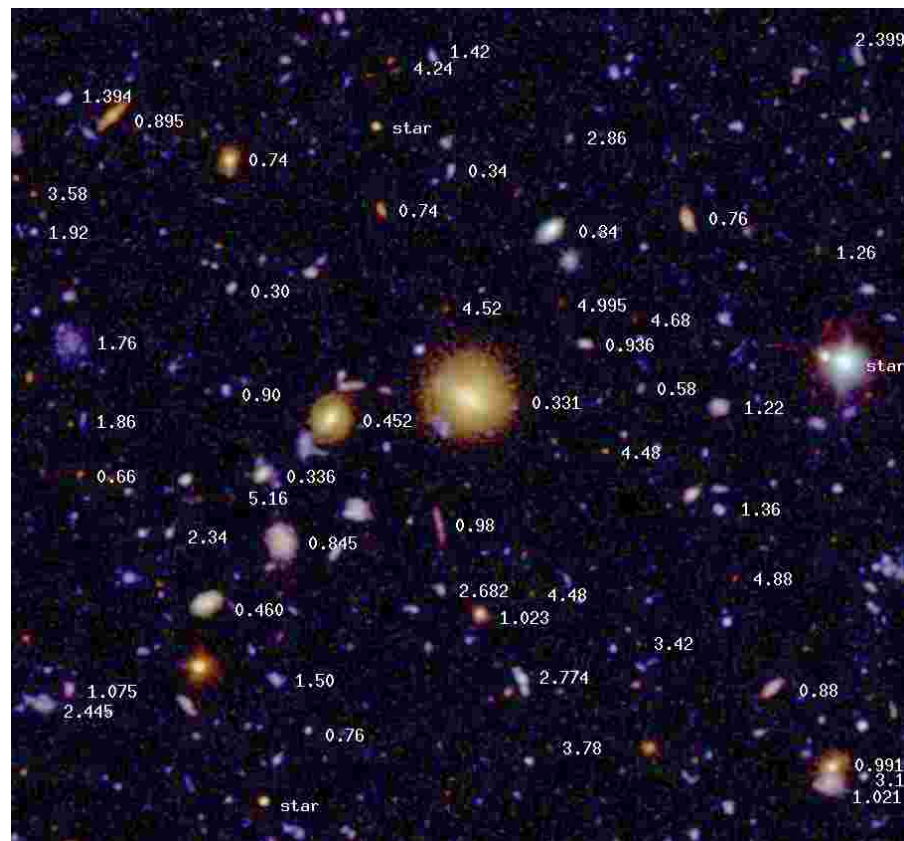


5. 测光与偏振

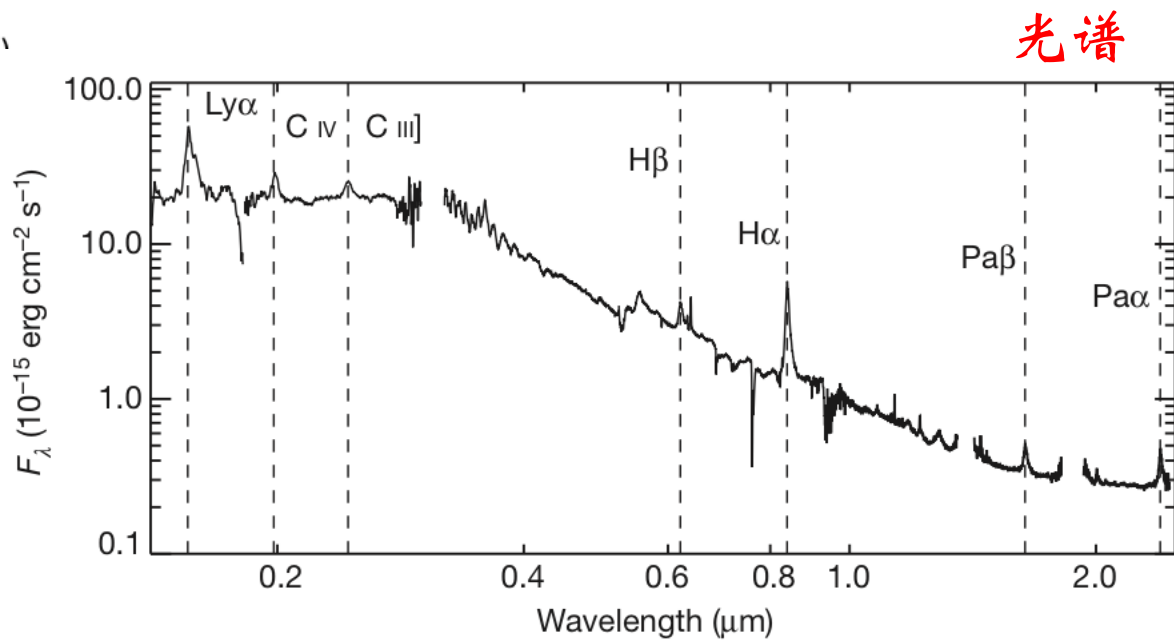
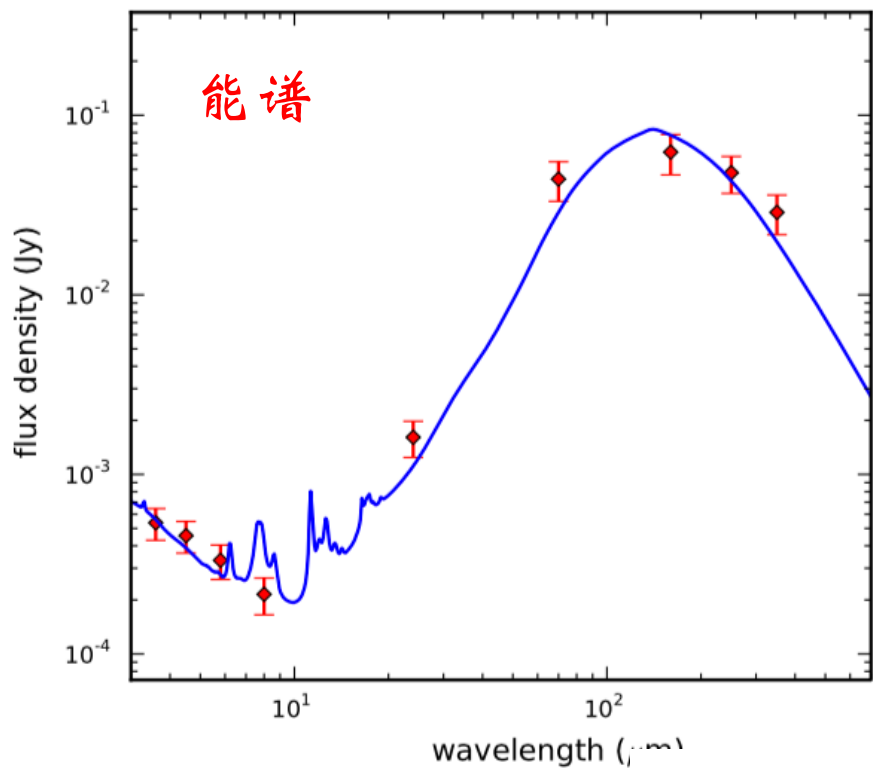


章节

- 1. 测光与偏振：简介
- 2. 恒星测光
- 3. 提高测光精度
- 4. 物理测光
- 5. 其他类型的测光
- 6. 偏振测量

1 测光与偏振： 简介

- 天体电磁辐射的信息可以通过测量和分析它们的能谱(spectral energy distribution, SED)或光谱(spectrum)来获得.
- 能谱和光谱可以简单的通过物理量 $R = \lambda / \Delta \lambda$ 的大小来区分, 其中 λ 是观测的波长, $\Delta \lambda$ 是在 λ 上单一流量的测量的波长范围。 $R \approx 2-10$ 称之为能谱, 更高 R 的称之为光谱。
- 测光是指测量能谱的过程。



2 恒星测光

2.1 源抽取和测量

➤ 按照原理来说，恒星测光主要分为两类：

 孔径测光 (aperture photometry):

恒星图像上套上一个孔径，测量孔径里的总光子数。

 点扩散函数拟合 (PSF fitting):

用点扩散函数拟合恒星的图像，依据卡方最小化来得到恒星的光度。

2.1 源抽取和测量：孔径测光

➤ 1. 确立孔径的中心，即恒星的中心位置：

假定 x_i 上的强度为 I_i ， x -轴方向上的中心为

$$x_c = \frac{\sum x_i I_i}{\sum I_i}$$

一般 I_i 需要减去背景的贡献。

2.1 源抽取和测量：孔径测光

➤ 2. 确立孔径的大小：

-  孔径大小并不是越大越好，尽管大孔径包含的信号越多。
-  在一个密集星场里，小孔径明显具有优势。
-  对于比较暗弱的天体，小孔径能够提供较高的信噪比。
-  实际应用时，需要尝试不同的孔径大小来确立最好的大小。

2.1 源抽取和测量：孔径测光

➤ 3. 确立背景：

 **天空孔径**：放置在源附近没有天体的区域，或者跟源口径同心的圆环。

 在天空孔径里可以测量**平均值(mean)**，**中值(median)**或**众数(mode)**。因为天空区域的值一般会有正偏差，所以一般众数是最适合的。

2.1 源抽取和测量：孔径测光

4.孔径修正：

 点扩散函数的强度分布是一直延伸到无限远的空间，有限的孔径测量需要修正丢失的能量。这个过程称之为**孔径修正**（aperture correction）。

 明亮的相对孤立的恒星可以用来计算孔径修正因子：用跟目标源一致的孔径（源和天空孔径）对该恒星进行测量，然后用非常大的孔径再对恒星做测量，两者的比值就是孔径修正因子。

2.1 源抽取和测量：点扩散函数拟合

- 点扩散函数拟合受一些反常因素的影响较小。
如孔径测光时，没有去除干净的宇宙射线可能会被当成信号，但这对点扩散函数拟合影响较小。
- 点扩散函数拟合的流量校正：可以依据标准星的点扩散函数拟合结果，也可以通过对比（明亮孤立恒星的）孔径测光的结果。

2.1 源抽取和测量：点扩散函数拟合

- 在实际应用时，一个星场里的所有恒星可以同时
进行点扩散函数拟合。一些软件如
DAOPHOT (Stetson 1987) or DOPHOT (Mateo
and Schechter 1980)。

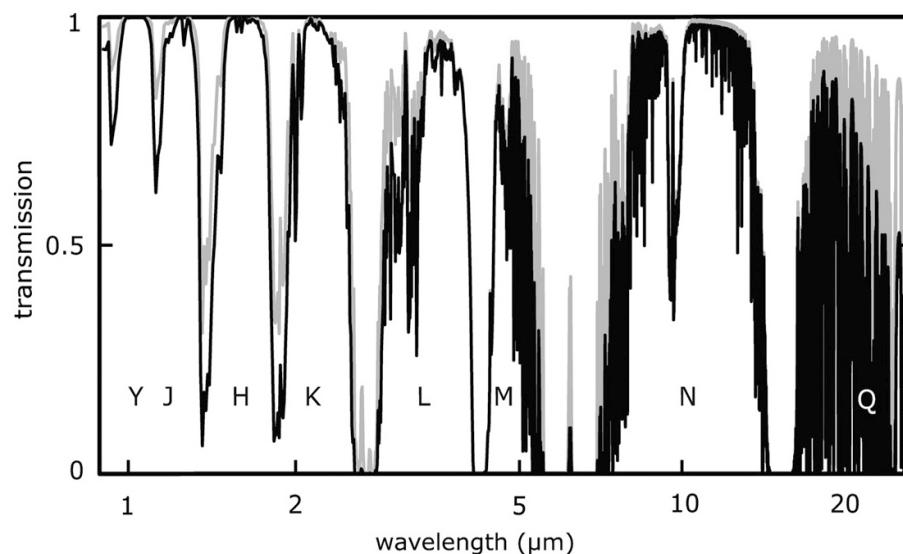
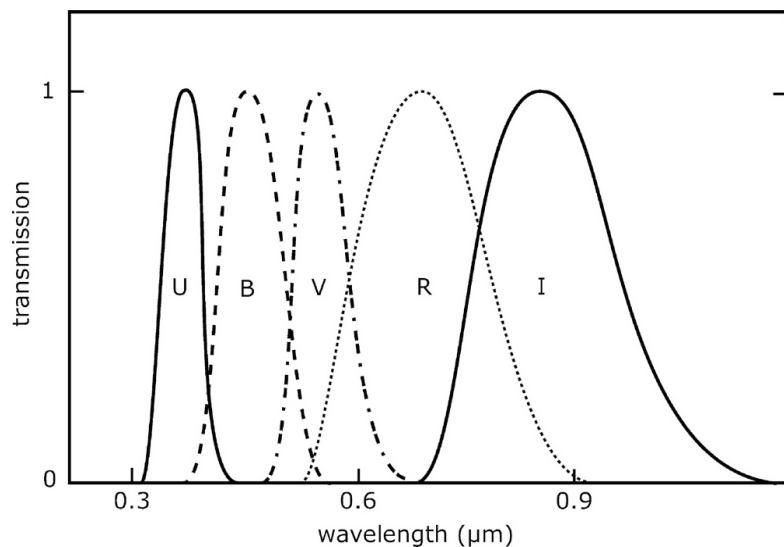
注：点扩散函数拟合对延展天体显然不适用，这些天体一般用孔径测光，或其他专门用于延展天体的拟合方法，如GALFIT (Peng et al. 2002)。

2.1 源抽取和测量：点扩散函数拟合

- 类似于孔径测光，点扩散函数拟合也需要对点扩散函数的形状有非常好的理解，需要做孔径修正。

2.2 测光系统

➤ 测光系统是一组规定了响应曲线的滤光片。



上图：UBVRIJHKLMNQ系统各滤光片的响应曲线。

2.2 测光系统

- 测光系统的定义便于测光结果的稳定与比较。
- 在实际应用中，最终的响应还跟望远镜、仪器的光路以及探测器都相关。

2.2 测光系统

- 20世纪的传统，天体的亮度可以用星等来表示，假设天体1和天体2在一个波段的流量分别为 f_1 和 f_2 ，那么星等的差异为：

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log(f_1 / f_2)$$

- 在一个测光系统中，天体的视星等定义为

$$m = -2.5 \log(f_{\text{star}} / f_{\text{ZP}})$$

其中 f_{ZP} 是系统中星等定义为0的恒星的流量，即该测光系统的零点。

2.2 测光系统

- 考虑到星等定义为0的恒星不会每次观测时都可见，因此测光系统还需要选取一套具有精确星等测量的标准星：

$$m = -2.5 \log(f_{\text{star}} / f_{\text{standard}}) + m_{\text{standard}}$$

其中 m_{standard} 是相对于零点。

- 仪器星等：在数据处理过程中，星等的定义可能通过比较一组特定恒星的亮度，这样的星等称之为仪器星等。仪器星等最终需要转化到相对于零点。

2.2 测光系统

➤ 绝对星等：是把天体放到10pc距离上的视星等

$$m - M = 5 \log\left(\frac{d}{10\text{pc}}\right)$$

其中， d 是天体的距离。

上述的定义中假定没有任何消光。实际应用中，还需要修正消光。

2.2 测光系统

- 在一个测光系统中，如UBVRIJHKLMNQ系统中B波段上的星等写成 m_B 。
- 颜色指数(color index, CI)：两个波段星等的差异 $m_B - m_V$ ，写成 $CI = B - V$ 。
- 颜色超：测量到的颜色与真实颜色的差异，如B-V颜色超 $E_{BV} = CI_{\text{observed}} - CI_{\text{intrinsic}}$ 。

2.2 测光系统

- 热星等 (bolometric magnitude) M_{bol} : 总光度的绝对星等。一般定义 $M_{\text{bol}}=0$ 时的光度为 3.055×10^{28} W。

2.2 测光系统

- **UBVRIJHKLMNQ系统的零点**: 对于UBVRI部分, Johnson选了六个类型为A0的恒星, 取它们的平均颜色。定义Vega (织女星) 为零点。这种方法进一步延伸到该系统的红外波段。因此该系统下的星等, 称之为**Vega星等**。

2.3 测光系统的稳定性

- 测光系统依赖于滤光片的响应曲线，望远镜与仪器中的光路以及探测器等相关。因此不同天文台在同一系统上可能也会有很大的差别。
- 为了有可比性，实际操作中会同时观测一大批的恒星然后比较两者的结果来得到两者之间的转化函数。

CIT(California Insitute Of Technology)的JHK系统与2mass的JHK系统间的转化

$$(K_S)_{2mass} = K_{CIT} + (0.000 \pm 0.005)(J - K)_{CIT} + (-0.024 \pm 0.003)$$

$$(J - H)_{2mass} = (1.076 \pm 0.010)(J - H)_{CIT} + (-0.043 \pm 0.006)$$

$$(J - K_S)_{2mass} = (1.056 \pm 0.006)(J - K)_{CIT} + (-0.013 \pm 0.005)$$

$$(H - K_S)_{2mass} = (1.026 \pm 0.020)(H - K)_{CIT} + (0.028 \pm 0.005)$$

3 提高测光精度

- 根据自己的科学目标和需要，必要的细化处理可以提高测光的测量精度。

3.1 大气消光

- 地面的测光需要修正大气的消光。假定头顶时的大气质量为一个大气质量 (air mass)。平面平行近似的地球大气的大气质量正比于天顶角的正割函数：

$$\text{air mass} \propto \sec(z) = \{\cos \phi \cosh \cos \delta + \sin \phi \sin \delta\}^{-1}$$

其中 ϕ 是观测者所占的纬度， h 是赤经， δ 是赤纬。

- 上述的近似，对于 air mass 小于 4 的误差小于 10%，air mass 小于 2 的误差小于 2%。
- 更精确的计算可以用以下公式：

$$\begin{aligned} \text{air mass} = & \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 \\ & - 0.0008083(\sec z - 1)^3 \end{aligned}$$

3.1 大气消光

$$\frac{dI_{\lambda}}{ds} = -\kappa_{\lambda}$$

其中 I_{λ} 是强度， κ_{λ} 吸收系数， s 是路径长度。

给定air mass上的消光（用星等差表示）为：

$$m_{\lambda}(am) - m_{\lambda}(am = 1) = 2.5\kappa_{\lambda}(am - 1) / \ln(10)$$

3.2 PSF变化

➤ PSF拟合以及孔径修正都会受PSF变化的影响：

 地面上观测中seeing的变化会导致不同的PSF。

 即使在空间，宽带PSF因为源的不同光谱形状而发生变化；探测器不同区域也会有不同的PSF。

 一种方法是用滤光片来制造与点源一样的光谱形状。

4 物理测光

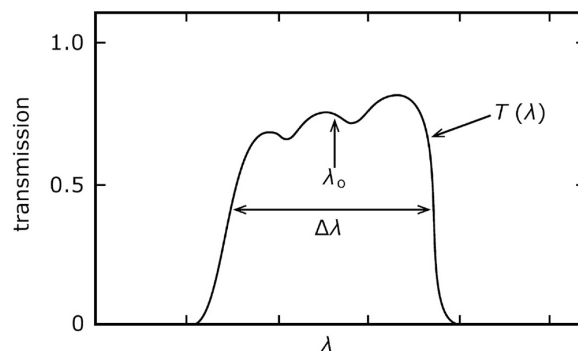
4.1 一般原则

- 传统的恒星测光不太适用于非恒星的研究工作，因为前者假定恒星的光谱接近于黑体谱，且只需要恒星的相对亮度。
- 很多时候，我们需要把测量结果转换成流量密度，即物理流量。

4.2 绝对校正

- 类似于传统的测光，物理测光先是测量目标源对参考源的相对亮度，再对相对亮度做各种修正，最后才把相对亮度转换成标准波长上的物理亮度。其中标准波长定义为

$$\lambda_0 = \frac{\int \lambda T(\lambda) d\lambda}{\int T(\lambda) d\lambda}$$



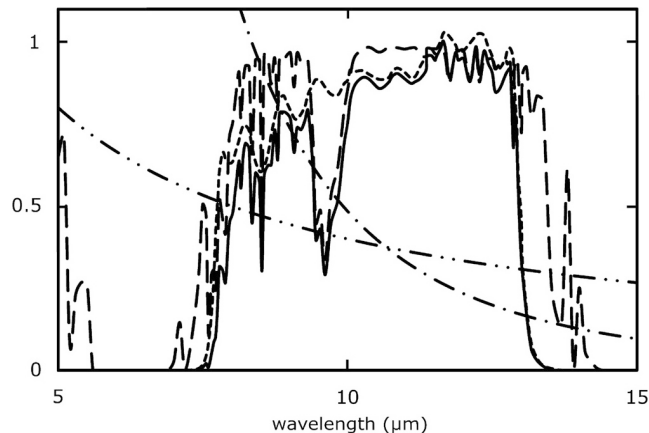
其中， $T(\lambda)$ 为系统的相对响应函数包括滤光片，望远镜，大气以及探测器的响应。

4.2 绝对校正

- 上述的方法避免了需要测量系统响应函数的绝对值（这在实际过程中非常难！）。
- 剩下的挑战就是需要知道标准星的绝对流量：
 - 直接校正：比较标准星与一校正过的黑体谱的亮度。
 - 非直接校正：通过估算恒星的大小和温度来确立恒星的绝对亮度。
 - 混合：利用太阳的绝对光度来估算类太阳(G2V型)恒星的绝对亮度。

4.3 带宽修正 (bandpass corrections)

- 尽管在测光中我们校正的绝对流量是给定在标准波长上，因为**带宽的存在**（即测光是光谱卷积响应函数），标准波长上流量一样的两个光谱他们的测光结果可能会不一样，类似地，同样测光结果的两个光谱它们在标准波长上的流量可能不一样。



左图：**N**滤光片的响应函数（实线），**A0**恒星的光谱（点划线）以及幂律谱（双点划线）。两光谱在标准波长上有相同的流量，但两者卷积响应函数后的测光结果显然不一样。

4.3 带宽修正 (bandpass corrections)

1. 标准波长上的
真实流量:

$$f(\lambda = \lambda_0)$$

通过滤光片测到的总光子数。

2. 通过滤光片测到的流量:

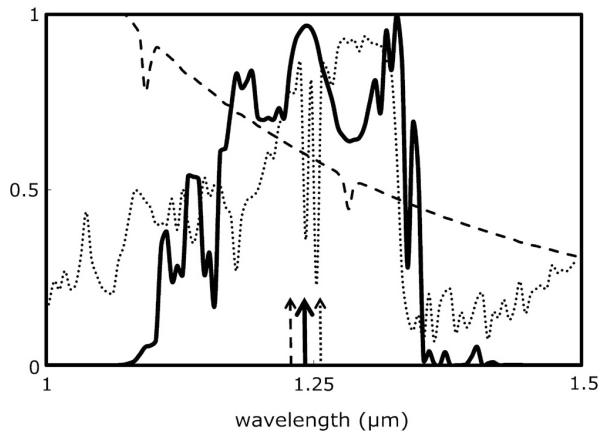
$$\left(\frac{\int \frac{f_\lambda \lambda}{hc} T_\lambda d\lambda}{\int T_\lambda d\lambda} \right) h \frac{c}{\lambda_0}$$

假定所有光子的波长为有效波长。

后者比前者的比值定义为带宽修正。

4.3 带宽修正 (bandpass corrections)

- 带宽修正需要源的光谱形状来修正得到源在标准波长上的真实流量。
- 带宽修正有时很难有很高的精度，因为源光谱的复杂性。



左图：实线是J波段的响应函数，虚线是A0V标准星光谱，点线是L型矮星光谱。[注：L型矮星光谱的复杂性将极大限制其J波段测光精度]。

4.4 最小化带宽修正

- 为了减少带宽修正，有时会用有效波长来代替标准波长（如IRAS以及Spitzer红外空间望远镜给定的红外测光）：

$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda^2 T(\lambda) d\lambda}{\int \lambda T(\lambda) d\lambda}$$

4.5 AB星等

➤ 定义3630Jy为零点：

$$m_{AB} = -2.5 \log(f_\nu (\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1})) - 56.085$$

➤ AB星等在光学波段跟Vega星等差别不是很大，但在近红外的差别很大 ($m_K(\text{AB}) - m_K(\text{Johnson}) \sim 2$)。

4.7 例子

- 假定有如下两颗星的测量：

波段	J(1.25微米)	N(10.66微米)
star Y	10010 DU	10016.1DU
star Z	983.1 DU	10097.3DU
sky	10 DU	10000 DU

其中star Y是标准星，其 $m_J=m_N=5.00$ 。所有上述测量用的是口径测光，sky的信号用跟源相同的口径。测量star Y时的air mass是1.1，测量star Z时的air mass是1.3；一个air mass对应的修正是0.2星等。输出的DU直接正比于源的流量密度。

4.7 例子

► 计算star Z的 m_J , m_N 以及 $m_J - m_N$

第一步，计算去除sky后的源信号：

	J	N
star Y	$10010 - 10 = 10000$ DU	$10016.1 - 10000 = 16.1$ DU
star Z	$983.1 - 10 = 973.1$ DU	$10974 - 10000 = 974$ DU

第二步，转化DU到仪器星等（假定零点为1DU）： $-2.5 \log(\text{DU})$

	$m_{J, \text{inst}}$	$m_{N, \text{inst}}$
star Y	-10.00	-3.02
star Z	-7.47	-7.47

4.7 例子

第三步，修正到1个air mass,

对于 star Y, 修正为 $(1.0-1.1) \times 0.2 = -0.02$

对于 star Z, 修正为 $(1.0-1.3) \times 0.2 = -0.06$

	$m_{J, \text{inst}}$	$m_{N, \text{inst}}$
star Y	-10.02	-3.04
star Z	-7.53	-7.53

第四步，修正到标准测光系统(利用star Y $m_J=m_N=5.00$):

$$\text{得到star Z } m_J = -7.53 - (-10.02 - 5.00) = 7.49$$

$$m_N = -7.53 - (-3.04 - 5.00) = 0.51$$

$$m_J - m_N = 6.98$$

4.7 例子

- 假定 $m_J=0$ 的流量为1623 Jy, $m_N=0$ 的流量为35 Jy, 请计算 star Z 的流量:

$$\text{J-band 为 } 1623 \times 10^{-7.49/2.5} = 1.638 \text{ Jy}$$

$$\text{N-band 为 } 35 \times 10^{-0.51/2.5} = 21.88 \text{ Jy}$$

5 其他类型的测光

5.1 示差测光(differential photometry)

- 示差测光是指用本地参考来获得源的相对亮度。本地参考可以是空间上的本地参考，也可以是光谱上的本地参考。
- 空间上的本地参考是指在目标源附近的参考星。通过成像仪，目标源与参考源可以同时成像，这在一阶上消除包括大气的变化和望远镜系统的光路变化等引起的误差。这种本地参考可以用于研究目标源亮度的变化。
- 光谱上的本地参考是目标源不同波段上的测光。如测量一发射线相对于连续谱的发射强度，窄带测光与同一波长中心的宽带测光的比值给定的就是谱线的相对发射强度。

5.2 快速测光

- 有些天体亮度快速变化。
- 快速测光可以借助于子阵列读出：
 -  CCD: 有用部分可以用正常速度读出, 其他部分可以快速读出, 这样可以获得低噪声的同时而实现高速测光。
 -  红外探测器: 可以直接读有用部分的子阵列。
- 快速测光也可以利用单光子探测器。

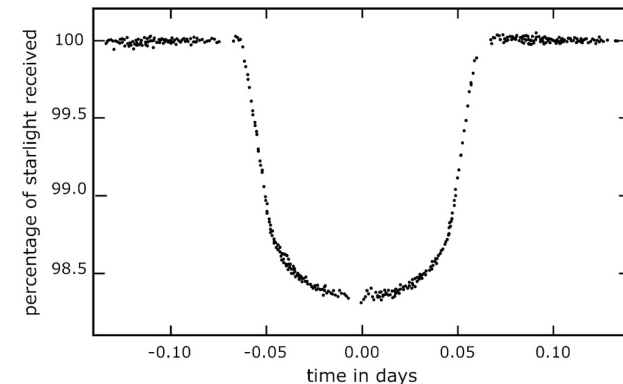
5.3 高精度

➤ 标准方法下的（基于成像仪）测光精度很难好于1%。更高精度可以通过以下方法来获得：

■ 把PSF分布到更多的像素上（散焦或目标源在探测器陈列上系统性的移动）。

■ 把目标源非常精确地成像到探测器的固定位置上。

■ 细致的数据处理来最小化系统误差。



6 偏振测量 (polarimetry)

6.1 简介

- 电磁辐射是横波，在垂直于传播方向的平面上有电磁场的振动。
- 如果平面里不同方向上的振动是不相关的，这样的电磁辐射无偏振。
- 反之，振幅和相位上有一定关联的辐射是有偏振的。

6.1 简介

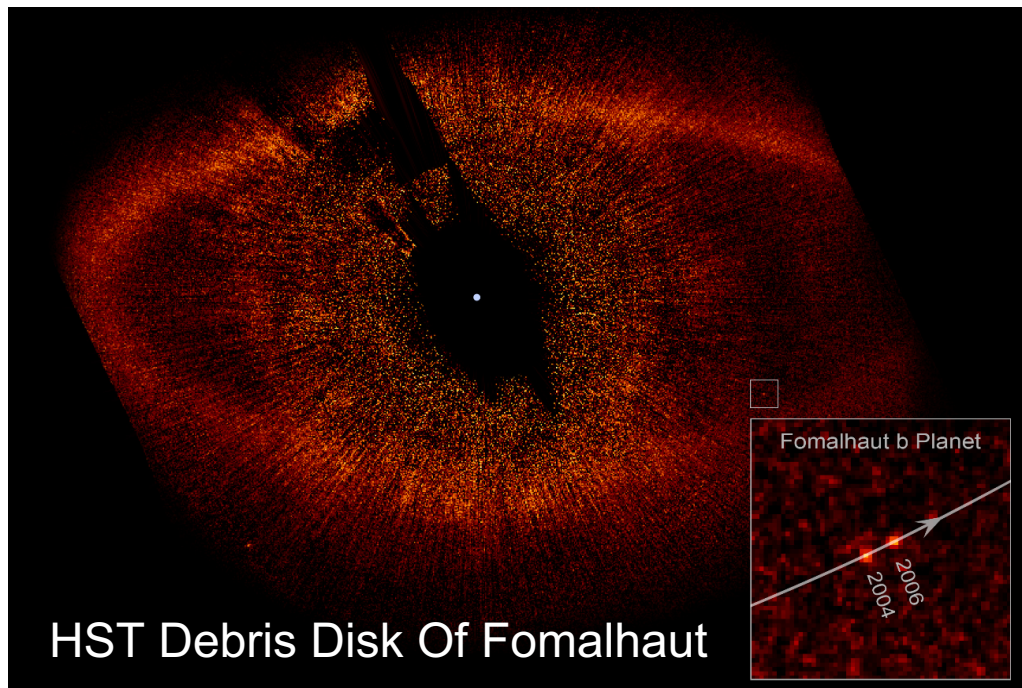
➤ 导致偏振的物理过程：

■ 固体表面的反射，如月球，行星和小行星。

■ 小尘埃颗粒的散射

■ 分子的散射

■ 自由电子的散射



HST Debris Disk Of Fomalhaut

6.1 简介

➤ 导致偏振的物理过程：

 Zeeman效应

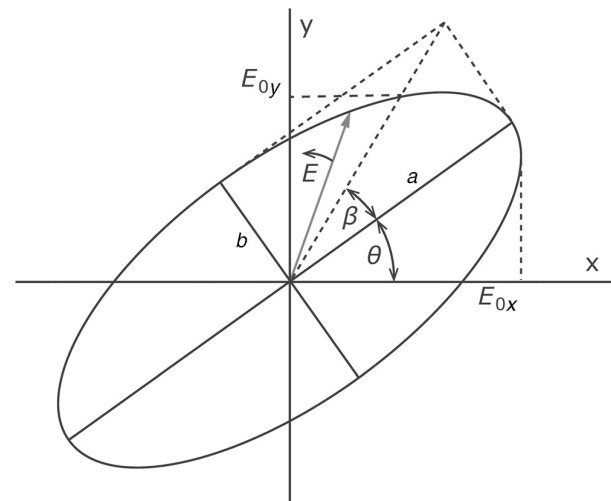
 高磁化的等离子体，如白矮星。

 同步辐射，如超新星遗迹，活动星系核。

6.1 简介

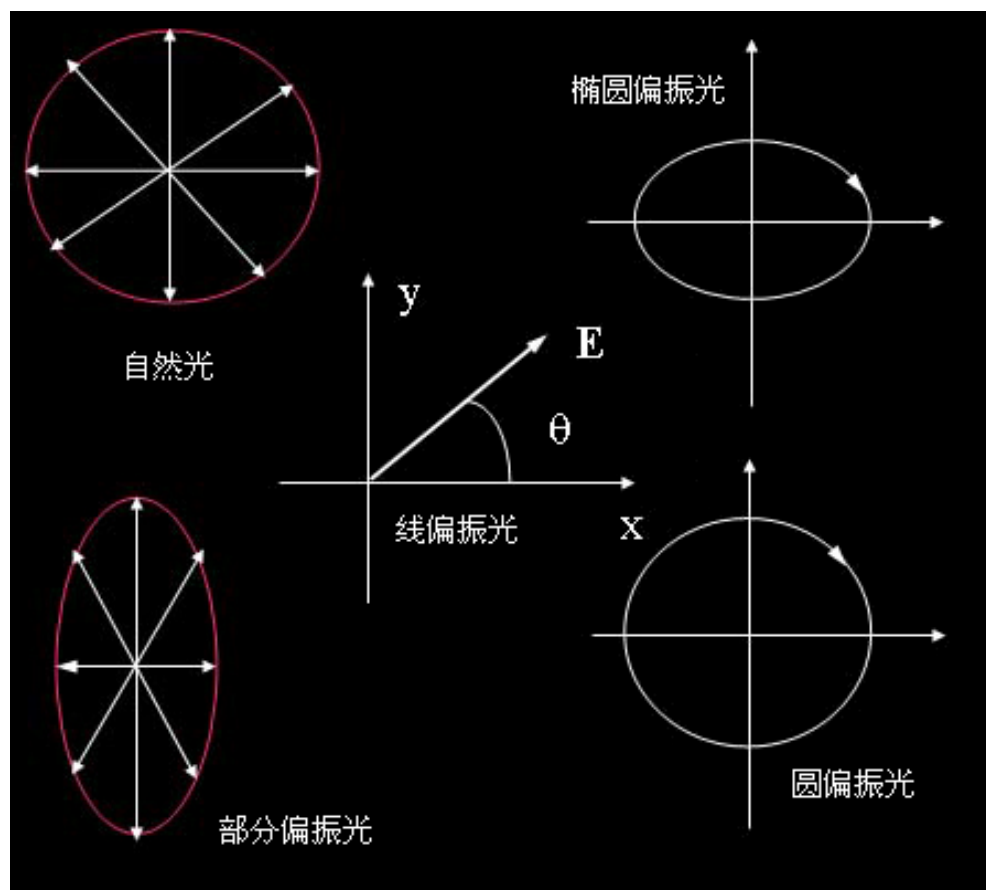
➤ 光波电矢量描述偏振：

- 线偏振光：光矢量的方向固定，振幅周期性变化。
- 圆偏振光：光矢量的振幅固定，以光频率做圆周运动。
- 椭圆偏振光：光矢量做圆周运动，同时振幅以2倍于光频率的周期变化。
- 部分偏振光：光矢量的振动在传播过程中只是在某一确定的方向上占有相对优势。



6.1 简介

➤ 5种偏振（包括无偏振）的示意图：



6.1 简介

► 光波电矢量的数学描述:

$$\vec{E} = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} = E_{0x} \cos(\omega t + \varphi_x) \hat{i} + E_{0y} \cos(\omega t + \varphi_y) \hat{j}$$

其中, ω 是角频率, φ 是相位。

► 上述的数学描述可以通过4个Stokes参数:

$$\text{总强度 } I = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle$$

$$\text{线性偏振 } Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle = I P_E \cos 2\beta \cos 2\theta = IP \cos 2\theta$$

$$\text{线性偏振 } U = \langle 2E_x E_y \cos \varphi \rangle = I P_E \cos 2\beta \sin 2\theta = IP \sin 2\theta$$

$$\text{圆偏振 } V = \langle 2E_x E_y \sin \varphi \rangle = I P_E \sin 2\beta = IP_V$$

6.1 简介

其中,

$$P_E = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \text{ 描述椭圆偏振强度,}$$

$\varphi = \varphi_x - \varphi_y$ 是相位差

$$P = P_E \cos 2\beta = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \text{ 是线性偏振的程度,}$$

$P_V = P_E \sin 2\beta$ 是圆偏振的程度, 正数为右旋偏振, 负数为左旋偏振。

β 定义线性偏振与圆偏振相对量的比值: $\beta = 0^\circ$ 是线性偏振, $\beta = 45^\circ$ 是圆偏振。

$$2\theta = \arctan\left(\frac{U}{Q}\right)$$

6.2: 光学器件：分析器

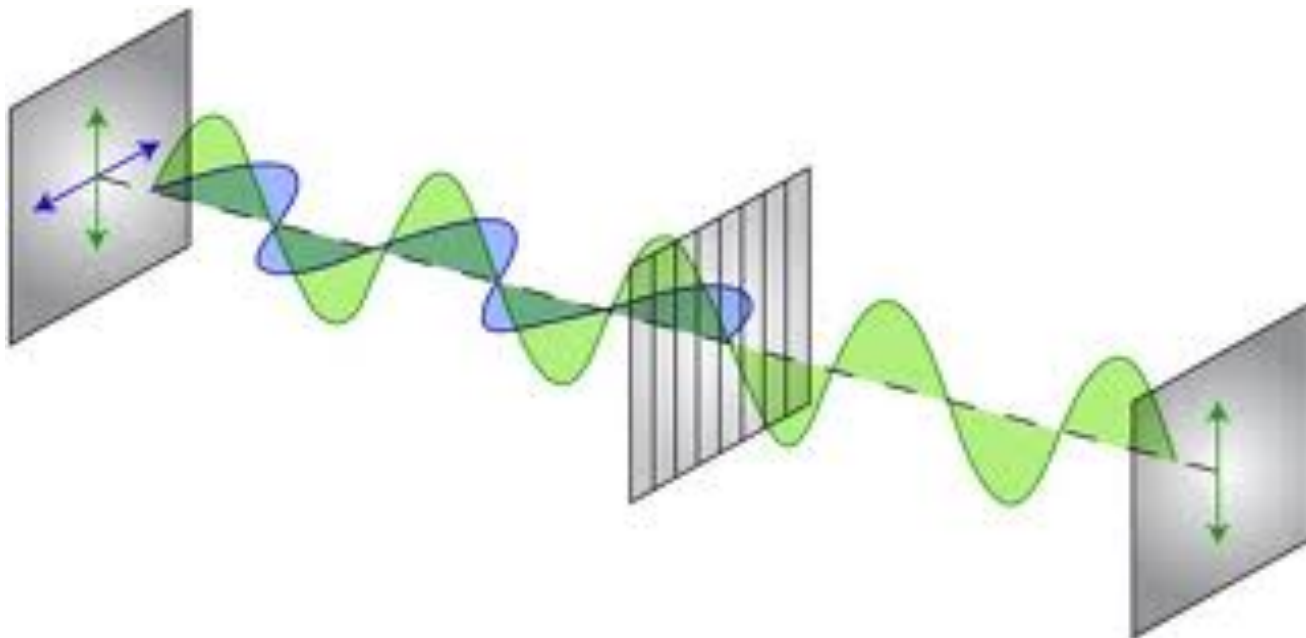
➤ 基本原理：

 一排排紧密放置的相互平行的导线，光波垂直于导线的方向传播。导线非常细，导线间距只有导线直径的几倍宽，那么这个装置对于波长长于导线间距的光波是很好的偏振器。

 导线将阻止垂直于导线方向的光矢量通过，而平行于导线方向的光矢量可以有效地通过。

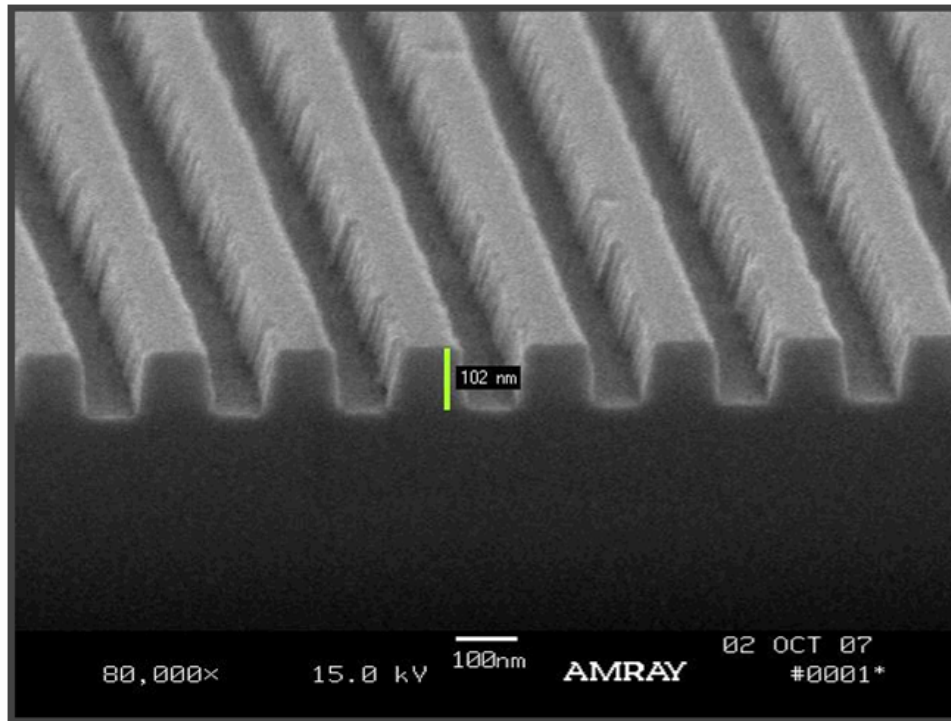
6.2: 光学器件：分析器

➤ 基本原理的示意图：



6.2: 光学器件：分析器

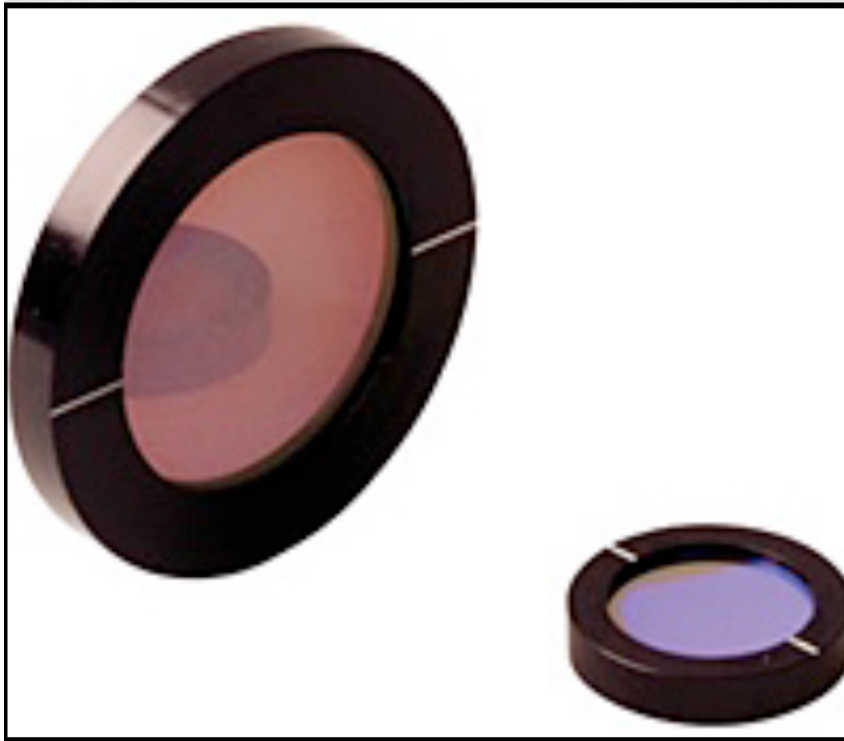
➤ 线栅极化器 (wire grid polarizer)



Plymouth Grating Laboratory has produced these structures with periods as small as 200 nm.

6.2: 光学器件：分析器

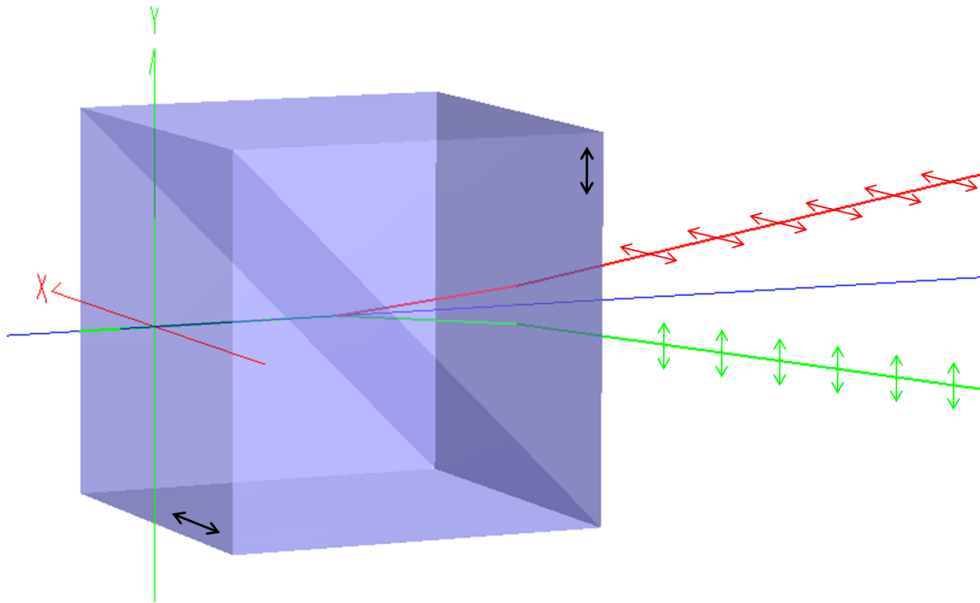
➤ 片状分析器 (sheet analyzer)



制造过程中材料
沿着一个方向拉
伸使得分子链沿
该方向排布。

6.2: 光学器件： 分析器

- 基于晶体双折射率的分析器：该晶体对不同振动方向有不同的折射率。



原理图

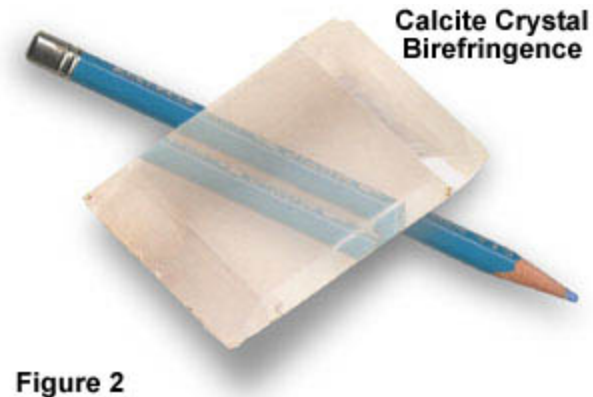


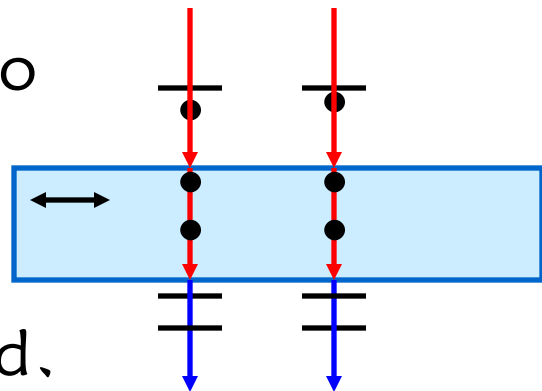
Figure 2

效果图

6.2: 光学器件：延迟器/波片

► 基本原理：

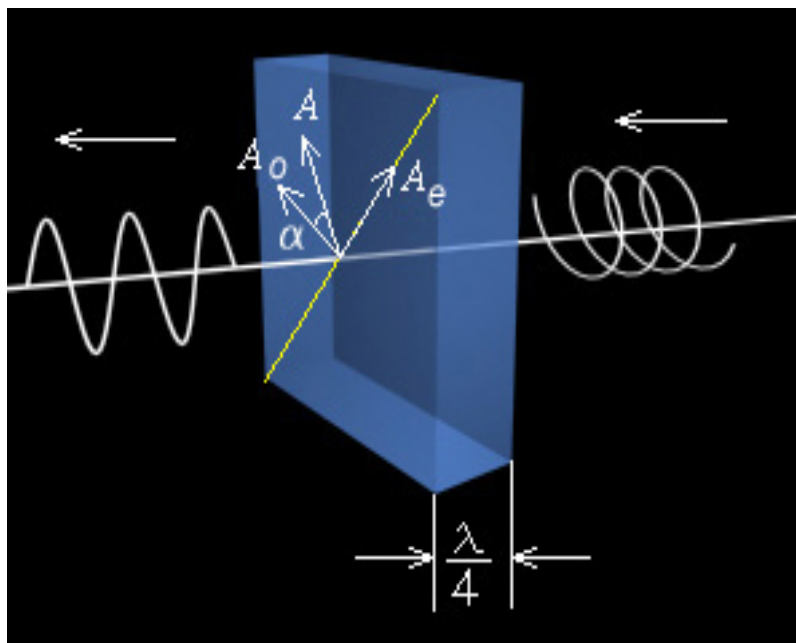
- 将双折射率晶体切成有一定厚度的晶体片，使其光轴平行于表面
- 当光垂直通过波片时，在波片内分解为寻常光(o)和非常光(e)
- 因在晶体内o光、e光垂直于光轴传播，所以o光、e光的传播速度不同
- 这样，传播到波片的后表面o光、e光就有了附加的相位差。波片产生的相位差与波片的d、 n_o 和 n_e 有关。



光程差: $\Delta = (n_o - n_e)d$
相位差: $\delta = 2\pi(n_o - n_e)d/\lambda$

6.2: 光学器件：延迟器/波片

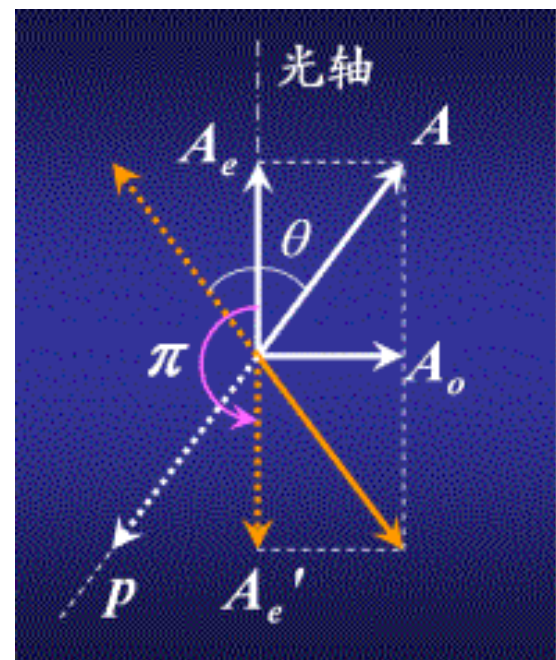
- 通常由具有精确厚度的石英、方解石或云母等双折射晶片做成，其光轴与晶片表面平行。



6.2: 光学器件：延迟器/波片

- 二分之一波片：能使o光和e光产生的光程差为 $1/2$ 的奇数倍，即相位差为 π 的奇数倍的晶片

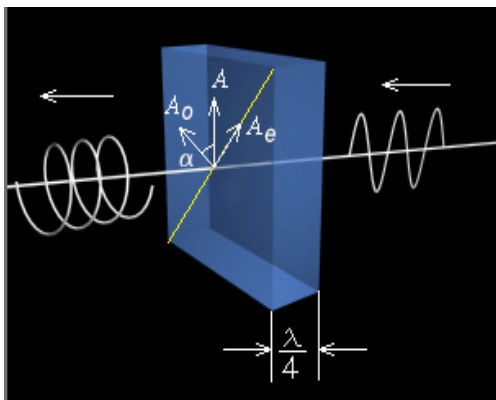
线偏振光通过 $1/2$ 波片后，仍然是线偏振光。只是振动平面转了一个角度，该转动的角度为初始振动平面与波片光轴夹角 Θ 的两倍



6.2: 光学器件： 延迟器/波片

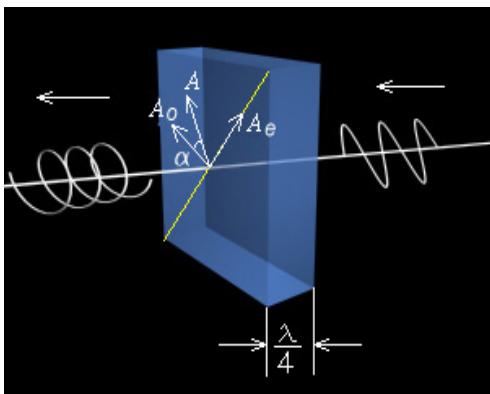
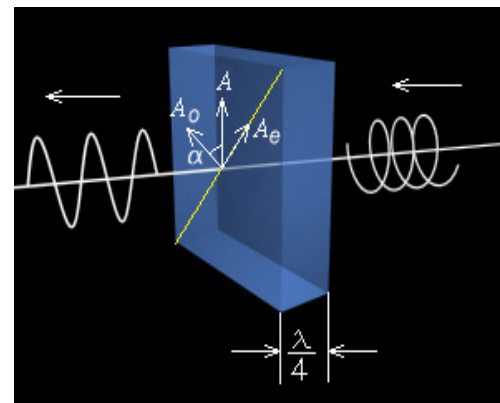
➤ 四分之一波片 (或 $\lambda/4$ 片)

能使o光和e光产生的光程差为 $\lambda/4$ 的奇数倍，即相位差为 $\pi/2$ 的奇数倍的晶片。



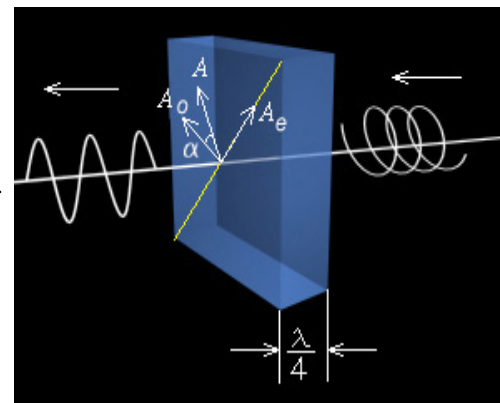
将线偏振光转
变为圆偏振光
 $a=45^\circ$

将圆偏振光转
变为线偏振光
 $a=45^\circ$

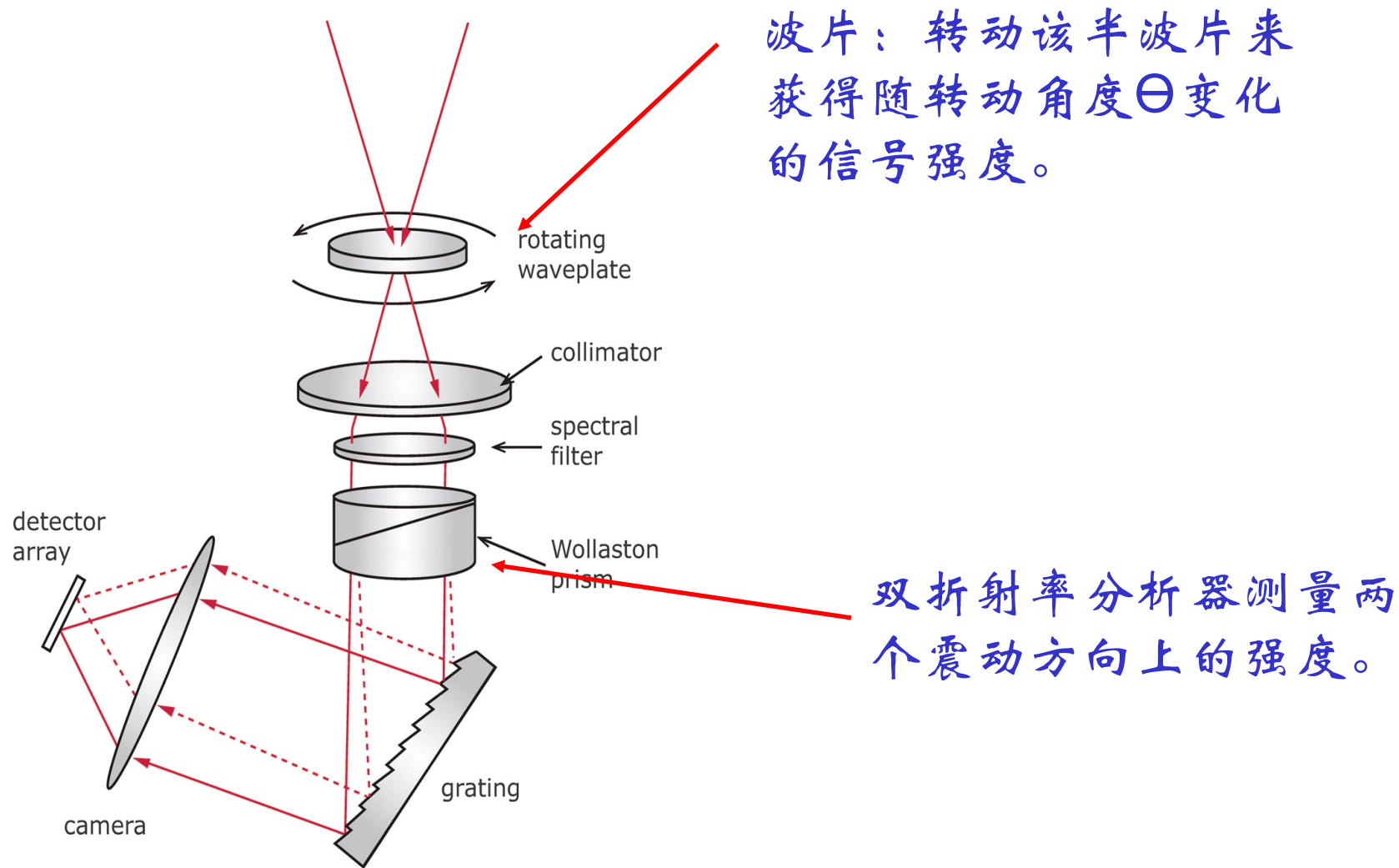


将线偏振光转
变为椭圆偏振
光 $a \neq 45^\circ$

将椭圆偏振光
转变为线偏振
光
 $a \neq 45^\circ$



6.3 偏光计



6.3 偏光计

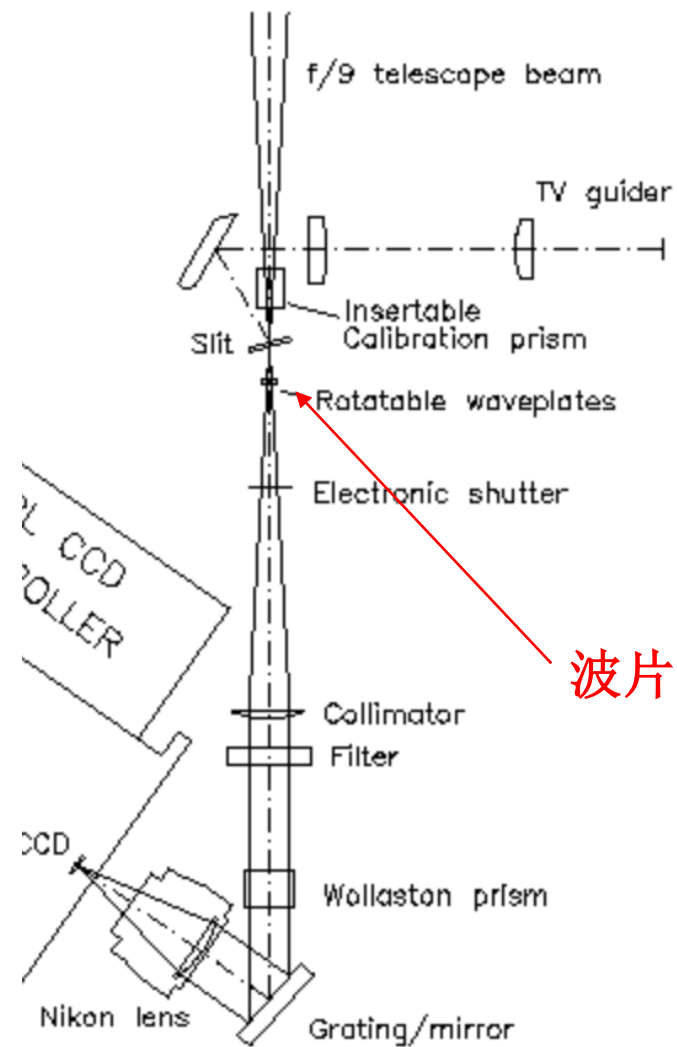
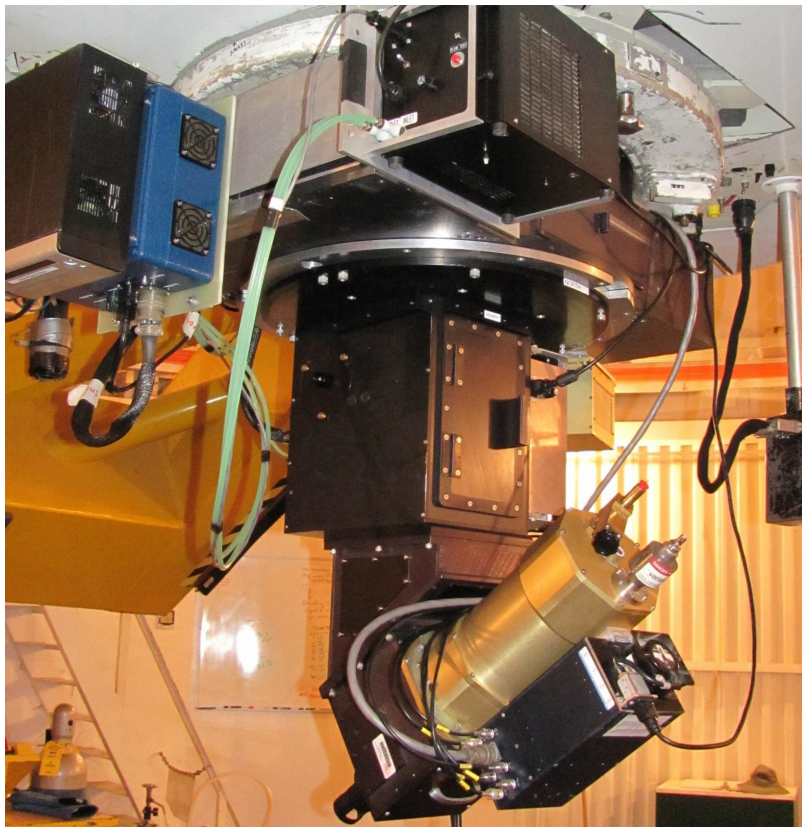
波片：

(1) 该半波片直接放置在主镜和副镜后面，而在其他光学器件的前面。这样可以避免其他光学器件因反射造成的仪器偏振。[主副镜上的入射和发射基本上是垂直于表面，所以偏振很小]。

(2) 偏振的角度是 2θ 。而由半波片缺陷而造成的干扰偏振的角度是 θ 。半波片后面光学器件造成的干扰偏振不随角度变化。三者可以分离开。

(3) 半波片可以在短时间内完成转动，避免大气透过率，seeming等的变化。

6.3 偏光计



6.3 偏光计

- 通过分析信号强度随半波片角度 Θ 的变化量来获得偏振的强度。信号强度为

$$R = (I_{pp} - I_{op}) / (I_{pp} + I_{op})$$

其中 I_{pp} 是双折射率晶体主平面方向上的强度， I_{op} 是垂直平面上的强度。

- 线性偏振用半波片；圆偏振用1/4波片。