

7 自适应光学和高对比度成像

Jason Chu
Photography

章 节

- 1. 简介
- 2. 散斑成像
- 3. 大气行为
- 4. 自然导星AO系统
- 5. 对自然导星系统的优化[激光导星]
- 6. 解释AO观测的注意事项
- 7. 高对比度成像

1. 简介

➤ 大气中的湍流元因温度与密度的差异具有不同的折射率。该折射率的变化改变光波的波前。

$$n_{air}(p[\text{mbar}], T[\text{K}], \lambda[\mu\text{m}]) = 1 + 7.76 \times 10^{-5} \left(1 + 7.52 \times 10^{-3} \frac{1}{\lambda^2} \right) \frac{P}{T}$$

 改变光的方向(tip-tilt误差，即倾斜误差)。

 改变波前的相位(piston误差)。

1. 简介

➤ 湍流元的物理性质：



直径约为5-15 cm (波长= $0.5 \mu\text{m}$):

即相位变化到达1弧度的空间尺度。



温度起伏约为 $0.01-1^\circ\text{C}$ 。



速度为10-50 m/s。



时标约为10毫秒 (=直径/速度)。

1. 简介

➤ 如果观测满足如下两条件，那么空间分辨率由seeing决定：

❖ 当望远镜的直径远大于湍流元的直径。

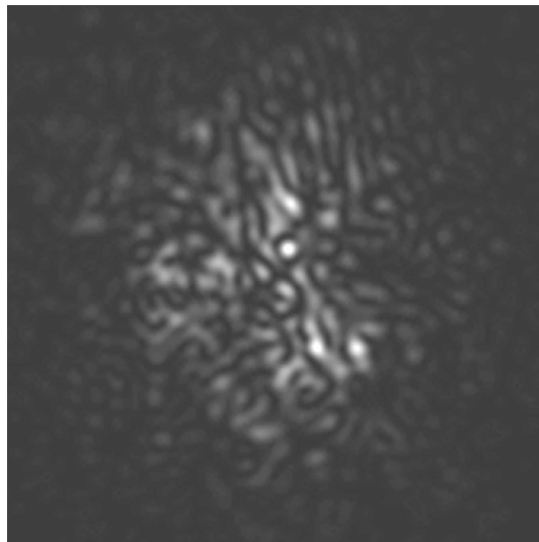
❖ 单次曝光时间远长于10ms。

1. 简介

- 如果望远镜直径小于湍流元的直径，分辨率由衍射决定 ($1.22 \lambda / D$), 但湍流仍旧会造成衍射斑在焦平面上快速移动。

2. 散斑成像 (Speckle Imaging)

- 光波的相位在湍流元的尺度上快速变化，短曝光 (10ms) 可以将瞬间受湍动影响的光波成像。
- 所成的像是总体符合seeing分布的散斑像。



2. 散斑成像 (Speckle Imaging)

- 散斑成像技术是一种突破seeing限制的方法。
- 它通过对一大批短曝光时间成像的分析来重构望远镜衍射极限下的分辨率（具体的技术涉及到傅里叶变换）。

可以用于研究亮源，如双星(Meyer+2006)。

2. 散斑成像 (Speckle Imaging)

- 另一种类似的技术为好运图像 (lucky image): 进行一大批的短曝光, 某一个或几个图像刚好受湍动影响最小, 该好运图像的分辩率可以接近衍射极限。

2. 散斑成像 (Speckle Imaging)

➤ 散斑成像或好运成像技术的缺点：

 短曝光要求非常低的探测器噪声，或只能观测非常亮的天体。

 该技术只能用于成像，不可能用于光谱（很难把狭缝对准快速移动的散斑像）。

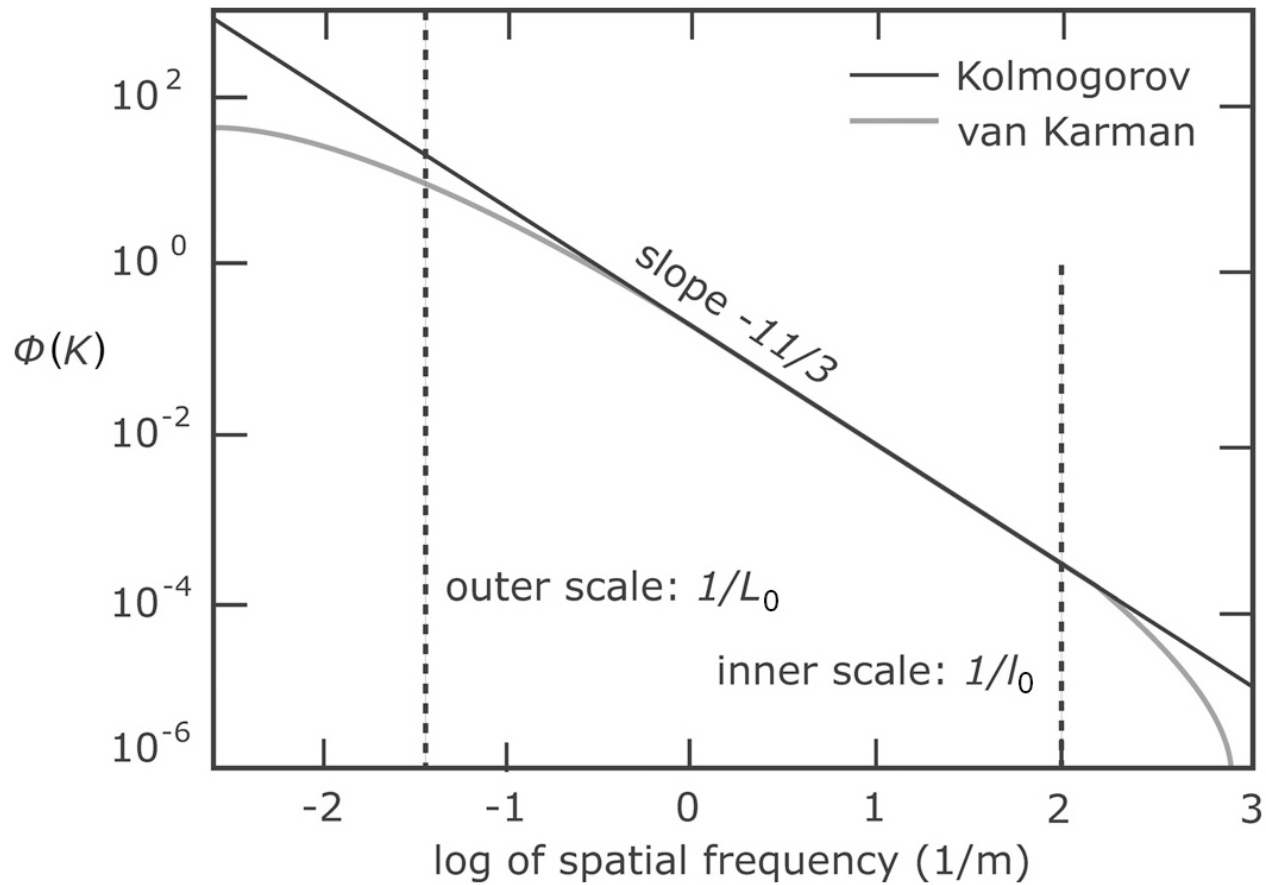
3. 大气行为

- 自适应光学 (adaptive optics, AO): 预先补偿大气湍动造成的波前变化来获得衍射极限下的成像, 该技术称之为自适应光学。
- 大气湍动: 不同空间尺度上的大气湍动能是尺度的幂函数。

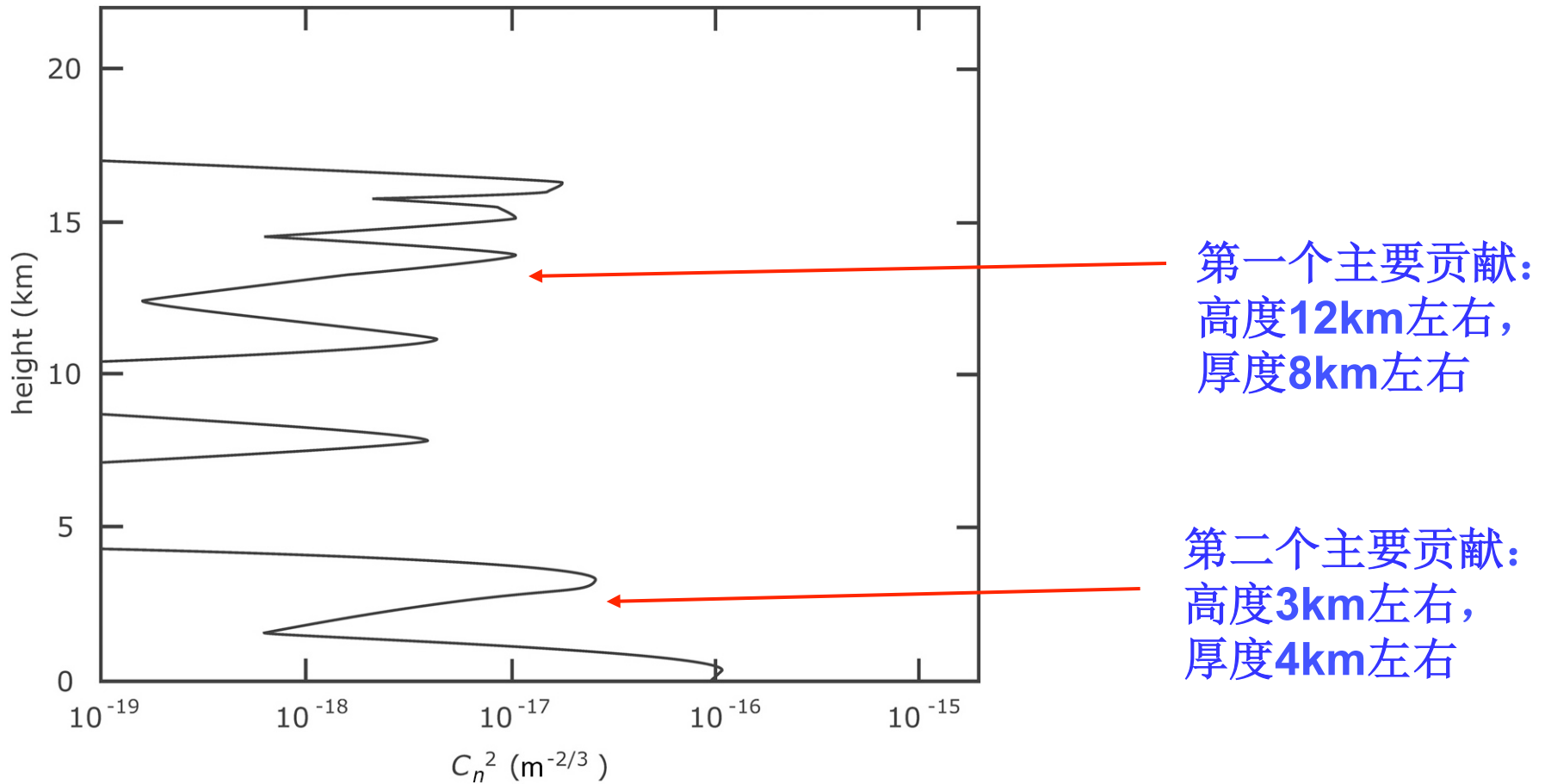
$$\Phi(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3}$$

其中 K 是空间频率, C_n^2 是结构系数。

3. 大气行为



3. 大气行为



早期的望远镜，圆包里的空气湍动有时是最主要的贡献。

3. 大气行为

➤ Fried长度：在该长度上，波前变化达到1个radian。
[Fried长度越长表明seeing越好]

$$r_0 = [0.423k^2 \sec \beta \int C_n^2(z) dz]^{-3/5}$$

其中 $k = 2\pi / \lambda$, β 是天顶角。

从上述公式可以看出：

$$r_0 \propto \lambda^{6/5}$$



近红外的seeing要比光学波段的好。

3. 大气行为

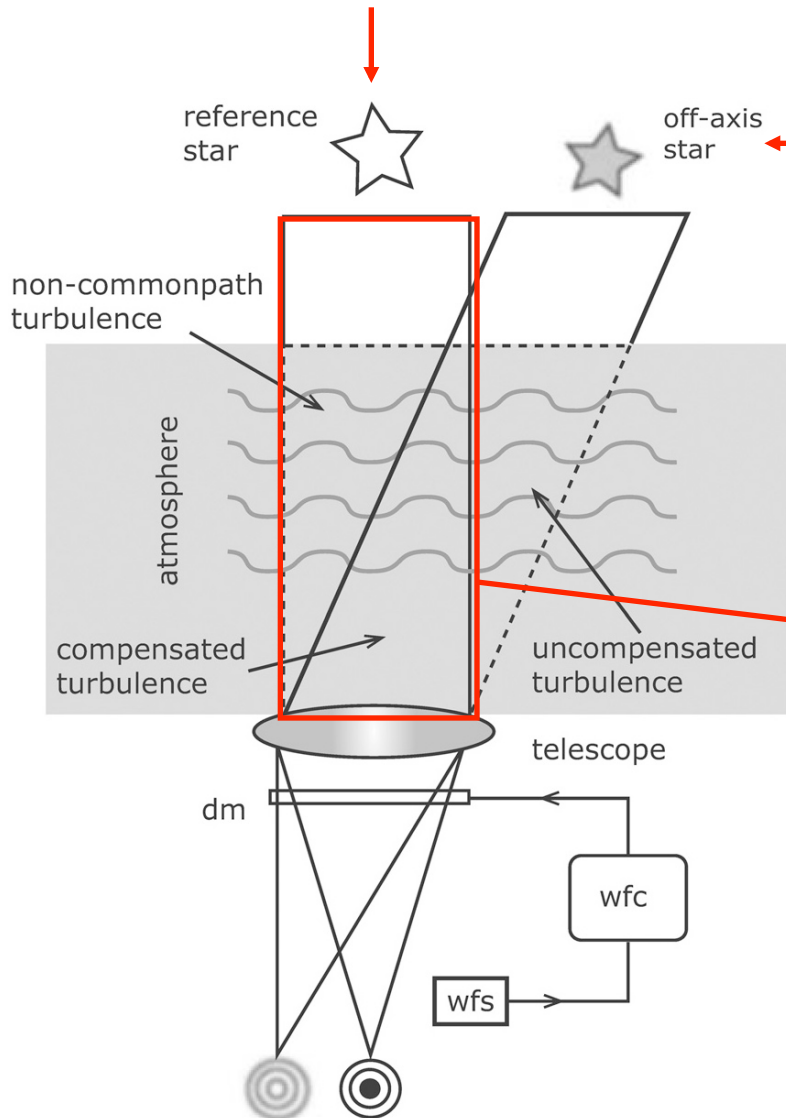
 口径为D的望远镜上波前变化为：

$$\sigma_{\text{wf}}^2 \propto 1.03 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}$$

口径越大，seeing影响越大。

参考源用来修正大气湍动

3. 大气行为



off-axis star

需要观测的目标源

Fried长度决定了能被修正的视场大小。

能被修正的光路，物理尺度是Fried长度。

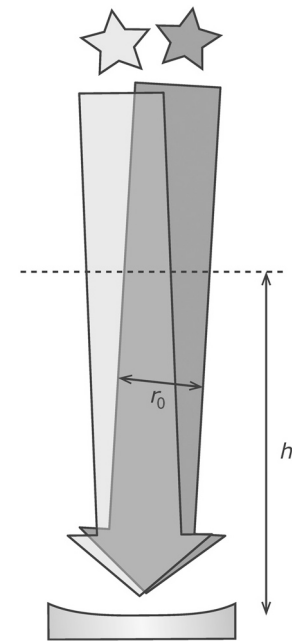
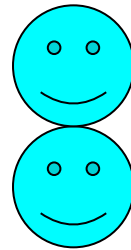
3. 大气行为

➤ 能被修正的视场大小，即
等晕面元大小：

$$\Theta_0 \approx 0.3 r_0/h$$

典型 $h=15$ km,

$$\begin{aligned}\Theta_0 &= 1.3 \text{ arcsec (0.5 } \mu\text{m)} \\ &= 7 \text{ arcsec (2.2 } \mu\text{m)}\end{aligned}$$



3. 大气行为

➤ Fried长度决定了修正的时效性（即波前变化1 radian的时间）：

$$t_c \approx 0.3 r_0 / V$$



其中， V 是风速。

在2.2 μm 上， $V=40\text{m/s}$, $r_0=100\text{ cm}$ ：

$$t_c = 7.5\text{ ms}$$

4. 自然导星AO系统

➤ Fried长度 (r_0)

➤ 等晕面元大小(Θ_0)

➤ 波前变化时标(t_c)

决定了自然导星AO系统的设计和操作。

需要修正主镜上每个长度为 r_0 的子单元。

导星位于目标源 Θ_0 内。

修正的速度需10倍于 $1/t_c$ 。

4.1 基本思路：部分修正

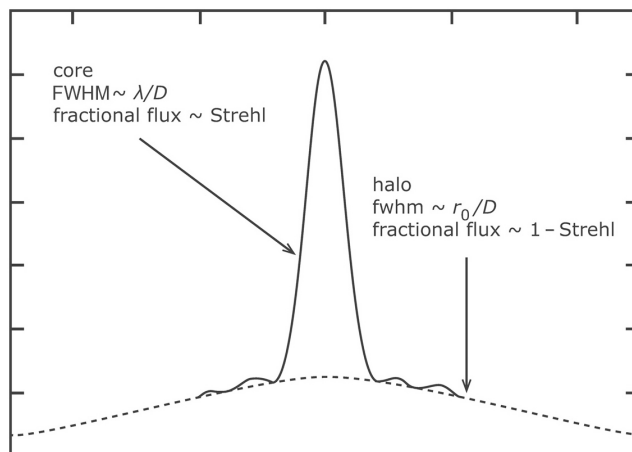
➤ 完全修正波前变化在技术上有很大挑战。以光学波段为例， $r_0=10\text{cm}$ ，口径8m的主镜：

需要~5000个修正器，技术上很难。

导星的辐射分散到每个修正器上的能量随修正器个数的增加而减少，这结合非常短时标的曝光（完成高速的修正），使得探测器系统很难获得高信噪比的导星信号。

4.1 基本思路：部分修正

- **部分修正**：使用相对少量的修正器来完成**部分修正**。通过部分修正，**点扩散函数=核心（接近衍射极限）+低亮度的晕（seeing大小）**。



- 部分修正能极大提高等效的空间分辨率。

4.1 基本思路：部分修正

- ▶ 光学相比较于红外需要更多的子单元，离目标源更近的参考星，更快的修正速度。因为这个原因，目前自适应光学主要应用在红外波段。

4.2 基本结构

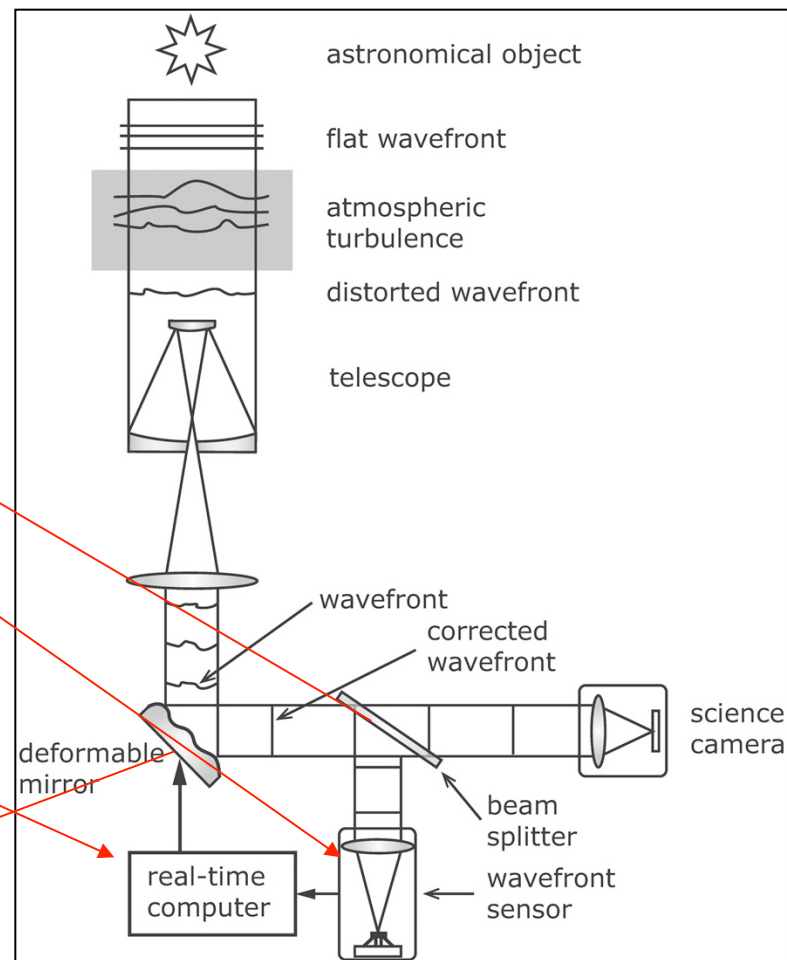
➤ 自然导星AO系统结构：

分光镜：红外辐射透过分光镜到达科学相机，光学波段的辐射被反射进AO系统用于修正大气湍动。[注：因光学和红外辐射通过完全相同的大气，受到的扰动是一样地]。

波前探测器：探测波前相位的变化。

计算机系统：计算波前的变化。

变形反射镜：通过调整该镜子的形状来互补波前变化。



4.3 波前探测器，变形反射镜和计算机系统

► 波前探测器：

- a. 四象限波前传感器
- b. Shack-Hartmann 传感器
- c. 波前曲率探测。
- d. 锥形波前传感器

4.3 波前探测器，变形反射镜和计算机系统

➤ 波前探测器修正两种波前变化：

Tip-tilt误差（倾斜误差）：波前斜率的变化，改变光的传播方向。

Piston误差：波前相位的变化，改变光的焦点。

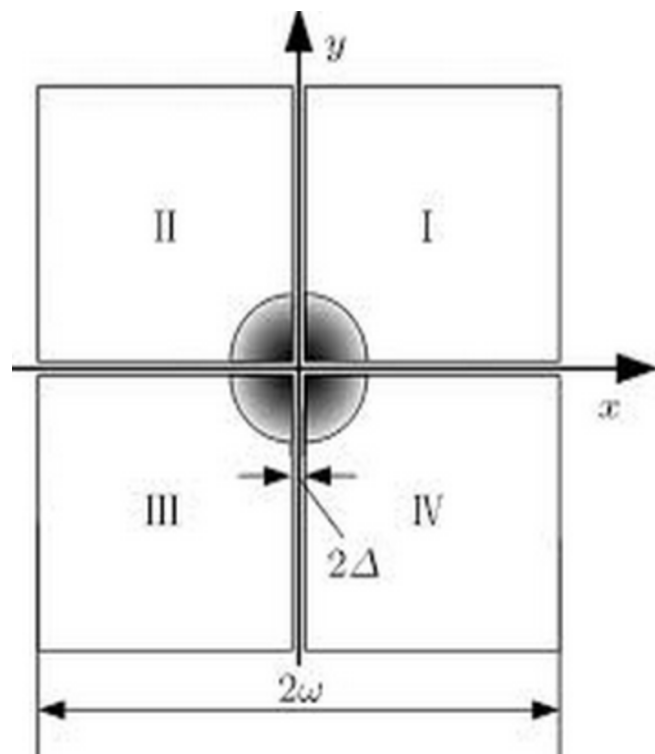
4.3 波前探测器

➤ a. 四象限波前传感器:

传感器由四个放在一起的探测器组成。

没有大气扰动的情况下，恒星的像位于该传感器的中心，四个探测器上的辐射流量相等。

大气扰动造成像的移动使得不同探测器上的辐射流量不相等。通过比较四探测器上的流量来探测波前的变化。



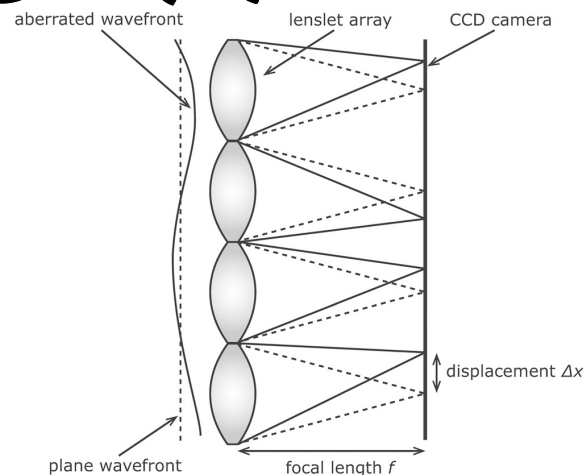
4.3 波前探测

b. Shack-Hartmann 传感器

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。



4.3 波前探测

► 波前曲率探测：

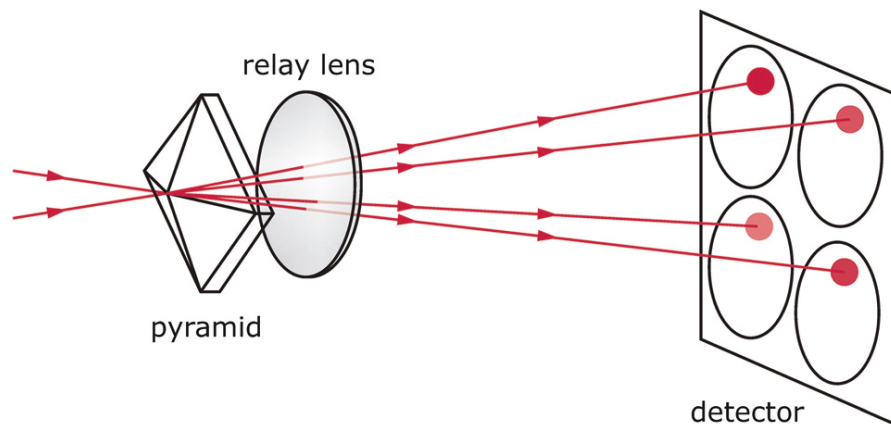
 原理：如果波前是凸出的，那么恒星像会成在真实焦点的前面；相反地，如果波前是往里凹，恒星像会在真实焦点的后面。

 在真实焦点前与后成像，比较两者之间的像来修正波前。波前修正后，焦点前与焦点后的像是对称的。

4.3 波前探测

➤ d. 锥形波前传感器（类似于四象限波前传感器）：

 导星的像成在四面锥的顶点。随后在一个探测器分成四个单独的像，通过四个像的相对流量来探测波前的变化。



4.3 变形反射镜

► 变形反射镜。技术要求：

- 在形状上有足够的自由度来提供必要的波前修正。
- 表面足够光滑而不引入额外的波前变化。
- 足够的控制性：较容易调整到需要的形状，而不受之前形状的影响。
- 足够的动态范围：对于10m的镜子，能达到5微米的形状变化；30m的镜子，能到达15微米的形状变化。
- 整个镜子需足够大来满足光路上的设计。
- 耗能小：其本身的热量不引起额外的大气湍动。

4.3 变形反射镜

► 变形反射镜的几种设计：

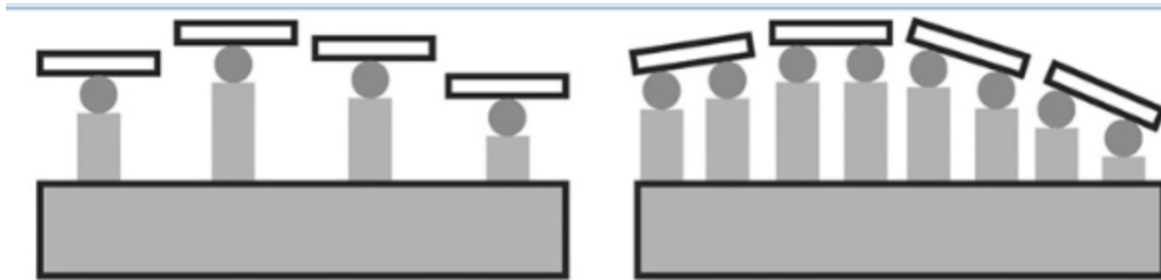
 拼接镜

 单面薄镜

 双压电变形反射镜

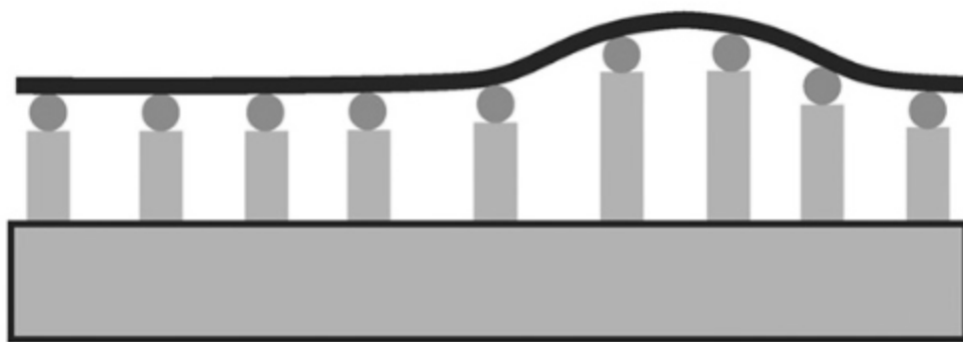
4.3 变形反射镜

- **拼接镜：**每个单元之间相互独立。每个单元连接一校准器（左图）或2-3个校准器（右图）。后者可以修正tip-tilt误差（波前倾斜）和piston误差（波前前后位移）。



4.3 变形反射镜

- 单面薄镜：在其后端连接一系列的校准器。



4.3 变形反射镜

- 双压电变形反射镜:

■ 有两块压电材料组成的反射镜，通过施加不同的电压来物理上变化其形状。

■ 相对于前面两种，这种反射镜通过密集型布置的电极来修正小尺度上的波前变化。



4.3 变形反射镜

➤除了单独的变形反射镜，副镜也可改造成变形反射镜。

把副镜设计成变形反射镜，其好处(a)没有额外的反射，减少光的损失；(b)没有额外的红外发射。对于红外观测这将极大降低噪声。其难点在于制造困难，视场小。

4.3 计算机系统

► 计算机系统:

 接受波前探测器的输出，计算相位上的移动，据此来计算必要的施加到变形反射镜上的电压或电流。

 整个过程需几毫秒内完成。

 波前探测器的测量一般要多于变形反射镜的个数，这样计算结果才会收敛。

5. 对自然导星系统的优化

➤ **Strehl比值**：是表征AO系统性能的参数。点扩散函数中心强度相对于理想情况（即衍射极限）下中心强度的比值。

$$S = e^{-(2\pi\sigma/\lambda)^2}$$

其中， σ 是波前误差。

$$\sigma^2 = \sigma_{fit}^2 + \sigma_{photon}^2 + \sigma_{delay}^2 + \sigma_{iso}^2$$

σ_{fit} ：因子单元的个数是有限的而造成的误差。 $\sigma^2 \propto C(d/r_0)^{5/3}$ ，其中 d 是子单元的直径， r_0 是Fried长度。常数 C 依赖于变形镜的结构，但一般 $C = 0.2$ 。

σ_{photon} ：导星系统接受的光子数起伏造成的误差。 $\sigma^2 = C/N$ ，其中 N 是光子数， C 依赖于光学系统和探测器的性能。

5. 对自然导星系统的优化

σ_{delay} : 整个系统响应的延迟性造成的误差。 $\sigma^2 = 28.4(t/t_G)^2$, t 是响应时间, t_G 是特征时间, 相关于波前的变化时标。

σ_{iso} : 由目标源和导星空间上不重叠造成的修正误差。
 $\sigma^2 = (\theta/\theta_0)^{5/3}$, θ 是目标源离导星的角距离。

5.1 激光导星

- 自然导星系统所要求的响应时间以及子单元的个数对导星的亮度要求非常高。尽管具体星等依赖于很多细节，一般要亮于12星等。这加上目标源离导星的距离不超过20角秒（2微米波段），这使得总共只有1%的天区可以通过自然导星来观测。
- 利用强激光，激光导星系统可以有效地降低上述对自然导星亮度的要求。

5.1 激光导星

➤ 两种激光导星：

1. 雷诺散射激光导星：

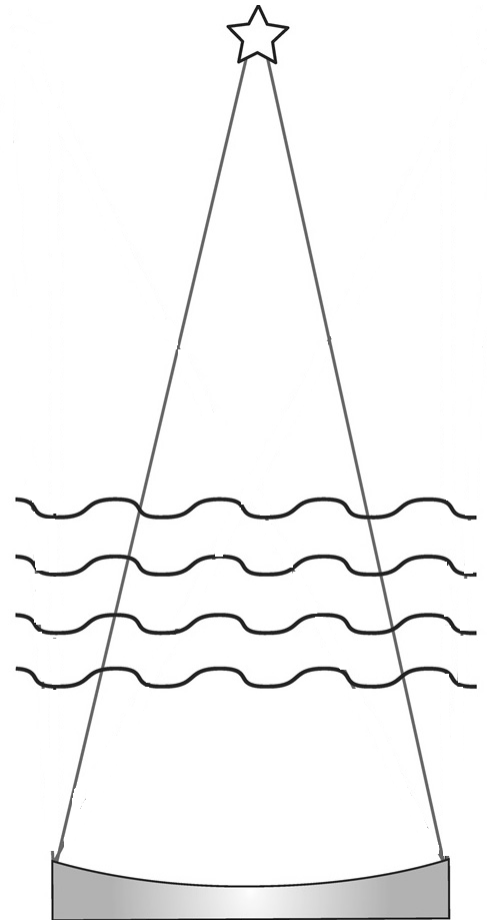
 用脉冲激光沿着望远镜的指向照射天空；大气中的原子和分子散射非常小的一部分能量返回望远镜用于波前测量和修正。一般使用蓝端（散射越强）的强激光。

 因为由不同大气层散射回的**激光到达时间不同**（越高层需要更长时间），通过设定系统响应上的延迟，可以修正不同大气层的湍动。

5.1 激光导星

返回的激光强度随着反射层的高度而降低，这使得该类型的激光导星只能探测**低层大气**，不超过10km。

因为大气的高度是有限的，这会导致所谓的“**锥误差**”（如右图所示），即以激光反射点为顶点、以主镜为底边的立体锥里的大气湍动得到修正。



5.1 激光导星

➤ 两种激光导星：

2. 钠激光导星：

 90km的大气层中包含有由流星所带来的钠以及其他金属。

 把激光频率调到D2的跃迁频率(589nm)，被激发的电子跃迁回基层所激发光子通过大气层到达望远镜。

5.1 激光导星

 钠金属的数密度是有限的(10^3 - 10^4 atoms/ cm^3), 因此终极强大的激光 (假定有足够的 \$), 该类系统的导星亮度都是有限的。

5.1 激光导星

➤ 激光导星系统中的自然导星：

-  两种系统都无法修正波前的**倾斜误差**，因光路来回两次造成的倾斜相互抵消。
-  **自然导星**用来修正波前的倾斜误差。相比于自然导星系统，激光导星里的自然导星亮度可以暗很多，同时倾斜修正的有效视场可以大很多（2微米上有好几个角分）。

5.1 激光导星

► 激光导星的缺点：

 激光在沿着大气向上传播的过程也受大气的影响，因此激光导星**不是点源**，典型大小是seeing的大小（0.5到2角秒）。

 激光导星因离望远镜的距离不是很远，所以波前不是严格意义上的**平面**，其焦平面跟天体的焦平面有一定的位移。

5.2 多导星系统

➤ 利用多个导星来修正大气的三维湍动。

 修正不同方向的大气湍动

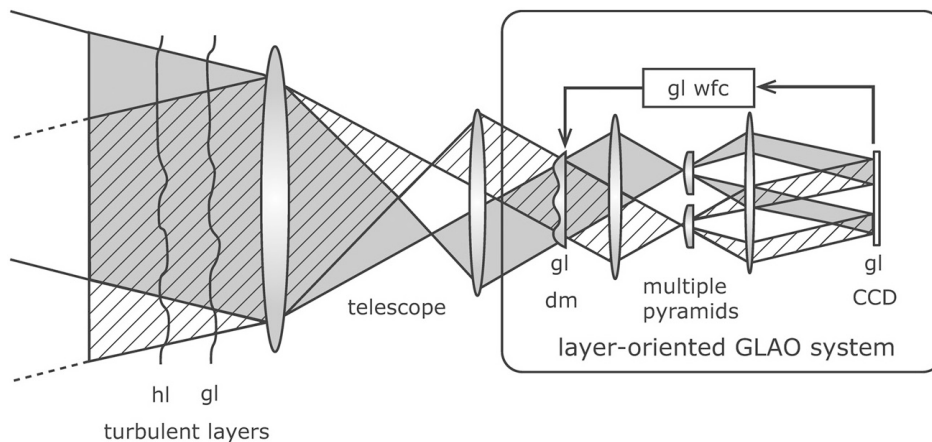
 修正不同高度的大气层的湍动

5.2 多导星系统

► 修正不同方向的大气湍动:

下图是修正低层大气湍动的示意图。

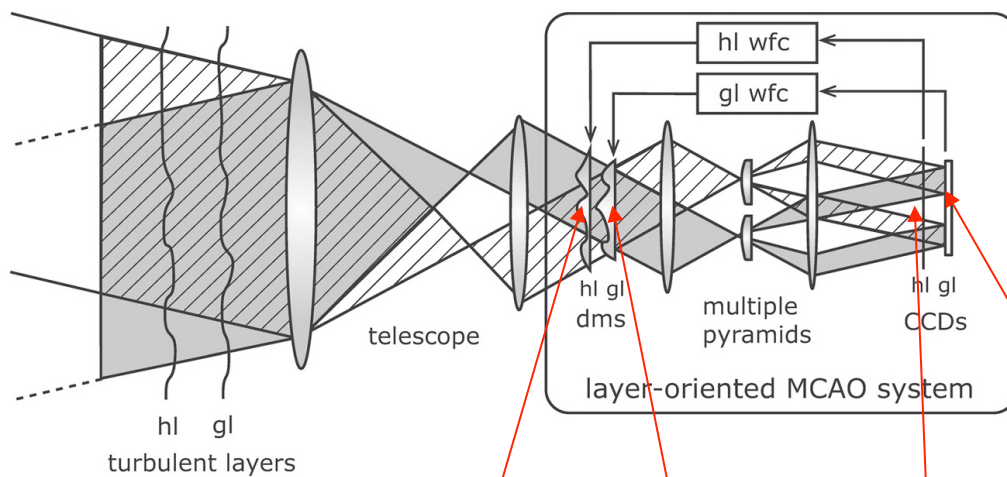
- 每个导星都使用一个锥形波前传感器。
- 每个导星通过同一锥面的像在同一CCD上重叠在一起。
- 因不同导星在低层大气通过相同的气体，该系统能非常有效地修正低层大气不同方向的湍动（到达几个角分），极大提高可用的视场。所测量到的波前变化通过单一变形镜来修正。
- 然而因高层大气没被修正，Strel比值仍旧不大。



5.2 多导星系统

► 修正不同方向的大气湍动:

■ 上述系统可以通过使用多个CCD和变形镜来同时修正高层和低层大气的湍动,称之为**层主导的MCAO(multiple conjugate adaptive optics)**.



高层大气
变形镜

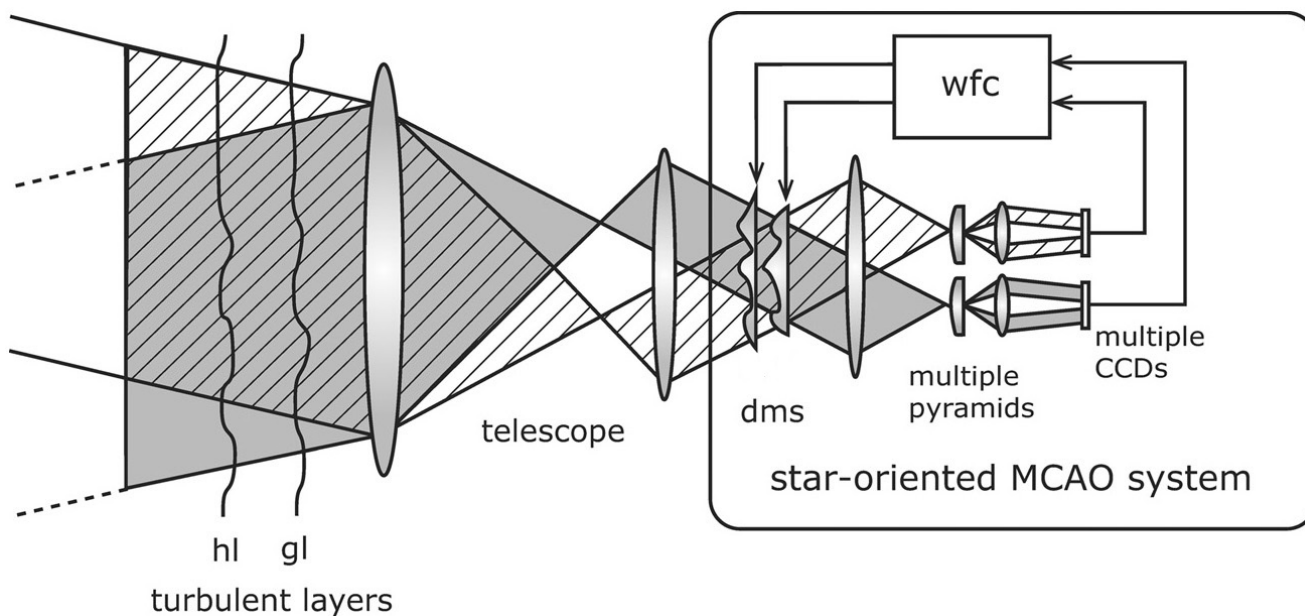
低层大气
变形镜

高层大
气CCD

低层大
气CCD

5.2 多导星系统

不同于层主导的MCAO系统，星主导的MCAO系统对每个导星的波前做单独修正。



5.2 多导星系统

 **MOAO (multi-object adaptive optics) 系统:**
MCAO 系统对整个视场做修正，而MOAO
只对视场里的一些有用的子视场做修正。
MOAO价格便宜技术上也相对简单。

6 解释AO观测的注意事项

- 当Strel比值不是很高时（如 $<10\%$ ），点扩散函数有相对比较大的变化，这将导致比较大的测光误差。
- 当导星不是点源时，如双星、延展源、在延展发射中的点源。源的结构会影响波前修正，在科学图像上造成一定的假结构。
- 对于部分修正的AO图像，在解释源结构时应注意点扩散函数中seeing限制的晕。

7 高对比度成像

➤ 高对比度成像技术用来测量非常亮天体周围的弱天体，如测量恒星系统中的行星，活动星系核中的吸积盘。

 **边瓣缩减；调整相位：**消除或减弱衍射斑的亮环。

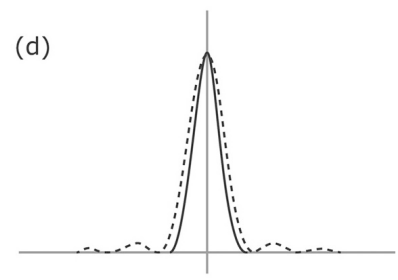
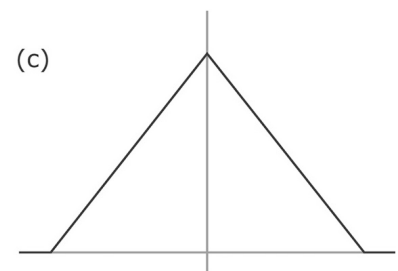
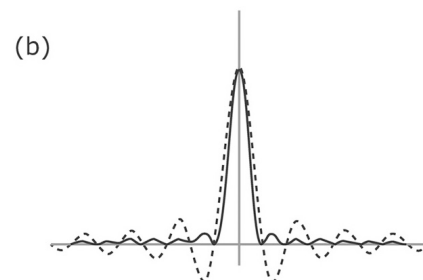
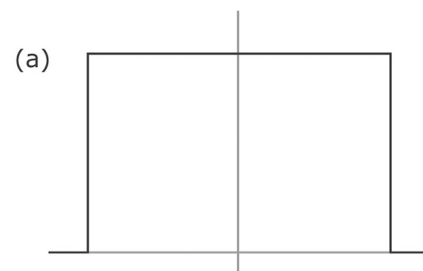
 **日冕仪技术：**人为地放置一挡板来遮挡中心亮源。

7.1 边瓣缩减

衍射斑的亮环是由于空间频率在主镜直径尺度上的突然截止造成的。

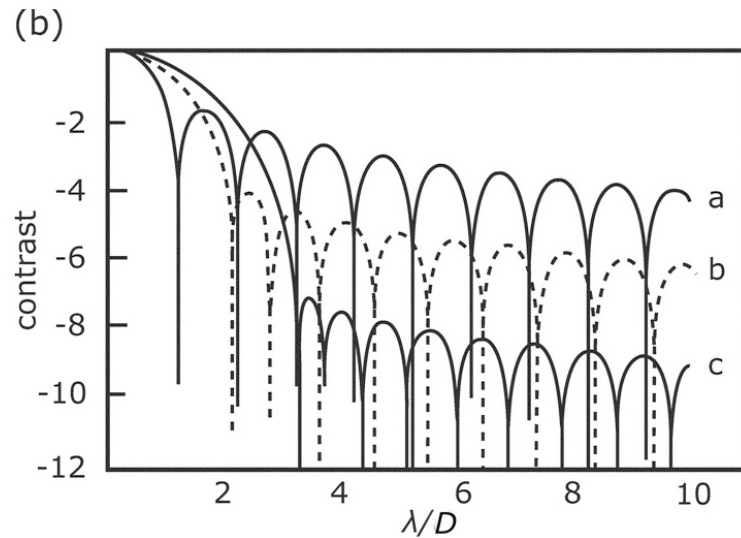
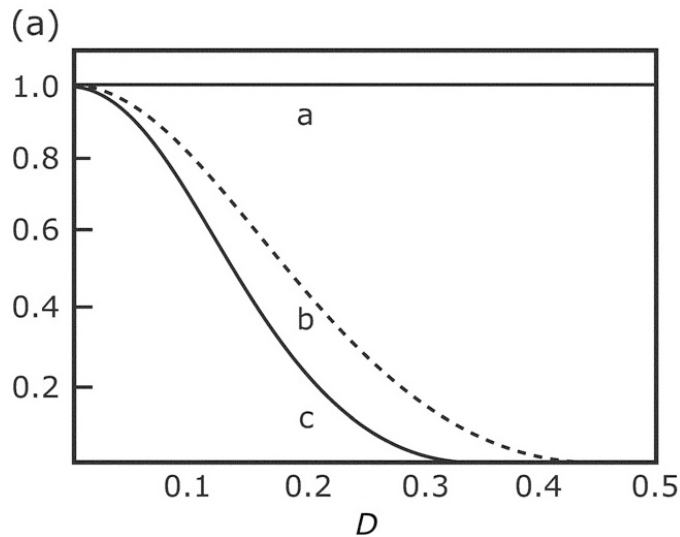
通过逐渐减少主镜外围的光透过率可以减弱亮环的强度。如图所示。

当然，中心部分的半高全宽会变大。



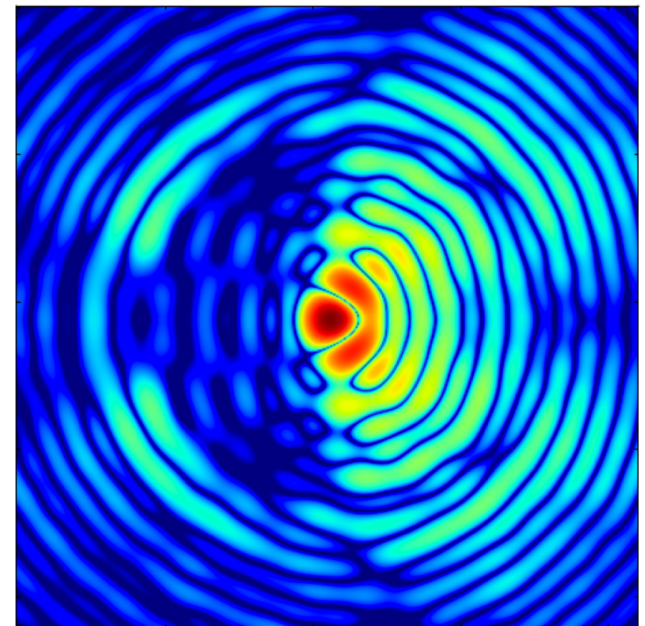
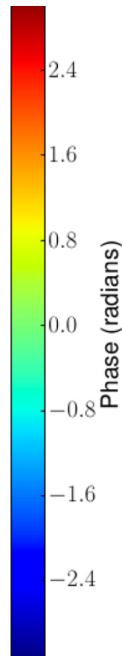
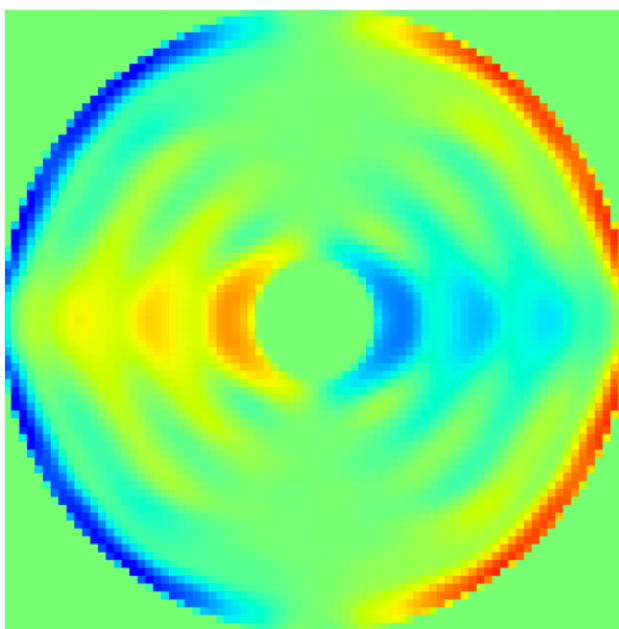
7.1 边瓣缩减

► 扁长球体函数形式的透过率可以最大化减少衍射环的亮度。如下图所示。



7.1 调整相位

- 边瓣缩减是调整光的强度，另一种方法是调整相位，常用的是边瓣相位平板。该平板可以调整相位使得在一边光相互抵消，而根据反对称，另一边的相互增强。



7.2 日冕仪技术

遮挡板：放置在望远镜前来遮挡亮源。

 板的大小要大于望远镜的主镜，以防止光在板上的散射进入望远镜。

 板在望远镜焦点上的成像需是点源。

--> 50m的板放置在50000 km的地方，只能在空间来实现。但是技术还是很难。

7.2 日冕仪技术

- Lyot 日冕仪：为避免上述的技术挑战，可以在望远镜的光路上放置一日冕仪。

