

ELEYANG DESIGN

La Vita E Bella



观测天体物理 期末 Review - 光学部分

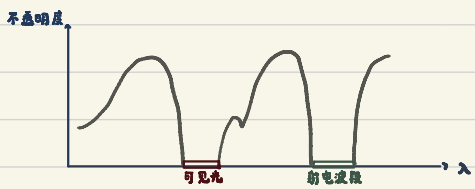
Catalog: I. 基础知识 II. 望远镜 III. 探测与成像 IV. 测光与成像 V. 现代光学观测

I. 基础知识

(i) 辐射强度 $dW = I_\nu \cos\theta dA d\Omega dv$ 换算关系 $I_\nu dv = -I_\lambda d\lambda = -I_\lambda d\frac{c}{\nu} = \frac{c}{\nu^2} I_\nu dv$

黑体满足维恩位移定律: $\lambda_{max} T = 3000 \mu m \cdot K$

- (ii) 大气影响:
- a. 大气消光: 大气吸收、散射 → 改变颜色与温度
 - b. 大气折射: 改变方向
 - c. 大气辐射: 大气本身辐射 → 影响红外观测
 - d. 大气湍动: 影响光学成像质量



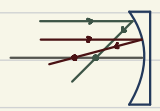
(iii) 天文定位: 观测到 n 个光子时其误差 $\sigma = \sqrt{n}$ 误差传播: 对 (x, σ_x) (y, σ_y) $f = f(x, y)$ 的误差为 $\sigma = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 \sigma_x^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2 \sigma_y^2}$

II. 望远镜

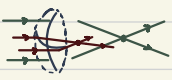
(i) 望远镜性能:

分辨率: $\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$ 光通量 $\propto D^2$ (决定能看见的最暗天体) 焦距 f 集光比 $f/\# = f/D$
 放大率: $M = \frac{f_{望远镜}}{f_{眼睛}}$ 底片比例尺 $cl = \frac{200205}{f}$ ("/mm) 视场 FOV

(ii) 光学像差: 包括: 球差、彗差、像散、场曲、畸变、色差



- // 球差: 球面透镜光轴不同距离的轴向平行光线在光轴上形成焦点位置不同 → 弥散光斑
 ↳ 避免球面镜
- // 彗差: 斜平行光束 → 彗状斑点
- // 像散: 两个互相垂直的平面焦点不同 → 散光、椭圆
- // 场曲: 最佳焦平面非平面 畸变: 放大率不为常数 色差: 不同波长光线折射率不同
 ↳ 弯曲底片; 加改正镜 ↳ 避免折射



(iii) 望远镜系统: 包括: 主焦点系统, 牛轭式系统, 卡塞格林系统, 格里高利系统

a. 主焦点系统 b. 牛轭式系统

— 直射: 无色差
— 轴外物: 无球差
— 彗差产生

优化: 成像于镜筒外

c. 卡塞格林系统 d. 格里高利系统

— 凹主凸副
— 倒立影像

— 凹主凹副
— 正立影像

Ex: 设计望远镜

(iv) 成像描述: MTF 输出信号与输入信号调制的比值 MTF 越大, 成像质量越好 (一般 $\nu < MTF < 1$)

II. 探测与成像

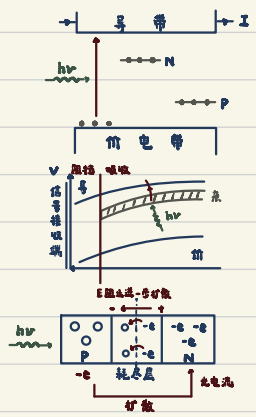
(i) 辐射探测器: 接收光子 \rightarrow 传递能量 \rightarrow 变成信号



$\mu \rightarrow$ 半导体光子探测器, 可掺入杂质形成杂质半导体
 N型: 多一个价电子
 P型: 多一个电子空穴

$\mu \rightarrow$ 杂质半导体探测器: 可解决 $h\nu < V$ 小时 (红外) 的问题

$\mu \rightarrow$ 光电二极管: 电流只能从 P \rightarrow N
 耗尽层受照
 耗尽层受照



区内使用二极管时 光子在 p 侧激发电子向 n 侧扩散, 此时耗尽层敏感, 中性区敏感, 扩散长度 $>$ 中性层厚度时产生光电流

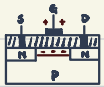
(ii) 探测性能:

DQE: 输出光电流 / 入射光子流 DQE: $(S/N)_{out}^2 / (S/N)_{in}^2$ 探测率: 能探测到的最小辐射率倒数
 阵列: pixel 大小反映空间分辨率 Response: 动态范围 = (噪声, 饱和值) 响应时间: 光照后恢复到原状态所需的时间 $\tau_{RC} = RC$

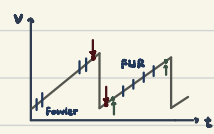
(iii) 光子噪声: 包括: 光子噪声, 热噪声, 暗流, KTC 噪声, $1/f$ 噪声

- // 光子噪声: $\sigma \sim \sqrt{N}$
- // 热噪声: 电阻中自由电子热运动 \rightarrow 降低 T 或增大 R
- // 暗流: 价带电子通过震动激发到导带 \rightarrow 降低 T 或增大平均
- // KTC 噪声: 电阻中自由电子热运动 $\rightarrow \langle Q_{eq}^2 \rangle = \frac{kTC}{4}$
- // $1/f$ 噪声: 低噪声功率与 ν 成反比 \rightarrow 长时标下有一定规律

(iv) 放大器: MOSFET



— G 不通电时 SD 之间永远不存在电流
 — 当连接探测器像素 G 上电压增大, 使两侧 N 半导体之间出现导电通道, SD 之间出现电流



读出 S-D 间电压可反应光子积累情况
 $V_{after} - V_{before}$ \rightarrow 不受放大器噪声影响, KTC 噪声大
 $V_{last} - V_{first}$ \rightarrow 不受 KTC 噪声影响 (只要 $\tau_{RC} \gg t_{int}$) noise $\sim \Delta n(t) \sim e^{-t/\tau_{RC}}$

$\mu \rightarrow$ 多次抽样降噪: Fowler Sampling or FUR Ramp 抽样少时 Fowler $>$ FUR

Ex2 DQE 计算

(v) CCD:



(vi) 成像仪: 收集电磁辐射的 2D 信息 光学系统 + 低温罩层 + 电路

光学: CCD + dewar (177K 液氮) + shutter + filter

红外: 放入低温罩层 + 光闸 (阻挡仪器辐射)



(vii) Nyquist 采样: 采样频率为信号频率的 2 倍 即像素大小 < 衍射斑 FWHM 的 1/2

→ 仪器空间分辨率 $\theta \sim \max(\text{seeing}, \text{像素大小} \times 2)$

(viii) 校准: 必要的校准图像: bias dark flat

1. dark₁ = dark - bias

// 考虑 bias: 不曝光, 在非常短的时间内收集光子

2. flat₁ = flat - dark₁ - bias

// 暗流 dark: 不曝光, 在曝光相同曝光时间内收集光子

3. data₁ = data - dark₁ - bias

// 平均 flat: 获得每个像素的响应 圆顶平均 暗幕天光平均 超深天空平均

4. data₂ = data₁ / response

(ix) FITS 文件: 由多个 Header + Data Units 组成

(x) 测天技术: 1. 望远镜稳定 2. 光焦面 测量精度 ~ FWHM / (SIN)

IV. 测光与成像

(i) 测光: 即测量能谱 SED SED v.s. Spectrum 定义 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ $R = 2-10$ 称为 SED 最高的 R 称为 Spectrum

// 孔径测光: 测量孔径里的总光子数 确立孔径中心 — 确立孔径大小 — 确立天空孔径 — 孔径修正

// PSF 拟合: 利用点扩散函数拟合 星展角因素影响小, 对星展不适用, 边缘级孔径修正

(ii) 测光系统: 一组规定了响应曲线的滤光片

m → 星等 $m_1 - m_2 = -2.5 \log(f_1 / f_2)$ 视星等 $m = -2.5 \log(f_{\text{star}} / f_{\text{SP}})$ 绝对星等 $m - M = 5 \log \frac{d}{10 \text{pc}}$

n → 颜色指数 CI 例如 UBVRIJHKLMN 系统中 B 波段与 V 波段分别有 m_B, m_V , 则 $CI = B - V$

(iii) 其它修正: 包括: 大气消光, PSF 变化, 绝对校正, 带宽校正

// 大气消光: 对给定 air mass 上的消光 $m_{\lambda, \text{air}2} - m_{\lambda, \text{air}1} = 2.5 k_{\lambda} (\text{air}2 - \text{air}1)$

// PSF变化: seeing 变化 \rightarrow PSF变化

// 绝对校正: 将一个 filter 上的亮度看作标准波长的物理亮度 $\lambda_0 = \frac{\int \lambda T_{std} d\lambda}{\int T_{std} d\lambda}$ or $\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda^2 T_{std} d\lambda}{\int \lambda T_{std} d\lambda}$

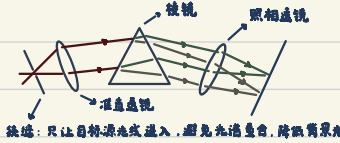
// 带宽修正: 标准波长上真流量 $f(\lambda = \lambda_0)$ 比 通过 filter 测得流量 $\frac{hc}{\lambda_0} \frac{\int_{std} T_{std} d\lambda}{\int T_{std} d\lambda}$ 为带宽修正 Ex 3 测光流程

(iv) 其它测光: 包括: 示差测光, 快速测光

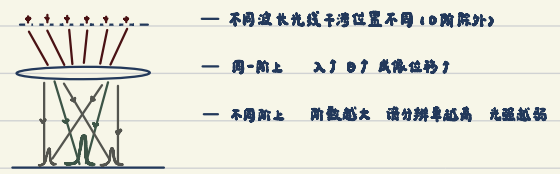
(v) 偏振: 来源包括: 固体表面反射, 尘埃颗粒散射, 自由电子散射, 分子散射 / Zeeman 效应 等离子体 同步辐射

(vi) 光谱: 内含信息: 元素丰度, 高层温度, 任何速度, 星系红移, 电磁动力学

a. 传统光谱仪 其光谱分辨率由色散与透镜焦距决定



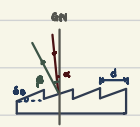
b. 光栅光谱仪



c. 闪耀光栅

衍射公式: $m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)$

闪耀角: $\theta_B = \frac{\beta + \alpha}{2}$ 闪耀波长: $\lambda_B = \frac{2d}{m} \sin\frac{\beta + \alpha}{2} \cos\frac{\beta - \alpha}{2}$



槽数密度: $1/d$

分辨率: $R = \frac{D(\sin\alpha + \sin\beta)}{D \cos\alpha \cos\beta}$ D : 主镜口径 D_0 : 准直平行光宽度 d : 槽缝宽度 Ex 4 设计光栅

(vii) 成像光谱仪: 对视场中多个点源同时成像 面阵 + 光纤

(viii) 光谱数据处理: 图像处理 + 抽取一维光谱, 去除大气谱线, 做波长, 流量校正

V. 现代光学观测

(i) 望远镜优化: a. R-C 系统: 改进版卡塞格林系统 凹双曲面 + 凸双曲面 \rightarrow 无色差, 球差, 彗差, 视场大, 但场曲

b. 施密特望远镜: 球面镜, 但由施密特改正透镜修正球差, 彗差 c. 马儿苏托夫望远镜

d. 扁平面改正系统: 改正镜在焦平面附加 (例如三透镜系统) e. 保罗-贝里望远镜

(ii) CCD 优化: a. 输入 n 型半导体: 解决电荷层吸附电子, 降低传输速度的问题 \rightarrow 红外探测器不用 CCD 读出

b. 电离光子: 破坏 CCD 图像 c. 紫外光子: 层间照射时产生自由电子可能破坏硅化学键捕获 \rightarrow 减小 CCD 厚度 或在后端加负电压

e. 在红外: 加厚衬底或采用非硅衬底材料

(iii) 自适应光学: 对视大气湍流 \rightarrow 改变光的方向! 倾斜误差; 改变波前相位 (piston 误差)

1- 满流元: $d \sim 5-15 \text{ cm}$ $\tau \sim 10 \text{ ns}$ 为望远镜口径大小 | 远大于满流元直径, 单次曝光时间远大于 10 ns 时 空间分辨率由 seeing 决定

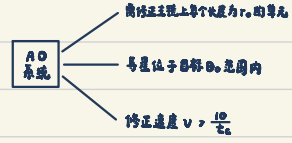
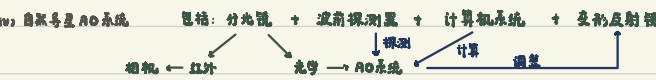
Lucky image: 一大批短曝光图像中受抖动影响小的 | 小于满流元直径, 空间分辨率由 $\frac{1.22\lambda}{D}$ 决定

散斑成像: 通过大批短曝光成像重构 (研究光源且不可成谱)

11- 自适应光学 AO: 预先补偿大气湍动造成的波前变化

- // 大气行为:
1. Fried 长度: $r_0 \propto \lambda^{6/5}$ 在波长上波前改变 1 rad $\rightarrow r_0$ 越大越好 $\lambda \uparrow r \uparrow$ 近红外 seeing 最好
 2. 口径越大, seeing 影响越大
 3. 等量面元大小: $\theta_0 \approx 1.3 \text{ arcsec}$ ($r_0 = 0.5 \text{ m}$) / 7 arcsec ($r_0 = 2.2 \text{ m}$) 能被修正的视场大小
 4. 时致性: $t_c \sim 0.3 r_0 / v$ 波前变化 1 rad 的时间

// 由于红外 r_0 大 需修正单元少, AO 多用于近红外波段



// 波前探测器: 修正 Tip-tilt 误差、Piston 误差

- 四象限波前传感器
- Shack-Hartmann 传感器
- 波前曲率探测
- 锥状波前传感器

// 变形反射镜: 机械镜 单面镜 双层电液变形反射镜

// Strehl 比值: 表征 AO 系统性能的参数 波前误差: $\sigma^2 = \sigma^2_{\text{jit}} + \sigma^2_{\text{photon}} + \sigma^2_{\text{delay}} + \sigma^2_{\text{iso}}$

(11) 激光导星: 圆筒散射激光导星 Na 激光导星

无法修正倾斜误差, 需配合自然导星 / 激光导星非点源 / 波前非平面

(12) 多导星系统: 多个导星修正不同方向, 抵消大气湍动

附录：观测天体物理记号公式

I. 辐射强度转换公式 $I_\nu d\nu = -I_\lambda d\lambda = \frac{c}{\nu_0} \cdot I_\lambda \cdot d\nu$

维恩位移定律 $\lambda_{\max} T = 3000 \mu\text{m K}$

II. 误差传递公式 $f = f(x, y)$ 则 $\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2}$

III. Rairy 判据 $R = 1.22 \frac{\lambda}{D}$

IV. 焦距 $f/\# = \frac{f}{D}$ 放大率 $M = \frac{f_{\text{望远镜}}}{f_{\text{望远镜}}}$ 照相比例尺 $\alpha = \frac{206265}{f}$ ("/mm)

V. 星等计算 $m_1 - m_2 = -2.5 \log(f_1/f_2)$ $m - M = 5 \log(d/10\text{pc})$

颜色指数 $CI = B - V = m_B - m_V$

VI. 闪耀光栅分辨率 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{D_1 (\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)}{D_2 \cos\alpha_1 \alpha_2}$

VII. Fried 长度 $r_0 \propto \lambda^{0.7}$ 等晕面元大小 $h = 15 \text{ km 时 } \theta_0 = 1.3 \text{ arcsec } (0.5 \mu\text{m}) \text{ or } 7 \text{ arcsec } (2.2 \mu\text{m})$

修正系数 $t_c = 0.3 r_0 / V$