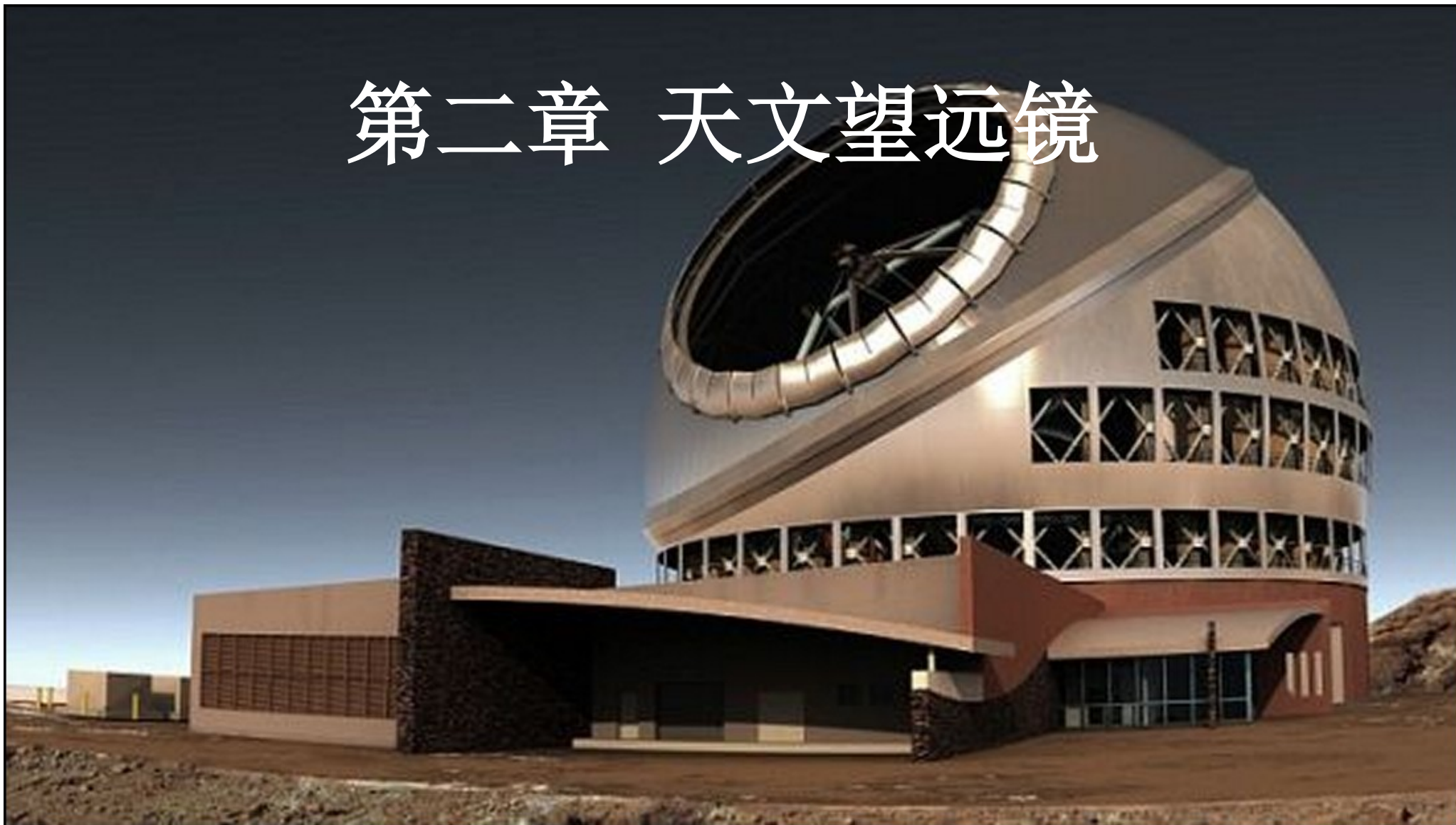


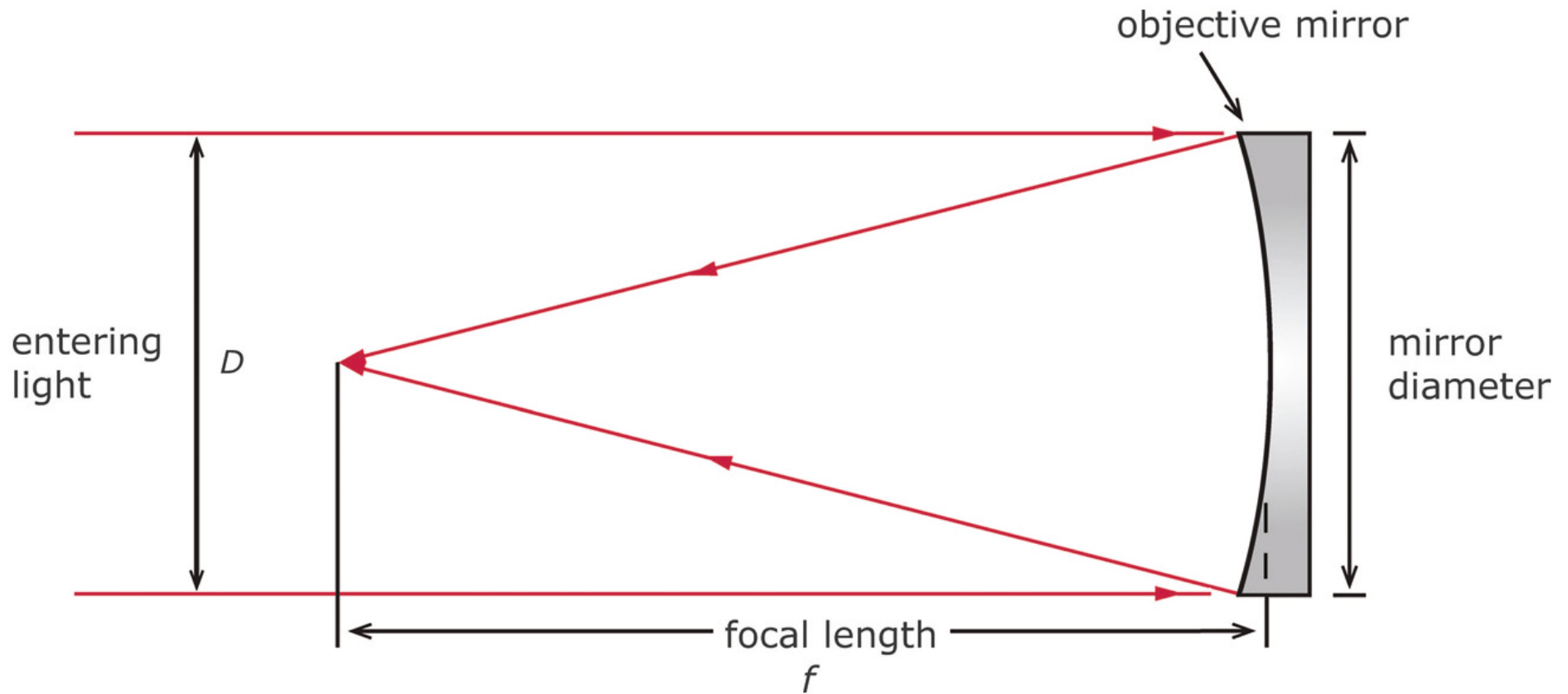
第二章 天文望远镜



章 节

- 1. 望远镜设计的基本原理
- 2. 实际光学系统的像差
- 3. 望远镜系统
- 4. 望远镜的跟踪系统
- 5. 连接望远镜与终端仪器
- 6. 望远镜优化（大视场，红外）
- 7. 现代10米光学红外望远镜

1. 望远镜设计的基本原理



1. 望远镜设计的基本原理

- 口径：越大越好，光通量 $\propto D^2$ (D 为直径)。
- 高效：效率越高越好，使到达望远镜的所有光子都能用于最终的探测。
- 排除不必要的光污染：任何跟目标天体无关的辐射都要尽量避免。
- 衍射极限的图像：尽量逼近衍射极限下的图像。
- 调整光路来优化在探测器上的成像。

2. 实际光学系统的像差：理想情况

➤ 点扩散函数：望远镜对点源的成像。

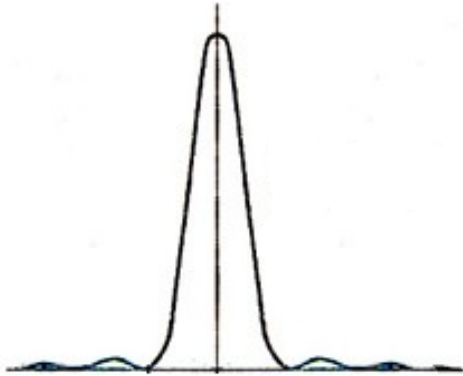
➤ 衍射极限下（即最理想情况下）的点扩散函数：在给定衍射方向 θ 上的强度为

$$I(\theta) \propto \left(\frac{J_1(2m)}{m} \right)^2 \quad (\text{圆形口径})$$

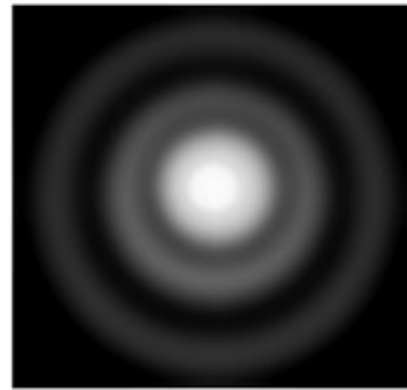
J_1 是一阶贝塞尔函数， $m = \pi(D/2) \theta / \lambda$ ， D 是圆形口径的直径， λ 是波长。

2. 实际光学系统的像差：理想情况

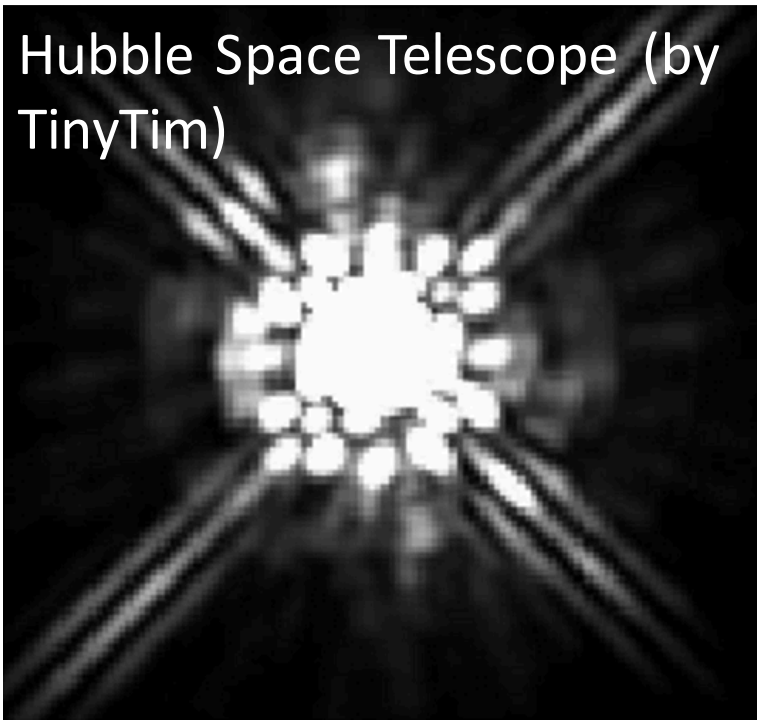
衍射图像的一
维强度分布



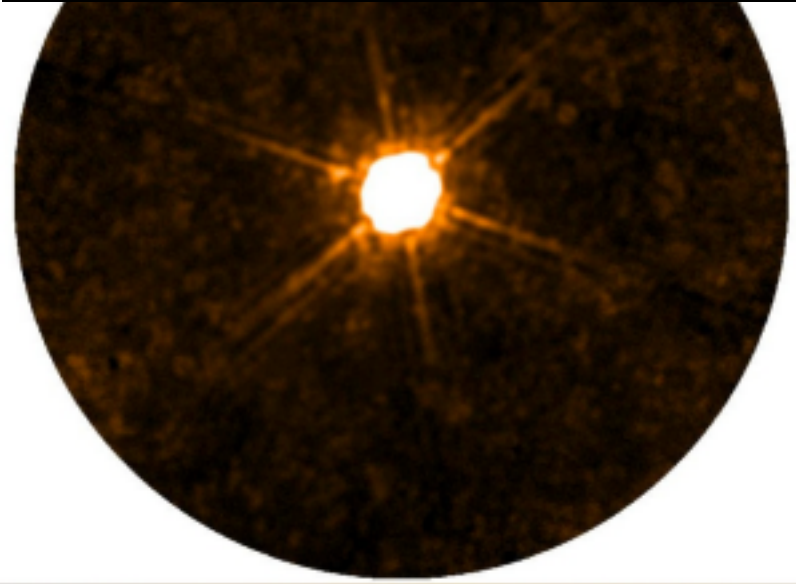
衍射图像二
维强度



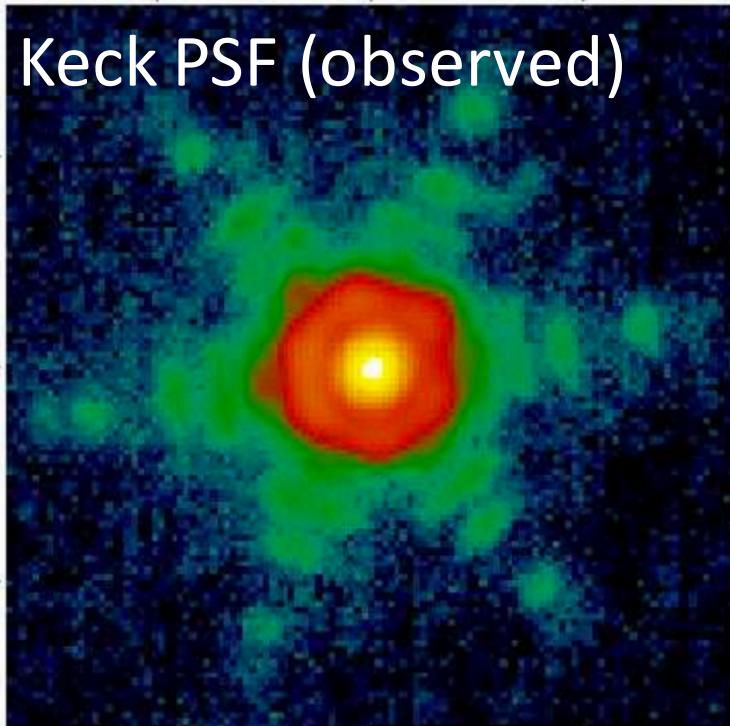
Hubble Space Telescope (by
TinyTim)



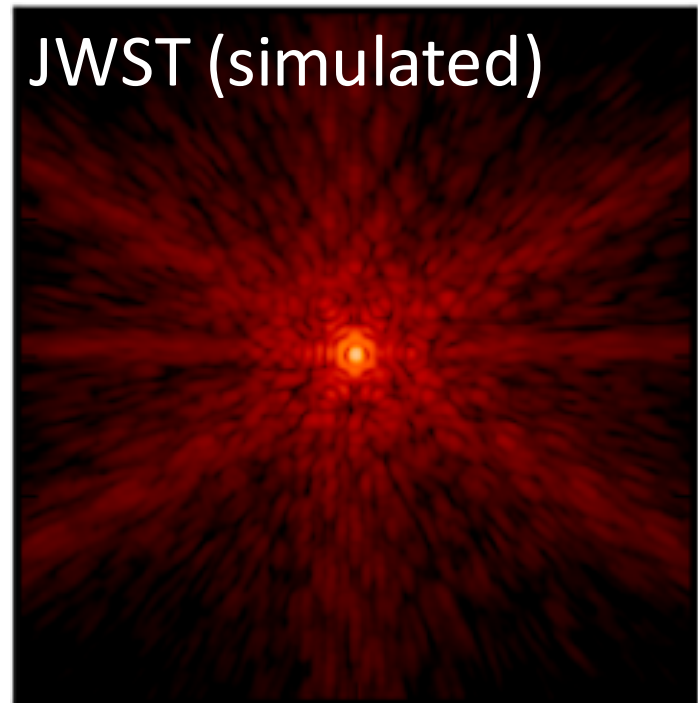
Herschel Space
Observatory (observed)



Keck PSF (observed)



JWST (simulated)



2. 实际光学系统的像差：理想情况

➤ 衍射极限下的空间分辨率为贝塞尔函数第一个零值发生的位置

$$\text{Radius} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$



即瑞利判据。

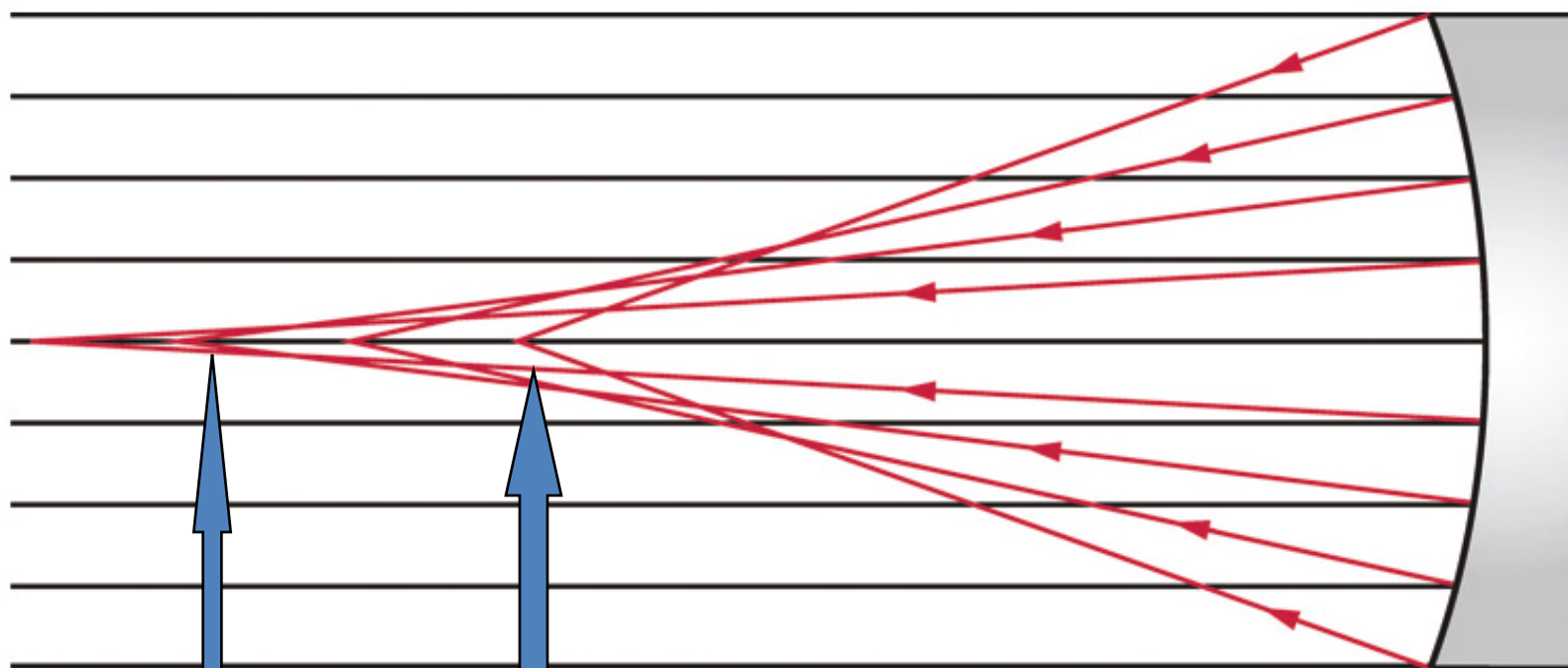
注：对于高信噪比成像，结合计算机处理，小于瑞利判据的两天体也可以很可靠地分开。

2. 实际光学系统的像差

1. 球差 Spherical Aberration
2. 彗差 Coma
3. 像散 Astigmatism
4. 场曲 Curvature Of Field
5. 畸变 Image Distortion
6. 色差 Chromatic Aberration

2.1 球差 Spherical Aberration

- 由球面镜所产生的成像误差。
- 远离光轴的轴向平行光线，在光轴上形成焦点的位置不同于光轴附近的轴向平行光线所形成的焦点位置。
- 由于平行光束在光轴上前后分散形成焦点，导致了弥散光斑（一定直径的模糊像）。



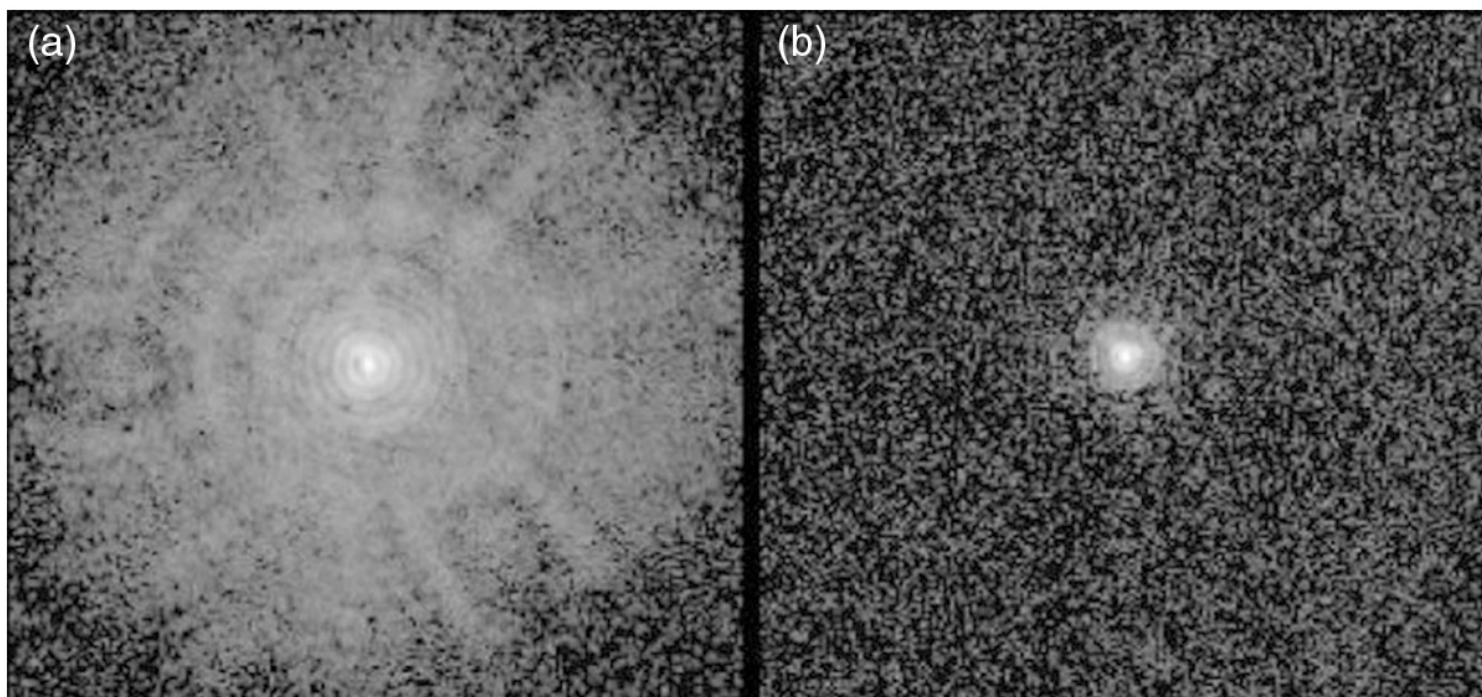
远离光轴入射光线的焦点。

光轴附近入射光线的焦点。

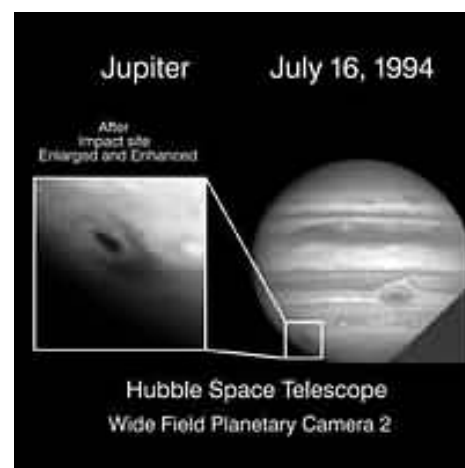


球差修正前

球差修正后

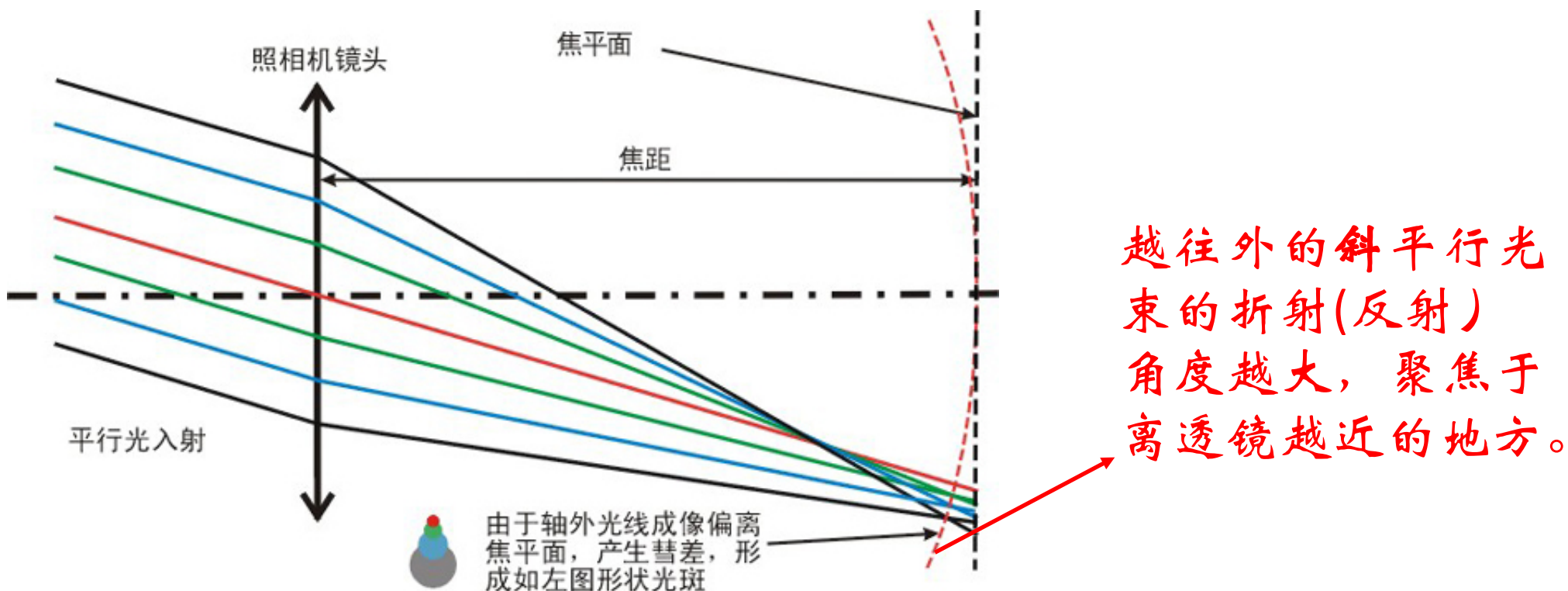


➤ 戴上近视眼镜之后的哈勃空间望远镜：
苏维克-列维9号彗星撞击木星



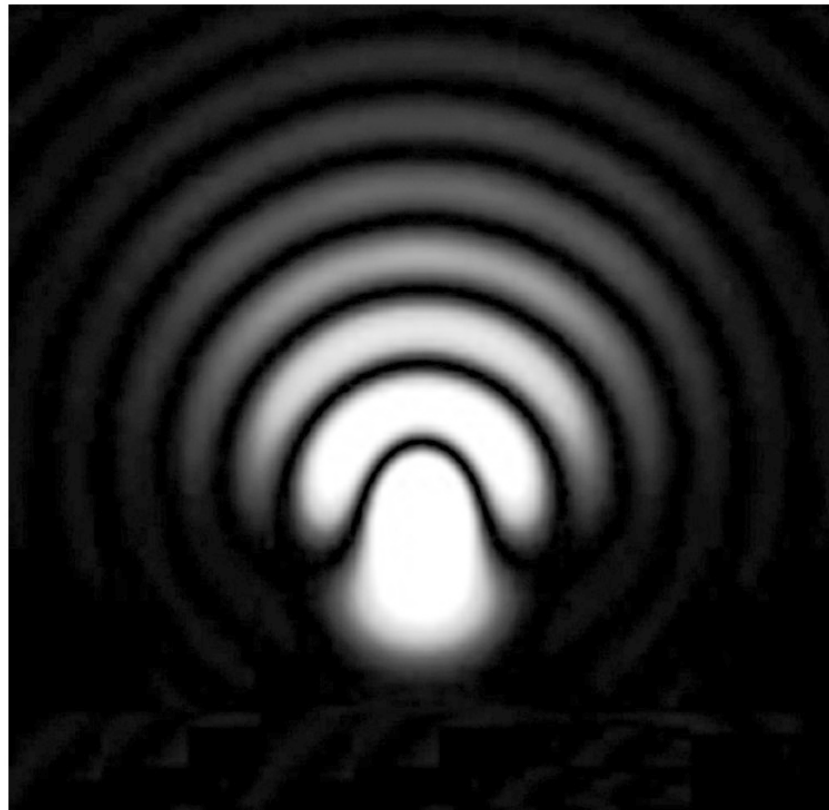
2.2 彗差 Coma

➤ 与光轴呈一定角度的斜平行光束在焦平面上的成像不是点像，而是一个彗状斑点。



2.2 彗差 Coma

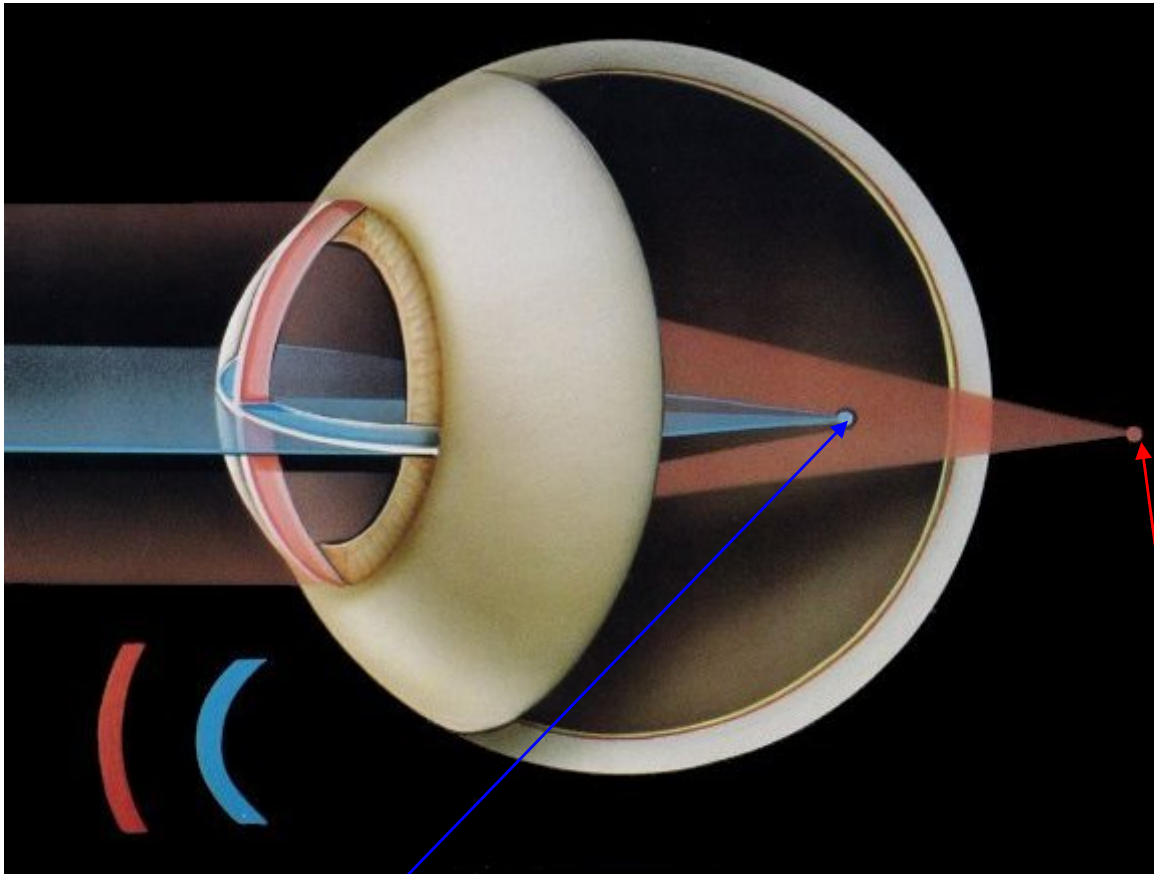
受慧差影响的点扩散函数



2.3 像散 Astigmatism

- 沿光轴方向两个相互垂直的平面里，光学系统在一个平面上的焦点不同于另外一个平面的焦点。
- 像散导致点光源在望远镜焦平面上所成的像是一个椭圆。

2.3 像散 Astigmatism

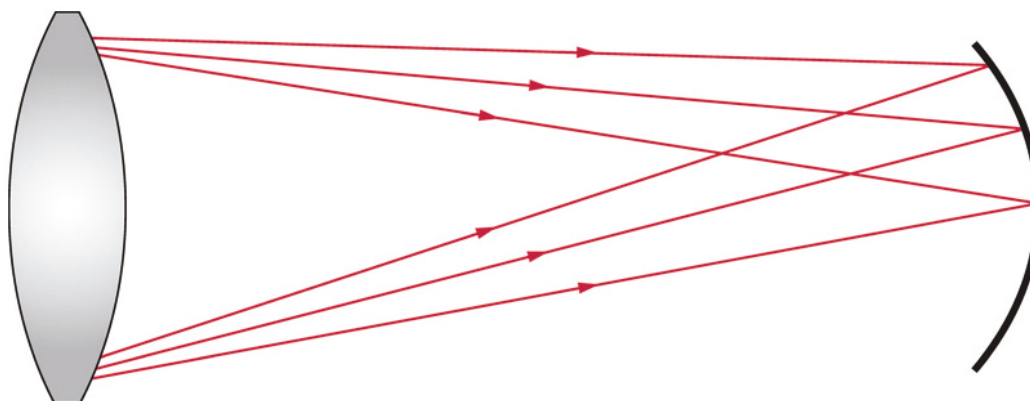


一个平面内
所成的焦点。

另一个垂直平面
内所成的焦点。

2.4 场曲 Curvature Of Field

- 最佳焦平面不在一平面上，而是凹面或凸面。

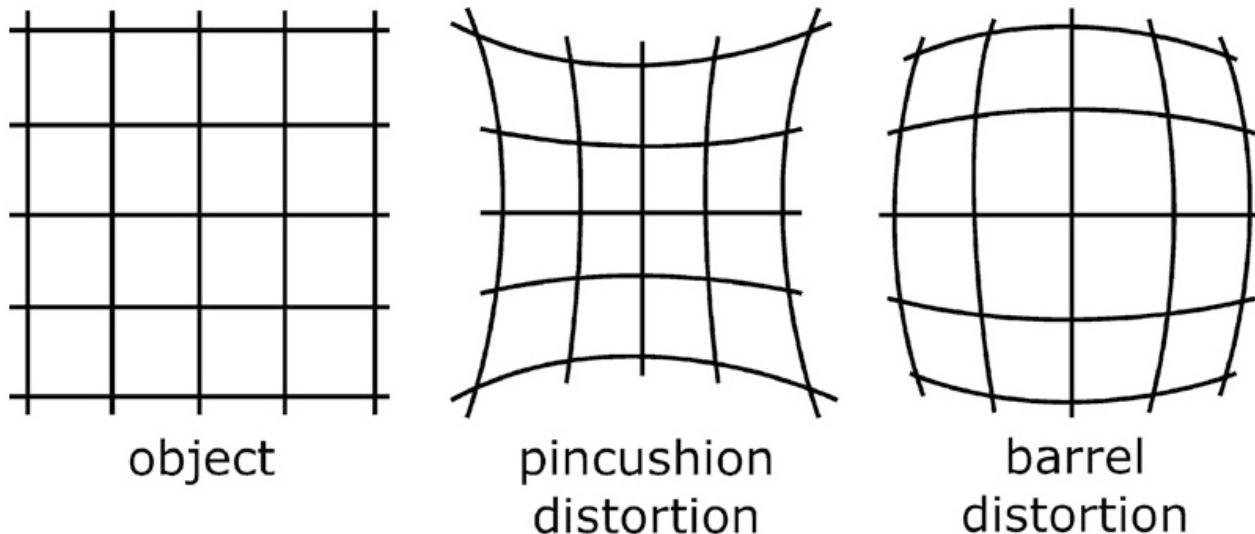


- 消除场曲的方法是：

1. 将底片形状弯曲成与望远镜焦面形状相符。
2. 加改正镜，消除场曲。

2.5 畸变 Image Distortion

- 焦平面上，图象的**放大率不是常数**。
- 在畸变的影响下，**正方形**的物体将成像为**枕形的或桶形的**，前者称为**枕形畸变**，后者称为**桶形畸变**，如下图所示。



2.6 色差 Chromatic Aberration

- 对于含有透镜的光学系统，还需考虑由于透镜的折射率随波长的变化所造成的像差，这种像差称为色差。
- 反射镜没有色差。

3. 望远镜系统

➤ 主焦点系统

➤ 牛顿式系统

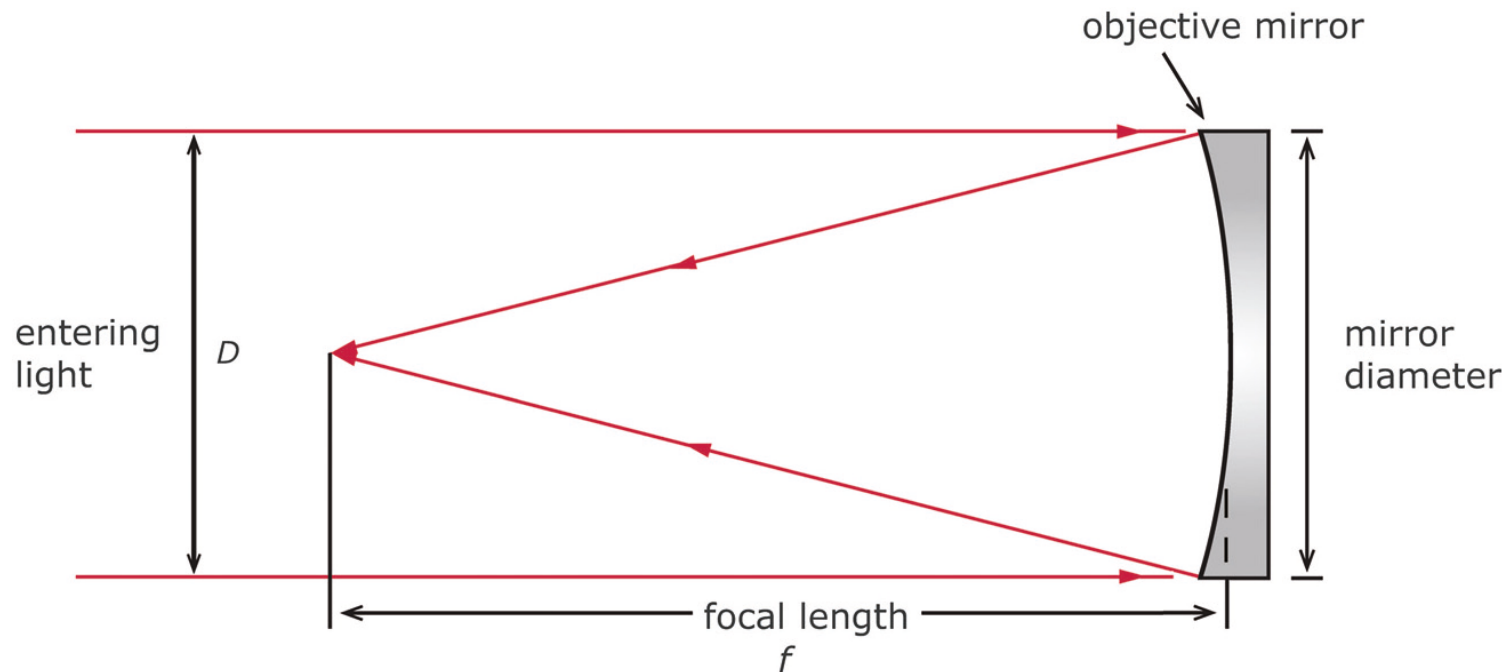
➤ 卡塞格林系统

➤ 格里高利系统

3.1 主焦点系统 (A Prime-Focus Telescope)

➤ 主镜：凹面镜。一般不用球面镜以避免球差。

➤ 成像于主镜的焦点。



3.1 主焦点系统 (A Prime-Focus Telescope)

- 由于只经过一个反射面，由反射引起的光损失小，而没有其他光学器件造成进一步的光损失。
- 主镜为抛物面的主焦点系统没有球差。
- 有严重的彗差。因为彗差，主焦点系统的视场特别小，除非使用改正镜（如日本8.2米的Subaru）。
- 成像于入射的光束上，造成很多不便。只会用于口径较大的望远镜系统，如射电望远镜。

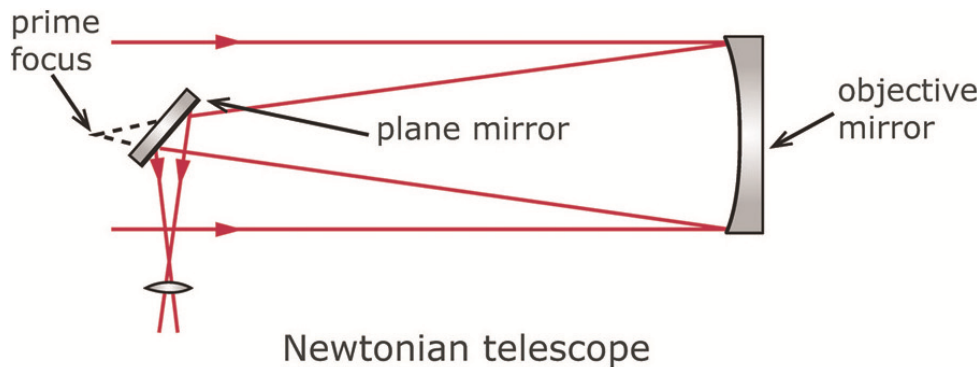
3.1 主焦点系统 (A Prime-Focus Telescope)

Parkes 64m



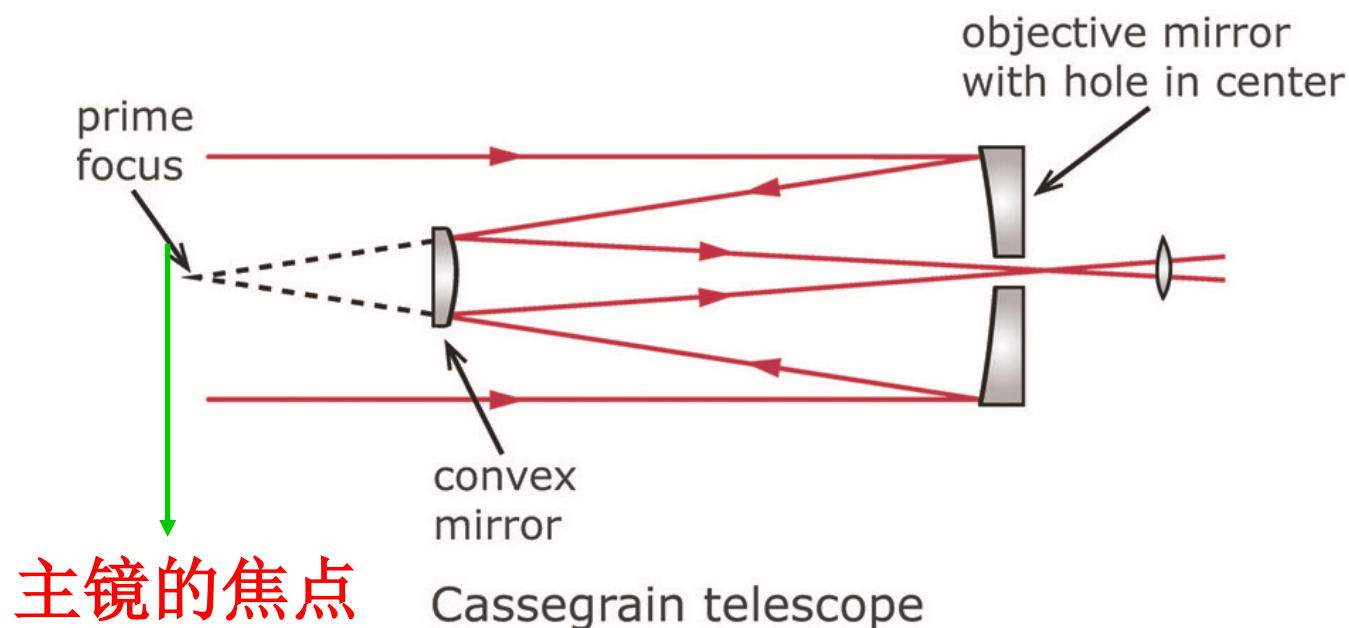
3.2 牛顿式系统 (Newtonian Focus)

- 主镜是凹面反射镜。
- 在主焦点上放置一倾斜45度的平面镜。把光线转向镜筒一侧，使成像于镜筒之外。



3.3 卡塞格林系统 Cassegrain Focus

- 凹面主镜：抛物面或双曲面
- 凸面副镜：位于主镜的焦点前。双曲面，球面或椭球面。
- 主镜中心开孔，成像在主镜之后。使得望远镜系统更紧凑。



3.3 卡塞格林系统 Cassegrain Focus



Keck 和 VLT 是一类特殊的卡塞格林系统，称为 RC 系统（见后面）。

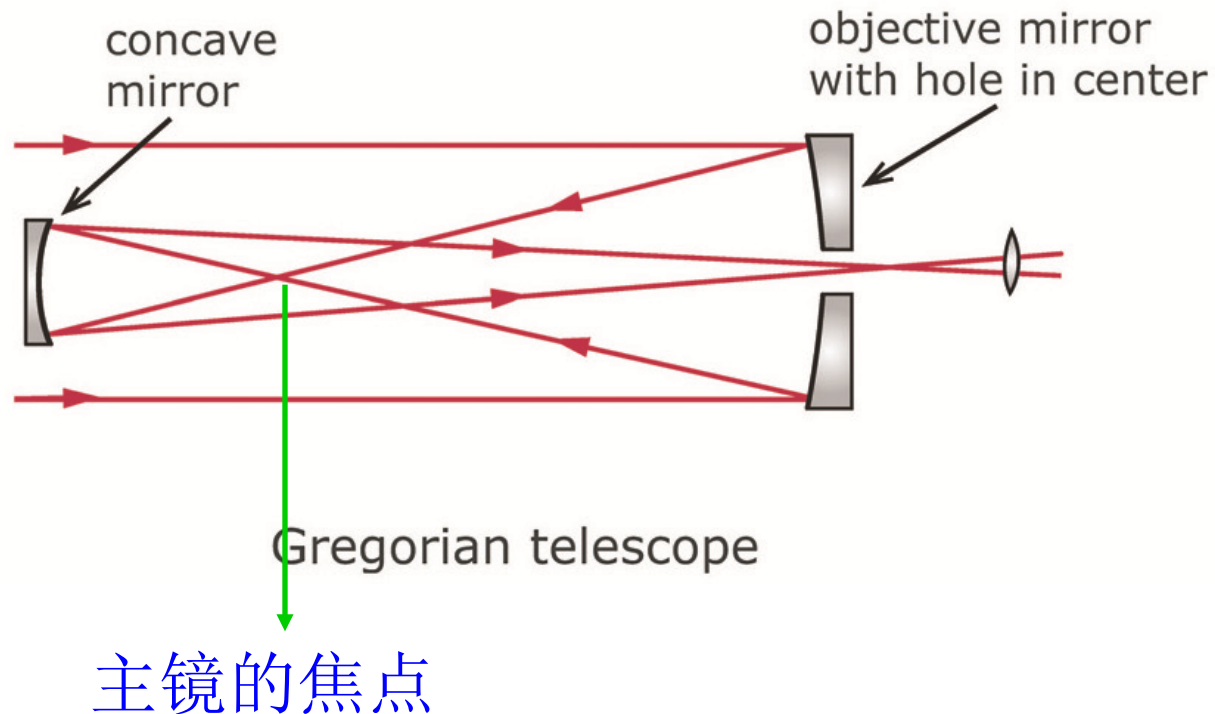


3.4 格里高利系统 Gregory System

➤ 凹面主镜

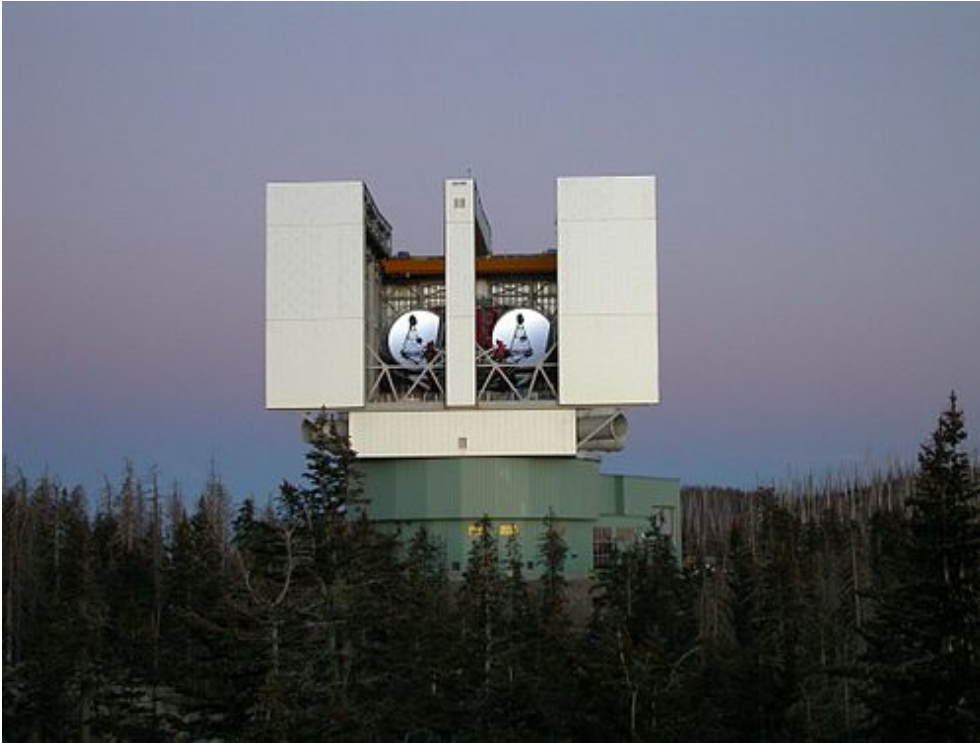
➤ 凹面副镜，放在主镜焦点后面。

➤ 主镜中心开孔。

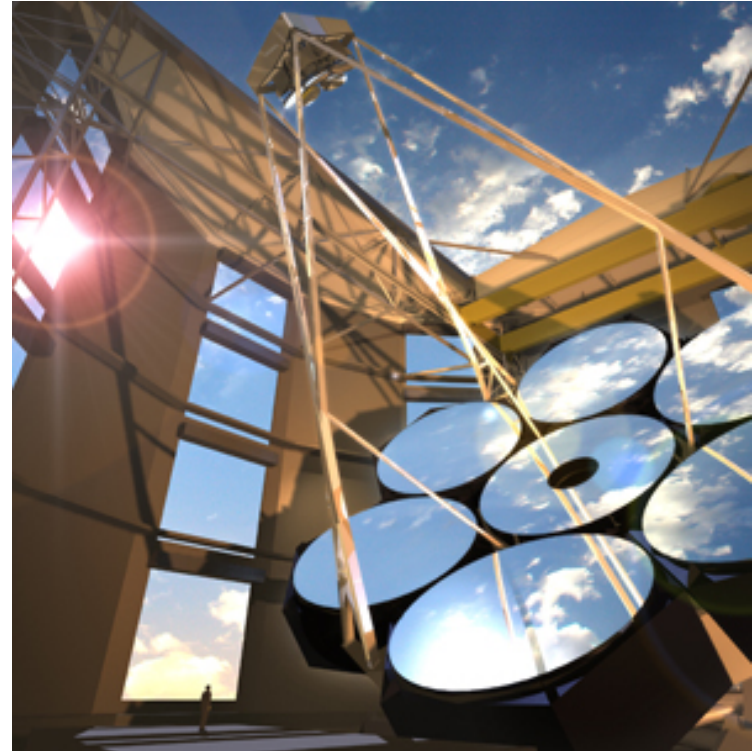


3.4 格里高利系统 Gregory System

LBT: 2个8.4m



Giant Magellan Telescope: 7个8.4米



4. 望远镜的跟踪系统

- 由于天体在天球上有周日视运动，因此在观测过程中必须对天体进行跟踪。
- 望远镜必须要能够绕两条相互垂直的轴线旋转。
- 根据轴线方向选择的不同，望远镜的跟踪装置分为两大类：地平式装置和赤道式装置。

4.1 地平式装置

- 两根轴是水平轴和垂直轴。
- 地平式装置对重力是对称的。
目前大型望远镜都采用这种装置。

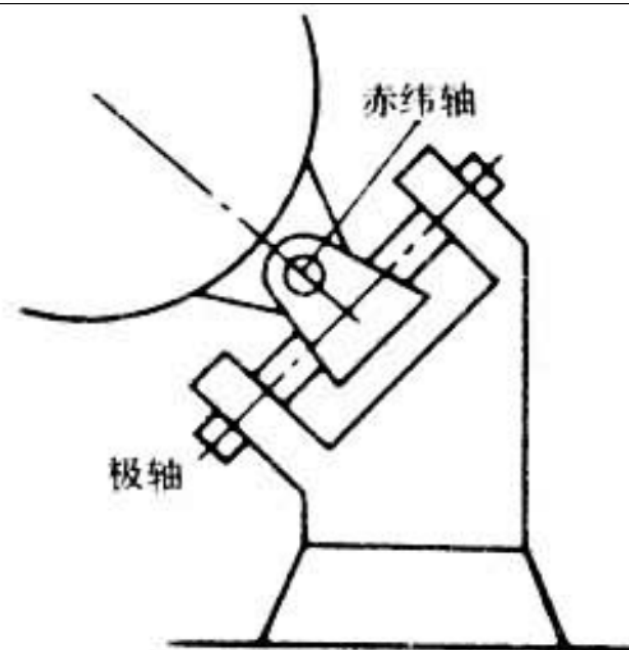


4.2 赤道式装置

➤ 赤道式装置的两根轴分别是赤纬轴和赤经轴(极轴)，也相互垂直。

➤ 因为天体的视运动是绕天轴进行的，因此这种装置跟踪起来很方便（只需转动极轴）。

➤ 因对重力不对称，现代大型望远镜很少使用这种装置。



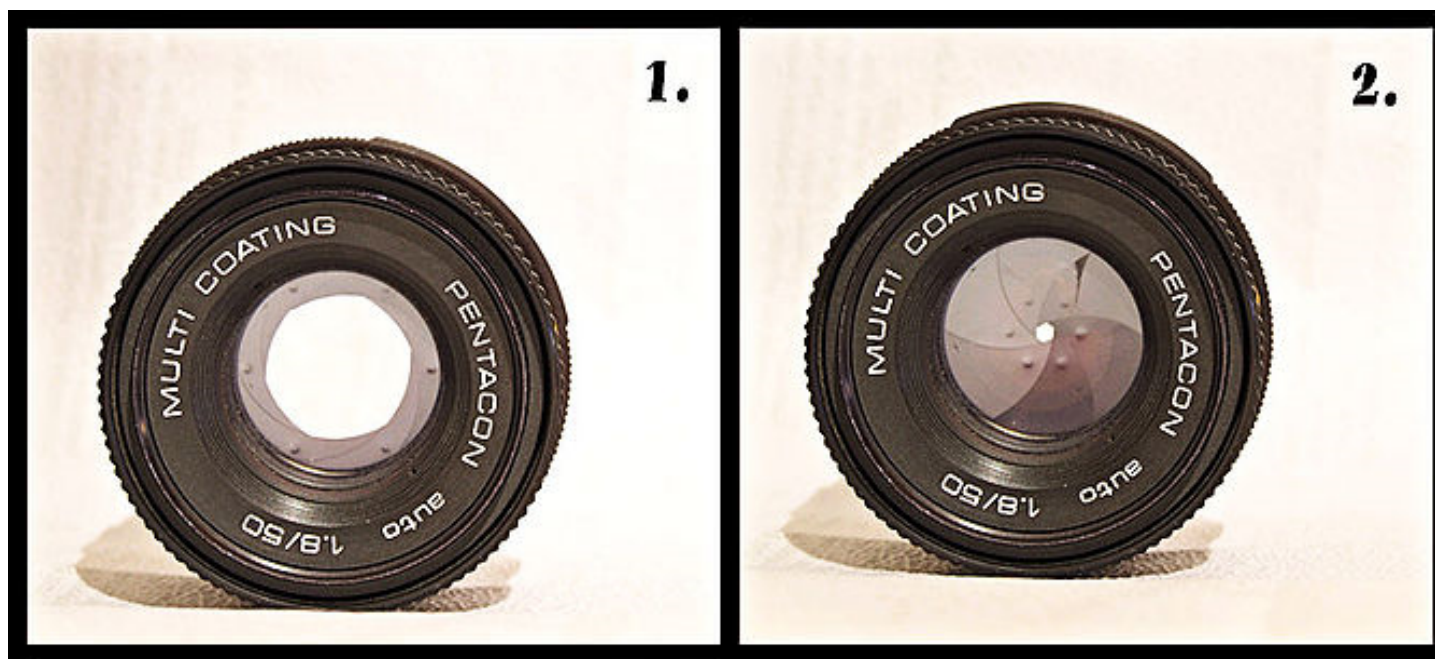
5. 连接望远镜与仪器

➤ 5.1 望远镜参数。

➤ 5.2 成像描述。

5.1.1. 口径

- 口径指物镜的有效口径，即未被镜框挡住的那部分物镜的直径，用 D 表示。



5.1.1. 口径

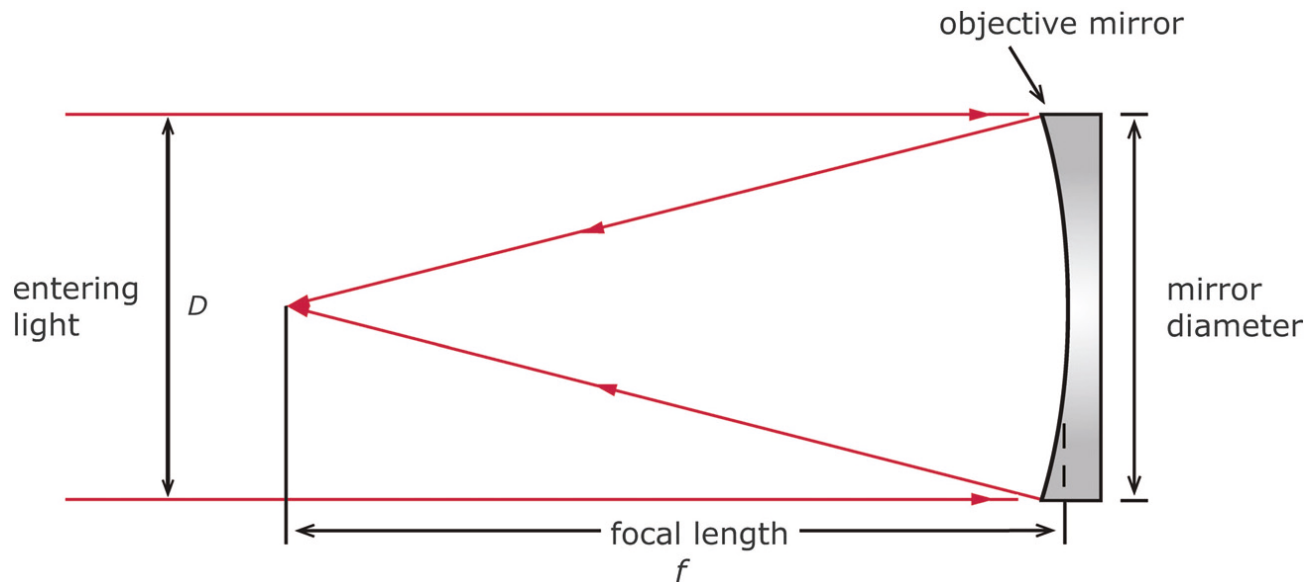
口径确定了望远镜所收集的**光量**：

$$\text{光通量} \propto D^2$$

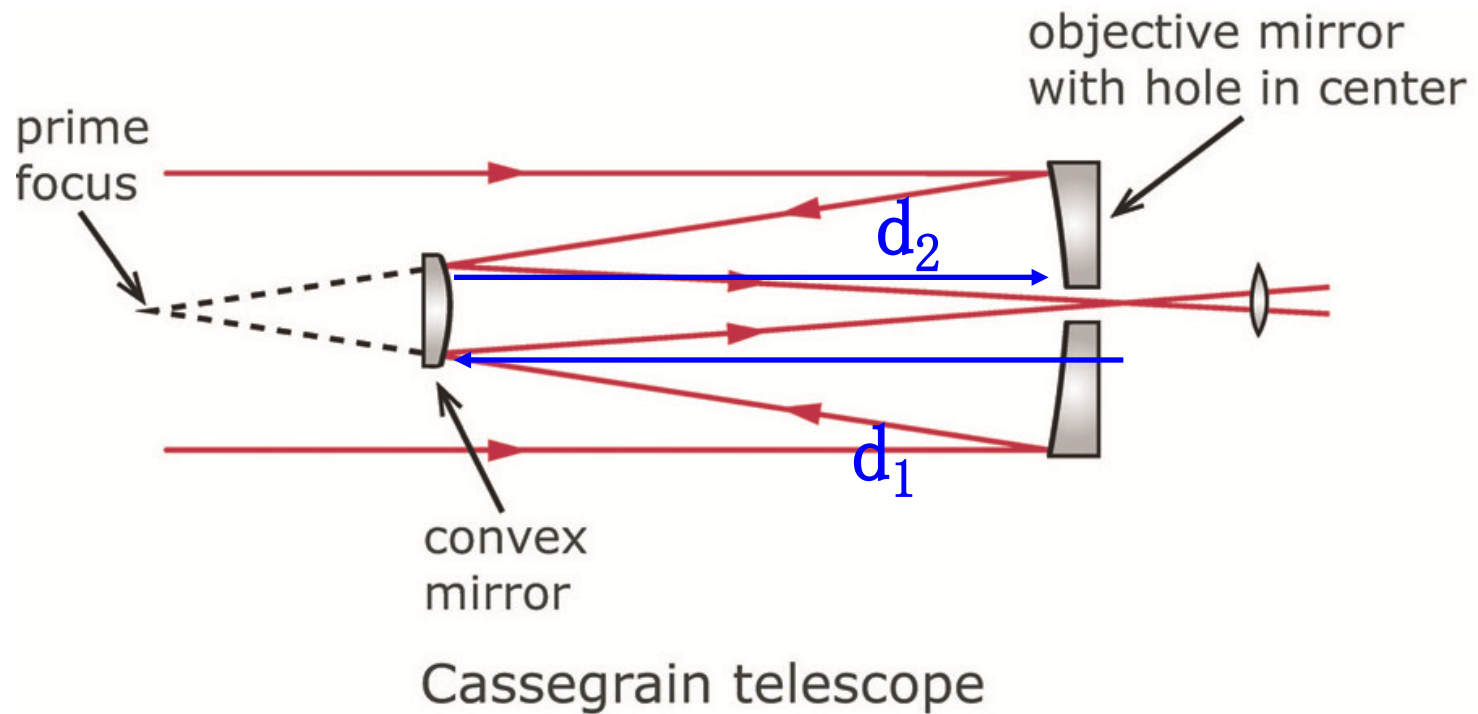
口径越大，就能看到越暗弱的天体，能看到的天体越多，所需曝光时间越短。

5.1.2. 焦距 f (focal length)

- 把焦点上的光束反推直到它的半径等于望远镜的口径，焦距就是这个反推的长度。



5.1.2. 焦距 f (focal length)

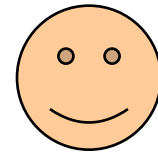


$$\text{焦距} = d_1 + d_2$$

5. 1. 3. 焦比 $f/\#$ (f-number)

- 焦距 f 与物镜的口径 D 的比值

$$f/\# = \frac{f}{D}$$



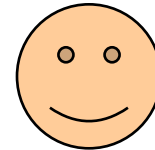
- 焦比的倒数称为相对口径，常用 A 表示

$$A = \frac{D}{f}$$

5.1.4. 放大率

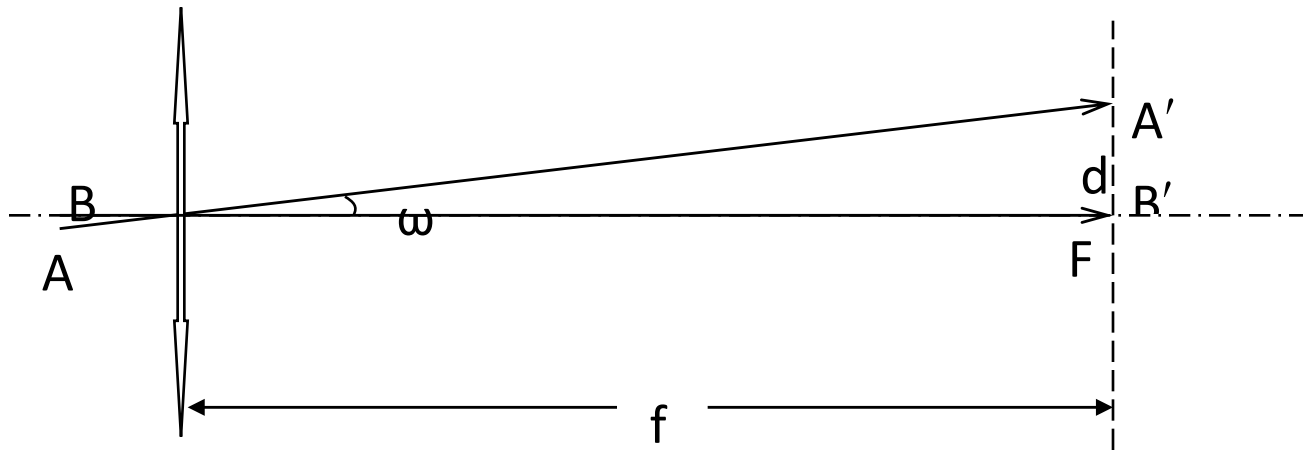
- 到焦平面上的焦比与主镜焦比的比例M:

$$M = \frac{f_{\text{equivalent}}}{f_{\text{primary}}}$$



5.1.5. 底片比例尺 (plate scale)

- 焦平面上物理尺度(如mm)到角度(如arcsec)的转换因子。



由 $\tan \omega = \frac{d}{f}$

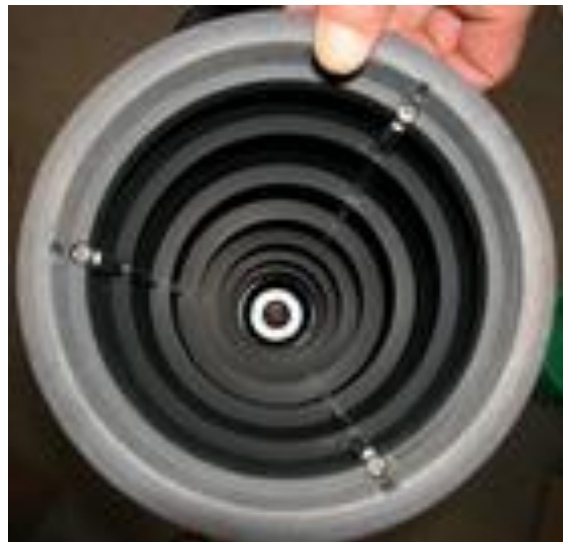
定义底片比例尺为 $\alpha = \frac{\omega}{d} \approx \frac{206265}{f} ("/mm)$ 😊

5.1.6. 视场 FOV (field of view)

- 能被望远镜良好成像的天空区域的角直径称为视场。
- 受光学系统，光路上挡板，仪器尺寸，仪器接收光路的角度等决定。

5.1.7 光阑 (stop)

- 光学元件的边缘、框架或特别设置的带孔屏障称为光阑。



5.1.7 光阑 (stop)

➤ 光阑按其作用分为两种：

(1) 孔径光阑 (aperture stop): 限制光束的直径大小, (主镜属于孔径光阑)。

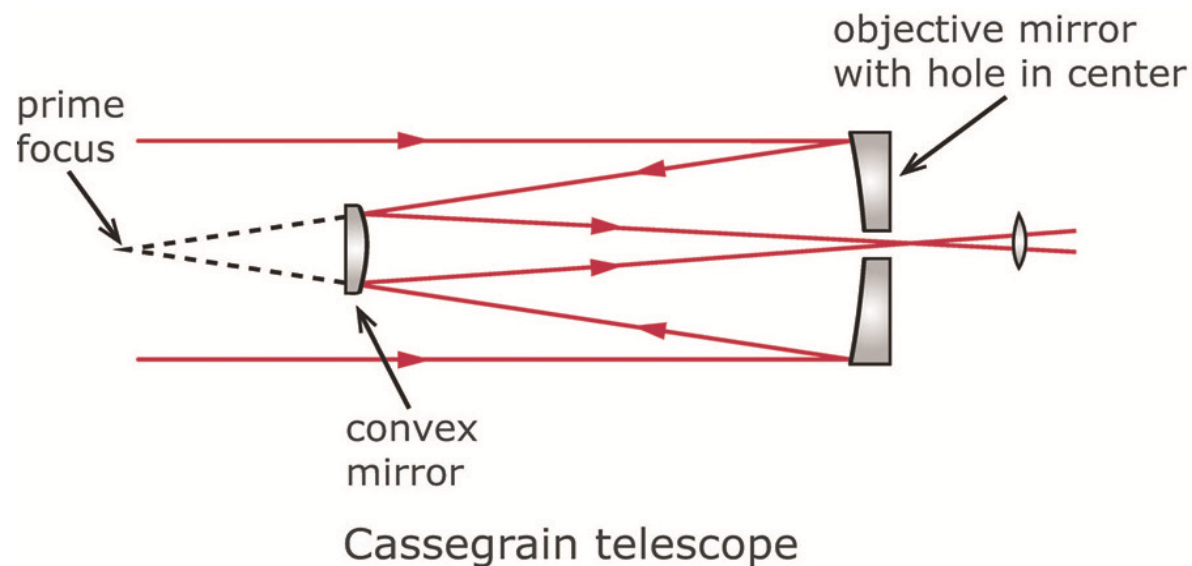
(2) 视场光阑 (field stop): 限制光束的入射角度大小。

5.1.8 瞳 (pupil)

- 瞳: 孔径光阑 (包括主镜) 所成的像。
- 入射瞳 (Entrance pupil) : 孔径光阑前的光学系统所成的像。对主镜的照射可以称之为入射瞳。
- 出射瞳 (Exit Pupil): 孔径光阑后的光学系统所成的像。

望远镜设计的一个例子

- 主镜直径 $D=4\text{m}$
- 主镜 $f/\# = 3$
- 副镜在主镜焦距前 3m
- 成像于主镜后 1m



望远镜设计的一个例子

1. 主镜的出射瞳在什么地方？

从 $D=4\text{m}$ 和 $f/\# = 3$ ，我们得出主镜焦距 $f=12\text{m}$

利用薄镜成像公式来计算副镜的焦距：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}$$

代入 $s_1=-3\text{m}$ 和 $s_2=10\text{m}$ ，得出副镜焦距 $f=-4.2857\text{m}$ 。

同样利用薄镜成像公式，从 $s_1=9\text{m}$ 和 $f=-4.2857\text{m}$ 得出 $s_2=-2.903\text{m}$ ，即主镜的出射瞳在副镜后方 2.903m 。

望远镜设计的一个例子

2. 如果在焦平面后0.4m处加一个焦距为0.25m的透镜，新的焦点和新的出射瞳在什么地方？

利用薄镜成像公式，

$$s_1 = 0.4\text{m} \text{ 和 } f = 0.25\text{m}$$

$$\text{得出 } s_2 = 0.667\text{m}。$$

$$s_1 = 2.903\text{m} + 10\text{m} + 0.4\text{m} = 13.303\text{m}$$

$$f = 0.25\text{m}$$

$$\text{得出 } s_2 = 0.255\text{m}。$$

即出射瞳在新焦点前面 $0.667\text{m} - 0.255\text{m} = 0.412\text{m}$

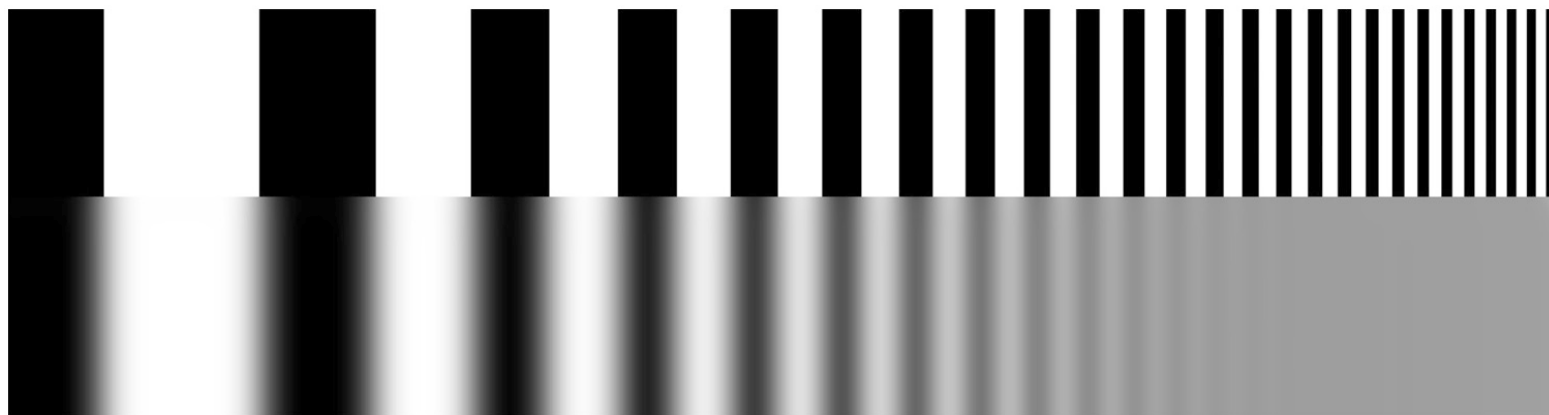
5.2 成像描述 (Image Description)

- 望远镜系统因各种原因使得其成所的像偏离衍射极限，因此我们需要定量的来描述望远镜所成的像，即这就是所谓的成像描述。

5.2 成像描述 (Image Description)

➤ 基本原理:

对一组黑白相间的图形成像，其中黑白带间距逐渐减少。图中上半部分是理想情况下的成像，下半部分是实际光学系统所成的像。



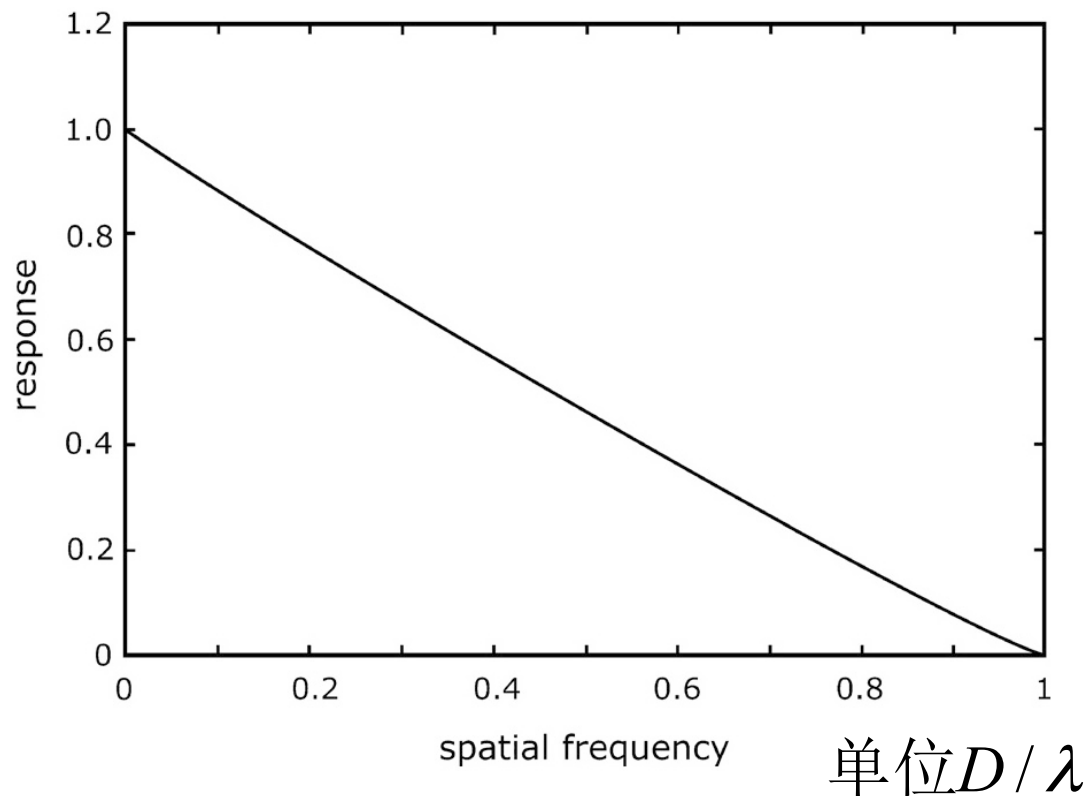
5.2 成像描述(Image Description)

➤ 定量描述是利用调制传递函数 MTF(modulation transfer function)

-  定义：输出像与输入像调制（即对比度，modulation）的比值。
-  描述光学系统传递调制的能力。MTF越大，表示系统的成像质量越好。
-  与空间频率特性有密切的关系，利用傅里叶转化来描述光学系统的成像。

5.2 成像描述 (Image Description)

- 圆形口径望远镜的MTF（光路上没有遮挡物）：**越高频部分（即越精细的结构），MTF越小。**



6. 望远镜优化

➤ 6.1 大视场



R-C 系统



施密特望远镜



马克苏托夫望远镜



焦平面改正镜系统



保罗-贝克望远镜



➤ 6.2 红外

6. 1. 1. R-C 系统

➤ 主镜:凹双曲面

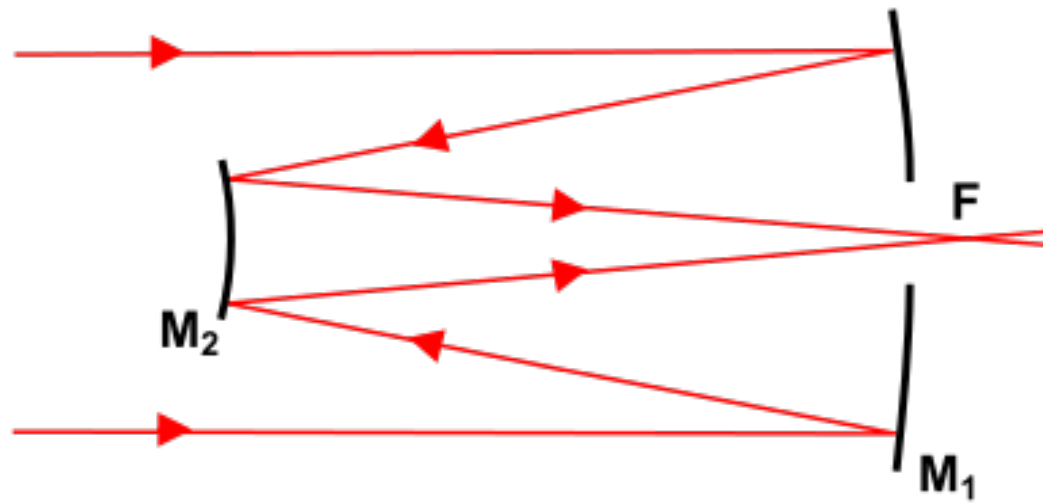
➤ 副镜:凸双曲面

➤ 这种系统无色差（因为没使用透镜）、球差（因为无球面镜）、彗差（因为主镜和副镜在光路上相互抵消）。

➤ R-C系统视场比同样相对口径的主焦点系统和经典的卡塞格林系统大好几倍，但像场是个曲面，要采用弯曲底片以消除场曲。

6.1.1. R-C 系统

➤ 是一类特殊的卡塞格林系统：



Ritchey-Chrétien

6. 1. 1. R-C 系统

Keck Observatory



Keck 和 VLT应用的是RC系统。

Very Large Telescope



6.1.2 施密特望远镜 Schmidt Telescope

- 球面主镜
- 改正镜：改正球差与慧差，其直径等于主镜的直径。

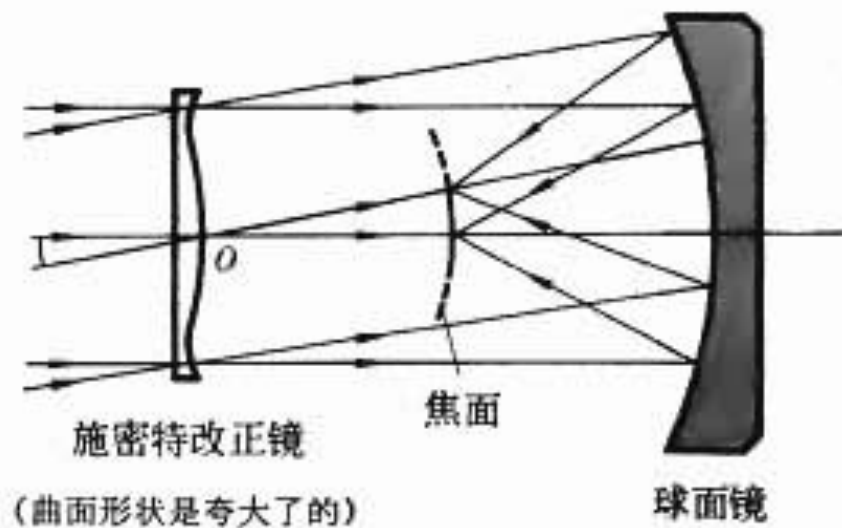


图1 施密特望远镜光学系统

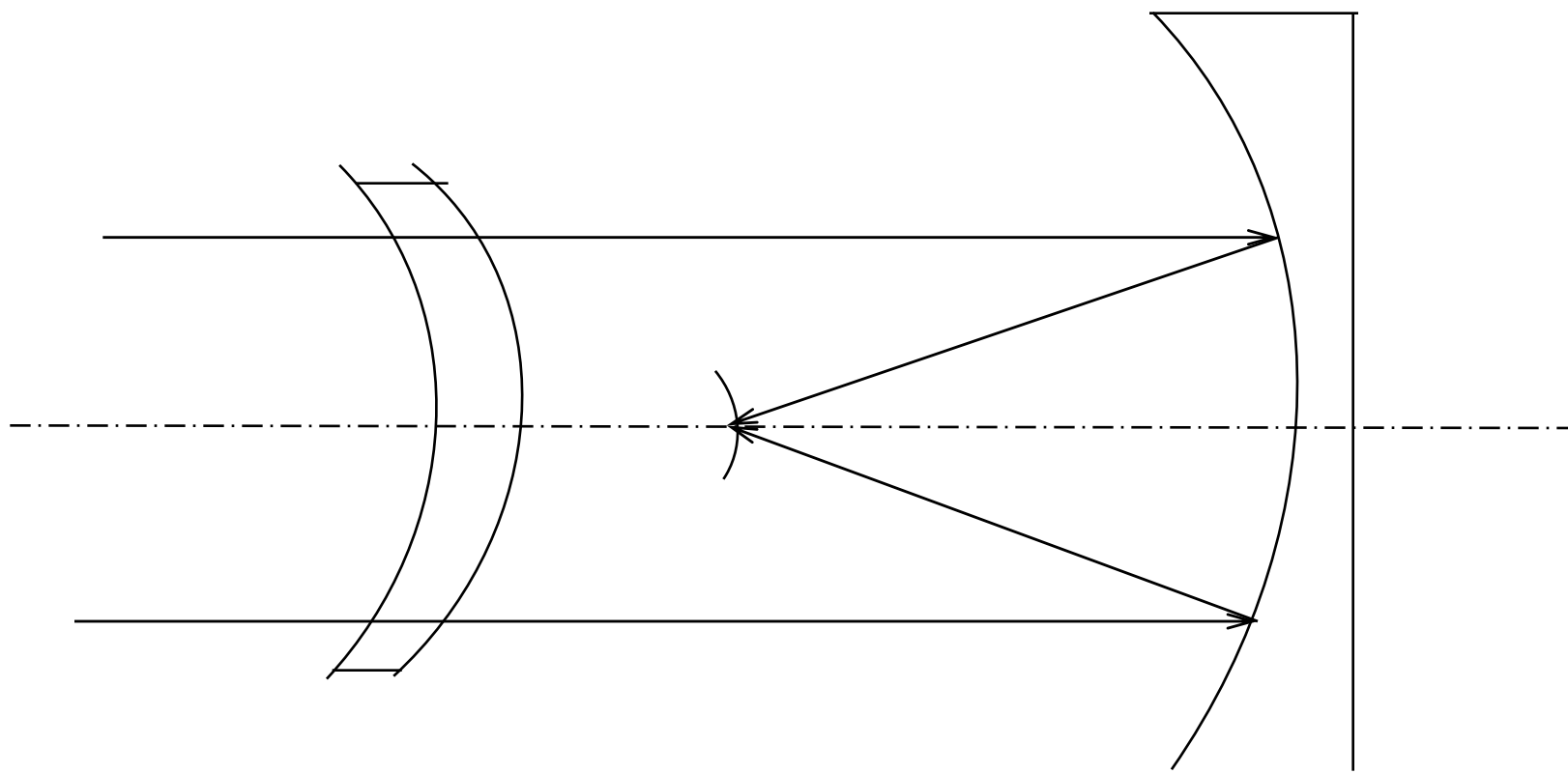
6.1.2 施密特望远镜

- 改正镜一面是平面，另一面中央稍微隆起，远离中心处则稍凹，这样中央部分起会聚透镜的作用，而远离中心的部分起发散透镜的作用，从而使近轴光线和远轴光线的会聚点彼此靠拢并重合在一起。
- 施密特系统的视场都是弯曲视场。

6.1.3 马克苏托夫望远镜

- 相类似于施密特望远镜，它也是在一个凹球面反射主镜前加一块改正球差的改正镜。
- 不同的是改正透镜是一块弯月形透镜。
 - 适当选择透镜两面的曲率和厚度，可以使弯月形透镜产生足以补偿凹面镜的球差，同时消去彗差和色差。
- 马克苏托夫系统的焦面为曲面，场曲较大。

6.1.3 马克苏托夫望远镜



6.1.3 马克苏托夫望远镜

➤ 马克苏托夫望远镜的缺点是：

■ 和相同口径、相同相对口径的施密特望远镜相比，视场稍小，成像质量稍差。

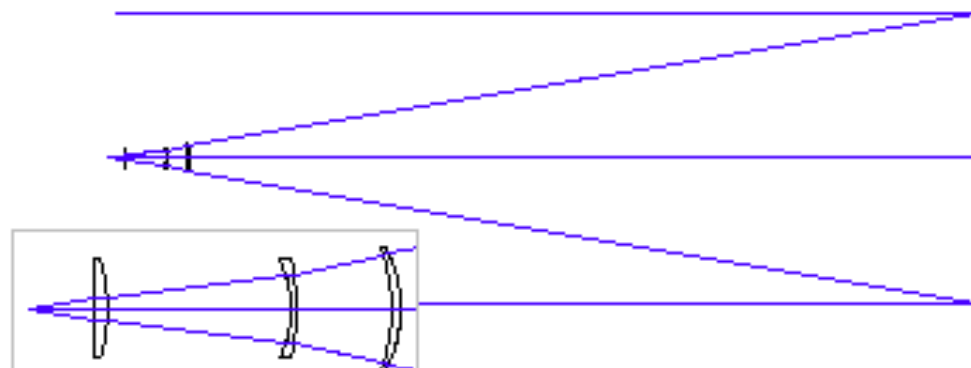
■ 因弯月形透镜的厚度需达到口径的十分之一左右，故光损较大，从而限制了口径的增大，因此目前无法建成口径可与施密特相匹敌的马克苏托夫望远镜。

6.1.4 焦平面改正镜系统

- 施密特望远镜和马克苏托夫望远镜都是在主镜前的光路上加改正镜。直径大于1-1.5米的改正镜的制造难度很大。
- 在焦平面附近修正光路可以避免上述问题（如Ross的二透镜系统，Wynne的三透镜系统）。

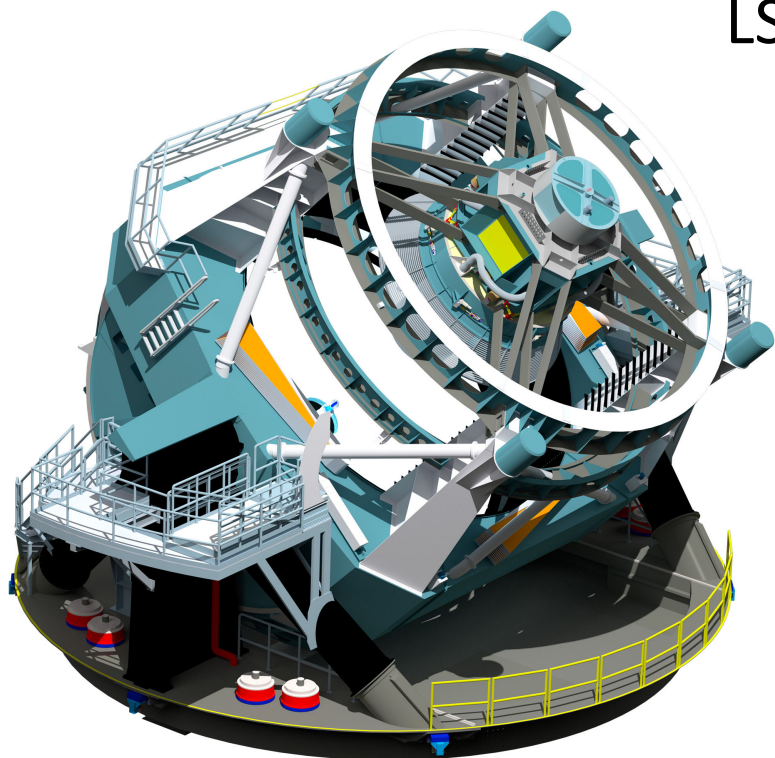
6.1.4 焦平面改正镜系统

- 三透镜系统利用三个透镜来修正光路，色差，场曲，球差，慧差和象散。

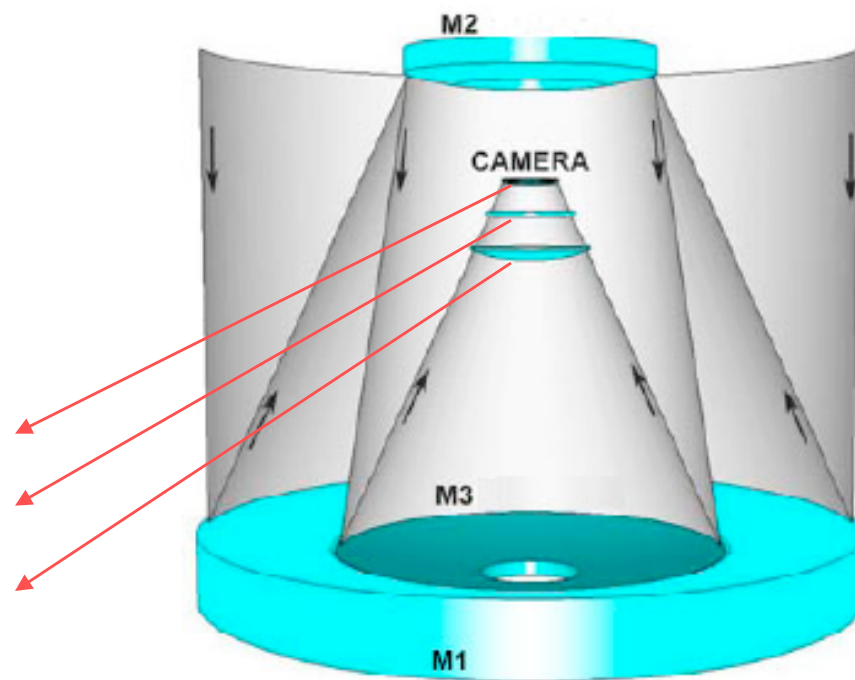


6.1.4 焦平面改正镜系统

LSST: 8米, 3天扫描一遍天空。



焦平面三透镜
修正系统。



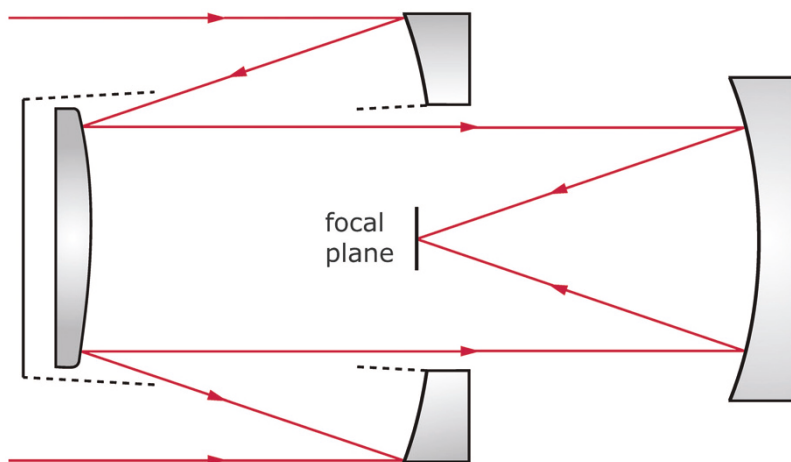
6.1.5 保罗-贝克望远镜 (Paul-Baker)

➤ 三反射镜设计（没有透镜）：

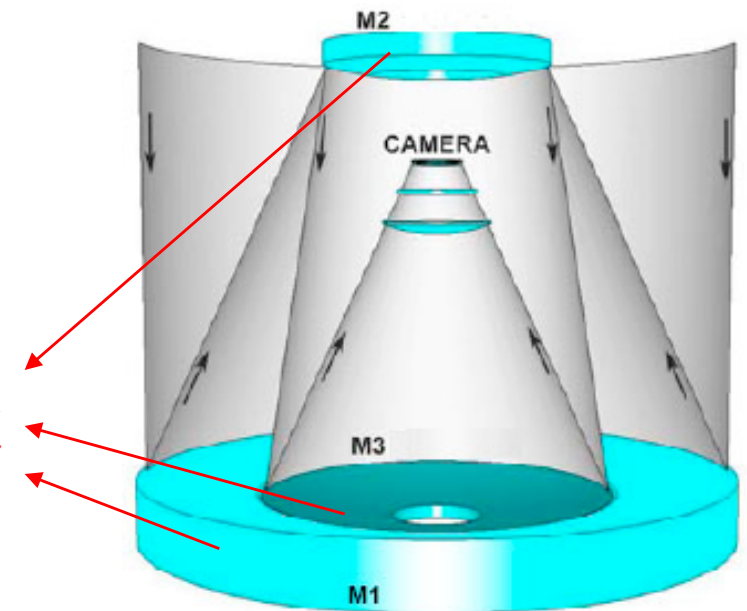
■ 抛物面主镜

■ 球面副镜

■ 球面形的第三个反射镜。



三反射镜



6.2 红外 (>2 微米) 望远镜的优化

- 除了光学波段上的各种问题需要克服，还需对望远镜做其他方面的优化。
- 望远镜本身的发射比其他所有来源的辐射都要强很多，包括周围环境，天光，黄道面红外辐射，银道面红外辐射，河外星系辐射等。
- 最主要的是最小化望远镜本身的辐射。

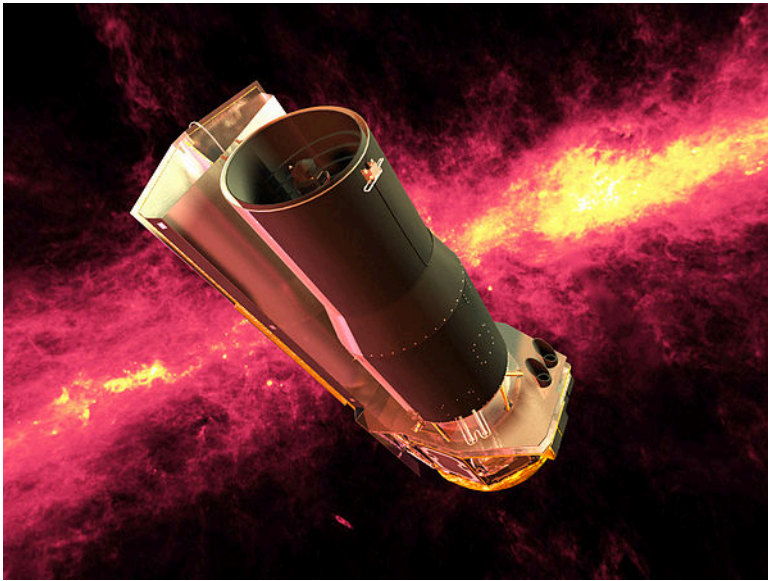
6.3 红外望远镜的优化

- 1. 冷却望远镜：但因接触大气，望远镜本身的辐射仍占主导。
- 2. 用合理大小的副镜，如 $f\text{-}\# = 15$ 。
- 3. 主镜可以用银或金来镀层，而不是铝。
- 4. 副镜的支架和其他支撑结构用薄材料。不用遮挡物 (baffle)。

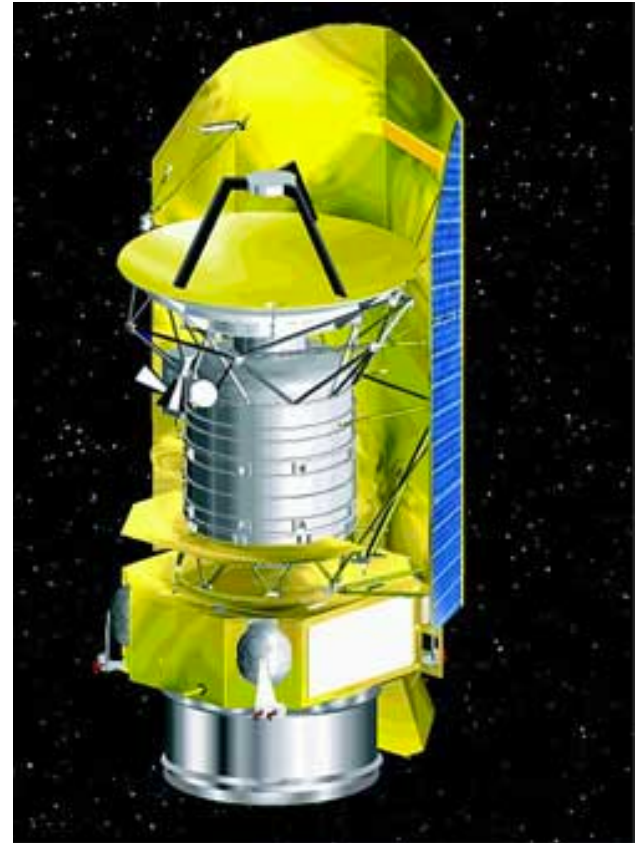
6.3 红外望远镜的优化

- 5. 仪器在低温下工作：如用液氦，而不是液氮。
- 6. 用光阑把剩下的热辐射尽量排除在天体的光路外。
- 7. 转动副镜来快速的对邻近的两个天区来成像：近红外天空亮度变化非常快；只转动副镜可以保证不同天区经过类似的光路（从大气一直到望远镜内部）。
- 8. 把红外望远镜放在空间：可以冷却使得望远镜本身的辐射不占主导（降低1百万倍）。

6.3 红外望远镜的优化



Spitzer Space Telescope
(2003-2008): 仪器冷却,
望远镜冷却.



Herschel Space Observatory
(2009-2013): 仪器冷却, 望
远镜被动冷却.

7 现代10米光学红外望远镜

- 设计的基本思路是增强 **成像的锐化度**，即空间分辨率。
- 加州理工帕拉玛天文台的Hale 5米在很长一段时间被认为是天文学家在地面所能构造的最大望远镜，因为：
 - ❖ 镜面本身的 **条纹** 将是无法克服的困难。
 - ❖ 图像大小固定的情况下（由seeing决定），望远镜探测弱天体的能力 **只正比于** 望远镜的直径。



7.1 现代10米口径光学红外望远镜

➤ 镜面的条纹：分析条纹，来调整主镜（主动光学）。

➤ 用轻材料：



有助于调整主镜



降低主镜的热容(Heat Capacity)：望远镜圆包里的空气流动贡献了一大部分seeing，而这些空气流动因为主镜的热表面造成。降低热容能使主镜更快更易与周围环境达到热平衡。

➤ 极端通风的望远镜圆包设计。

7.2 三种主镜的设计

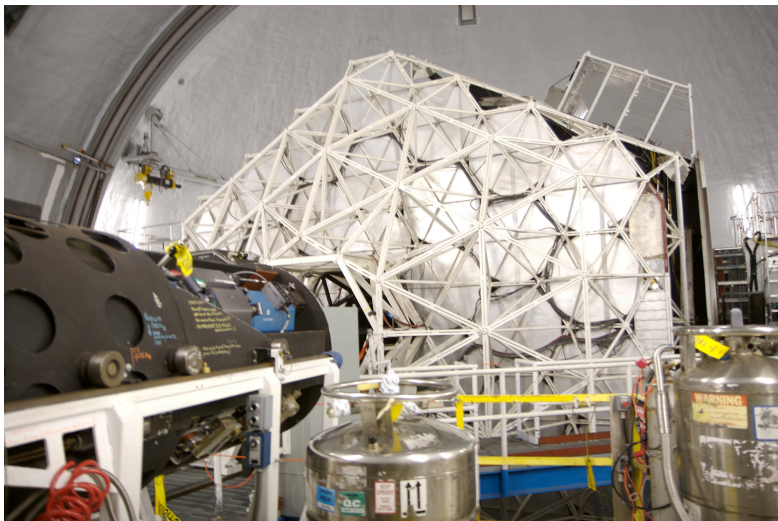
➤ 片式主镜 (segmented primary mirror).

Keck Telescope

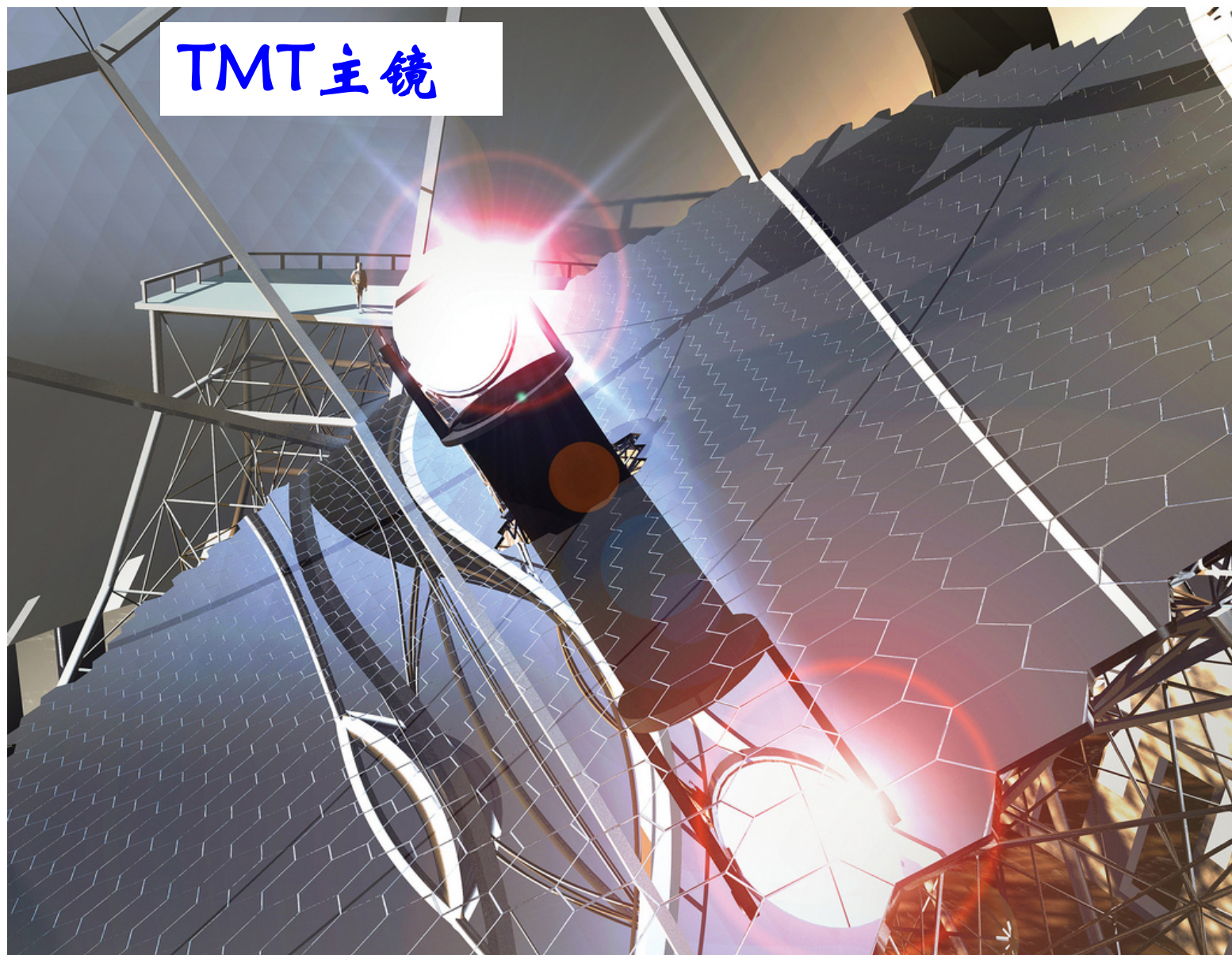
Gran Telescopio Canarias (GTC)

Hobby-Eberly Telescope (HET)

South African Large Telescope (SALT)



7.2 三种主镜的设计



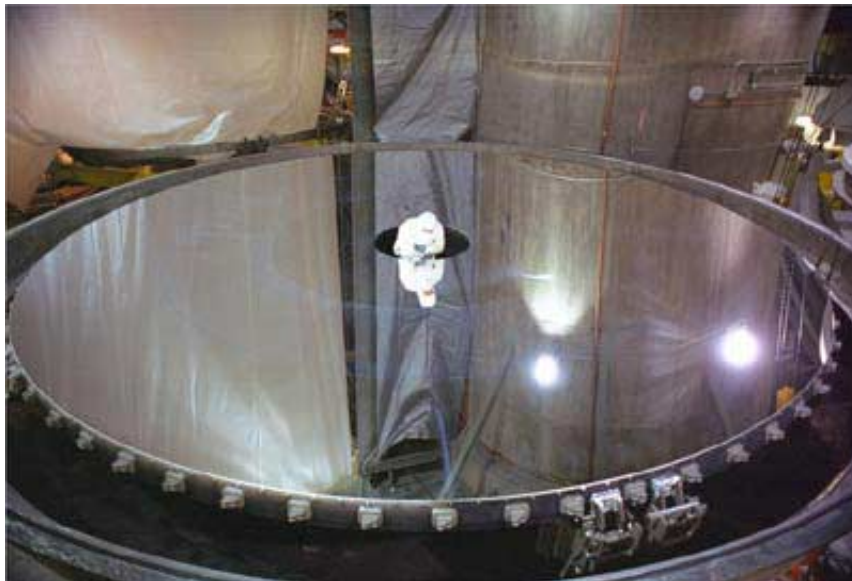
7.2 三种主镜的设计

➤ 单片薄主镜。

Very Large Telescope (VLT)

Subaru

Gemini



0.175米厚

微晶玻璃(Zerodur):热膨胀系数极低

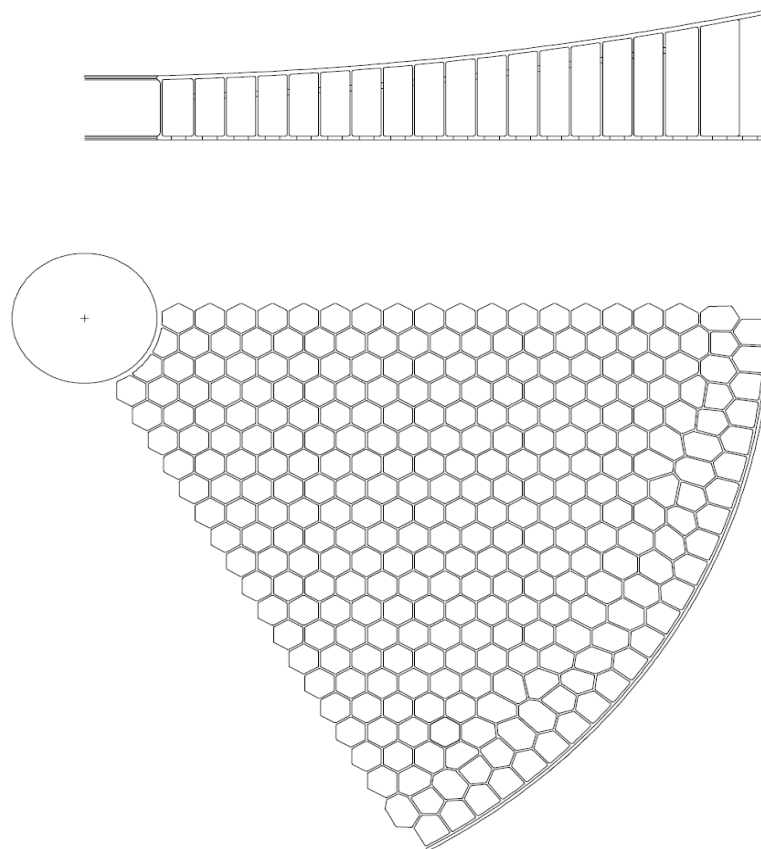
7.2 三种主镜的设计

➤ 单面蜂窝夹层结构主镜 (honeycomb sandwich mirror)

Multiple Mirror Telescope (MMT)

Magellan Telescope

Large Binocular Telescope (LBT)

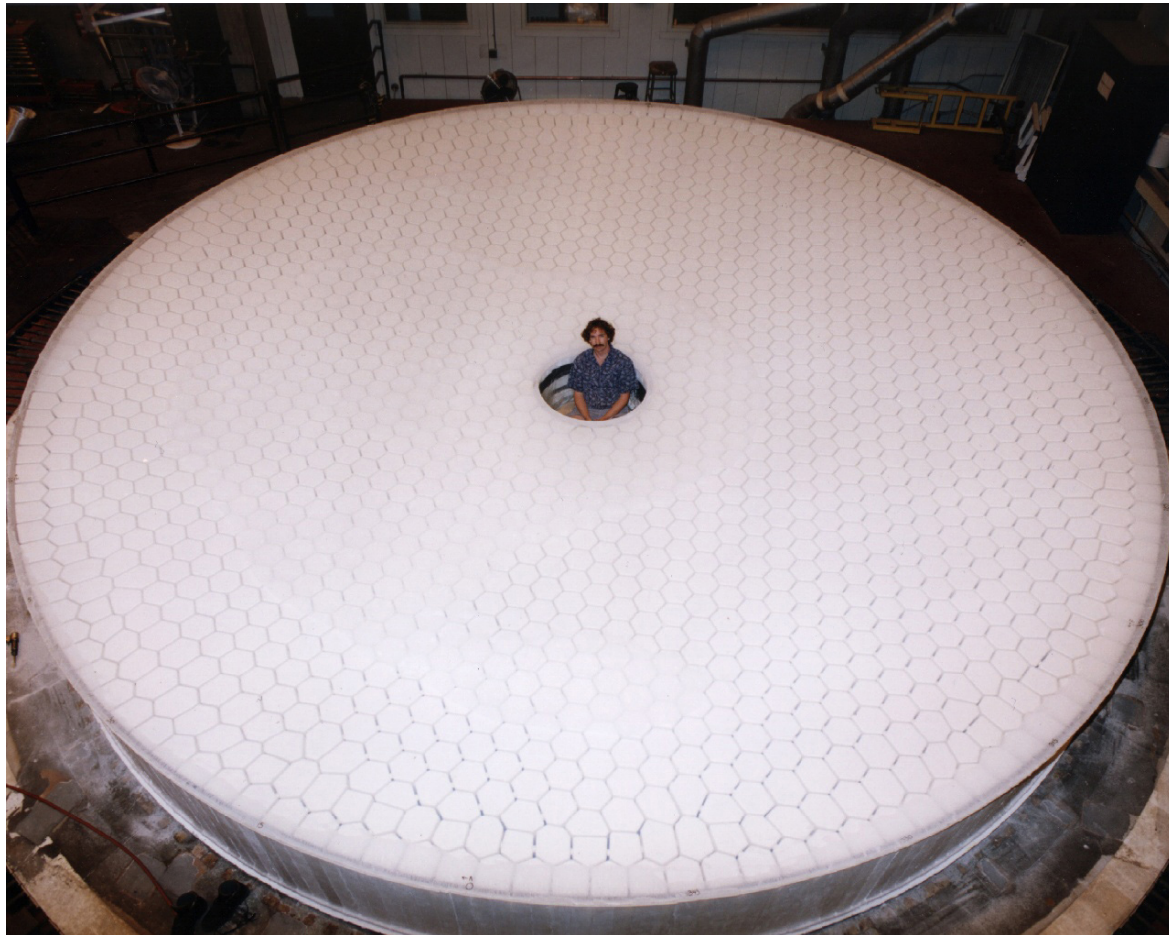


内边缘437mm厚；

外边缘894mm

7.2 三种主镜的设计

➤ LBT的一面主镜



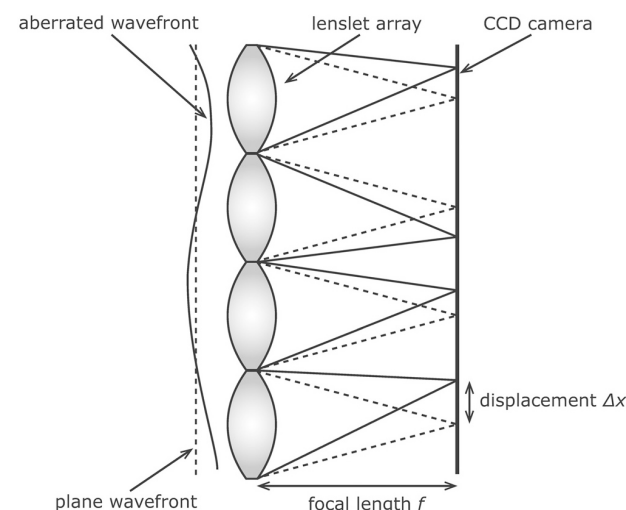
7.3 波前探测: Shack-Hartmann传感器

➤ 修正镜子条纹与热膨胀造成的波前变化:

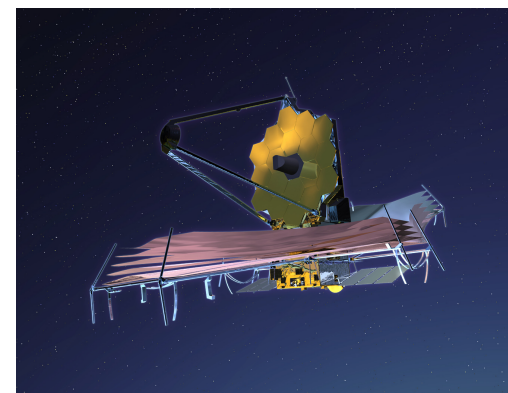
利用微透镜阵列对入射波前采样从而重构出整个波前。

每个微透镜对其波前的成像通过后端的CCD可以精确测量。

平行光的成像是等距的条纹。



7.4 未来大型望远镜



➤ 空间望远镜:

JWST用片式主镜:

重量轻

发射时可以收起来

发射之后不间断的波前探测来最优化主镜镜面

➤ 地面30米量级:

增强图像锐化度，因为同样锐化度下，探测弱天体的能力只正比于主镜直径的一次方。

用多共轭自适应光学(multi-conjugate adaptive optics)