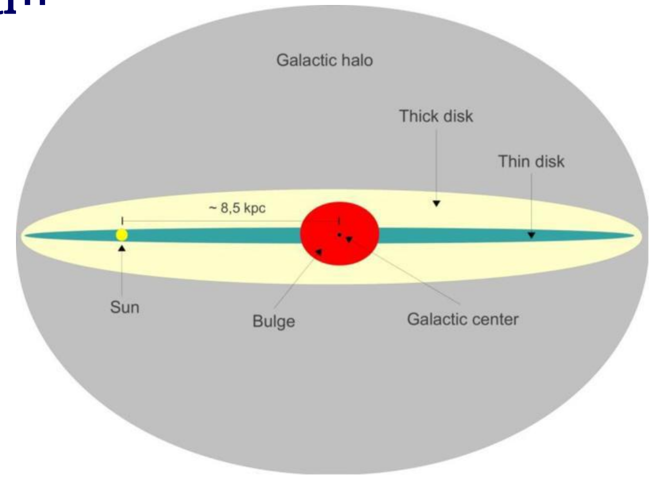
第五章 旋涡星系和透镜星系

Review of Basic Components

- Disks :
  - Metal rich stars and ISM
  - Nearly circular orbits with little (~5%) random motion
  - Both thin and thick components
- Bulge :
  - Metal poor to super-rich stars
  - High stellar densities with steep profile
  - $V_{rot}/\sigma \sim 1$, so dispersion support important
- Bar :
  - Flat, linear distribution of stars
  - Associated ringsand spiral pattern

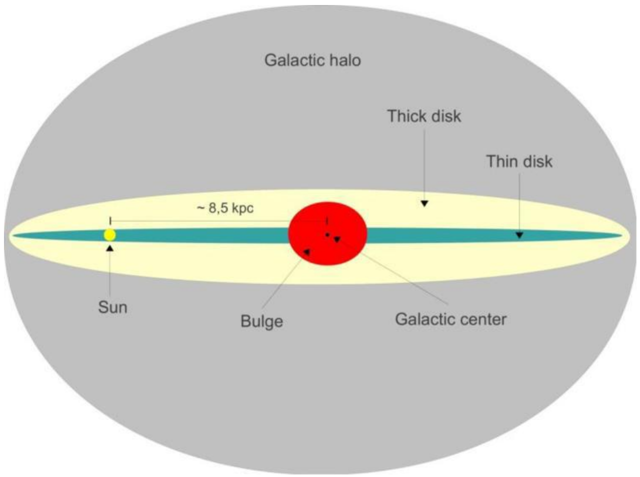


Review of Basic Components

- Stellar Halo :
  - Very low SB; ~few % total light; little/no rotation
  - Metal poor stars; GCs, dwarfs; low-density hot gas

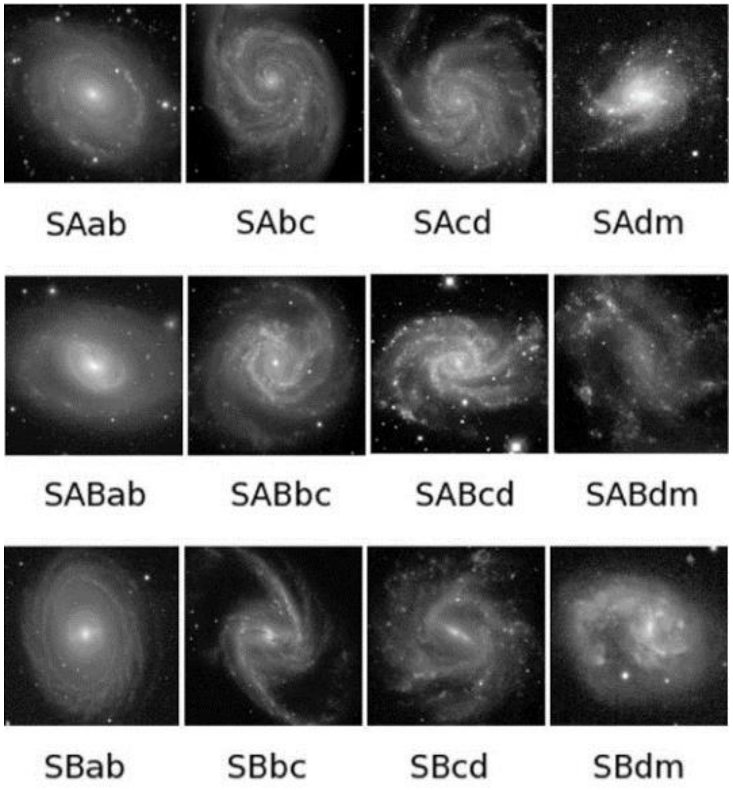
- Nucleus :
  - Central (< 10pc) region of very high density ($\sim 10^6 \mathrm{Mpc}^{-3}$)
  - Dense ISM &/or starburst &/or star cluster
  - Massive black hole

- Dark Halo :
  - Dark matter



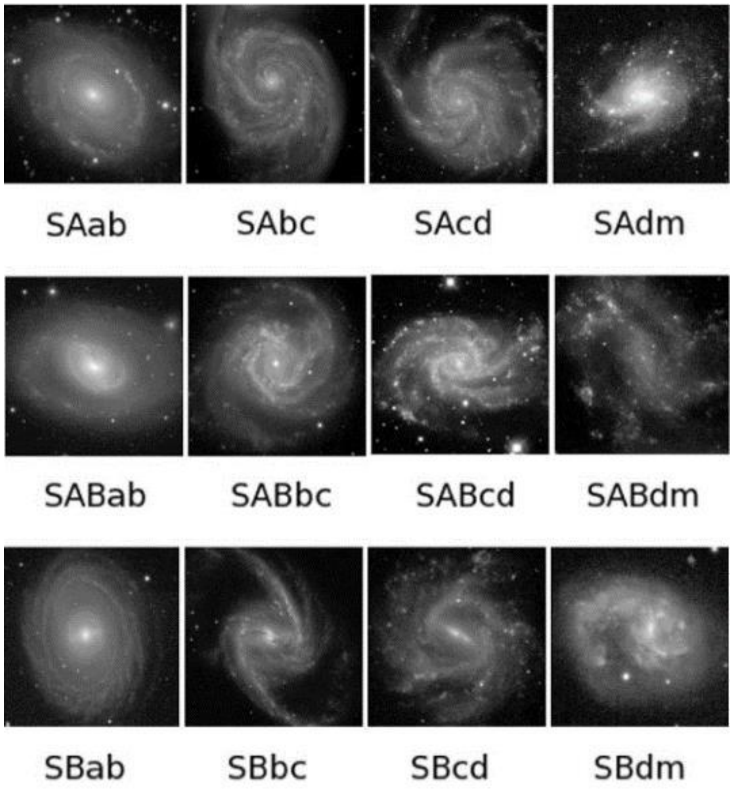
Spiral Galaxies are Complex Systems

- Wide range in morphological appearance:
  - classification bins : simple E0-7 compared with all the spiral types
  - not just smooth, considerable fine-scale details
- Wide range in stellar populations:
  - old, intermediate, young and currently forming
  - Ongoing chemical enrichment



Spiral Galaxies are Complex Systems

- Wide range in stellar dynamics:
  - "cold" rotationally supported disk stars
  - "hot" mainly dispersion supported bulge and halo stars
- Significant cold ISM:
  - influences dynamical evolution (e.g. helps spiral formation)
  - influences stellar density distribution (e.g. creates dense cores & black holes)



主要内容

5.1 星光分布：盘内的恒星成分

5.2 观测气体：气体成分与恒星关系

5.3 气体运动：转动曲线和TF关系

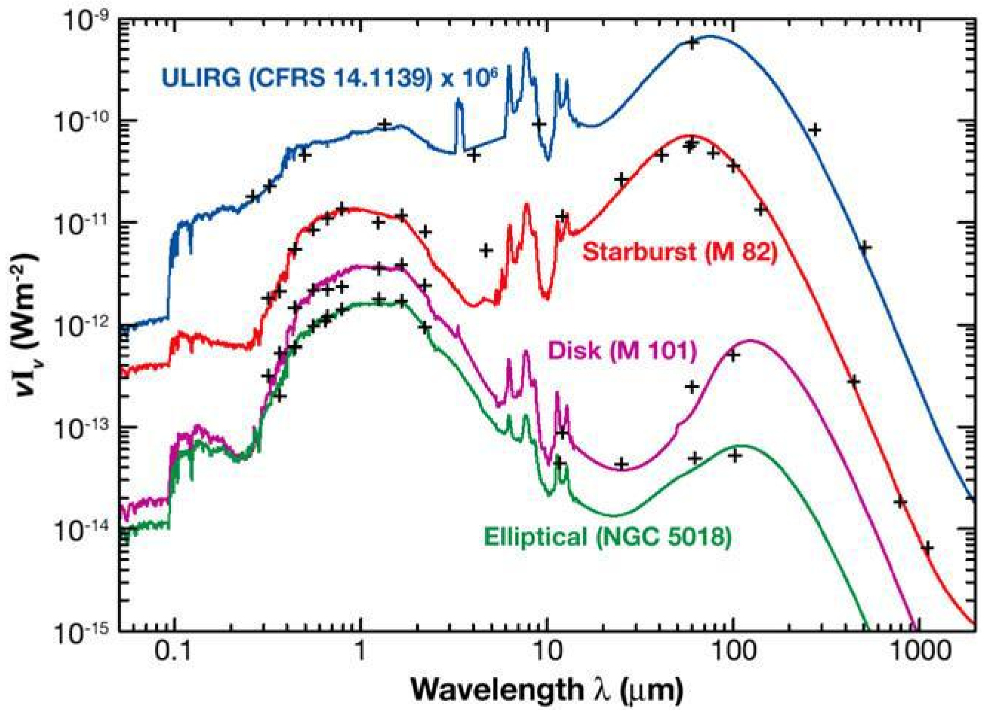
5.4 盘星系序列：星系的其他性质

5.5 旋臂和星系棒：困难的课题

5.6 核球和中心：与其他部分联系

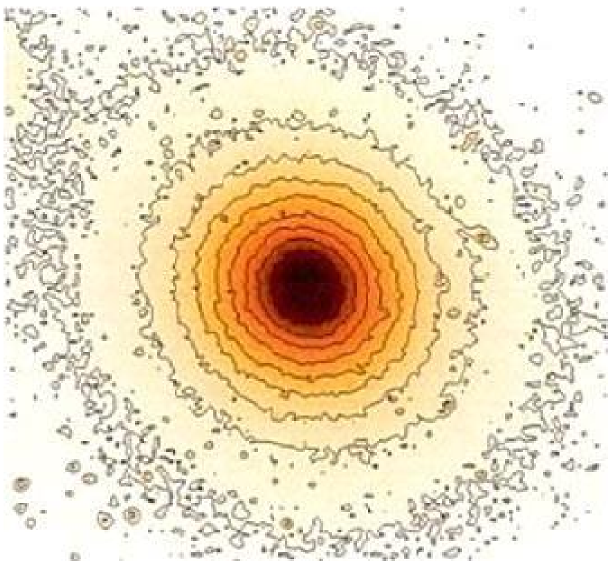
5.1 星光分布

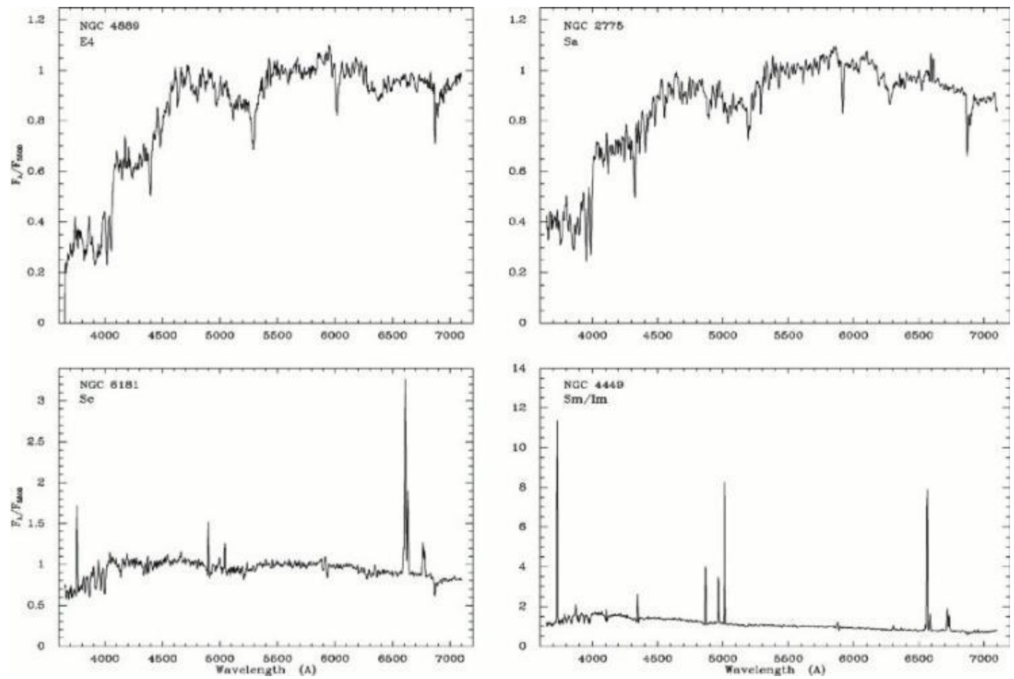
- 盘星系的恒星辐射：主要在能谱的近红外区
  - K型巨星等老年恒星辐射，大部分波长接近1mm
  - 年轻恒星光会被周围尘埃吸收，红外波段再辐射
  - 在可见光波段的辐射稍弱
  - 在紫外波段的辐射不重要



5.1 星光分布

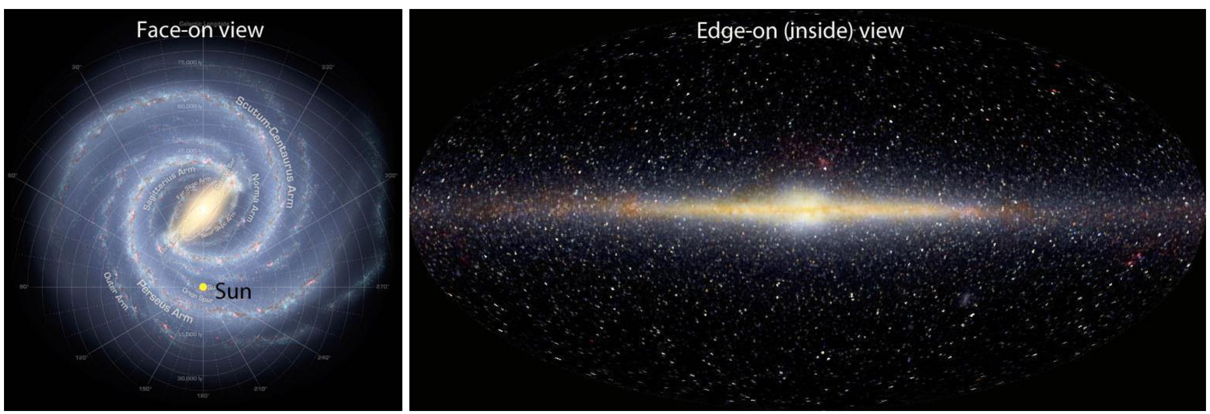
➢ 研究方法：图像和光谱观测、分析

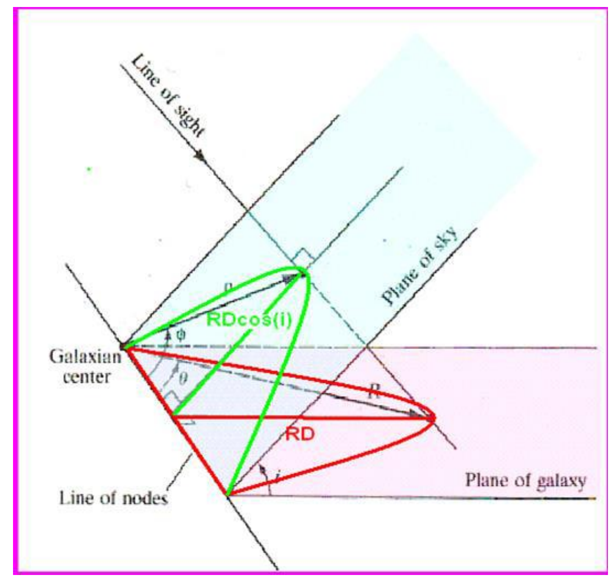




5.1.1 盘星系的面源测光

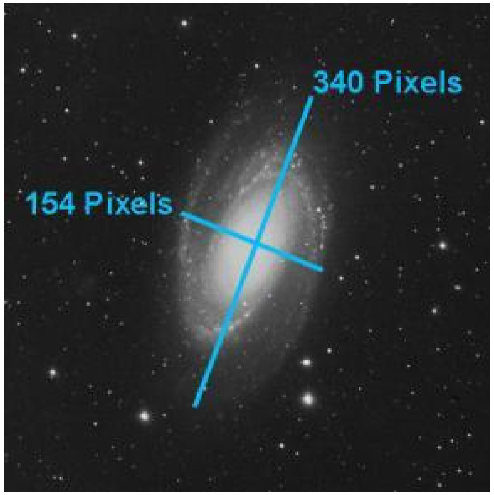
- 等照度线：即星系的等面亮度线。
  - 等照度线在星系核球区相当圆；在盘内区变为椭圆；外部因受到旋臂等影响，变得参差不齐
- 假设盘是圆的（恒星类圆轨道运动）并且很薄，离开面向（face-on, $i = 0$），以角度i看它时，显示为一个轴比为$q = b/a = \cos i$的椭圆
- 倾角i时，半径为RD圆盘在天球上投影是椭圆
- 半长轴：$a = RD$
- 半短轴：$b = RD\cos(i)$





倾斜角

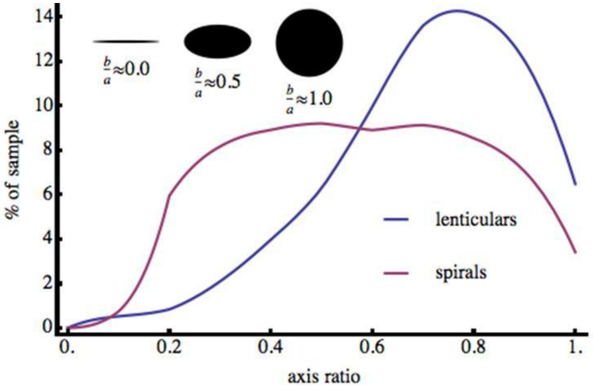
- 倾斜角测量（假定盘的厚度为零）
  - 测量星系盘半长轴、半短轴
  - 倾斜角 $i = cos-1(q) = cos-1(b/a)$
  - M81（NGC3031）的$i = 63$度



- 倾斜角测量（盘的厚度不为零）
  - 假定盘为三轴椭球（$a\colon b\colon c$）
  - $q_0 = c/a$（Sc星系有$q_0 = 0.13$）

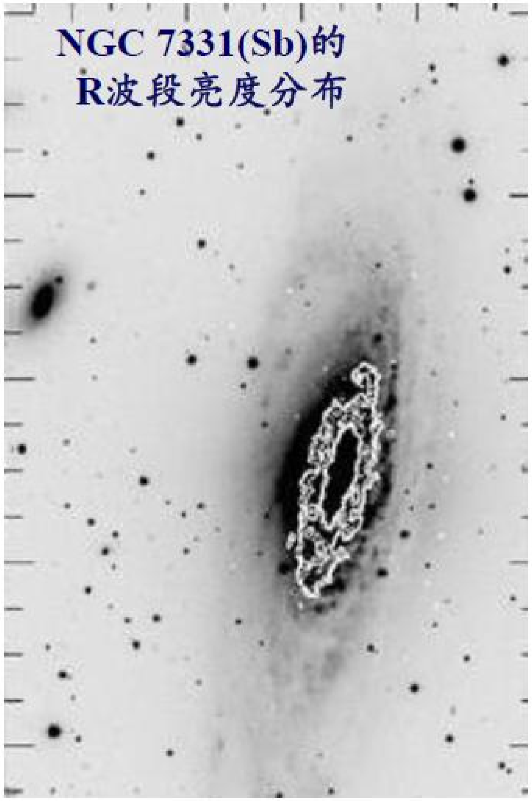
$$\cos i = \sqrt{\frac{(b/a)^2 - q_0^2}{1 - q_0^2}}.$$

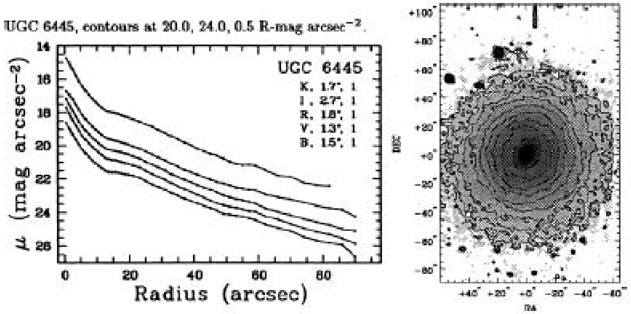
- 5000个S0星系视轴比分布：q=b/a 的峰值～0.7，真轴比 q_0～0.25－0.85之间均匀分布
- 13000个旋涡星系视轴比分布：q～0.3－1.0之间均匀分布；真轴比q_0小（旋涡星系很薄c << a）

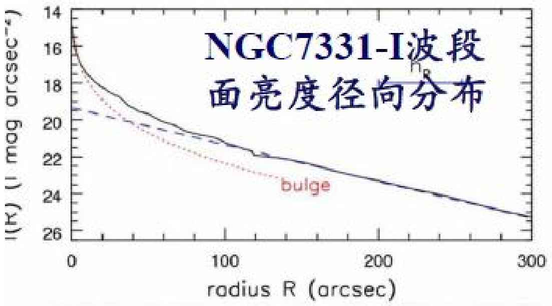


盘星系面亮度

- 河外星系是面光源，测量星系面亮度，研究其**面亮度**的变化规律
- **面亮度**：每平方角秒的流量，表示为视星等。单位：星等/角秒^2。NGC7331中心 $I_I(0)=15\mathrm{mag\ arcsec}^{-2}$
- 面亮度随径向分布无明显截断；**星系大小**定义为 $I(B)=25\ \mathrm{mag\ arcsec}^{-2}$处半径, R_{25}（NGC7331:$R_{25}=315''$）
- 如果盘内吸收尘埃可忽略，面亮度要比从正向看盘时亮$1/\cos i$倍
- 盘星系面亮度径向分布：**核球**和**盘**部分亮度分解





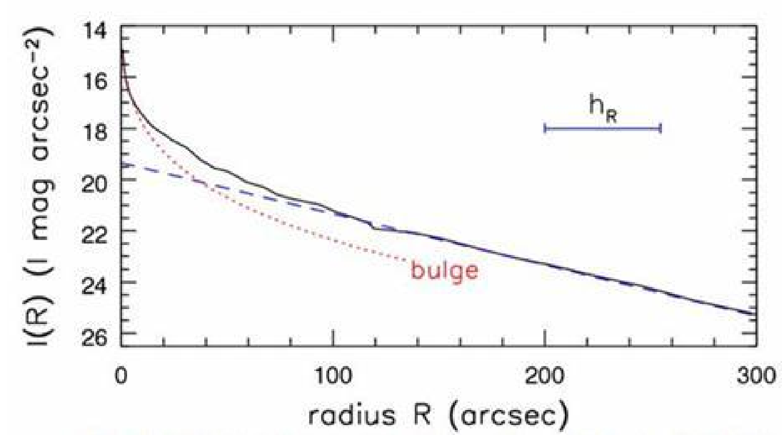


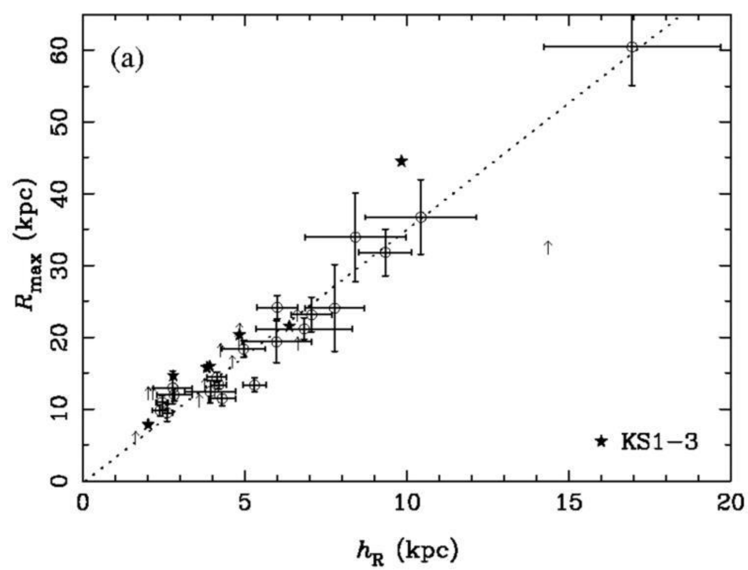
面亮度径向分布——星系盘

- **星系盘**：当对旋臂之类的特征作平均后，面亮度I(R)近似遵循**指数**形式.

$$I(R) = I(0)\exp(-R/h_R)$$

- h_R称为盘的标长，$I(h_R) = 1/e\, I(0)$
- 一般有$h_R \sim 0.25R_{25} \sim 1 - 10\mathrm{kpc}$
- R_{max}：恒星盘指数部分**终止**处半径。$R_{max} \sim 10 - 30\ \mathrm{kpc} \sim (3 - 5)h_R$
- $h_R > R_e$(R_e有效半径；e.g. MW: $h_R \sim 5\mathrm{kpc}$, $R_e \sim 2.7\mathrm{kpc}$)
- 积分光度: $L_{tot}(\mathrm{disk}) = 2\pi h_R^2 I(0)$

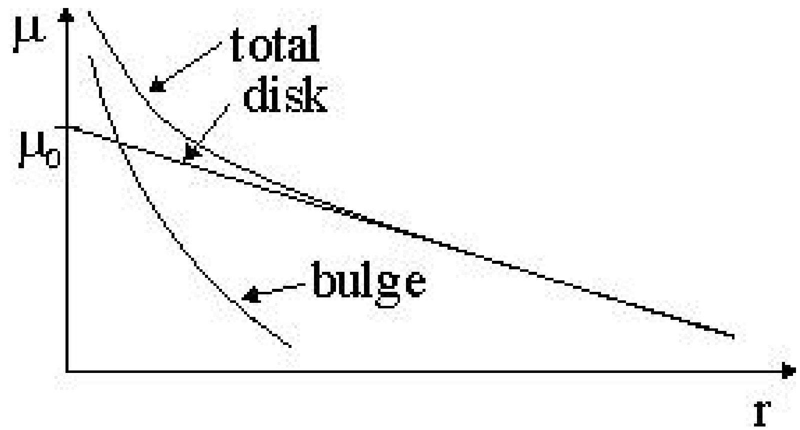




面亮度径向分布——核球

- 星系核球：来自星系中央**核球**的光，使得星系的面亮度I(R)超过指数盘，可用$R^{\frac{1}{4}}$律描述.

$$
\begin{aligned}
I(R) &= I(0)\, exp\left(-7.67\,(R/R_e)^{1/4}\right) \\
&= I(R_e)\, exp\left(-7.67\left[\,(R/R_e)^{1/4}-1\,\right]\right)
\end{aligned}
$$



- R_e，有效半径，包含星系光度1/2的区域大小；$I(0) = I(R_e) * e^{7.67} = 2140\, I(R_e)$
- $R_e \sim 0.5 - 4$ kpc（早型盘星系的核球比晚型盘星系核球更大）

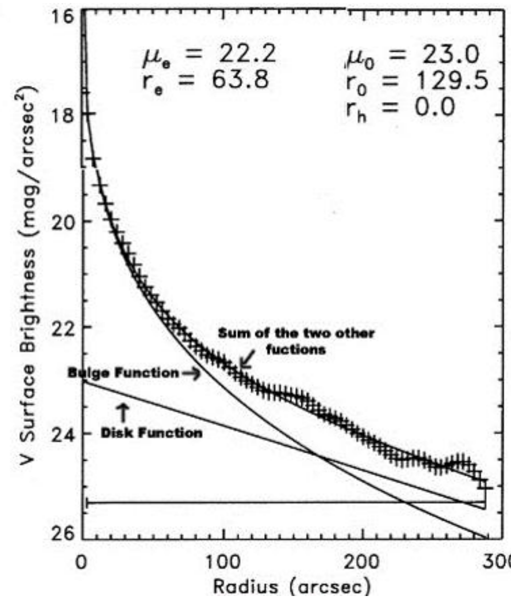
$$
I(r) = I_e \exp\left[-b_n\left(\left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/n_b}-1\right)\right] + I_d \exp\left[\frac{r}{h}\right]
$$

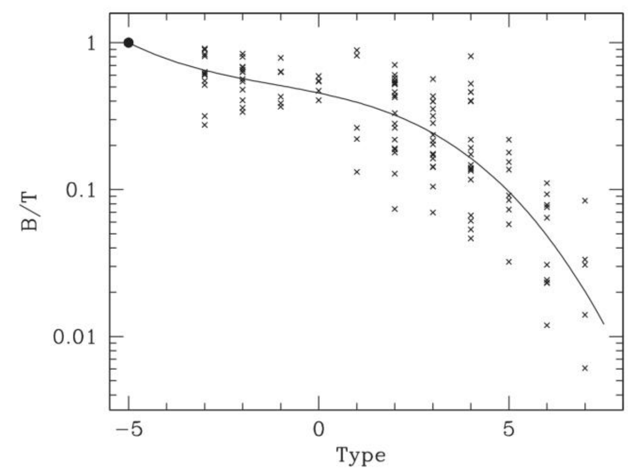
Bulge fraction B/T

- 盘星系总光度可分解为两部分：核球部分利用$R^{\frac{1}{4}}$律拟合，盘部分利用指数函数拟合

$$I(r) = I_e \exp\left[-b_n\left(\left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/n_b} - 1\right)\right] + I_d \exp\left[\frac{r}{h}\right]$$

- 核球对星系总光度的贡献记作B/T
- 盘和核球的光度比记作$\gamma = D/B = \left(\frac{B}{T}\right)^{-1}-1$
  - Bulge/disk ratio
    - **Sa** - tightly wound, large b/d ratio, some gas, steeply rising rotation curves
    - **Sb** - intermediate
    - **Sc** - open spiral arms, lots of substructure, small bulge, lots of gas, slowly rising rotation curves, lots of HII regions
    - **Sd** - no bulge, open arms, lots of HII regions
    - **Sm** - lopsided (like LMC)





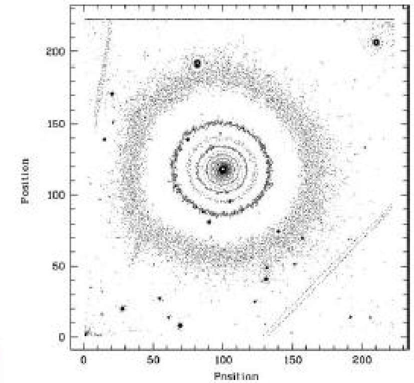
星等 magnitudes

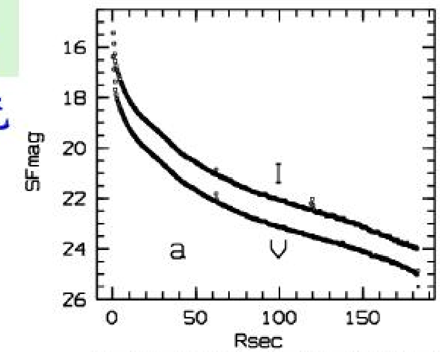
- 如果知道星系的面亮度分布I(R)，对面亮度积分(R from 0 to ∞)，即得星系总视星等

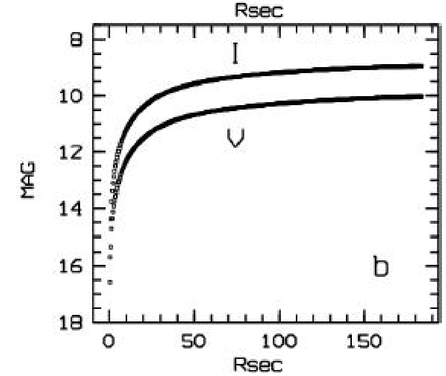
$$m_\lambda = \int I(R,\theta)dA \qquad m_\lambda = 2\pi\int_0^\infty I(R)RdR$$

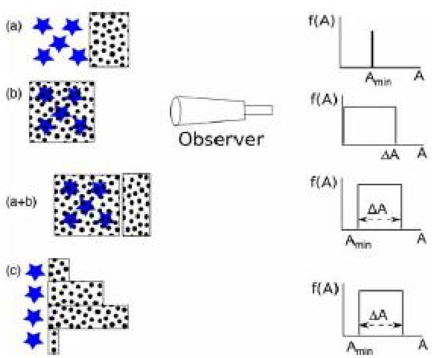
- B_T：B波段观测总星等；B_T^0：B波段总星等，校正了：
  - 银河系前景消光影响，Ag
  - 星系内部消光影响，Ai
  - k-改正：红移使得星系光谱更蓝波段的光进入B波段滤光片，与红移大小和星系谱形状有关

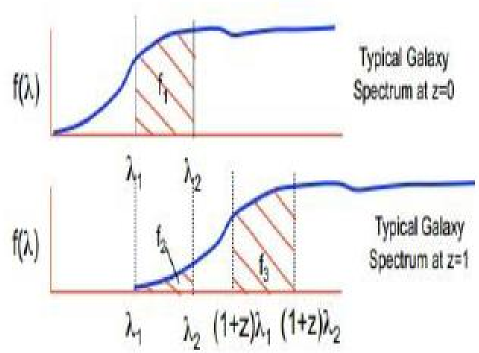
NGC 7331：
$B_T^0 = 9.37$，$V_T^0 = 8.75$







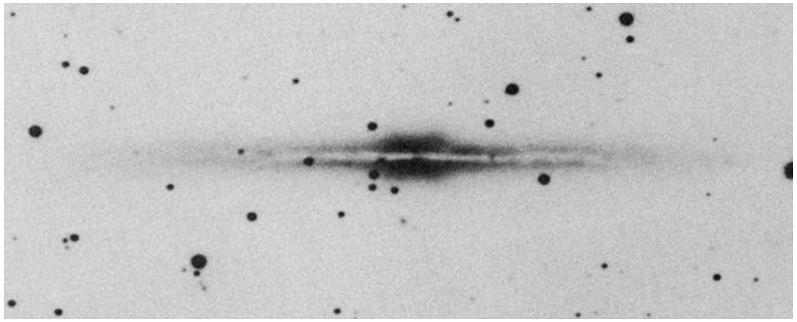




- 测量到某一半径处星系的星等：孔径星等

面亮度垂向分布

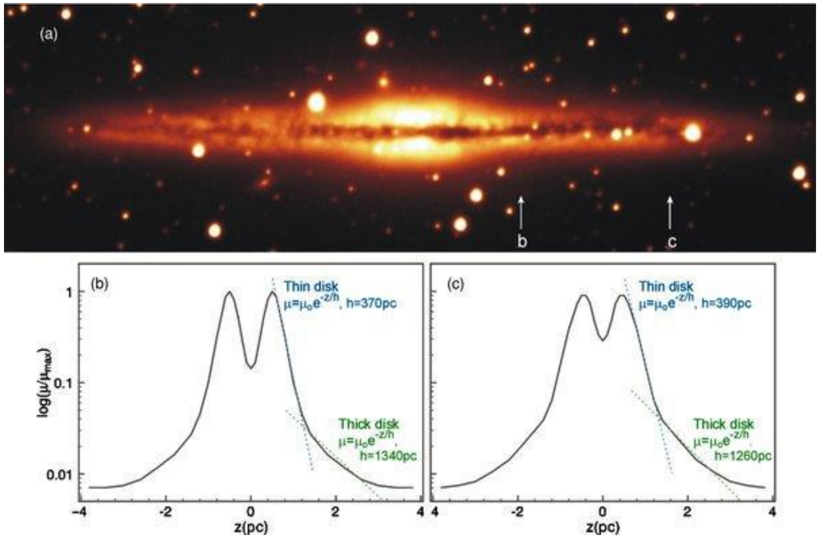
- 侧向盘星系的光学像中，盘的中部有一条薄的**暗尘带**：尘埃处于星系盘**中平面**附近，散射和吸收星光
- z为离星系**中平面**的距离，则在尘埃带的上方和下方，为星系**薄盘和厚盘**

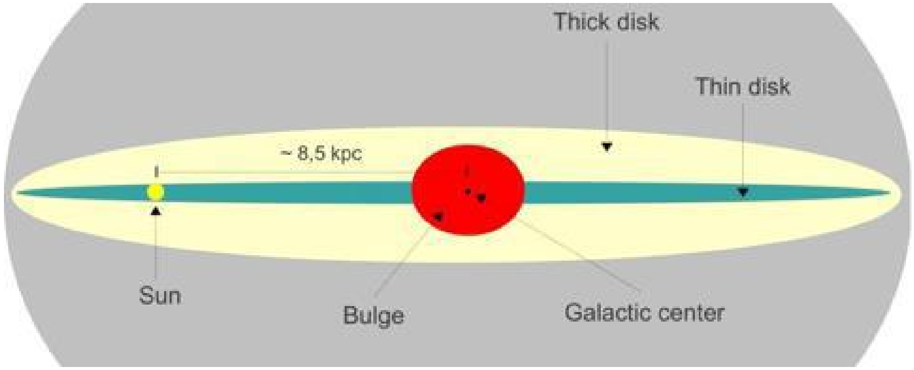


- 它们的面亮度分布，遵循**指数形式**：

$$I(R,z)=I(R)\exp(-|z|/h_z).$$

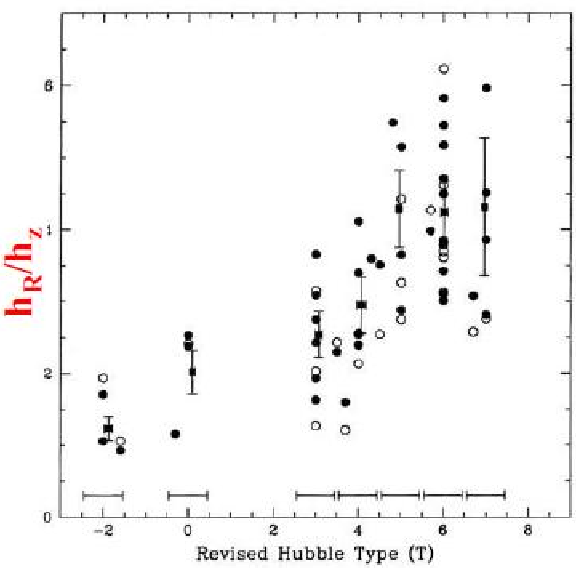
- h_z称为盘的**标高**，$I(R,h_z)\ =\ I(R,0)/e$
- **薄盘**区域亮度下降快，标高h_z小
- **厚盘**区域亮度下降慢，标高h_z大

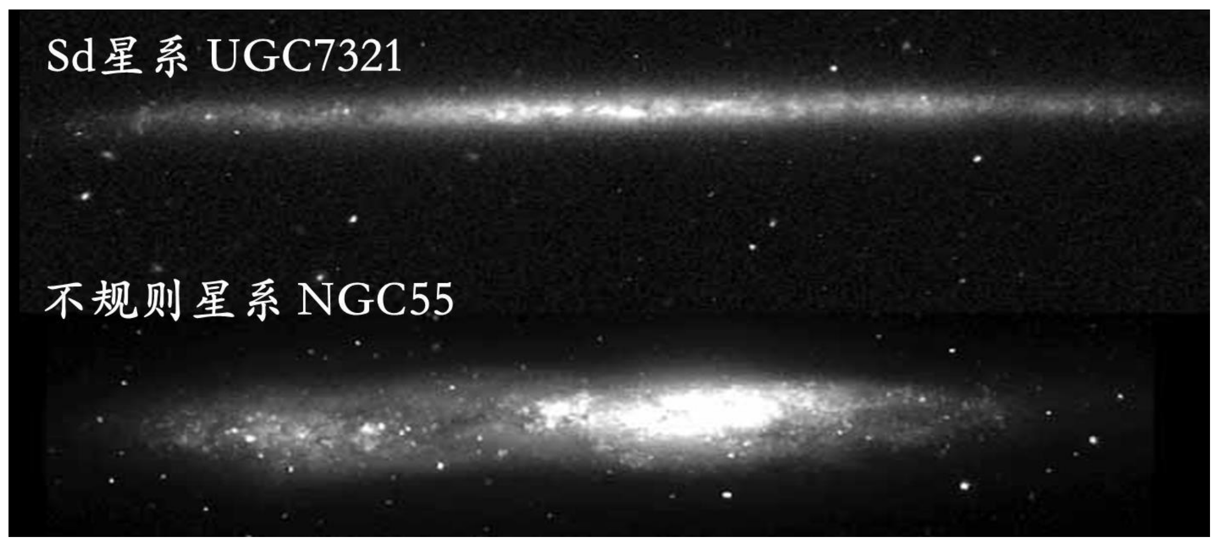




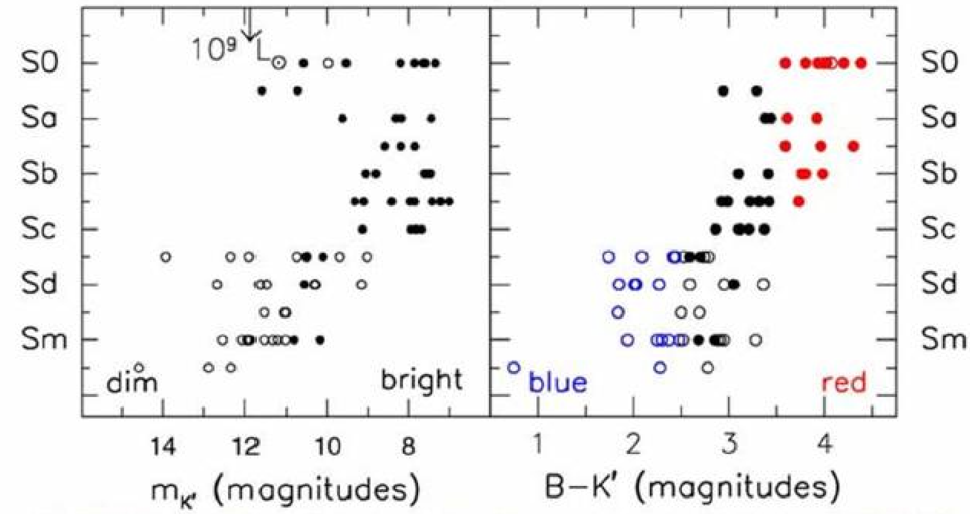
Vertical structure of disks

- h_R/h_z（标长/标高）与星系形态、绝对光度、颜色和气体比例等有关：晚型、颜色蓝、气体丰富的暗旋涡星系的盘更薄
- 盘星系的大部分星光来自星系盘，且有h_z<< h_R：Sc、Sd星系扁平；而在Sm和不规则星系中，盘相当厚而松散



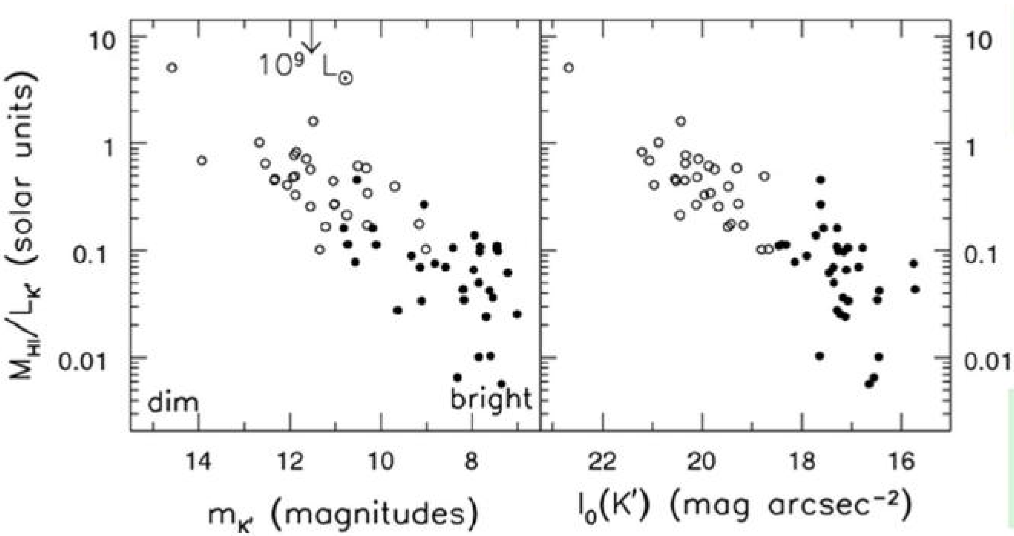


盘星系序列



大熊座星系群中星系视星等$m_{K'}$和B−K′颜色与星系形态关系

从Sa到Sd，星系光度逐渐变暗，颜色逐渐变蓝（年轻恒星比例高）



大熊座星系群中星系的HI与星系的星等和中心面亮度关系

从Sa到Sd，星系中心面亮度逐渐变暗；星系中中性氢气体比例逐渐增加（气体丰富）

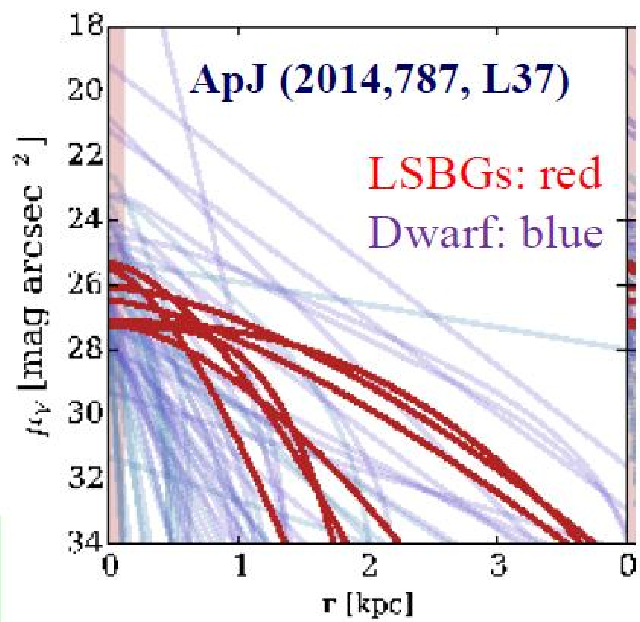
LSBG：低表面亮度星系$I_0(K)$ > 19.5 mag/arcsec^2 (空圆圈)

低面亮度星系

- Low Surface Brightness Galaxy (LSBG)：一般指中心面亮度暗于23 mag arcsec^{-2}（B波段）的星系

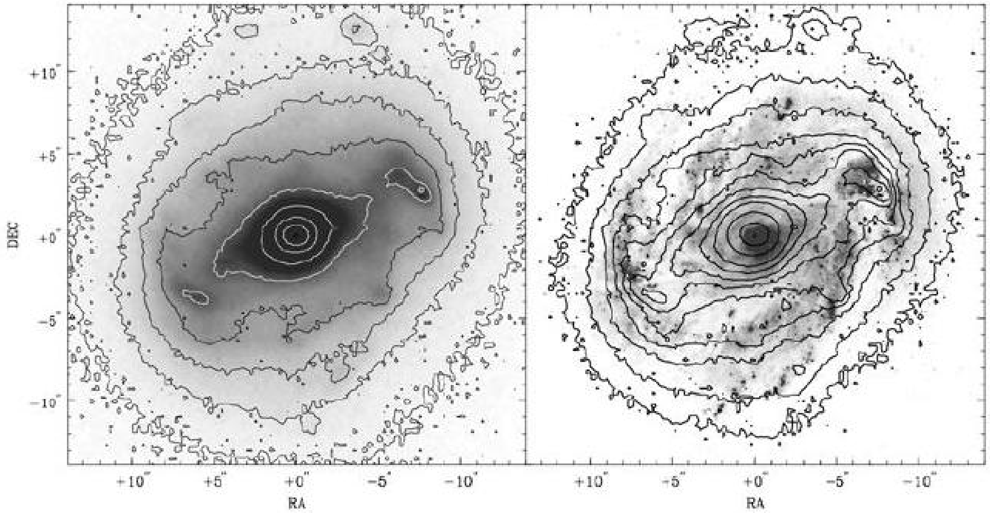
- Malin 1：第一个被观测发现的 LSBG (1986)
  - 最大的LSBGs，直径 D~200kpc (MW 50kpc)
  - $I_B(0) \approx 25$ mag/arcsec^2，盘星系平均值为22

- 多数LSBGs为矮星系。转动曲线显示LSBGs的质光比M/L大，可能的解释有：
  - 恒星气体对星系质量贡献小，暗物质比例大
  - 多为孤立星系：没有和其它星系进行并合和相互作用，恒星形成活动没有被触发
  - 重子物质以气体为主，恒星少：面亮度较暗



低面亮度星系的光度低，内部HI气体比例高：LSBGs与矮不规则星系类似，将气体转变为恒星的效率较低

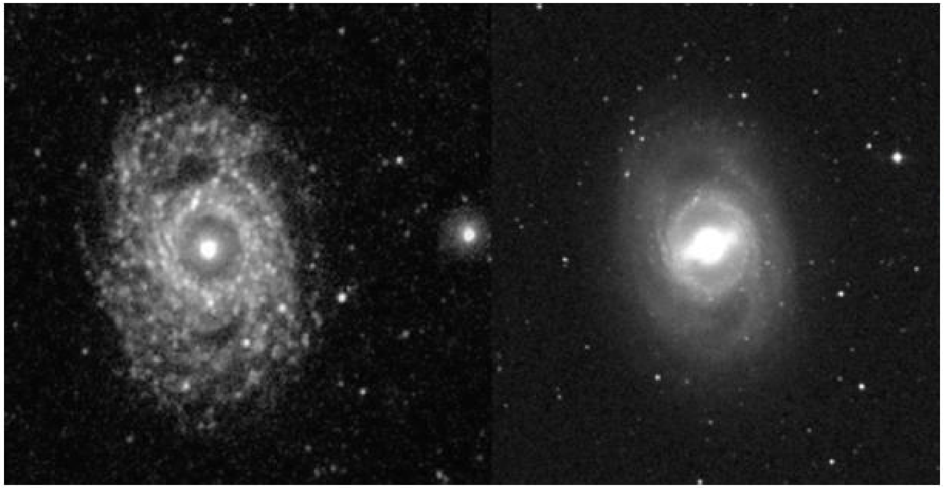
盘星系不同波段面亮度分布



左：星系M100的K波段图像和等照度线，存在一中央棒

右：年轻大质量星周围的Ha发射，叠加K波段等照度线

- 近红外：旋臂较平滑、不突出，年老恒星辐射为主
- 可见光：辐射来自较年轻的恒星，受尘埃影响严重



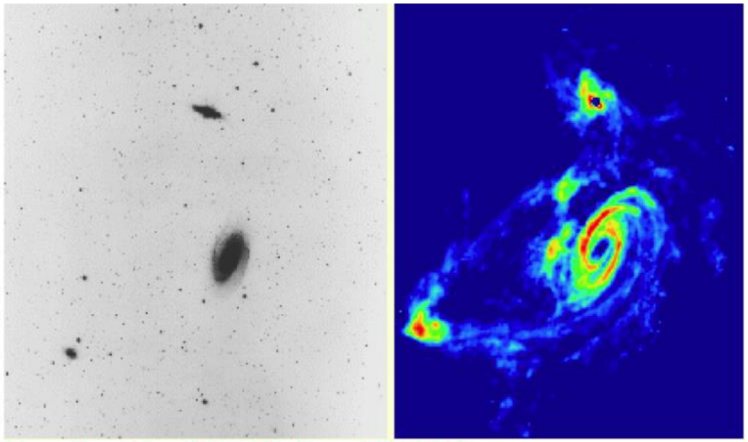
SBb型棒旋星系M95

左：紫外图像，看不见棒；恒星形成→旋臂显示不连续

右：可见光波段，强的中央棒被环和光滑的旋臂围绕着

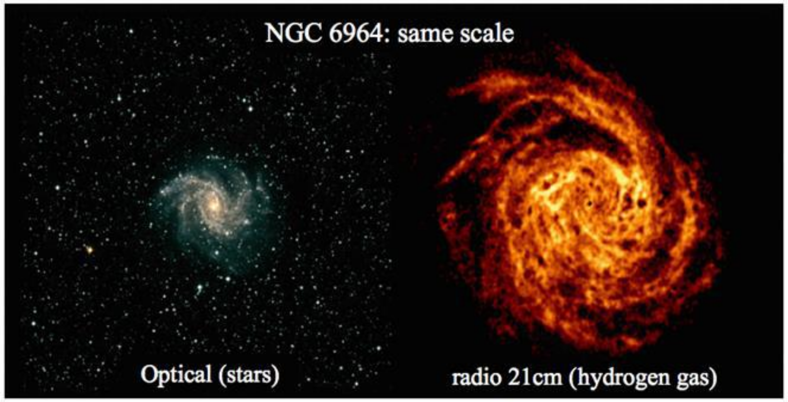
5.2观测气体

HI as an Interaction Tracer



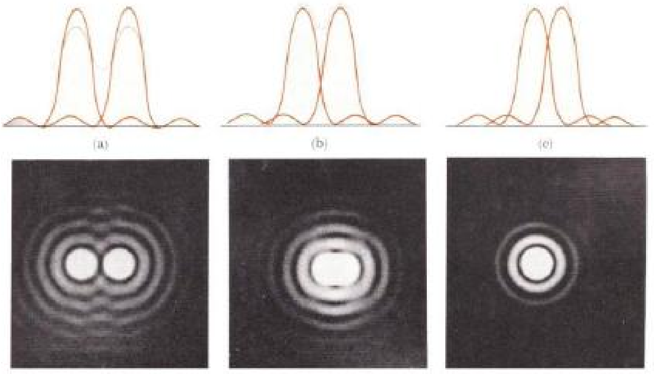
(Yun, Ho, & Lo 1993, Nature, 372, 530)

- 旋涡星系的气体主要位于星系盘上：冷的原子氢和分子氢，是制造恒星的原料
- 盘中气体运动，可以利用HI的21cm谱线多普勒移动，测量气体运动的径向速度
- 如冷气体被热星的紫外辐射或激波电离，可在光学波段看到发射线，例如Ha
- 中性氢在星系中分布，比恒星盘更延展

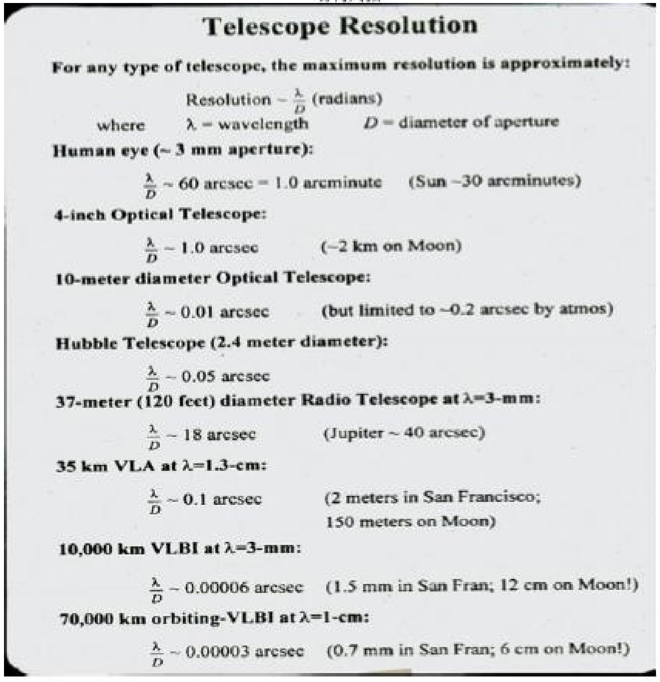


5.2.1 射电望远镜阵

- 望远镜**分辨率**：是指望远镜所能分辨的**最小**的视角。“分辨”的标准为**瑞利判据**.
- 瑞利判据：当一个艾里斑的**边缘**与另一个艾里斑的**中心**正好重合时，此时对应的两个物点**刚好**能被人眼或光学仪器所分辨
- 光学系统分辨率 $\theta = 1.22\,\lambda/D$ (衍射极限)
  - θ的单位是**弧度**；λ是波长，单位m；
  - D是望远镜**口径**，单位也是m.
  - 望远镜的分辨率与观测的**波长**λ（频率）和望远镜**口径**D相关
  - 人眼 $D = 3\mathrm{mm} = 0.003\mathrm{m}$, $\lambda = 6000\text{Å} = 6\times10^{-7}\,\mathrm{m}$, $\theta = 2.44\times10^{-3}$弧度 ~ 1 角分
  - 地面10 cm米光学望远镜 $\theta = 1$ arcsec
  - HST（$D = 2.4\mathrm{m}$）：$\theta = 0.05$ arcsec
  - 射电 $\lambda = 20\mathrm{cm}$; $\theta = 1$ arcsec → **D = 40 km**



瑞利判据



Telescope Resolution

For any type of telescope, the maximum resolution is approximately:

Resolution ~ $\frac{\lambda}{D}$ (radians)

where λ = wavelength D = diameter of aperture

Human eye (~ 3 mm aperture):

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 60 arcsec = 1.0 arcminute (Sun ~30 arcminutes)

4-inch Optical Telescope:

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 1.0 arcsec (~2 km on Moon)

10-meter diameter Optical Telescope:

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 0.01 arcsec (but limited to ~0.2 arcsec by atmos)

Hubble Telescope (2.4 meter diameter):

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 0.05 arcsec

37-meter (120 feet) diameter Radio Telescope at λ=3-mm:

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 18 arcsec (Jupiter ~ 40 arcsec)

35 km VLA at λ=1.3-cm:

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 0.1 arcsec (2 meters in San Francisco; 150 meters on Moon)

10,000 km VLBI at λ=3-mm:

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 0.00006 arcsec (1.5 mm in San Fran; 12 cm on Moon!)

70,000 km orbiting-VLBI at λ=1-cm:

$\frac{\lambda}{D}$ ~ 0.00003 arcsec (0.7 mm in San Fran; 6 cm on Moon!)

综合孔径技术

- 射电波长大约是光学波长的10^5倍，要达到较高空间分辨率，需要增大望远镜直径
- 最大单面可移动射电望远镜（GBT，8500吨，140米高）D～100m；多数D～n×10m：单口径射电望远镜分辨率低
- 综合孔径技术：将多个射电望远镜用电缆连接起来，观测相同的天区，再利用计算机合成，产生天区合成的图像（综合）
- 综合孔径射电望远镜：具有高空间分辨率、高灵敏度、能够成像、适合于探测强度不变的射电源。