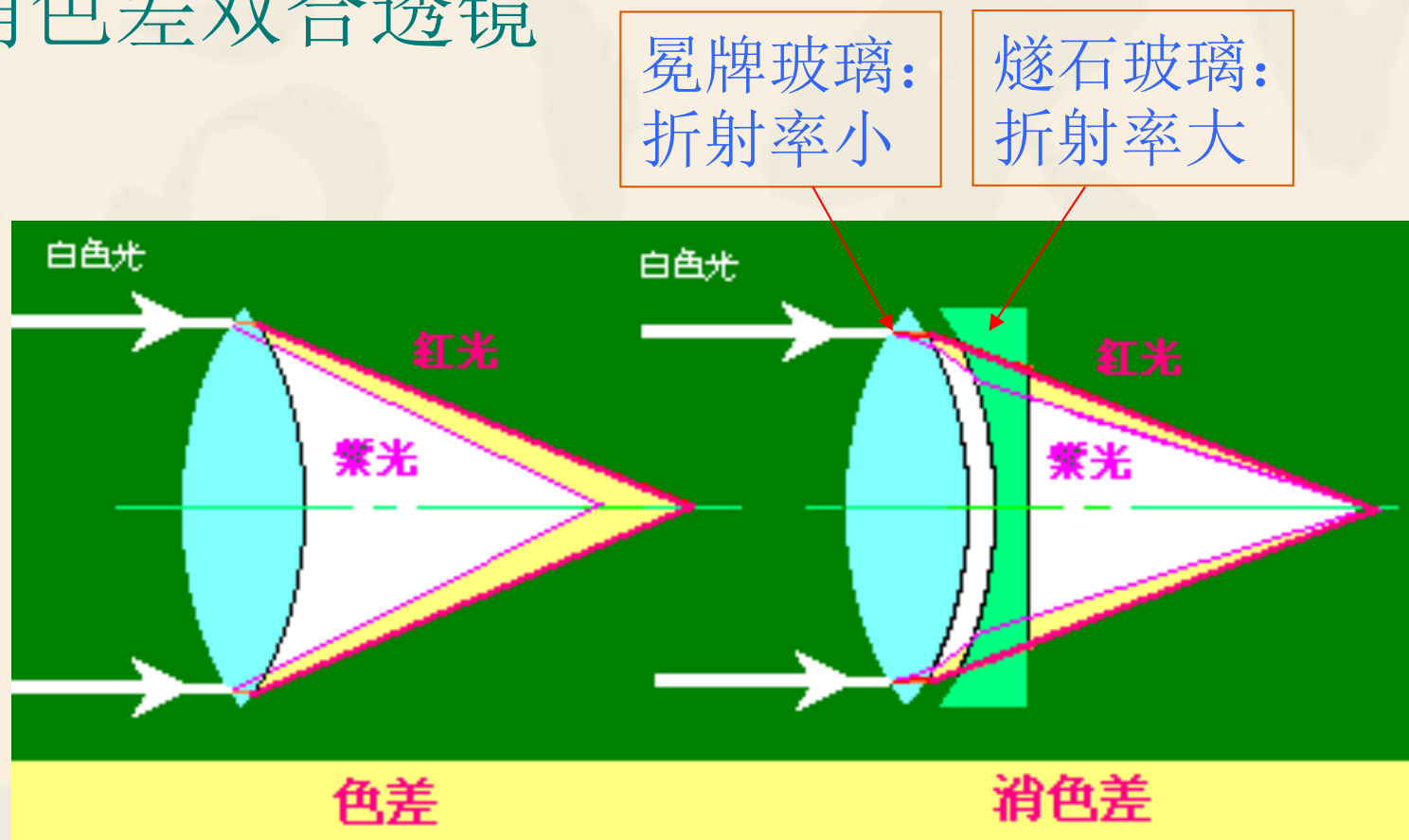
$$\begin{aligned}f_{\text{blue}} &= 954 \text{ mm} \\f_{\text{green-yellow}} &= 967 \text{ mm} \\f_{\text{red}} &= 970 \text{ mm}\end{aligned}$$



色差现象：在绿光的焦平面上，亮的绿色光斑周围有紫色的环（蓝色+红色）



## ❖ 消色差双合透镜



- John Dolland 1758 专利

- Chester Moore Hall 1733 首次制造

# 消色差双合透镜原理

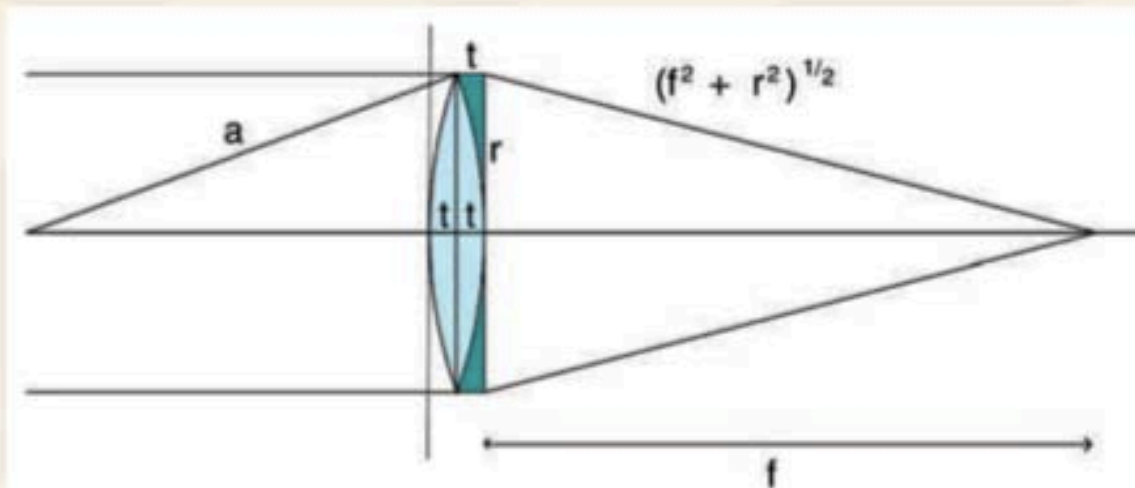


Figure 5.6 An achromatic doublet.

$$f + 2n_1t = t + n_2t + (f^2 + r^2)^{1/2}$$

$$f + t(2n_1 - n_2 - 1) = (f^2 + r^2)^{1/2}$$

$$f^2 + 2ft(2n_1 - n_2 - 1) + [t(2n_1 - n_2 - 1)]^2 = f^2 + r^2$$

$$f = r^2 / 2t(2n_1 - n_2 - 1)$$

$$2at = r^2$$

$$f = a / (2n_1 - n_2 - 1)$$

## ❖ 消色差双合透镜原理

设 $a=393.6\text{mm}$

Blue	0.409	962.3 mm
Green-yellow	0.407	967.0 mm
Red	0.408	964.6 mm

$$2n_c - n_f - 1$$

$$f = a / (2n_1 - n_2 - 1)$$

- 复消色差透镜：基本→完全消除色差
- 消色差三合透镜：Peter Dollond 1763



# 极限星等

❖ 150mm的望远镜:  $(150/7)^2 \sim 460$

$$\begin{aligned}\Delta m &= 2.5 \times \log_{10}(460) \\ &= 6.65\end{aligned}$$

该望远镜的极限星等:  $\sim 6.5 + 6.65 = 13.15$

❖ 望远镜效率

- 折射式望远镜:  $\sim 98\%$

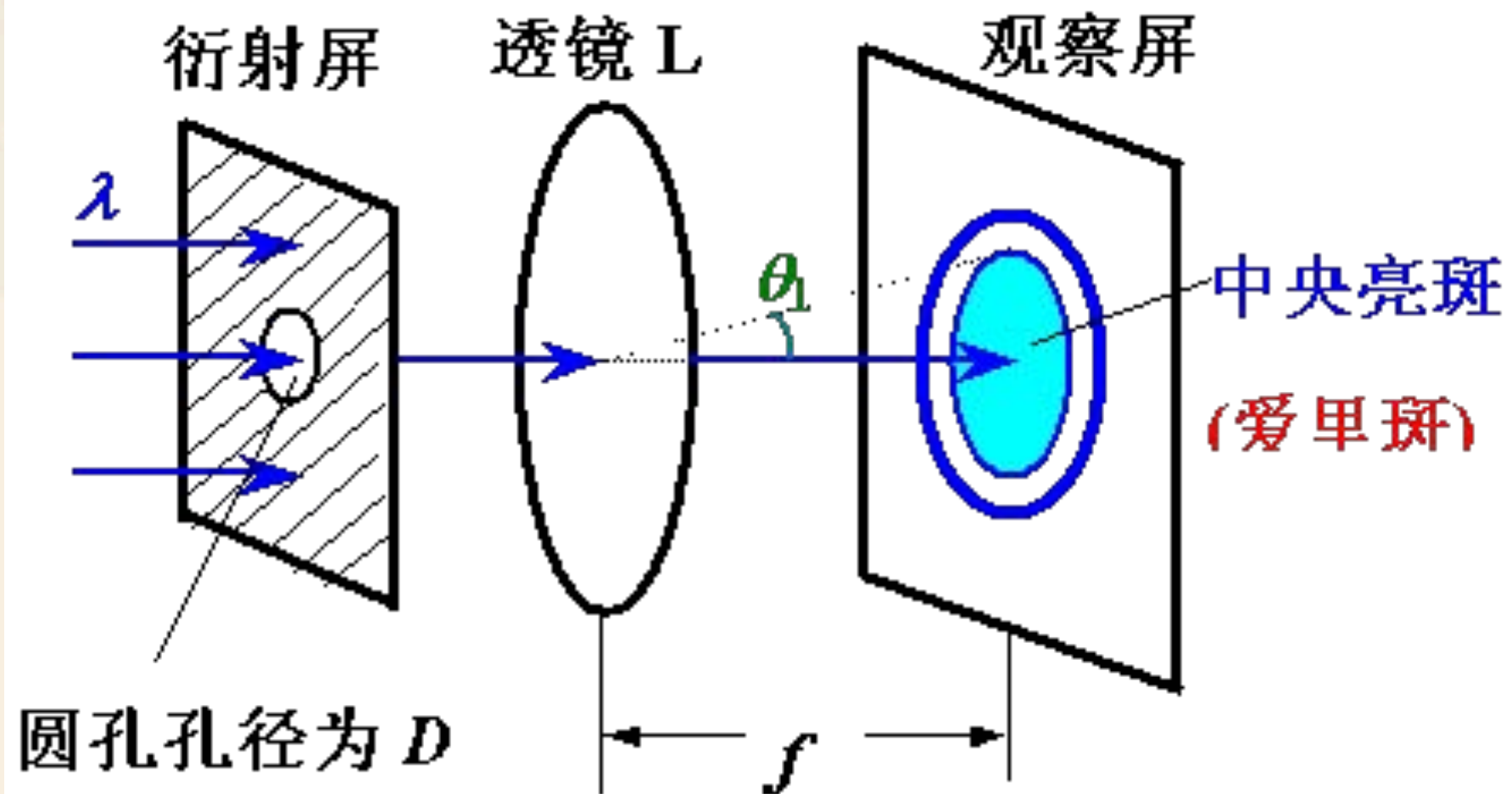
- 反射式望远镜:  $\sim 86\%$ , 两个镜子:  $\sim 74\%$ ;

现代多层镀膜技术:  $\sim 97\%$ , 两个镜子:  $\sim 94\%$

❖ 望远镜半径增加1.58倍, 极限星等增加1等

❖ 大气视宁度的影响

# 圆孔衍射



# 望远镜分辨率

❖ 衍射极限：Airy斑-望远镜分辨天体的极限

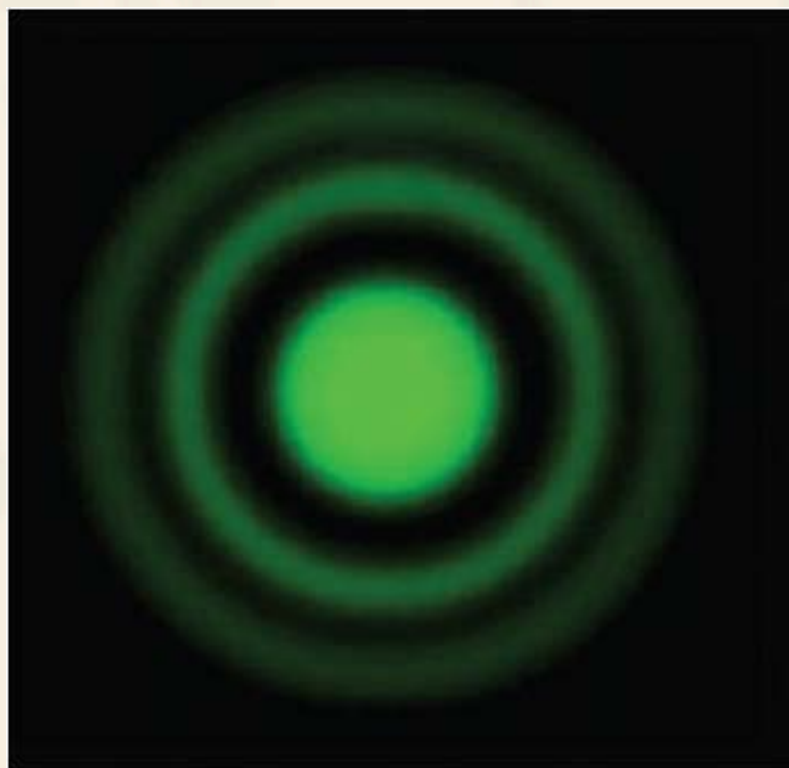


Figure 5.8 The Airy disc.

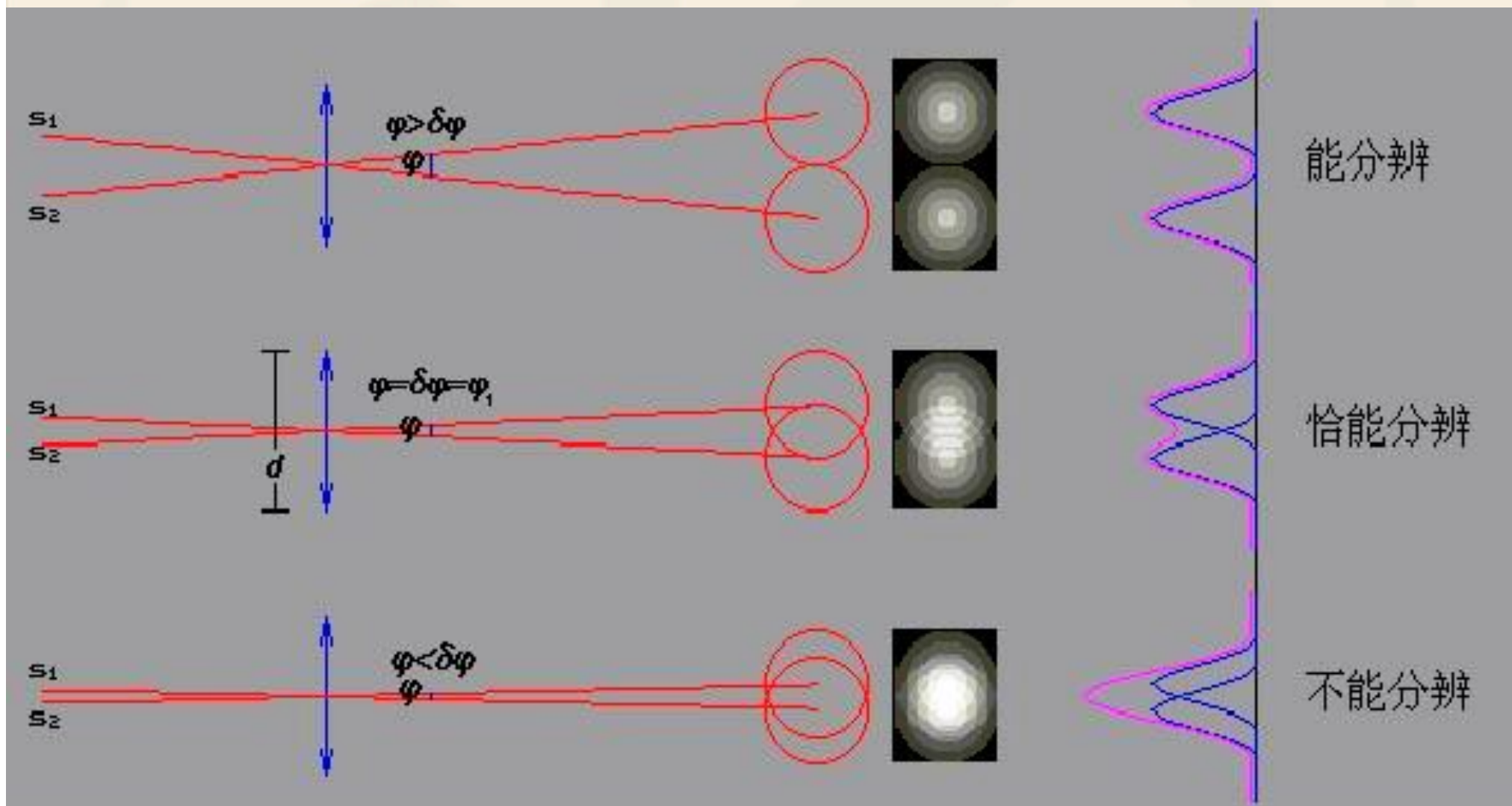
$$\Delta\theta = 1.22 \lambda/D$$

- 84%光集中于中心斑
- 第一个环的半径大概是中心斑的两倍，集中了大部分剩余的光



# 望远镜分辨率

$$\Delta\theta = 1.22 \lambda/D$$

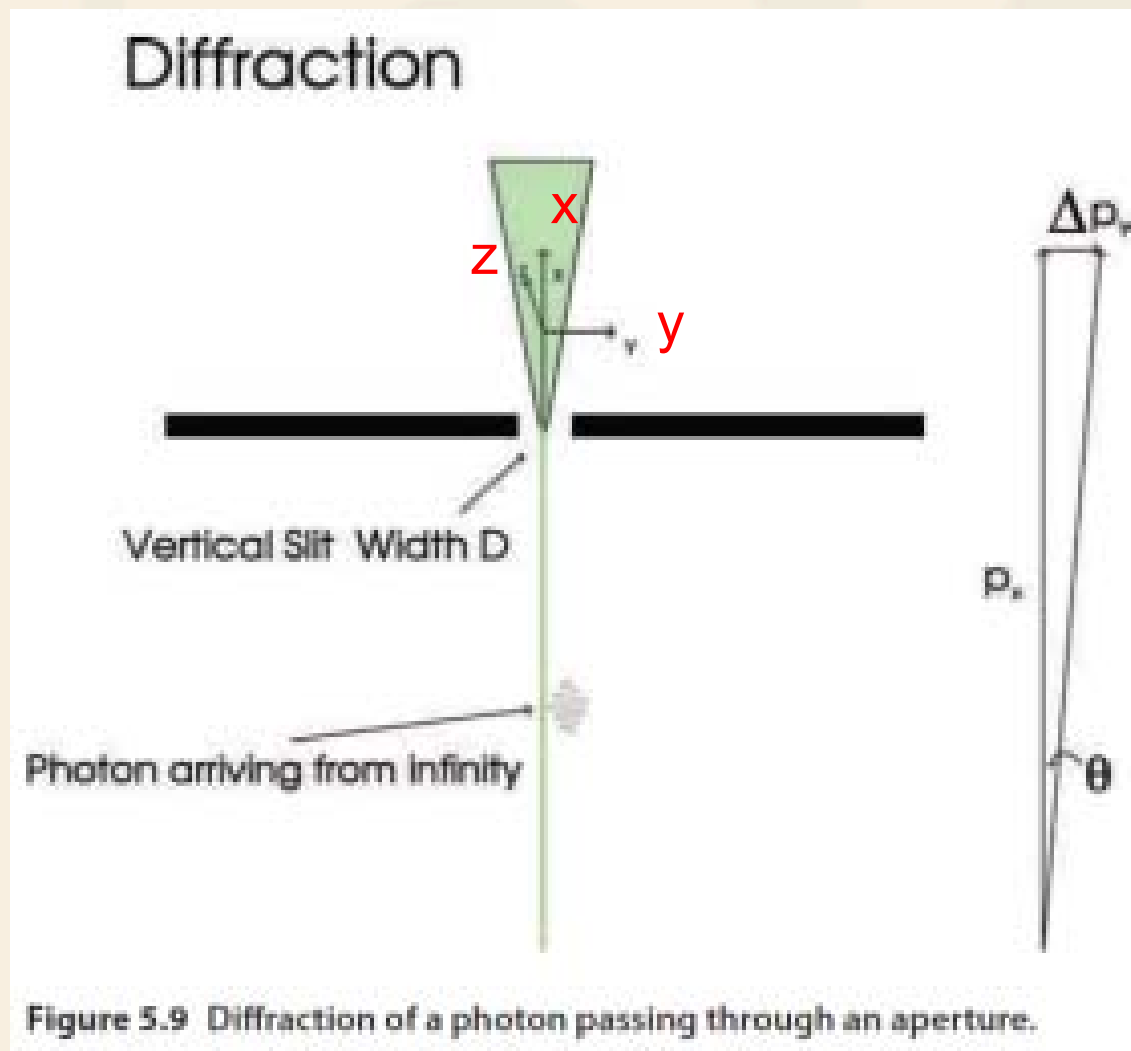


源的混淆与灵敏度的关系: XMM-Newton vs. Chandra

# 望远镜为什么越大越好？

- 收集光线的面积大：能看到很遥远，很暗弱的天体
- 分辨本领高：能看到很小的细节

## ❖ Airy斑的定性推导



$$p_x = h/\lambda$$

$$\Delta p_y D = h$$

$$\Delta p_y D = p_x \lambda,$$
$$\Delta p_y / p_x = \lambda / D.$$

$$\Delta \theta = \Delta p_y / p_x$$

$$\Delta \theta = \lambda / D.$$

(两个方向受限，  
系数变成1.22)



- ❖ 衍射例子：月亮激光反射器
- ❖ 不是单一、大面积的反射器；而是100个，3.8cm见方的三面直角反射棱镜，组成一个边长46cm的方阵

大反射器：

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= \sim 1.22 \lambda / D \\ &= \sim 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7} / 0.46 \\ &= \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ rad}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}d &= \sim 1.5 \times 10^{-6} \times 378\,000 \\ &= \sim 0.57 \text{ km}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}d_t &= 2 \times \pi \times [6780 \times \cos(40)] \times 2.5 / (24 \times 3600) \\ d_t &= 0.94 \text{ km}\end{aligned}$$

小反射器：反射斑的直径  $\sim (46/3.8) \times 0.57 = 6.9 \text{ km}$

❖ 望远镜的分辨率：D=150mm，绿光

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= 1.22 \lambda/D \\ &= 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7} / 0.15 \text{ rad} \\ &= 4.4 \times 10^{-6} \text{ rad} \\ &= 4.4 \times 10^{-6} \times 57.3 \times 3600 \text{ arcsec} \\ &= 0.9 \text{ arcsec}\end{aligned}$$

❖ 大气视宁度（seeing）的影响

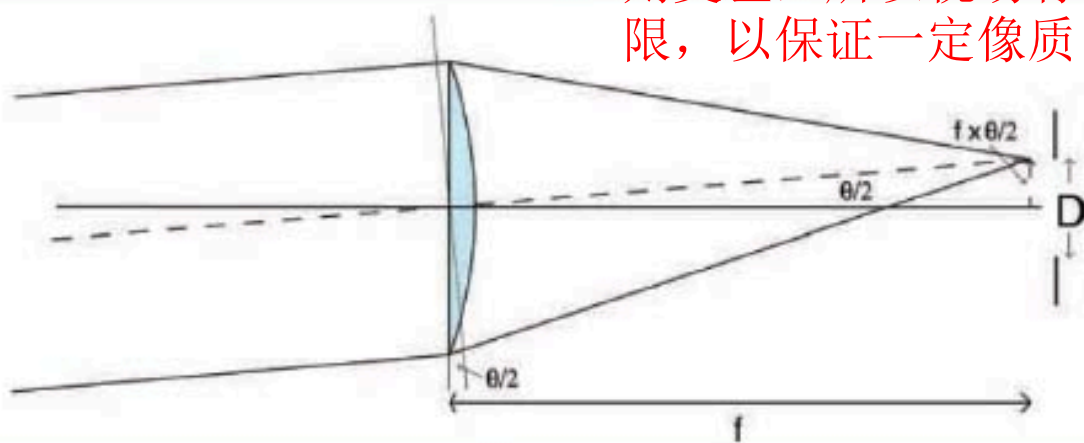
- 一般seeing: 1-3 arcsec
- 最好:  $\sim 0.5$  arcsec;  $>4\text{m}$ 望远镜，影响大
- HST: D=2.4m,  $\sim 1/20$  角秒@可见光

## ❖ 望远镜的放大率

- 物镜焦距/目镜焦距
- 在光路中靠近目镜插入一个凹透镜（Barlow透镜），增加放大率：~ 2-4倍

## ❖ 望远镜的视场

像质在轴上好，偏轴则变差，所以视场有限，以保证一定像质



$$D = 2 \times f \times \theta / 2 = f \times \theta$$

$$\theta = D / f$$

$$D = 12mm \quad f = 1200mm$$

$$\theta = 1/100rad = 0.573^\circ$$

月亮角直径~0.5度

D=视场光阑直径

放大率=物镜焦距/目镜焦距;  
焦比 $f/x$ =物镜焦距/物镜口径( $x$ );  
一般来说,  $f/x$ 越小, 视场越大;  
观测视场=目镜视场/放大率。



(对于类似光路设计的目镜)  $\theta = D/f$

- ❖ 视场光阑(field stop)直径与目镜焦距大致正比
  - 目镜焦距越小，放大率越大，但观测视场越小
  - 标准目镜：Plossl目镜，由两个消色差双合透镜组成
  - 宽视场目镜：给定焦距，使用五个或以上光学器件，视场大，价格高
- ❖ 肉眼看望远镜放大率越大越好？~100-200倍

- 眼睛的衍射极限
- 视网膜上视觉细胞的数量足够多
- 大气视宁度

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= 1.22 \lambda/D \\ &= 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7} / 0.003 \text{ rad} \\ &= 2.24 \times 10^{-4} \text{ rad} \\ &= 2.24 \times 10^{-4} \times 57.3 \times 60 \text{ arcmin} \\ &= 0.77 \text{ arcmin}\end{aligned}$$

(设瞳孔D=3mm)

## ❖ 像的对比度

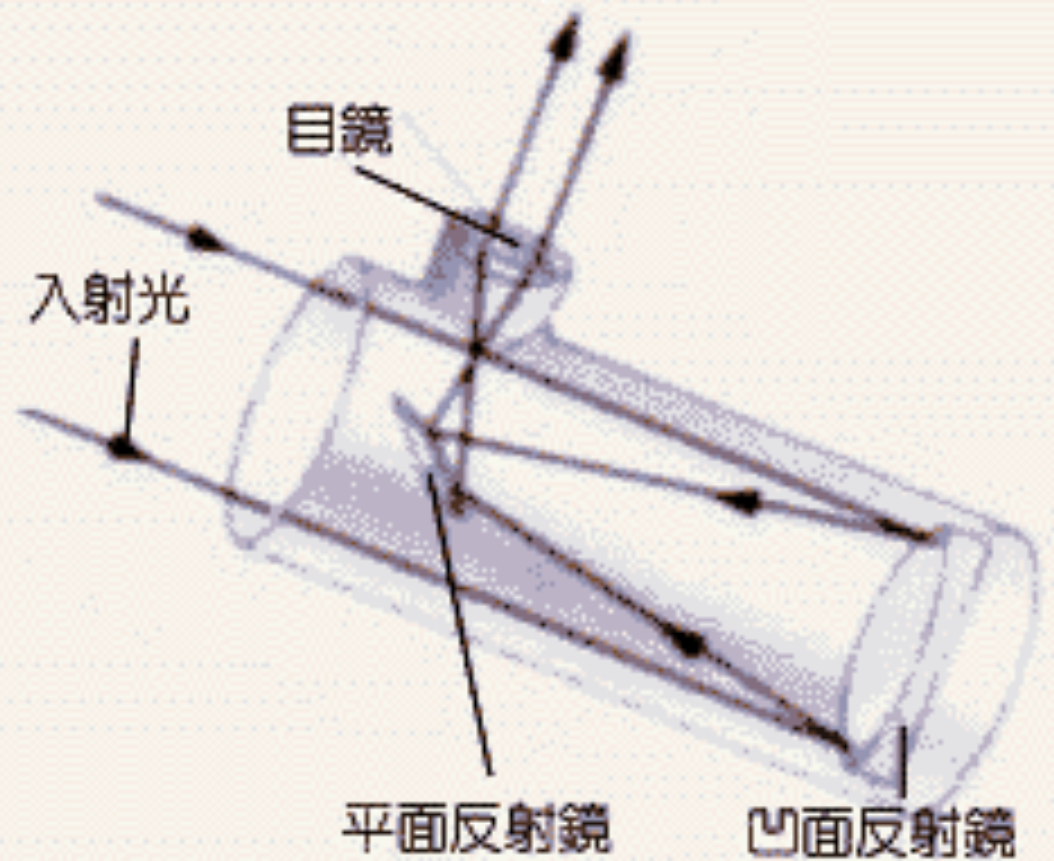
镜筒、面等散射星光：黑→暗灰，降低对比度。

折射式望远镜要好于反射式望远镜

通过镀膜提高反射率，可以看到更暗的天体，  
并且降低散射光，提高对比度。

# 反射式望远镜

## (牛顿)





# 经典牛顿式望远镜

次镜小且需要悬挂

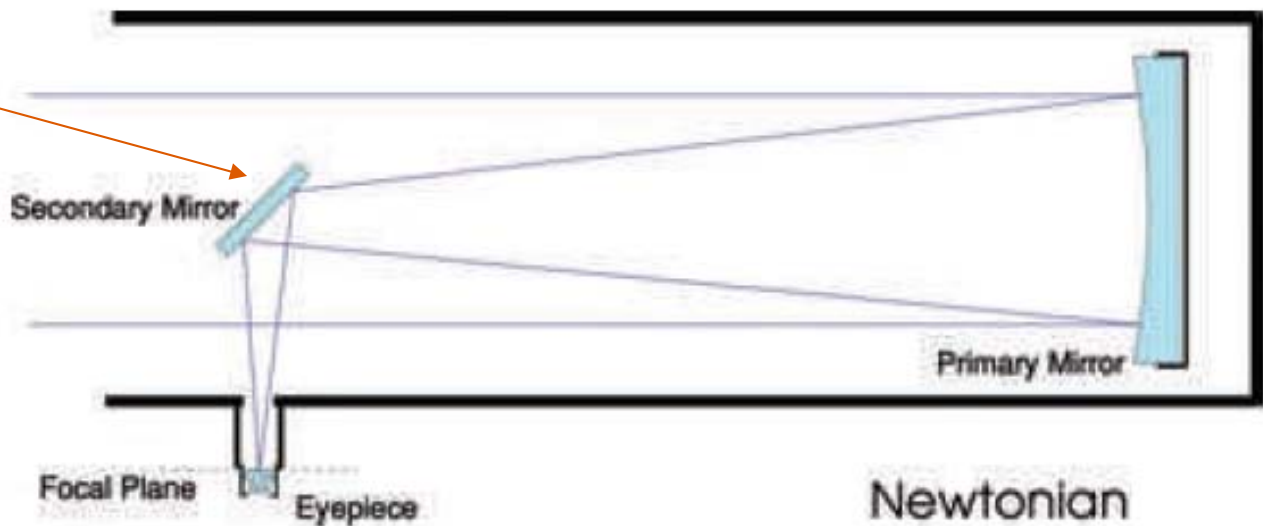


Figure 5.11 The Newtonian telescope.

$$D/F = d/k$$

$$\begin{aligned} d &= D \times k/F \\ &= 200 \times 125/1600 \\ &= 15.6 \text{ mm.} \end{aligned}$$

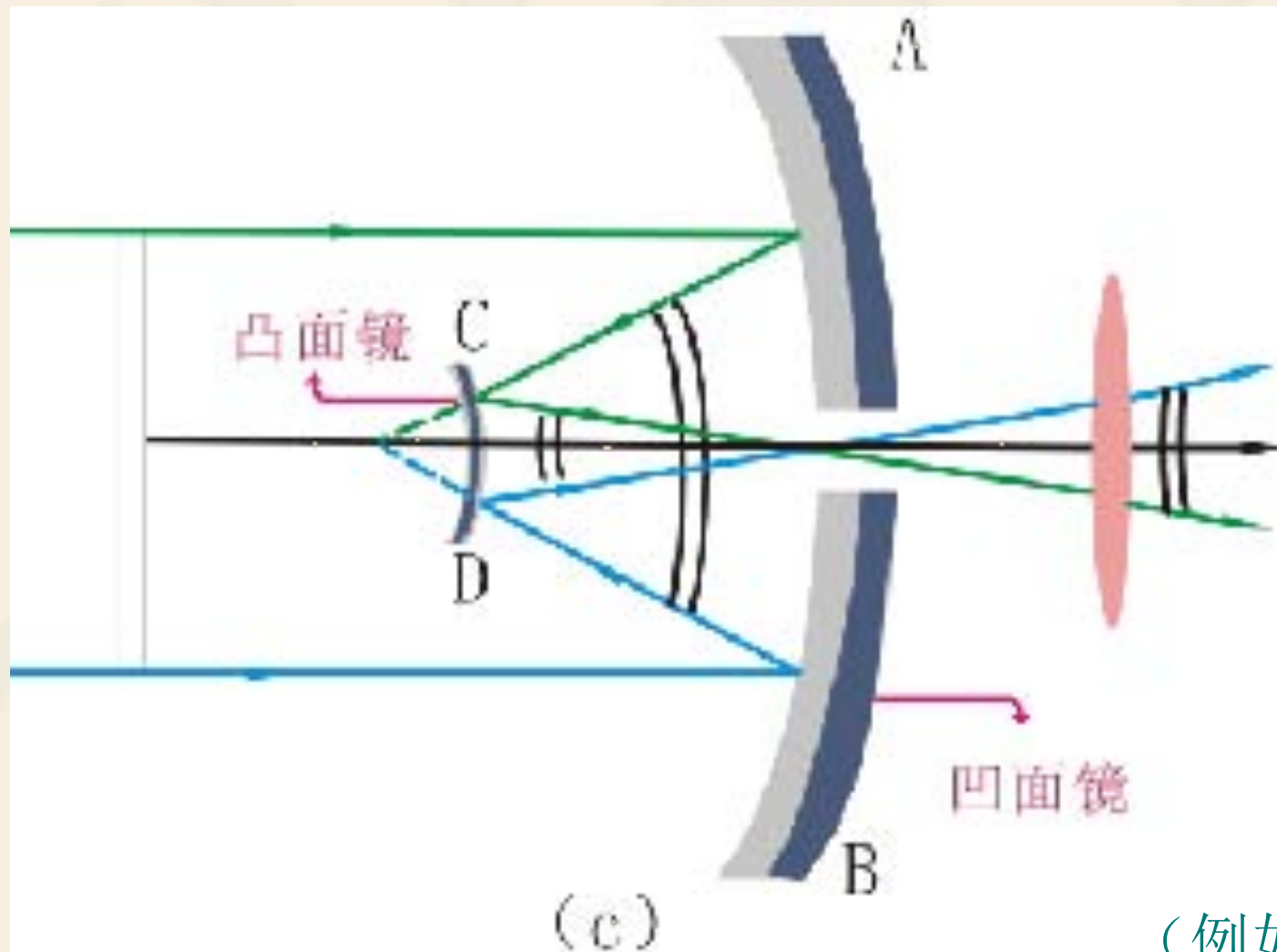
D—主镜的直径

F—主镜的焦距

k—像平面距离望远镜中心轴

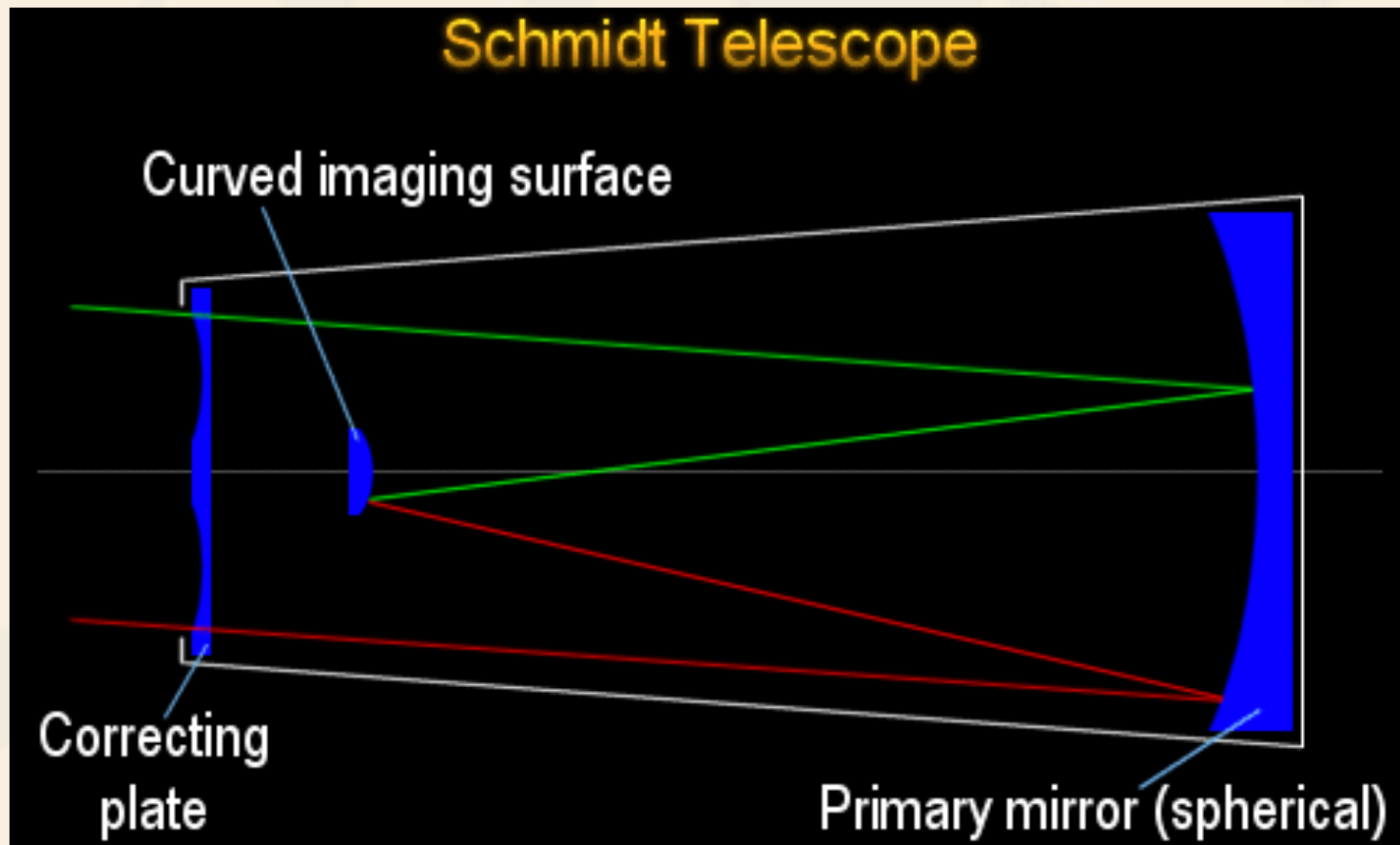
d—次镜的短轴

# 卡塞格林式望远镜



(例如HST)

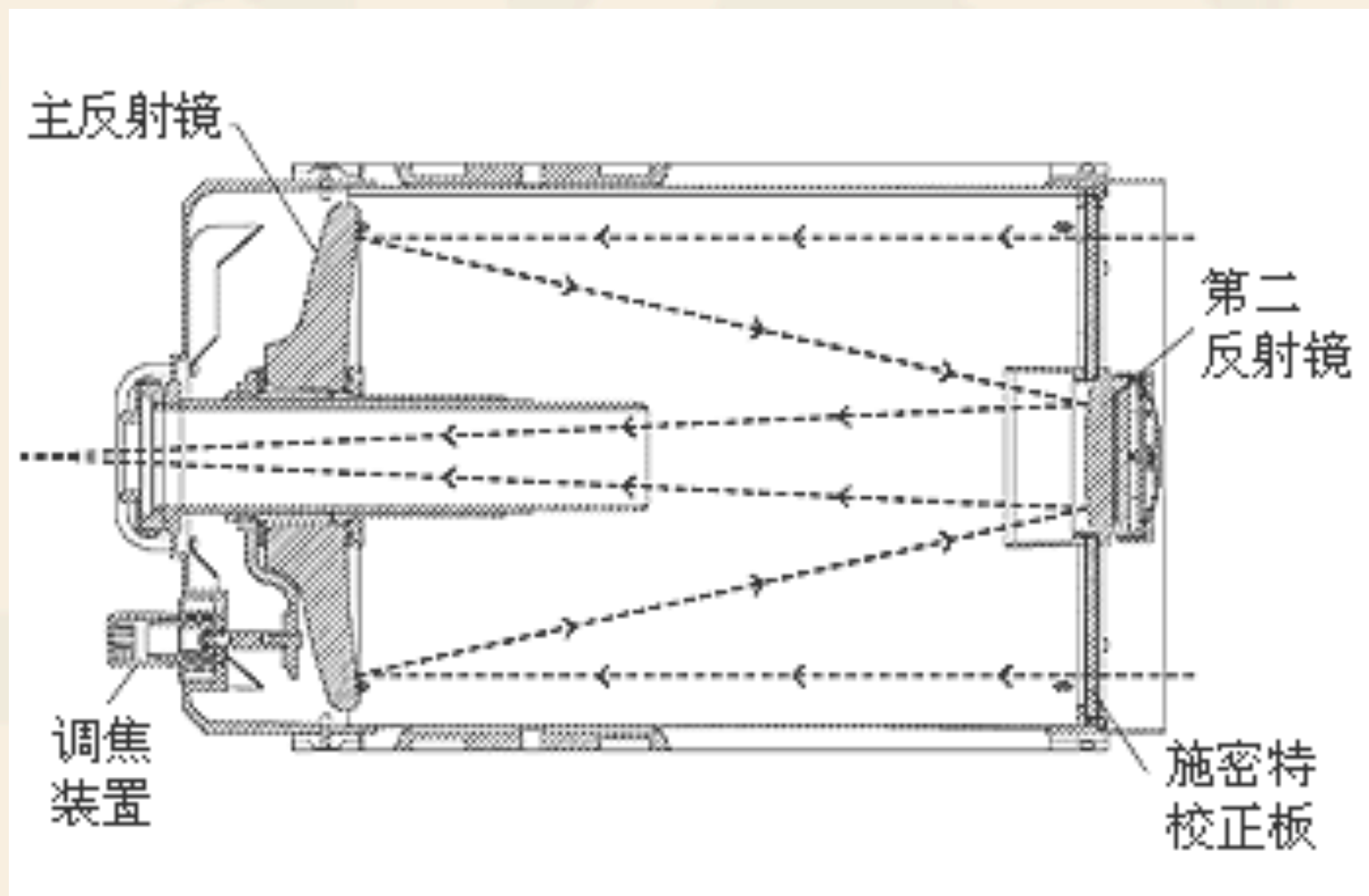
# 折反射望远镜



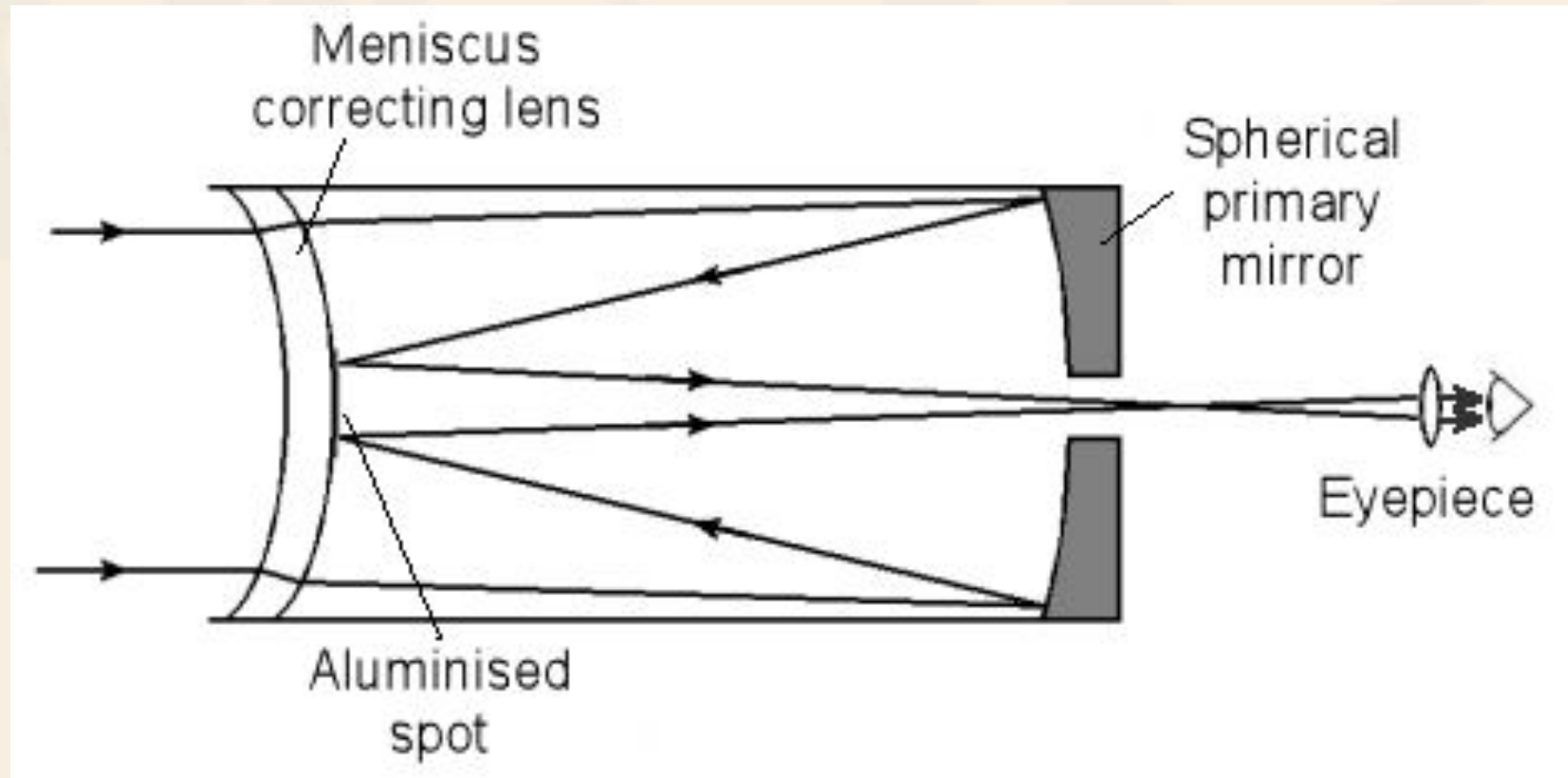
B.V. Schmidt 1930, 球面反射镜, 宽视场, 小的焦比



## ❖ Schmidt-Cassegrain 望远镜



## ❖ Maksutov-Cassegrain 望远镜

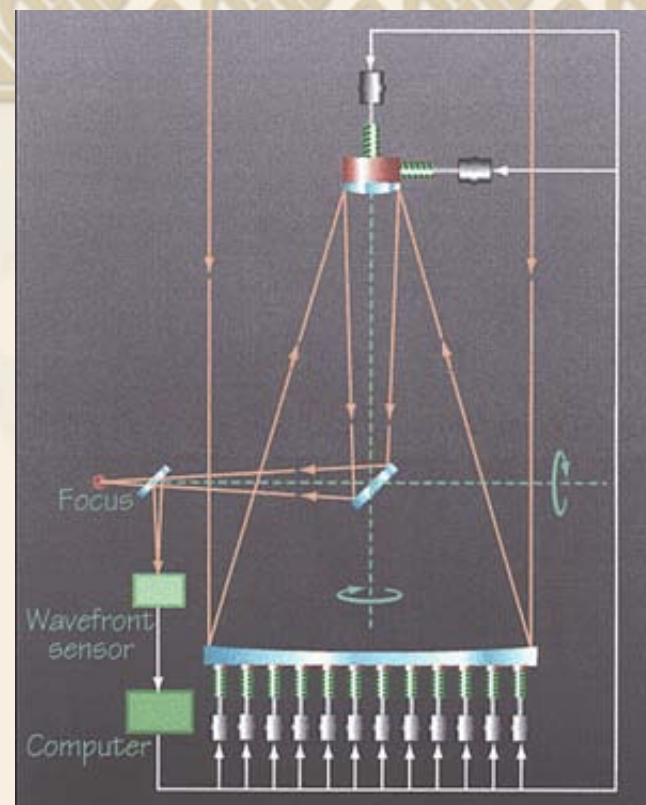


## ❖ 主动光学望远镜

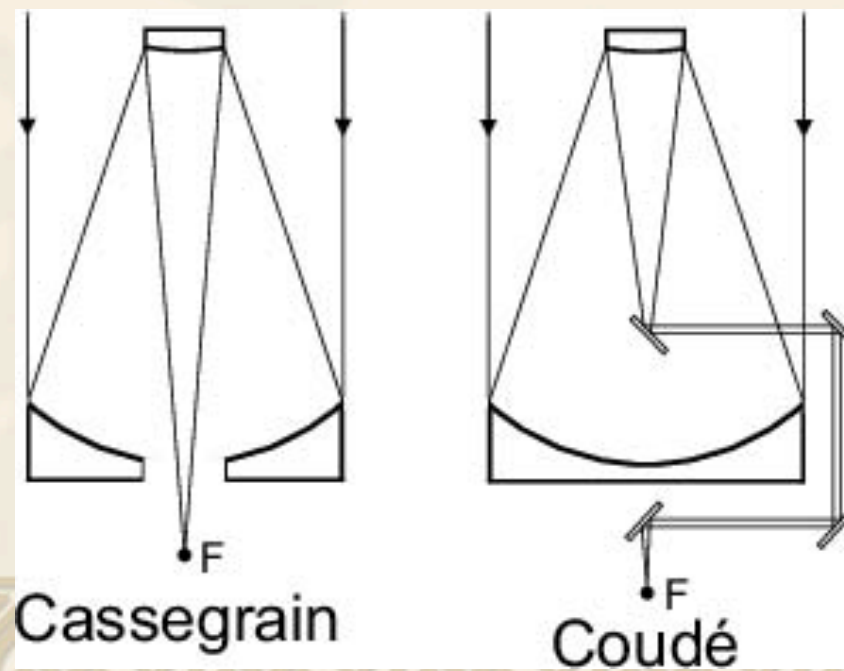
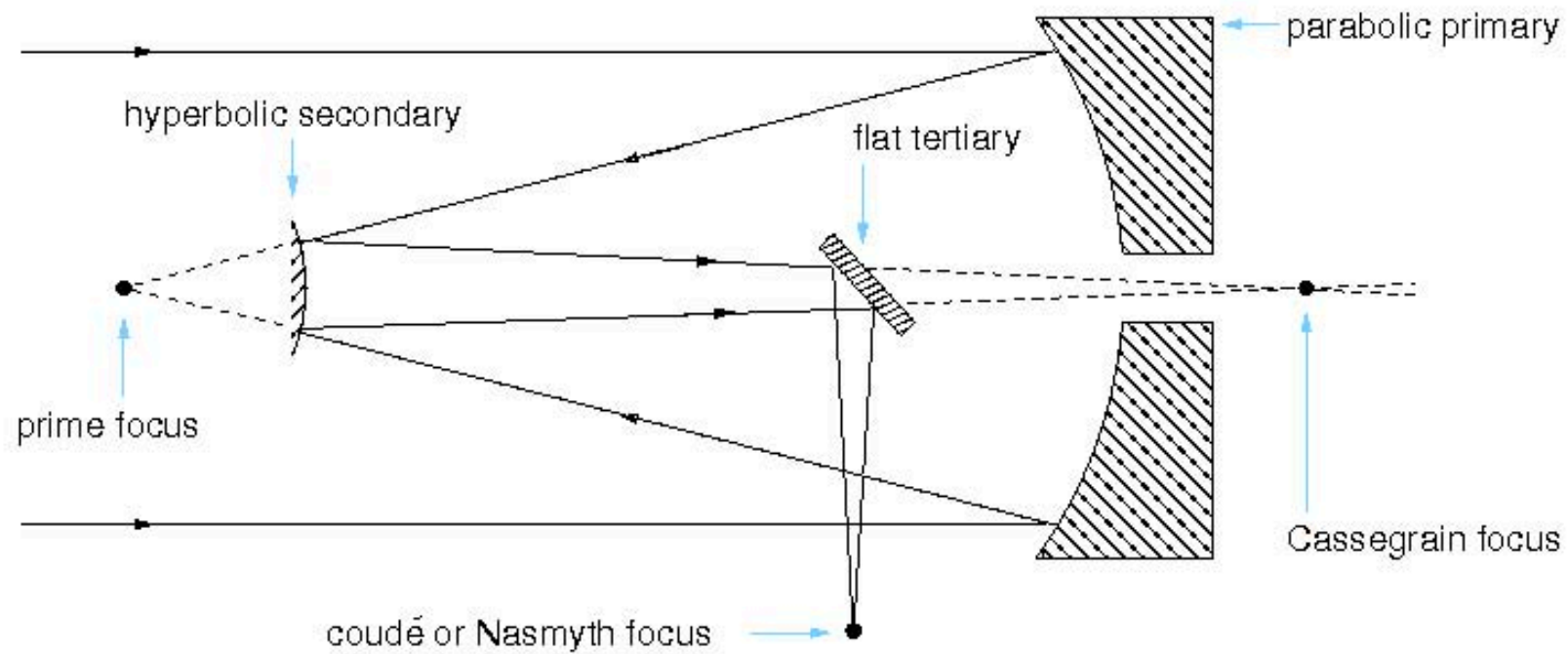
主动光学的校正是低频的，主要用于修正主镜由于自重和热胀冷缩所造成的形变，其触动物一般位于主镜的后面

## ❖ 自适应光学望远镜

自适应光学的校正是高频的，主要修正大气湍流对星光波前的扭曲，其触动物位于校正光路中的弹性镜面后方。自适应光学在红外波段效果最佳，在光学波段也有显著效果；通常需要大功率激光器所产生的人造定标星。







主焦点  
卡塞格林焦点  
耐氏焦点  
库德焦点

# 射电望远镜

- ❖ 大气射电窗口：0.75m(408MHz)—1cm(22GHz)
  - 低频电离层吸收
  - 高频水蒸气吸收
- ❖ 射电的优势：不被尘埃吸收，可观测银河系中心
- ❖ 射电光路设计
  - 接收机在主焦面
  - Cassegrain式



## ❖ 射电望远镜：馈源和低噪声放大器

- 馈源收集镜面的射电波
- 通过低噪声的放大器（低温至接近绝对零度，降噪）放大收集的信号

## ❖ 射电噪声：

- 冷却的放大器：~8K
- 宇宙微波背景：~3K
- 来自银河系相对论电子的同步辐射
- 大气中分子的辐射，特别是水蒸气（高频）  
→ 高海拔或南极
- 地面的黑体辐射（~290K）被散射



## ❖ 射电接收机

- 探测射电信号，记录信号强度
- 模拟信号，数字信号
- 射电分辨率：带宽（Beam width）

镜面：76m， 波长：21cm

$$\begin{aligned}\text{Beam width} &= \Delta\theta = 1.22 \lambda/D \\ &= 1.22 \times 0.21/76 \text{ rad} \\ &= 3.4 \times 10^{-3} \text{ rad} \\ &= 3.4 \times 10^{-3} \times 57.3 \times 60 \text{ arcmin} \\ &= 11.6 \text{ arcmin}\end{aligned}$$

1.6

比人眼在可见光波段的分辨率还要低12倍！

## ❖ 望远镜的设计

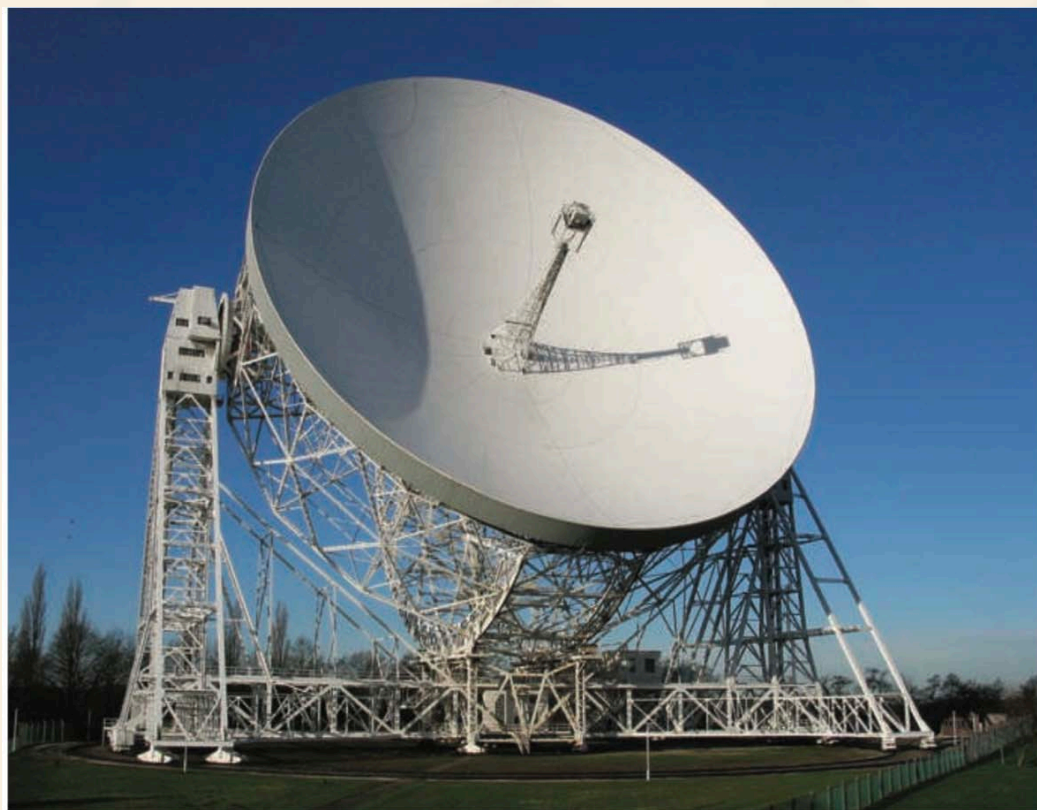


Figure 5.21 The 76-m Lovell Telescope – a prime focus design. Image: Ian Morison.



Figure 5.22 The 32-m Cambridge Telescope – a Cassegrain design. The cone houses a carousel supporting four receivers. Image: Ian Morison.

主焦面设计（低频）

Cassegrain设计

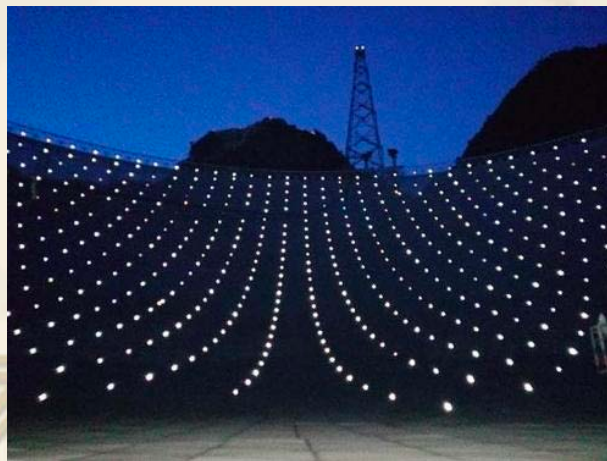


## ❖ 主焦面设计与Cassegrain设计的优缺点

- Cassegrain设计的优点：焦平面转盘，可以放许多接收机，便于多频转换
- 主焦面设计的优点：适合低频

## ❖ 主动光学式的设计

- 镜面转动，引力场导致变形，调整到抛物面（例如FAST）
- 焦点位置改变，需移动馈源
- 焦平面放置激光光源，用于测量镜面的形变





# 天线阵

- ❖ 地球转动综合孔径技术
- ❖ 三个主要的天线阵
  - Very Large Array (VLA)
  - MERLIN
  - Giant Metre Radio Telescope (GMRT)

# 其它电磁波段的观测

- ❖ 红外
- ❖ 亚毫米波
- ❖ 紫外
- ❖ X射线
- ❖ 伽玛射线

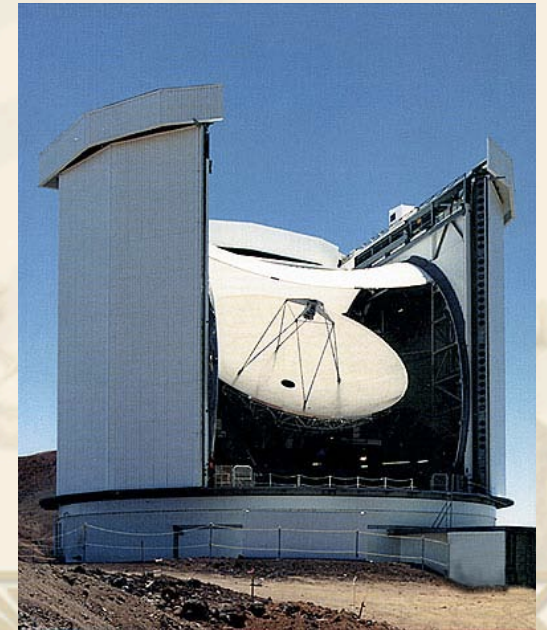
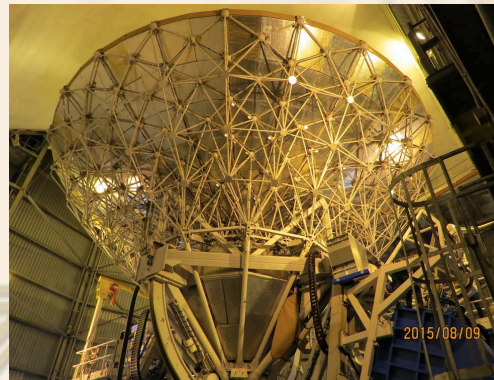
## ❖ 红外

- 很多望远镜的观测波长延伸到红外
- 专门的红外望远镜，例如：United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT), Mauna Kea, Hawaii, 3.8m, 阶梯光栅光谱仪
- 年轻的恒星被气体和尘埃包裹，近红外不可见，中红外可以
- 褐矮星：“失败”的恒星



## ❖ 亚毫米波

- 红外与射电之间的波段
- 来自宇宙中冷物质---例如气体和尘埃（Interstellar medium, ISM）---的辐射
- ISM: 恒星形成的温床, 恒星死亡抛射物质到ISM
- James Clark Maxwell Telescope (JCMT):
  - 15m, Mauna Kea, Hawaii (干燥)
  - 探测器: SCUBA, 探测尘埃颗粒 ( $\sim -240$  摄氏度) 的热辐射, 液氮降温至  $1/10\text{K}$
  - 接收机: heterodyne (外差) 接收机, 探测空间气体云的辐射
  - 恒星形成区、银河系中心观测



# 非电磁辐射

- ❖ 中微子
- ❖ 宇宙线
- ❖ 引力波

# 宇宙线

- ❖ 宇宙线的成分：90%质子+9%氦核+1%电子+少量的重核
- ❖ 方向随机，最高能量达 $10^{20}\text{eV}$ ！（大型重子对撞机： $\sim 10$ 几个 $\text{TeV}$ ）
- ❖ 宇宙线的起源：大多来自银河系中的旋转中子星、超新星（遗迹）、黑洞；最高能量的粒子来自超大质量黑洞周围、喷流，低能粒子来自太阳；银心
- ❖ 宇宙线的分类：初级粒子和次级粒子
  - 初级粒子：氧核、碳核（产自恒星，超新星爆发抛出）
  - 次级粒子：锂、铍、硼，初级粒子与ISM作用的结果
- ❖ 对全球温度的可能影响：宇宙线流量改变地球云层覆盖程度
- ❖ 大气簇射：与大气中的氧、氮作用，形成数十亿个轻的粒子！
- ❖ 中子碰撞 $^{14}\text{N}$ ，产生放射性的 $^{14}\text{C}$ （半衰期：5730年），大气中 $^{14}\text{C}$ 的比例稳定：定树木的年龄
- ❖  $\mu$ 子衰变，检验狭义相对论（半衰期 $1.6\mu\text{s}/10\text{km}$ 高/1%光速/到达地面概率 $1/(3M)$  →  $7.8\mu\text{s}$ /概率 $1/20$ ）