

Galactic Astronomy notes

PB21151823 杨景硕

学到一个星系/星团要考虑:

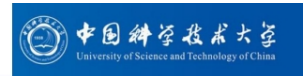
- 整体形态结构
- 不同年龄的恒星组成和分布
- 不同相、不同温度的气体组成和分布
- 恒星形成活动
- 恒星的运动
- 金属丰度

1. Introduction

1.1 恒星

- 恒星特征：光度、亮度（流量）、有效温度、距离、半径
- 恒星光谱：第一激发态的氢原子导致的Balmer跃变和金属导致的4000Å跃变
- 元素丰度
- 赫罗图（HRD or CMD）
- 恒星演化主要受恒星质量影响，化学组成所起作用较小，贫金属星更蓝、更亮、寿命更短
- 超新星的分类：光谱中有氢的吸收线→II型，光谱中没有氢的吸收线→I型
- 双星：密近双星、钱德拉塞卡极限（ $1.44M_{\odot}$ ）、SN Ia
- 光谱观测，热光度观测，特定波长区间观测（滤光片）
- 星等：Vega星等系统，AB星等系统、绝对星等、天体颜色、热改正

星等系统总结



- Magnitude is defined as
$$m = -2.5 \times \log(\text{flux}) + \text{zeropoint}$$
$$m_1 - m_2 = 2.5 \times \log(f_2/f_1)$$
- The Vega system: $m_{\text{vega}} = 0$ in all passbands.
- The AB system (by Oke & Gunn 1983):
$$m_{\text{AB}} = m_{\text{vega}} = 0 \text{ at the V-band}$$
constant zeropoint in f_{ν} (erg/s/cm²/Hz)
$$m = 25 - 2.5 \times \log(f_{\nu}/0.363), f_{\nu} \text{ is given in units of } \mu\text{Jy}$$

A0 V-band: $f_{\nu} = 3635 \text{ Jy} = 0.3635 \times 10^{10} \mu\text{Jy}$

1.2 银河系

- 银河系结构：银盘 disk，旋臂 spiral arm，核球 bulge，银晕 halo，暗物质 dark matter
- 银晕不是球形，而是更接近橄榄球的三轴椭球
- 银河系的恒星运动
- 银河系的星际介质
- 天体辐射过程：
 - o原子离子辐射：复合辐射，光致电离，韧致辐射，碰撞激发，禁线，精细/超精细结构线，H原子21cm线
 - 分子辐射：转动跃迁→射电波段，振动跃迁→红外波段，电子跃迁→光学和紫外波段，CO示踪H₂
- 星际尘埃消光： $\frac{dF_{\lambda}}{dx} = -\kappa F_{\lambda} \rightarrow F_{\lambda} = F_{\lambda,0} e^{-\kappa_{\lambda}(x-x_0)} = F_{\lambda,0} e^{-\tau_{\lambda}}$ ，波长越短消光越严重
- 天球坐标系：
 - 地平坐标系：以地球为中心，地平圈为基本圈，正北方为基本点，顺时针量度为方位角
 - 赤道坐标系：以地球为中心，天赤道为基本圈，春分点为基本点，逆时针量度为赤经。地球自转轴进动引起春分点位移称为岁差
 - 银道坐标系：以太阳为中心，银道面为基本面，银心为基本点，逆时针量度为银经

1.3 河外星系

- 星系研究历史
- 哈勃序列：椭圆星系、透镜星系、旋涡星系、棒旋星系、不规则星系

旋涡/棒旋星系 (S, SB)	椭圆星系 (E)	不规则星系
由恒星和气体构成的扁盘和星系晕。棒旋星系的核心有棒状结构	球形或椭球形，除中心核区外无其他结构	无明显结构
盘包含年轻和年老的恒星，晕只有年老的恒星	光度和质量一般都由年老的恒星主导	包含年轻和年老的恒星
盘包含大量气体和尘埃，晕中的气体和尘埃很少	没有或只有很少的气体和尘埃	富含气体和尘埃
旋臂中有恒星形成过程	近几十亿年没有明显的恒星形成过程	强烈的恒星形成过程
盘中的恒星和气体绕核心作圆轨道运动，晕中的恒星绕核心作无规则运动	恒星绕星系核心作无规则轨道运动，低质量越低的倾向具有越显著的旋转	恒星和气体成分具有较显著的无规则运动

- 星系形态与环境
- 外观受观测波段影响
- 星系测光：面亮度，夜天亮度
- 光度函数：单位体积、单位光度间隔内的星系（恒星）平均数目

1.4 宇宙中的星系

- 哈勃-勒梅特定律：测距离，本动速度，膨胀宇宙，大爆炸宇宙学模型，宇宙年龄
- 宇宙学
- 红移：多普勒红移、引力红移、宇宙学红移
- 前星系时代的宇宙：
 - 普朗克时期 ($T \sim 10^{32} \text{K}$)：时空创生
 - 强子时期 ($T > 10^{12} \text{K}$)：充满可以把任何原子核粉碎为其组成粒子的高能光子，重子（质子、中子）和反重子
 - 轻子时期 ($T = 10^{12} \text{K} - 5 \times 10^9 \text{K}$)：重子和反重子湮灭，留下轻子（光子、 μ 介子、电子、中微子），正负 μ 介子湮灭，中微子与其他粒子退耦
 - 辐射时期 ($T = 5 \times 10^9 \text{K} - 10^4 \text{K}$)：正负电子湮灭，留下光子、中微子和反中微子
 - 早期核合成时期 ($T \sim 10^9 \text{K}$)：大约25%质量计的质子和中子变成氦，多余的质子变为氢原子核，约占总质量的75%
 - 黑暗时期 ($T > 3000 \text{K}$)：高温使得氢和氦处于电离状态，大量自由电子导致光子自由程短，辐射与自由电子强烈耦合
 - 复合时期 ($T \sim 3000 \text{K}$)：光子能量不能电离氢，物质与辐射退耦，宇宙微波背景辐射，星系形成

补充

- 一般情况下，热的、致密的固体、液体和气体产生连续谱，连续谱经过冷的、稀薄的气体后产生吸收线，热的、稀薄的气体产生发射线。但过于稀薄的热气体无法通过辐射冷却，因此无法产生发射线，只能产生吸收线
- 主序星的质量越大，则温度越高，光度越大
- 我们说恒星的金属丰度一般指外层气体的金属丰度，未受到核心元素核合成的影响（强对流使恒星各层物质混合的情况除外），主要由形成它的分子云的金属丰度决定
 - 年老的恒星形成时间较早，宇宙中以氢、氦等元素为主，因此年老的恒星金属丰度较低
 - 年轻的恒星形成时间较晚，宇宙中存在超新星爆发等带来的重元素，因此年轻的恒星金属丰度较高
- 富星系团中最亮星系有大致相同的光度
- 证明星系面亮度公式：

$$I[\text{mag}/\text{arcsec}^2] = M_{\odot} + 21.572 - 2.5\lg L[L_{\odot}/\text{pc}^2]$$

设星系距离为d, [d] = pc, 单位面积内星系的光度为L, [L] = L_{\odot}/pc^2 , 则在距离d处:

$$\text{太阳的视星等为 } m_{\odot} = M_{\odot} + 5\lg d - 5$$

$$1\text{arcsec}\text{对应的尺寸为 } D = \frac{\pi}{180 * 60 * 60} d$$

$$\begin{aligned} \therefore I[\text{mag}/\text{arcsec}^2] &= m_{\odot} - 2.5\lg(L * D^2) \\ &= M_{\odot} + 5\lg d - 5 - 2.5\lg L - 5\lg D \\ &= M_{\odot} - 5\lg \frac{\pi}{180 * 60 * 60} - 5 - 2.5\lg L \\ &= M_{\odot} + 21.572 - 2.5\lg L[L_{\odot}/\text{pc}^2] \end{aligned}$$

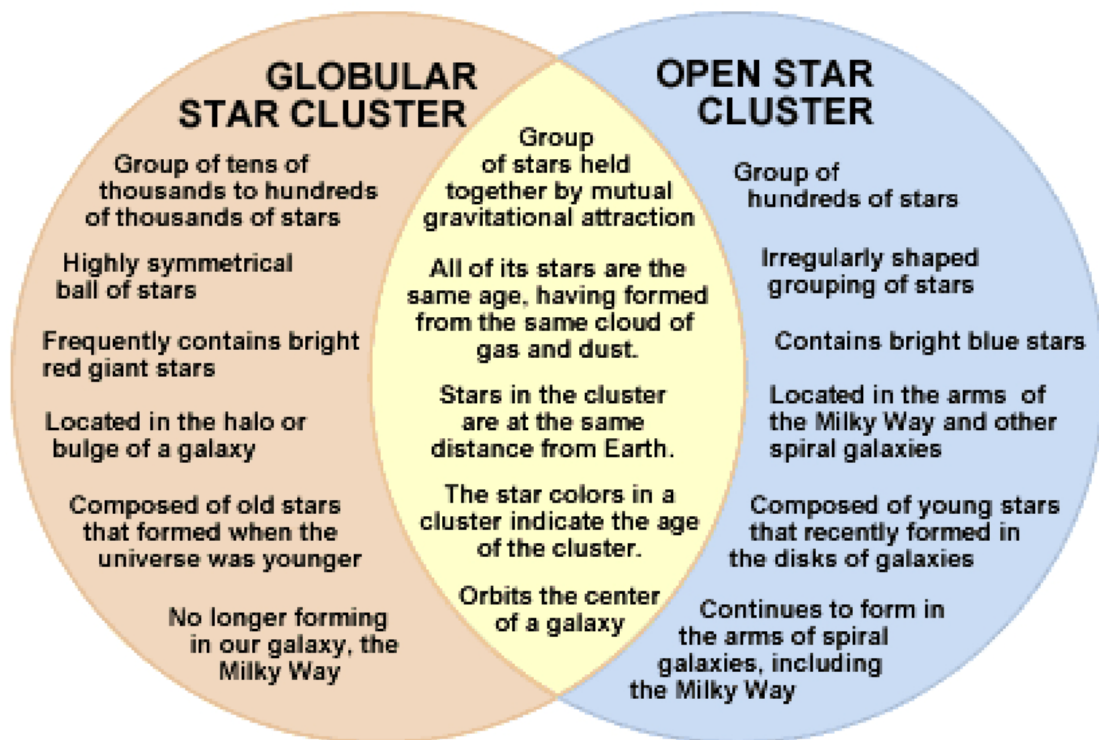
2. Mapping our Milky Way

2.1 太阳的邻域

- 三角视差测距: Hipparcos, Gaia
- 光度函数: 马姆奎斯特偏差
- 恒星对光度、质量的贡献: 稀少的大质量亮星贡献了星系的大部分光度, 但对质量贡献很小; 大量的小质量暗星贡献了星系的大部分质量, 但对光度贡献很小。也适用于星系
- 初始光度函数
- 初始质量函数: 单位体积、单位质量间隔内新形成的的恒星的数目

2.2 银河系中的恒星

- 运动学距离: 利用视向速度 V_r 与切向速度 V_t 的关系计算 V_t , $V_t = \mu \times \text{距离}d$
- 分光视差: 假设具有相同光谱型的主序星光度相同
测光视差 ("poor man"方法): 利用恒星颜色等观测信息, 确定恒星光谱类型
- 银盘的垂直结构: 较老的恒星有较大的标高
- 古尔德带
- 星团: 利用颜色得到年龄和金属丰度, 移动HRD上理论的等年龄线拟合观测, 测量距离
- 疏散星团, 球状星团, 在银河系的分布



- 球状星团测距:
 - CMD方法: 将观测到的星团CMD (HRD) 同恒星演化模型进行比较; 调整假设的距离、年龄和元素丰度, 获得最佳拟合
 - 变星方法: 天琴座RR型变星 ($L \approx 50 L_{\odot}$) 或者造父变星周期-光度关系
- 晕区恒星: 贫金属、年老的球状星团和晕星
- 核球: 红外观测, 恒星金属丰度和年龄范围大, 可能的形成机制
- 核心: 射电或红外观测, 恒星形成受高密度的促进和高温的抑制, 超大质量黑洞
- 银河系中心区域, 有很多超新星遗迹、壳状和纤维状结构; 超大质量黑洞位于中央点状源人马座A*
 - 中心黑洞在星系中很常见, 它们的质量通常占核球的一小部分
 - 黑洞自身不可见, 但是我们可以通过周围的恒星测量它的引力效应

- 地球大气层中的湍流会使任何小于0.5弧秒的细节变得模糊，为了看到距离黑洞足够近的恒星（0.1弧秒），需要自适应光学（AO）来校正大气湍流的影响
- 对银河系中心黑洞质量的最佳估计方法：
 - 附近恒星轨道的红外波段观测
 - 吸积盘或黑洞阴影的射电观测
 - 旋臂中恒星的轨道遵循开普勒第三定律
 - 日冕气体的X射线观测
 - 用旋转曲线研究暗物质

2.3 星系旋转

- 局域静止标准（LSR）：在空间中定义一个点，该点与太阳到银心的距离相同（ $R=R_{\text{sun}}$ ），绕银心做完美的圆形轨道运动
- 银河系的较差自转：离银心较近的恒星（ ω 大）转一圈所用的时间（ $T = 2\pi/\omega$ ），短于较远的恒星
- 测量银河系转动曲线：利用HI的21cm线的多普勒效应， $V_r = R_0 \sin l (\omega - \omega_0)$ 与银经有关
- 切点法：可测量银河系 $R < R_{\text{sun}}$ 的转动曲线
 - 角速度 $\omega = V/R$ 随半径增加而下降
 - 切点T处视线离银心最近， R 最小， V_r 最大， $V(R) = V_r + V_0 \sin l$
- 理解旋转曲线： $V(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$
 - 在银河系内部， M 随半径增加而增加，因此速度可能保持不变，甚至随半径增加而增加
 - 在银河系之外，就像在太阳系中一样，随着 R 的增加， M 保持不变（如果大部分质量终止于可见的边缘），我们预计旋转曲线会类似开普勒运动向下倾斜
 - 旋转曲线显示在圆盘可见边缘（大约 $R=15\text{kpc}$ ）以外的速度没有下降，表明一定存在一些额外的不发光物质：暗物质
- 银河系中的暗物质：存在证据和探测方法

2.4 星际气体

- 星际介质（ISM）：恒星之间存在的星际气体和星际尘埃等
- 运动学距离：利用 V_r 和旋转曲线测距
- 银河系HI和H₂的分布
- 不同相的ISM：从分子到原子到离子介质，温度升高，密度降低，填充因子变大

ISM- Phases (5)

f is the filling factor



- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ◆ Molecular Medium (MM): $T \sim 20 \text{ K}$, $n > 10^2 \text{ cm}^{-3}$, $f < 0.1\%$ <ul style="list-style-type: none"> ◆ MM is mostly cold dense molecular clouds which are gravitationally bound. ◆ this phase contains ~as much mass as the atomic hydrogen, but occupies only a very small fraction of the ISM. ◆ Cold Neutral Medium (CNM): $T \sim 100 \text{ K}$, $n \sim 20 \text{ cm}^{-3}$, $f = 2 - 3\%$. <ul style="list-style-type: none"> ◆ The CNM is distributed in rather dense filaments or sheets, occupying a minor fraction of the ISM. ◆ The CNM is most readily traced by HI measured in absorption. ◆ Warm Neutral Medium (WNM): $T \sim 6000 \text{ K}$, $n \sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$, $f \sim 35\%$. <ul style="list-style-type: none"> ◆ This phase provides the bulk of the HI seen in emission line surveys. | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Warm Ionized Medium (WIM): $T \sim 8000 \text{ K}$, $n \sim 0.2 \text{ cm}^{-3}$, $f \sim 20\%$. <ul style="list-style-type: none"> ◆ associated with HII regions, but a considerable fraction of the ISM ◆ outside of HII regions is also filled with ionized gas. ◆ Hot Ionized Medium (HIM): $T \sim 10^6 \text{ K}$, $n \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $f \sim 45\%$. <ul style="list-style-type: none"> ◆ The hot gas produced by supernova explosions ◆ In spirals, the ISM is filled with this component. |
|---|---|
- Hot ionized medium (e.g. X-rays)
 - Warm ionized medium HII region (e.g. H α)
 - Warm neutral medium (e.g. HI emission)
 - Cold neutral medium (e.g. HI absorption)
 - Molecular medium (e.g. CO)

- 分子氢：恒星形成的材料，尘埃颗粒催化原子合成分子，CO的积分线强度与H₂柱密度成正比 (X factor)
- 原子氢：HI大多光学薄，柱密度与积分线强度成正比，质量与21cm线强度成正比
- 电离氢：HII区 (PDR)
- 金属只占重子质量的1%，但它们主导着大多数重要的化学、电离和加热、冷却过程
- ISM的不同相之间有很强的相互作用，恒星形成和ISM之间有反馈
- ISM的加热和冷却
- 复合时间和冷却时间：高温气体，冷却的更快；高金属丰度，冷却的更快；致密的气体，冷却的更快
- 银河系尘埃：M_{dust}/M_{gas} ≈ 1%，L_{dust}/L_{bol}(MW) ≈ 30%，不同尺寸尘粒的辐射，多环芳香烃 (PAHs)
- 金斯判据
- 恒星形成律 (SF law) : $\Sigma_{SFR} = A \Sigma_{gas}^N$, 即the Kennicutt-Schmidt star formation relation
- SFR指示器
 - SFR指示器从X射线到无线电定义
 - 它们都探测大质量恒星的形成速率
 - 假设IMF和星族合成模型
 - 根据“无偏”指标校准的其他波长，如用H α /Pa比较校正Pa ($\lambda=1.876\mu\text{m}$) 消光

银河系星际介质总结

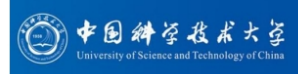


Table 2.4 A ‘zeroth-order’ summary of the Milky Way’s interstellar medium (after J. Lequeux)

Component	Description	Density (cm ⁻³)	Temperature (K)	Pressure (p/k _B)	Vertical extent	Mass (M _⊙)	Filling factor
Dust grains						10 ⁷ –10 ⁸	Tiny
large ≲ 1 μm	Silicates, soot		~20		150 pc		
small ~ 100 Å	Graphitic C		30–100				
PAH < 100 atoms	Big molecules				80 pc		
Cold clumpy gas	Molecular: H ₂	> 200	< 100	Big	80 pc	(2) × 10 ⁹	<0.1%
	Atomic: HI	25	50–100	2 500	100 pc	3 × 10 ⁹	2%–3%
Warm diffuse gas	Atomic: HI	0.3	8 000	2 500	250 pc	2 × 10 ⁹	35%
	Ionized: HII	0.15	8 000	2 500	1 kpc	10 ⁹	20%
HII regions	Ionized: HII	1–10 ⁴	~10 000	Big	80 pc	5 × 10 ⁷	Tiny
Hot diffuse gas	Ionized: HII	~0.002	~10 ⁶	2 500	~5 kpc	(10 ⁸)	45%
Gas motions	$\frac{3}{2} \langle \rho_{\text{HI}} \rangle \sigma_r^2$	$\langle n_{\text{H}} \rangle \sim 0.5$	10 km s ⁻¹	8 000			
Cosmic rays	Relativistic	1 eV cm ⁻³		8 000	~3 kpc	Tiny	
Magnetic field	B ~ 5 μG	1 eV cm ⁻³		8 000	~3 kpc		
Starlight	$\langle \nu h_{\text{p}} \rangle \sim 1 \text{ eV}$	1 eV cm ⁻³			~500 pc		
UV starlight	11–13.6 eV	0.01 eV cm ⁻³					

Note: () denotes a very uncertain value. Pressures and filling factors refer to the disk midplane near the Sun; notice that the pressures from cosmic rays, in magnetic fields, and the turbulent motions of gas clouds are roughly equal.

Disks			
	Neutral Gas	Thin Disk	Thick Disk
M ($10^{10} M_{\odot}$) ^a	0.5 ^b	6	0.2 to 0.4
L_B ($10^{10} L_{\odot}$) ^c	—	1.8	0.02
M/L_B (M_{\odot}/L_{\odot})	—	3	—
Diameter (kpc)	50	50	50
Form	$e^{-h_z/z}$	$e^{-h_z/z}$	$e^{-h_z/z}$
Scale height (kpc)	0.16	0.325 ^d	1.4
σ_w (km s^{-1})	5	20	60
[Fe/H]	> +0.1	-0.5 to +0.3	-1.6 to -0.4
Age (Gyr) ^e	0 to 17	< 12	14 to 17
Spheroids			
	Central Bulge	Stellar Halo	Dark Matter Halo
M ($10^{10} M_{\odot}$) ^a	1	0.1	55 ^a
L_B ($10^{10} L_{\odot}$) ^c	0.3	0.1	0
M/L_B (M_{\odot}/L_{\odot})	3	~ 1	—
Diameter (kpc)	2	100	> 200 ^a
Form	bar?	$r^{-3.5}$	$(a^2 + r^2)^{-1}$
Scale height (kpc)	0.4	3	2.8
σ_w (km s^{-1})	120	90	—
[Fe/H]	-1 to +1	-4.5 to -0.5	—
Age (Gyr) ^e	10 to 17	14 to 17	pre-Galactic?

Table 1. The Galaxy: Some Vital Statistics

Solar Orbit	$V_0/R_0 = 29 \pm 1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ $V_0 = 220 \pm 10 (R_0/8 \text{ kpc}) \text{ km s}^{-1}$ $R_0 = 8.0_{-1.0}^{+0.5} \text{ kpc}$
Mass	$M (<10 \text{ kpc}) = (1.0 \pm 0.2) \times 10^{11} M_{\odot}$ $M (<100 \text{ kpc}) = (7 \pm 2.5) \times 10^{11} M_{\odot}$
Luminosity (bol)	$L = 3_{-1}^{+2} \times 10^{10} L_{\odot}$ $M_V \sim -20.5 \pm 1.0$ $M_H \sim -23 \pm 1$
Stellar Mass	$M_* \sim (4 \pm 2) \times 10^{10} M_{\odot}$
Interstellar Mass	$M_{ISM} \sim (7 \pm 3) \times 10^9 M_{\odot}$ $M_{ISM}/M_* \simeq 0.2$
Total Visible Mass	$M_{vis}/M_{tot} \sim 0.5$ ($R \leq 10 \text{ kpc}$) ~ 0.07 ($R \leq 100 \text{ kpc}$)
Star Formation Rate	$SFR = 2 \pm 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ $SFR/<SFR>_{past} \sim 0.7 \pm 0.3$ $M_{ISM}/SFR \sim 3.5 \text{ Gyr}$
Revised Hubble Type	SB(r)bc pec

Kennicutt 2001, ASPC231,2

^a The total mass may reach $1.3 \times 10^{12} M_{\odot}$ within $r = 230 \text{ kpc}$.

^b $M_{dust}/M_{gas} \simeq 0.007$.

^c The total luminosity of the Galaxy is $L_{B,tot} = 2.3 \pm 0.6 \times 10^{10} L_{\odot}$.
 $L_{bol,tot} = 3.6 \times 10^{10} L_{\odot}$ ($\sim 30\%$ in IR).

^d The scale height of the young thin disk is 50 pc.

^e Age estimates are uncertain; see text.

补充

- 恒星寿命与质量负相关，故可观测到的大质量恒星一般比较年轻，光谱偏蓝；而年老的恒星一般是小质量的，光谱偏红
- 恒星光谱吸收线的宽度反映了恒星的光度，对于给定的光谱型，可以确定主序星的光度，但巨星和矮星的光度离散较大，无法确定其光度
- 对星团或星系发光区域而言（忽略暗物质），M越大，L越大，M/L越小，因为大质量亮星对光度的贡献大于对质量的贡献
对星系群或星系团而言，M越大，L越大，M/L越大，因为有大量暗物质

3. The orbits of the stars

3.1 星系质量测量

- 星系动力学
 - 星系 (和星系的部分) 的基本形态是由恒星的轨道决定的, 例如, 盘状星系是盘状的, 因为大多数恒星在一个平坦的平面上以近似圆形的轨道运行
 - 恒星的轨道由引力势 $\Phi(r, \theta, z)$ 决定
 - 引力势由质量分布 $\rho(r, \theta, z)$ 决定
- 从万有引力定律到泊松方程 (势与密度的关系): 质点, 均匀球, 奇异等温球, Plummer球, Kuzmin盘
- 两条牛顿定理:
 - 第一定理: 密度均匀的球壳, 对位于其内部任意一点处的物体引力之和为零
 - 第二定理: 任何球对称物体对位于其外面任一物体的引力, 等于把其所有质量集中于球心处的点质量对该物体的引力
- 静态引力场中单个恒星能量守恒, 孤立多体系统总能量守恒
- 稳态多体系统满足位力定理, 用于估计星团或星系的质量和质光比

3.2 二体弛豫

- 恒星系统引力势可以分为一个平滑变化的平均成分和每个恒星附近的深势阱
 - 平滑势: 遥远恒星微小拉拽的积累效应
 - 深势阱: 恒星在彼此非常近交会时产生, 在改变恒星运动进程方面更重要
- 强近交会: 强交会半径, 强交会平均时间 t_{close}
- 弱远交会: 垂直速度的改变, 弱交会半径, 弛豫时标 t_{relax}
- 穿越时标 t_{cross} , 直接碰撞时标 t_{direct}
- 对于无碰撞系统 (如星系): $t_{direct} \gg t_{close} \gg t_{relax} \gg t_H \gg t_{cross}$
- 二体弛豫效应: 处于平衡态的系统受到外界瞬时扰动后, 经一定时间必能恢复到平衡态, 该过程称为弛豫
 - 恒星蒸发: 恒星逃逸所需的平均动能, 是每颗恒星动能平均值的四倍, 蒸发时间 (恒星系统丢失其大部分恒星的时标) $t_{evap} \approx 136t_{relax}$
 - 质量层化: 质量大的恒星有向中心集聚的趋势, 小质量恒星则比较多地分布在星团外部
 - 核塌缩: 核半径将收缩到零, 中心密度无限增加
- 弛豫倾向于使不同质量的恒星平均动能相同。

大质量恒星速度减小, 轨道变低, 但新的轨道速度大于原来的轨道速度, 故内部的恒星倾向于持续失去能量;

小质量恒星速度增大, 轨道变高, 但新的轨道速度小于原来的轨道速度, 故外部的恒星倾向于持续获得能量

3.3 盘星的轨道

- 盘星的轨道: 均轮, 本轮
 - 径向运动:
$$a_R = R'' - R\phi'^2 = -\frac{\partial\Phi}{\partial R}(R, z) \rightarrow R'' = R\phi'^2 - \frac{\partial\Phi}{\partial R}(R, z) = -\frac{\partial\Phi_{eff}}{\partial R}(R, z) \rightarrow R = R_g + X\cos(\kappa t + \psi)$$
 - 切向运动:
$$\phi' = \frac{L_z}{R^2} = \frac{\Omega(R_g)R_g^2}{(R_g+x)^2} \approx \Omega(R_g)(1 - \frac{2x}{R_g} + \dots) \rightarrow \phi = \phi_0 + \Omega(R_g)t - \frac{2\Omega(R_g)}{R_g\kappa} X\sin(\kappa t + \psi)$$
 - 垂向运动: $a_z = z'' = -\frac{\partial\Phi}{\partial z}(R, z) = -\frac{\partial\Phi_{eff}}{\partial z}(R, z) \rightarrow z = Z\cos(\nu t + \theta)$

3.4 无碰撞的Boltzmann方程

- 对于星系、星系团和球状星团, 恒星交会不重要: 恒星系统的动力学是无碰撞系统的动力学, 组成系统的粒子 (星系或恒星) 在所有其他粒子产生的平均引力势作用下运动
- 无碰撞Boltzmann方程: 测量太阳附近银盘的质量密度
- 运动积分及其应用

补充

- 均匀球的引力和引力势:

$$F(r) = -\frac{GM(< r)}{r^2} = \begin{cases} -\frac{4}{3}G\pi\rho r \dots\dots r < a \\ -\frac{4}{3}G\pi\rho a^3/r^2 \dots\dots r > a \end{cases}$$

$$\therefore \Phi(r) = \int_r^{+\infty} F dr = \int_r^a F(r < a) dr + \int_a^{+\infty} F(r > a) dr = \begin{cases} -\frac{2}{3}G\pi\rho(3a^2 - r^2) \dots\dots r < a \\ -\frac{4}{3}G\pi\rho a^3/r \dots\dots r > a \end{cases}$$

- For the Plummer sphere, $PE = -\frac{3\pi GM^2}{32a_p}$

4. Our backyard: the Local Group

- 星系群和星系团的区别
- 本星系群的成员星系
- 本星系群的研究意义

4.1 银河系的伴星系

- 大、小麦哲伦云和麦哲伦流
- 本星系群中星系测距，变星的脉动机制
- 矮椭圆星系dE和矮椭圆星系dSph，与球状星团的比较

4.2 本星系群中的旋涡星系

- M31和M33，与MW的比较

4.3 本群星系的形成

- 本群星系的形成
- 银河系形成的塌缩模型：气体云在塌缩时角动量守恒，旋转速度增大，产生的离心力在垂直于旋转轴的平面上抵抗引力的进一步塌缩，使得气体在旋转平面上扩展，而在垂直方向上受到离心力较小的影响，因此可以继续塌缩。
- 银河系的核球恒星
- 星族
- 重元素的增丰，单区瞬时循环模型及其检验
- 贫金属恒星的 α 元素增丰

4.4 本星系群中的矮星系

- LG中的矮星系分布
- 为什么矮星系如此重要
 - 是最早形成的，也是早期宇宙中数量最多的天体
 - 在任何深巡天的微弱星系计数中占主导地位
 - 主导本群星系的光度函数
 - 是更大星系的建构基础
 - 但是它们不包含大部分的恒星和重子物质
- 矮椭圆星系dE和矮椭圆星系dSph，与椭圆星系比较：矮椭圆星系不只是巨椭圆星系的缩小版，它们在表面亮度、速度弥散、有效半径等方面表现出不同的特性和规律
- M32
- 矮不规则星系dIrr，与dSph比较
- 矮星系中的feedback使dIrr向dSph演化
- 本群矮星系的恒星形成历史SFH，Cetus and Leo A
- 本群矮星系的金属丰度，与MW比较

4.5 本星系群的未来

- 本星系群的未来
- 本星系群周围
- 宇宙大尺度结构

补充

- LG中恒星形成最剧烈的区域在LMC内，H α 图像反映恒星形成
- 质量相同的造父变星金属丰度越低，光度越低
- 产额 p ：特定元素丰度、质量为 m 的恒星，向ISM返回的重元素质量与保留在小质量恒星和恒星遗迹中ISM质量之比。依赖于初始质量函数、核燃烧的细节、恒星物质中角动量的分布、金属丰度、恒星磁场以及恒星在密近双星中的比例

5. Spiral and S0 galaxies

- 回顾漩涡星系的基本结构
- 漩涡星系是复杂的系统

5.1 星光分布

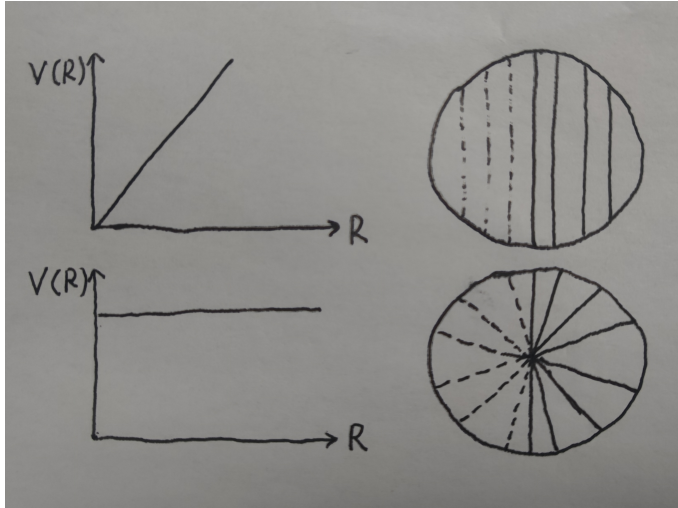
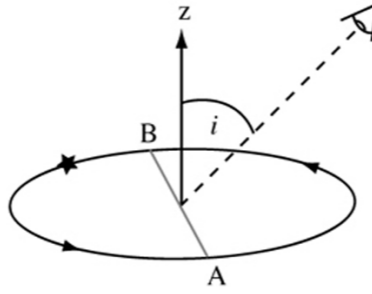
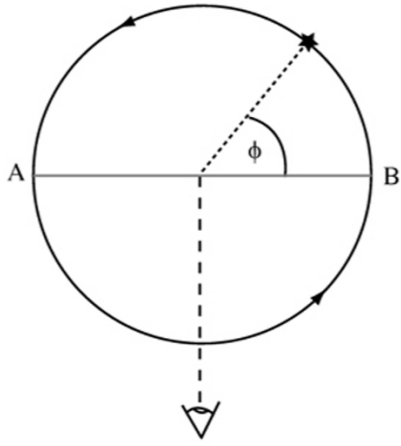
- 盘星系的恒星辐射：主要在能谱的近红外区
- 天文探测器CCD
- 盘星系的倾斜角（假设盘是圆的）：厚度为零，厚度不为零
- 盘星系面亮度：
 - 星系盘的面亮度径向分布： $I(R) = I(0)\exp(-R/h_R)$
 - 核球的面亮度径向分布： $I(R) = I(0)\exp(-(R/R_0)^{1/4})$
 - 盘和核球对总光度的贡献
 - 对面亮度积分 (R from 0 to ∞) 得星系总视星等
 - 面亮度垂向分布： $I(R, z) = I(R)\exp(-|z|/h_z)$
- h_R/h_z (标长/标高) 与星系形态的关系：晚型漩涡星系的盘更薄
- 盘星系序列
- 低面亮度星系
- 盘星系不同波段面亮度分布

5.2 观测气体

- 射电望远镜阵，综合孔径技术
- HI的射电21cm线，HI气体的径向和垂向分布
- HII的20cm射电连续发射和H α 线，电离氢的分布
- CO的mm线，冷分子氢的分布
- 富气程度
- S0星系中的气体：外部俘获？

5.3 盘星系气体运动和质量

- 盘星系转动曲线与光度/星系形态的关系：光度越大的星系旋转曲线上升越快，且最大旋转速度也越大
- 视向速度 $V_r(R, i) = V_{sys} + V(R)\sin i \cos \phi$, 网架图



- 盘星系中的暗物质：光学转动曲线的结果，射电转动曲线的结果，什么是暗物质
- Tully-Fisher relation: 双角形轮廓，估计星系距离

5.4 盘星系序列

- 星系光谱
- 星系特性, Trends along Hubble sequence
- specific star formation rate (sSFR) = SFR/M*, 星系的恒星质量越大, SFR越高 (Main sequence of galaxies)
birthrate (b) = SFR / <SFR> = sSFR × t_H, 盘星系越亮, birthrate越低

Table 5.1 The sequence of luminous disk galaxies

<i>Characteristic</i>	<i>S0–Sa</i>	<i>Sb–Sc</i>	<i>Sd–Sm</i>
Spiral arms	Absent or tight		Open spiral
Color	Red: late G star	Early G star	Blue: late F star
$^a B - V$	0.7–0.9	0.6–0.9	0.4–0.8
$^a u - r$	2.5–3	1–3	1.5–2.5
Young stars	Few		Relatively many
HII regions	Few, small		More, brighter
Gas	Little gas		Much gas
$\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$	$\lesssim 0.05$ –0.1		~ 0.25 to > 1
	Luminous		Less luminous
L_B	$(1-4) \times 10^{10} L_\odot$		$(< 0.1-2) \times 10^{10} L_\odot$
$I(0)$	High central brightness		Low central brightness
	Massive		Less massive
$\mathcal{M}(<R)$	$(0.5-3) \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$		$(< 0.2-1) \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$
Rotation	Fast-rising $V(R)$		Slowly rising $V(R)$

5.5 旋臂和棒

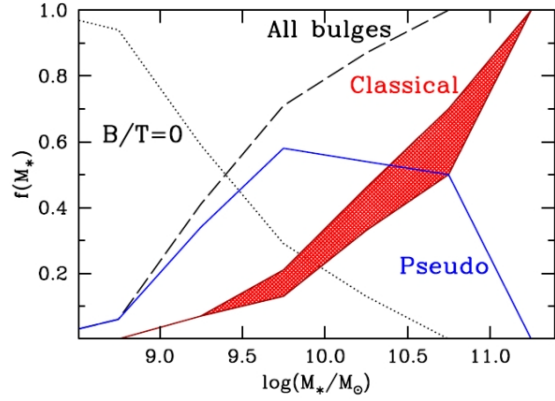
- 旋臂分类 - 结构: 宏象旋臂, 絮状旋臂, 多旋臂
- 宏象旋臂的数学描述, 早期盘星系平均螺距角 (半径R处旋臂与圆的切线之间的夹角) 小 (缠绕得紧)
- 旋臂分类 - 指向: 前导型, 后随型
- 较差转动会使旋臂越卷越紧, 如何解释?
 - 密度波理论解释宏象旋臂的形成和维持: 恒星形成, 运动学旋臂
 - 随机自传播恒星形成模型解释絮状旋臂的形成
- 星系棒, 棒的形成和瓦解

5.6 盘星系核球和中心

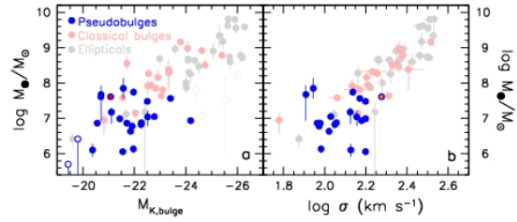
- 核球
- 经典核球: 可能形成于盘星系之间的并合, 并合时标短
伪核球: 形成于盘气体长期向星系中心下落, 长期演化

- ◆ 经典核球
 - ◆ 核球区域明显比盘厚；呈椭球状
 - ◆ 无明显子结构（棒、旋臂、环）
 - ◆ 年老恒星为主（尘埃和恒星形成区少）
 - ◆ 运动学热，恒星速度弥散 σ 大，转动速度小 V_{rot}
 - ◆ 由星系并合形成，形成剧烈，气体通过星暴形成恒星

- ◆ 伪核球（盘状核球）
 - ◆ 存在如核棒、旋臂、环等子结构
 - ◆ 常有尘埃、年轻星族和恒星形成等特征
 - ◆ 运动学冷，恒星的 σ 小， V_{rot} 大
 - ◆ 形成主要是因为恒星盘的不稳定性；为相对连续、平缓的过程



不同质量星系中，经典核球、伪核球、无核球 (B/T=0) 星系的比例 (Fisher & Drory 2011) .



- 核心有丰富的气体和致密的核心星团
- 黑洞
- 运动学方法搜寻黑洞：恒星运动，电离气体，脉泽 (maser) 辐射
- 用吸积盘估计黑洞质量：对于较远的星系，恒星和气体运动已经不能用于测量它们中心黑洞，可以观测宽线区云运动，估计星系中心黑洞质量，气体云运动的越快，发射线越宽，中心黑洞质量越大
- 黑洞和宿主星系的共同演化

补充

- 指数盘的总光度 L_{tot} :

$$L_{tot} = \int_0^{+\infty} I(R) 2\pi R dR = \int_0^{+\infty} I(0) \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) 2\pi R dR = 2\pi h_R^2 I(0)$$

求解指数盘的有效半径 R_e :

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\int_0^{R_e} I(R) 2\pi R dR}{\int_0^{+\infty} I(R) 2\pi R dR} &= \frac{\int_0^{R_e} \exp(-R/h_R) R dR}{\int_0^{+\infty} \exp(-R/h_R) R dR} = \left(\frac{R_e}{h_R} + 1\right) \exp\left(-\frac{R_e}{h_R}\right) = \frac{1}{2} \\ \therefore R_e &= 1.678 h_R, I(R_e) = I(0) \exp(-1.678) \approx 0.187 I(0) \\ \therefore I(R) &= I(0) \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) = I(0) \exp\left(-1.678 \frac{R}{R_e}\right) = I(R_e) \exp\left(-1.678 \left(\frac{R}{R_e} - 1\right)\right) \end{aligned}$$

- 核球的总光度 L_{tot} :

$$L_{tot} = \int_0^{+\infty} I(R) 2\pi R dR = \int_0^{+\infty} I(0) \exp\left(-\left(\frac{R}{R_0}\right)^{1/4}\right) 2\pi R dR = 8\pi R_0^2 I(0) \int_0^{+\infty} e^{-x} x^7 dx = 8! \pi R_0^2 I(0)$$

求解核球的有效半径 R_e :

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\int_0^{R_e} I(R) 2\pi R dR}{\int_0^{+\infty} I(R) 2\pi R dR} &= \frac{\int_0^{R_e} \exp\left(-\left(\frac{R}{R_0}\right)^{1/4}\right) R dR}{\int_0^{+\infty} \exp\left(-\left(\frac{R}{R_0}\right)^{1/4}\right) R dR} = \frac{1}{2} \\ \therefore R_e &= 3461 R_0, I(R_e) = I(0) \exp(-7.67) \approx 4.67 \times 10^{-4} I(0) \\ \therefore I(R) &= I(0) \exp\left(-\left(\frac{R}{R_0}\right)^{1/4}\right) = I(0) \exp\left(-7.67 \left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/4}\right) = I(R_e) \exp\left(-7.67 \left(\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/4} - 1\right)\right) \end{aligned}$$

- 观测波段的波长越长，对望远镜孔径大小（提高分辨率）要求越高，但对镜面精度（粗糙度，防止漫反射）要求越低，因此射电望远镜需要做大，也能做大
- 越晚型的漩涡星系（Sd），原子氢气体相对含量（富气程度）较高，但并未有效转化为分子氢，故分子氢占原子氢的比例较低，消耗其气体速度慢，过去的恒星形成效率较低
- 取银心坐标系 (R, ϕ) ，设初始时刻某恒星的引导中心位于 $(R_g, \phi(0))$ ，则t时刻恒星的坐标 $(R(t), \phi(t))$ 为 $(R_g + X\cos(\kappa t + m\phi(0)), \phi(0) + \Omega(R_g)t)$ ，用 ϕ 表示R，得

$$\begin{aligned} R &= R_g + X\cos(\kappa t + m(\phi - \Omega t)) \\ &= R_g + X\cos((m\Omega - \kappa)t - m\phi) \end{aligned}$$

- 经典核球的表面亮度函数 $n > 2$ ，伪核球 $n < 2$

6. Elliptical galaxies

- 椭圆星系 - 简单 or 复杂

6.1 星系测光

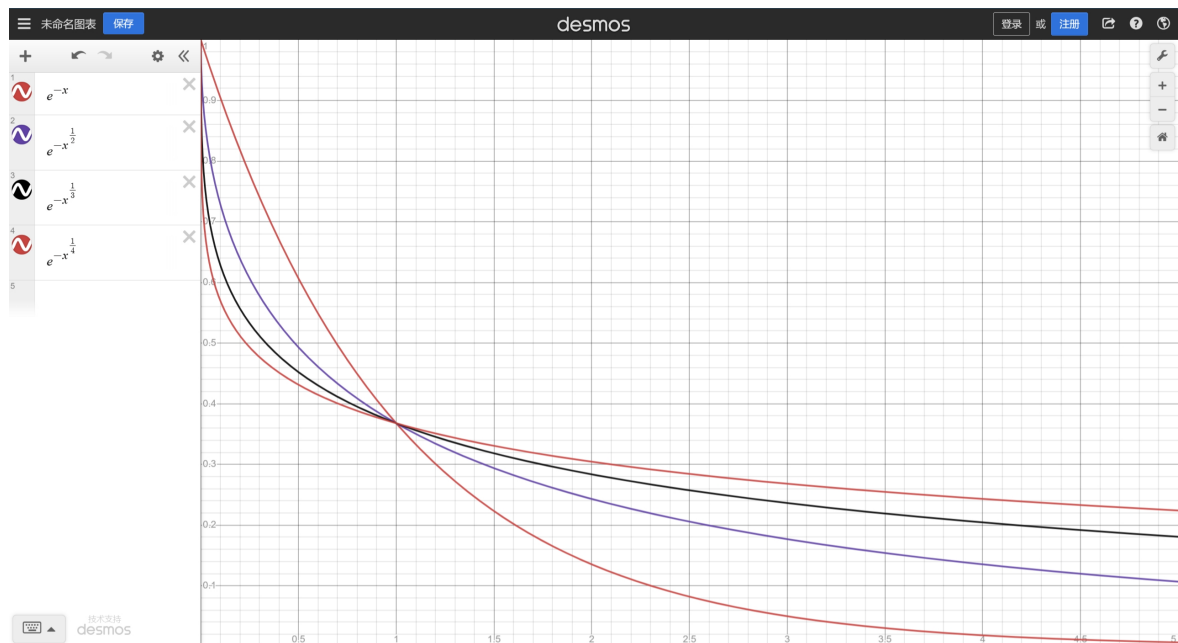
- 椭圆星系的光度分布范围很大，光度基本决定了椭圆星系的性质
 - 巨椭圆星系: $M_B < -20.5$
 - 中等椭圆星系: $-18 < M_B < -20.5$
 - 矮椭圆星系: $M_B > -18$
- 径向面亮度分布服从Sersic's formula:

$$I(R) = I(0)\exp(-(R/R_0)^{1/n}) = I(R_e)\exp(-b((R/R_e)^{1/n} - 1))$$

for $n \geq 1, b \approx 1.999n - 0.327$

极亮椭圆星系 (cD星系) $n > 4$, 巨椭圆星系和中等椭圆星系 $n \approx 4$, 矮椭圆星系 $n \approx 1$

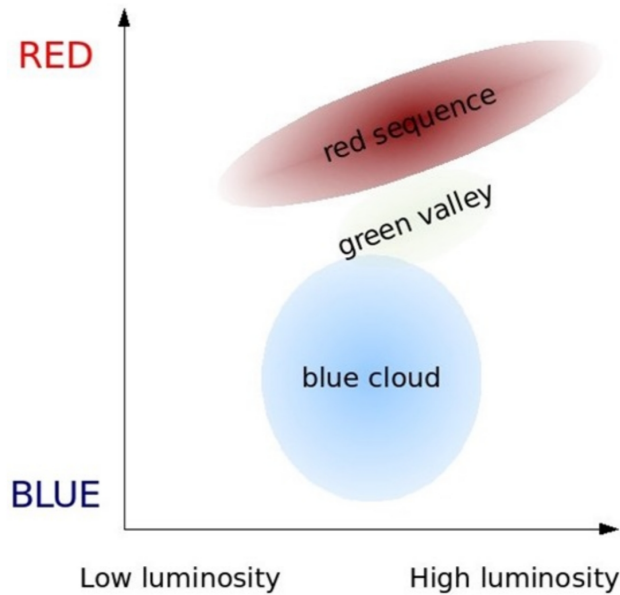
光度越大, 指数n越大, 中心面亮度越陡, 外部越平



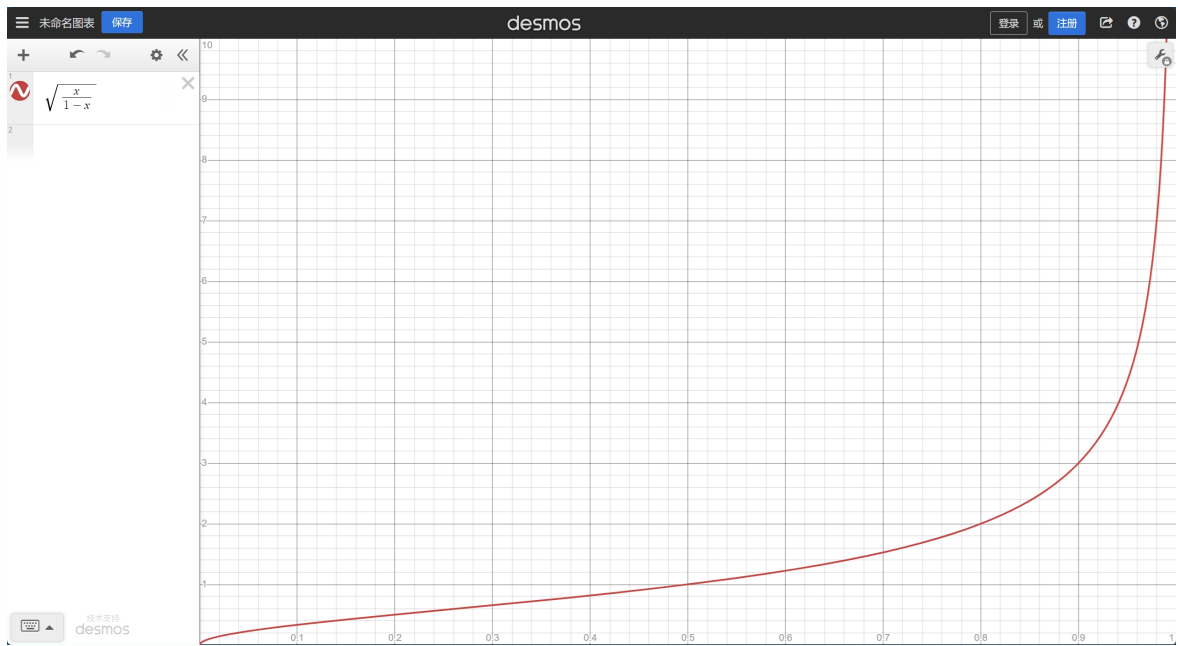
- 特殊椭圆星系: cD (central Dominant) 星系, 有子结构的椭圆星系
- 椭圆星系的中心面亮度、核半径和星系光度密切相关: The Kormendy Relation
 - 巨椭圆星系: 中心暗, 核区大, 可能形成于其他椭圆星系的干并和
 - 中等椭圆星系: 中心亮, 核区小 (无核, 有中央尖峰), 可能形成于其他椭圆星系的湿并和
 - 矮椭圆星系: 中心暗, 核区大, 可能是耗尽气体的dIrr or dS
- 椭圆星系的形状, 视轴比与真轴比的关系: 扁椭圆 $a = b > c$, 长椭圆 $a > b = c$
 - 巨椭圆星系: 视轴比 $q \approx 0.85$
 - 中等椭圆星系: 视轴比 $q \approx 0.75$
- 等照度线扭转:
 - 巨椭圆星系: 盒状 ($a_4 < 0$), 转动缓慢, 速度弥散大, X射线和射电辐射强, 更可能是三轴的
 - 中等椭圆星系: 盘状 ($a_4 > 0$), 转动相对较快, X射线和射电辐射弱, 多为扁椭圆

6.2 恒星运动

- 利用椭圆星系恒星的光谱吸收线测量速度弥散和退行速度
- 椭圆星系存在转动, 但速度弥散更高
- A mock-up of the galaxy color-magnitude diagram with three populations: the red sequence, the blue cloud, and the green valley: most red galaxies are generally Es; blue galaxies are spirals.



- 椭圆星系的某些特性之间存在关系：
 - 两参数关系：光度越高，颜色越红；速度弥散越大，金属丰度越高；光度越高，速度弥散越大（Faber-Jackson relation, or $D_n - \sigma$ relation），两参数关系存在较大弥散
 - 三参数关系：椭圆星系分布在由其有效半径 R_e ，有效半径内的平均表面亮度 $\langle I(R_e) \rangle$ 和中心速度弥散 $\sigma(0)$ 组成的三维空间中的一个平面附近（fundamental plane）， $\log R_e = a \log \sigma(0) + b \log \langle I(R_e) \rangle + const$
- 假设椭圆星系是轴对称的且绕对称轴 z 转动，随机运动是各向同性的，则椭圆星系转动速度最大值 V_{max} 同速度弥散 σ 之比与视椭率 ϵ 之间存在关系： $V_{max}/\sigma \approx \sqrt{\epsilon/(1-\epsilon)}$



- $(V_{rot}/\sigma)^*$ 定义为观测值与模型值的比较
 - 巨椭圆星系： $(V_{rot}/\sigma)^* < 1$ ，转动不重要，速度的各向异性重要，速度的各向异性导致星系扁平
 - 中等椭圆星系： $(V_{rot}/\sigma)^* \sim 1$ ，转动重要，转动导致星系扁平
- 椭圆星系的慢转动显示，星系的剧烈弛豫尚未完成，保留着有关它们形成途径的信息，如可能是星系潮汐俘获产生的运动学退耦核（KDC）：快速转动，反相转动，金属丰度高，有子结构

6.3 星族和气体

- 椭圆星系的光谱金属线较多，4000Å 跃变明显，UV 波段辐射弱
- 椭圆星系星族年老、富金属，与银河系核球相似，与球状星团差别大
- 演化的星族合成方法
- 光度越大的椭圆星系，颜色越红，如何解释？
 - 高光度星系金属丰度更高？√

- 高光度星系星族更年老? ×
- 简并效应: 宽波段颜色无法区分星族的年龄和金属丰度, 如何解简并?
 - 年轻的星族有强的Balmer lines (如H β 、H γ)
 - 富金属的星族有强的金属吸收线 (如Mg、Fe)
 - Lick谱指数
- 椭圆星系的 α 元素增丰
- 椭圆星系的紫外超 (UV upturn) : 热亚矮星, 蓝离散星
- 椭圆星系中的冷气体: 外部俘获?
- 椭圆星系中的热气体: 在X射线波段辐射, 高光度椭圆星系热气体多, 来源
- 椭圆星系的球状星团: 椭圆星系的球状星团数目是光度相同的盘星系的数倍。高光度椭圆星系中的球状星团颜色分布呈双模: 蓝色球状星团金属丰度低, 相对年老; 红色球状星团金属丰度高, 相对年轻

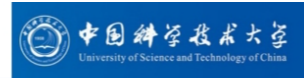
6.4 暗物质和黑洞

- 椭圆星系暗物质晕测量方法: 冷气体 (少数有效), 球状星团, 引力透镜效应, X射线晕 (最有效), 恒星旋转速度 (少数有效)
- 椭圆星系黑洞搜寻非常困难: 非旋转体系, 星系中心光度集中, 投影效应
- 用恒星速度弥散估计黑洞质量, $M_{BH}-\sigma$ 关系: 星系核球区域恒星速度弥散 σ 和星系中心黑洞质量的经验关系。黑洞质量与星系其他特性的关系

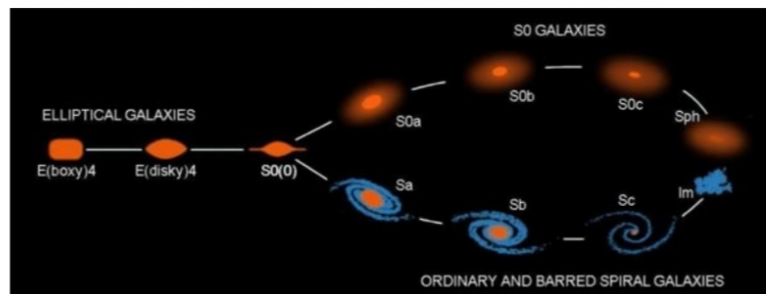
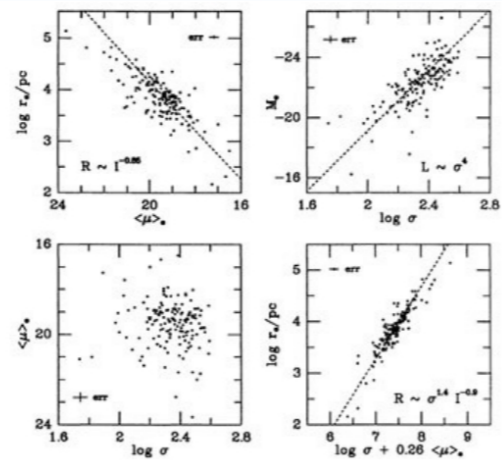
6.5 早型星系的形成演化

- 整体耗散塌缩模型
- 分级并合模型

Two Kinds of Ellipticals : Boxy and Disky



Property	Boxy ($a_1 < 0$)	Disky ($a_1 > 0$)
Luminosity	high : $M_B < -22$	low : $M_B > -18$
Rotation Rate	slow/zero : $(V_r / \sigma) < 1$	faster : $(V_r / \sigma) \sim 1$
Flattening	velocity anisotropy	rotational
Rotation Axis	anywhere	photometric minor axis
Velocity Field	anisotropic	nearly isotropic
Shape	moderately triaxial	almost oblate
Core Profile	cuspy core	steep power law
Core Density	low	high
Radio Luminosity	radio loud and quiet $10^{20} - 10^{25}$ W/Hz	radio quiet $< 10^{21}$ W/Hz
X-ray Luminosity	high	low



补充

- Sersic椭圆星系的总光度 L_{tot} :

$$L_{tot} = \int_0^{+\infty} I(R) 2\pi R dR = \int_0^{+\infty} I(0) \exp\left(-\left(\frac{R}{R_0}\right)^{1/n}\right) 2\pi R dR = 2n\pi R_0^2 I(0) \int_0^{+\infty} e^{-x} x^{2n-1} dx = (2n)! \pi R_0^2 I(0)$$

- D4000越大, 星族越年老

- 年老的星系因大质量蓝星死亡，光谱偏红；但若不考虑星系的恒星组成，星系的金属丰度越高，表明尘埃越多，红化严重，光谱偏红。球状星团由形成于同一时间的同一批恒星组成，且球状星团普遍比较年老，大质量蓝星已经死亡，光谱较红；剩余恒星组成对球状星团光谱颜色的影响较小，更年老的球状星团因形成较早，金属丰度较低，光谱偏蓝（只是在红色中偏蓝）。

7. Galaxy groups and clusters

- 近邻宇宙中多数星系位于星系群或星系团中，星系群和星系团不随宇宙膨胀
- 星系群和星系团中，星系数密度是宇宙平均星系数密度10 - 100倍
- 星系群中旋涡星系和不规则星系多，星系团中椭圆星系和S0星系占主导地位：研究星系形成演化与星系环境关系
- 宇宙中最大的引力束缚体系：可用于研究宇宙的大尺度结构，约束宇宙学参数

intergalactic gas of galaxy groups	intergalactic gas of galaxy clusters
<p>Galaxy groups largely lack this relatively dense hot atmosphere of intergalactic gas. However, far more dilute gas between their galaxies may contain 90% of all the baryons in the Universe. Since this gas is too diffuse to cool by radiation, we can trace it only as it absorbs the light of bright background galaxies.</p> <p>Compact groups have hot intergalactic gas at $T \sim 10^7$ K glowing brightly in X-rays and cool HI gas stripped from the galaxy disks as they came close. Some of the gas clouds were then heated to X-ray temperatures as they ran into each other. Sparse groups' galaxies are connected by long streamers of atomic hydrogen torn from their disks as they passed close to one another. Here, almost all of the gas has remained cool.</p>	<p>Galaxy clusters are filled with hot gas at temperatures $T \sim 10^7 - 10^8$ K, and glow brightly in X-rays. As new galaxies join a cluster they fall in through the hot gas, and its pressure strips away their cool atomic and molecular gas. The HI disks of galaxies in dense regions, such as the inner parts of the Virgo cluster, are much smaller than those further out, since they have lost the cool gas in their outer parts.</p> <p>More luminous clusters contain hotter gas. Because new clumps of galaxies are continually added to a cluster, both its X-ray luminosity and the virial temperature should grow over time. The gas is reheated, perhaps by hot winds from supernovae, or the outflows from radio sources.</p>

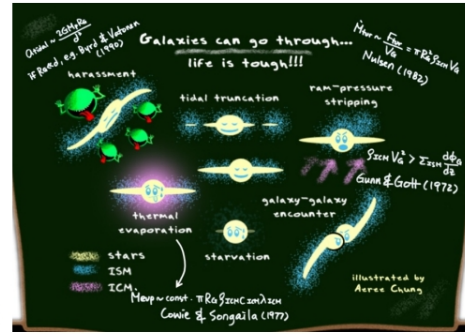
7.1 星系群：盘星系的家园

- 星系群：致密星系群，松散星系群，化石星系群
- 星系群中的气体
- 星系群质量估计：运动学方法（维里定理），热气体方法（流体静力学平衡方程）
- 星系群的质光比
- 星系间近交会：动力学摩擦
 - 星系团中，星系运动快，不大可能彼此减慢到足以变为一个束缚对：会分开，但两者都会留下一些扰动遗迹
 - 星系群中，星系运动较慢，近交会产生的扰乱大得多：处于并合过程中的几乎所有星系都在星系群中
- 星系次并合与主并合
- 星暴星系和亮红外星系（LIRGs）
- 星系群的命运

7.2 富星系团：S0和E的领地

- 星系团：室女座（Virgo）星系团最近，天炉座（Fornax）星系团星系密度最高，后发座（Coma）星系团最亮，英仙座（Perseus）星系团X射线最亮
- Butcher-Oemler Effect：中等红移（ $z \sim 0.3$ ）星系团中心区域蓝星系比例（ f_B ）高于低红移（ $z \sim 0.0$ ）星系团，约束星系恒星形成历史
- 形态 - 密度关系：密度高的区域，早型星系（E/S0）比例高
- 各类型星系在不同环境下的光度函数
- 团星系有更确定的颜色 - 星等关系：星系光度越高，颜色越红
- 越大越亮的星系团：
 - 热气体占比越高，将气体变为恒星的效率越低
 - 热气体温度越高，星系团X射线光度越大
- 星系团热气体来源？星系扰动（harassment），冲压剥离（ram pressure stripping），热蒸发（thermal evaporation），气体反馈（feed back）

- ◆ 富星系团中热气体很多，热气体的来源？
- ◆ 星系扰动 (harassment)：群、团星系成员之间 (多次) 高速、近 (~50kpc) 相遇，剥离星系的恒星和气体 [并合多在星系群中]
- ◆ 冲压剥离 (ram pressure stripping)：星系在星系团内介质 (ICM) 中穿行时，受到介质的拖曳力，气体被剥离。与潮汐作用不同，冲压只作用在气体上 [富团重要]
- ◆ 热蒸发 (thermal evaporation)：ICM 的温度远远高于ISM 的温度，热量从ICM 传递到ISM 中，而使ISM 的温度升高至足够挣脱星系的引力而逃逸
- ◆ 气体反馈 (feed back)：星系中超新星爆发和核区活动星系核的喷流，可将星系中的气体变为ICM [high-z 宇宙重要]



- Galaxy Quenching
- 如何发现星系团：寻找星系过密区，寻找X-ray延展发射源，Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 效应，弱引力透镜
- 星系团组成：重子物质+暗物质，重子物质的贡献主要来自星系之间的弥漫电离气体
- 星系团的质量和质光比

7.3 星系形成：遗传 or 环境？

- 星系分层效应：亮、红星系位于富团的致密区，而恒星形成活跃的盘星系和不规则星系则位于稀疏区；即星系形态-密度关系。如何解释？
 - “遗传”：分层效应是星系团形成时的状态保留到现在而能被观测到（环境密度决定了能形成什么类型的星系），令人困惑
 - “环境”：分层效应是在星系团形成后的漫长时间内成员星系在不同环境下经历各自的演化过程，表现为目前所被观测到的状态（高密度区域盘星系可能并合为椭圆星系）
- 先天的星系形成：
 - 无角动量气体收缩快，较快的消耗完气体和尘埃，形成恒星：椭圆星系
 - 星系形成时，如果气体的角动量较多，不容易坍缩，形成盘：旋涡星系
- 环境影响星系形成：
 - 椭圆星系：富星系团中，星系并合概率大，并合触发恒星形成、快速消耗气体
 - 旋涡星系：星系盘的存在，表明旋涡星系没有发生主并合或受到周围星系强烈潮汐力作用
 - 棒旋星系：数值模拟结果显示，与周围星系的相互作用可以形成棒。棒是潮汐作用的结果
 - 透镜星系：并合过程中，剧烈恒星形成爆发，产生强星风，吹走气体和尘埃，但盘被保留
- 星系团中星系的演化

7.4 星系际暗物质：引力透镜

- 引力透镜效应：当背景光源发出的光在引力场（比如星系、星系团及黑洞）附近经过时，光线会像通过透镜一样，发生弯曲。用于估计质量
- 致密天体的透镜效应：爱因斯坦环，增亮效应

7.4.1 引力透镜：光被致密天体偏折

I: 恒星在像平面上的视位置
L: 透镜源, 质量为M的点状天体
S': 恒星的真实位置
 d_x : 表示各种距离

θ, β, α 为角度: $\theta - \beta$ 真实位置和星像之间的角距离; θ 为S和星像I之间的角距离

爱因斯坦广义相对论: 以距离b从质量M掠过, 其偏折角: $\alpha \approx \frac{4GM}{bc^2} = \frac{2R_s}{b}$ R_s 是史瓦希半径, $R_s = 2GM/c^2$

爱因斯坦环

背景天体十分遥远 (d_x 大), 强引力透镜作用范围小 ($x, y, x-y$ 小): $\beta \approx y/d_s$ ($d_s \gg y$); $\theta \approx x/d_s$ ($d_s \gg x$); $x-y = \alpha d_{LS}$ ($d_{LS} \gg x-y$); 瞄准参数 $b = \theta d_{Lens}$ ($d_{Lens} \gg b$)

$\theta - \beta = \frac{\alpha d_{LS}}{d_s} = \frac{1}{\theta} \frac{4GM}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_{Lens} d_s} \equiv \frac{1}{\theta} \theta_E^2$

θ_E 称为爱因斯坦半径. 透镜源L和星像I之间的角距离 θ , 有:
 $\theta^2 - \beta\theta - \theta_E^2 = 0$ $\theta_{\pm} = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{2}$

$\beta = 0$: 恒星正好在透镜天体后, 在地球上看起来将是一个半径为 θ_E 的光环

观测者、透镜天体、源天体三者完全连成一条直线, 光线从上、下两条路径进入观测者眼中: 观测者到远处天体好像在天空中分裂成两个像

真实空间是三维的: 观测者会看见一个环绕透镜天体的光环, 爱因斯坦环

Various strong lens systems

- 当 $\beta > 0$ 时, 成2个像 (θ_+, θ_-)
 - 在 θ_+ 处的像离透镜较远 $\theta_+ > \beta$, 且处于爱因斯坦半径外面: $\theta_+ > \theta_E$
 - 在 θ_- 处的像离透镜较近 $\theta_- < \beta$, 且处于爱因斯坦半径里面: $\theta_- < \theta_E$

Observer Cluster of Galaxies Background Galaxy

Non-Linear Multiple Images Arcs Weak Shear Linear

Optical Path Wave Front Multiple Image Area

$\beta > 0$ $\beta = 0$

强度放大 (增亮) 效应

- 质点透镜放在一个小亮斑 (星系) 前面, 亮斑的像将变为 θ_{\pm} 的两个斑 (图像)
- 引力透镜效应不改变天体的面亮度: 面元的视亮度与斑 (图像) 的面积成正比
- 源 (星系) 的每个像的视亮度正好正比于它们的面积, 面积的比是:

$$\frac{A_{\pm}(\text{image})}{A(\text{source})} = \left| \frac{\theta}{\beta} \frac{d\theta}{d\beta} \right| = \frac{1}{4} \left(\frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}} + \frac{\sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{\beta} \pm 2 \right)$$

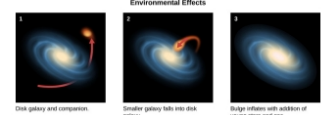
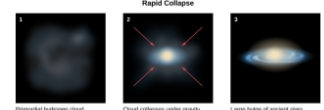
从对称性分析, 面元在环向变化 $x/y = \theta/\beta$, 在径向变化 $\Delta x/\Delta y = \Delta\theta/\Delta\beta$

离L较远的像 θ_+ 总是比源亮, 且在环向延长; 较近的像 θ_- 比较暗: 小亮斑通过引力透镜后, 至少有一个像比源本身亮一亮度增强 \rightarrow 发现高红移星系

- 星系和星系团的透镜效应: 临界密度
- 引力透镜估计质量
- 弱引力透镜: 星系虽然处于星系团后面, 如星系在星系团爱因斯坦半径之外时, 星系的像只会被微弱放大、产生较小扭曲, 没有产生爱因斯坦环或者弧形扭曲那样强烈的形变。用于探测暗物质
- 微引力透镜: 发生在恒星级天体中的一类引力透镜现象, 透镜源天体质量很小, 光偏转小, 难以直接看到微引力透镜所成的像, 只能通过引力透镜的放大效应, 观察天体光度在瞬间增强的现象。用于寻找系外行星

Typical Properties of Clusters and Groups

Property ^a	Rich clusters	Groups and poor clusters
Richness ^b	30-300 galaxies	3-30 galaxies
Radius ^c	(1-2) h^{-1} Mpc	(0.1-1) h^{-1} Mpc
Radial velocity dispersion ^d	400-1400 km s^{-1}	100-500 km s^{-1}
Radial velocity dispersion ^d (median)	$\sim 750 \text{ km s}^{-1}$	$\sim 250 \text{ km s}^{-1}$
Mass ($r \leq 1.5h^{-1}$ Mpc) ^e	$(10^{14}-2 \times 10^{15})h^{-1} M_{\odot}$	$(10^{12.5}-10^{14})h^{-1} M_{\odot}$
Luminosity (B) ^f ($r \leq 1.5h^{-1}$ Mpc)	$(6 \times 10^{11}-6 \times 10^{12})h^{-2} L_{\odot}$	$(10^{10.5}-10^{12})h^{-2} L_{\odot}$
$\langle M/L_B \rangle$ ^g	$\sim 300h M_{\odot}/L_{\odot}$	$\sim 200h M_{\odot}/L_{\odot}$
X-ray temperature ^h	2-14 keV	$\lesssim 2$ keV
X-ray luminosity ^h	$(10^{42.5}-10^{45})h^{-2} \text{ erg s}^{-1}$	$\lesssim 10^{43}h^{-2} \text{ erg s}^{-1}$
Cluster number density ⁱ	$(10^{-5}-10^{-6})h^3 \text{ Mpc}^{-3}$	$(10^{-3}-10^{-5})h^3 \text{ Mpc}^{-3}$
Cluster correlation scale ^j	$(22 \pm 4)h^{-1} \text{ Mpc}$ ($R \geq 1$)	$(13 \pm 2)h^{-1} \text{ Mpc}$
Fraction of galaxies in clusters or groups ^k	$\sim 5\%$	$\sim 55\%$



补充

- 质量为M的星系 II 以速度V经过由质量为m，速度弥散为σ的恒星组成的星系 I 时，会经历动力学摩擦，损失能量和角动量，将一部分向前运动的能量转化为星系 I 内部恒星的运动。考虑星系 I 中单个恒星m对星系 II 的引力，由于V >> σ，假设m静止，与星系 II 的轨道的垂直距离为b，则任意时刻星系 II 受m垂直方向的力为

$$F_{\perp}(t) = \frac{GMm}{b^2 + V^2t^2} \frac{b}{\sqrt{b^2 + V^2t^2}} = M \frac{dV_{\perp}}{dt}$$

故交会发生很久以后，星系 II 的垂直速度为

$$\Delta V_{\perp} = \frac{1}{M} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp}(t) dt = \frac{2Gm}{bV}$$

根据动量守恒，m获得方向相反的速度增量

$$\Delta v = \frac{2GM}{bV}$$

因为M >> m，故小质量天体获得了大部分能量，该能量只能由星系 II 向前运动的能量来提供。

8. The large-scale distribution of galaxies

- 宇宙空间中星系分布非均匀：星系集中在一些巨壁和长条里，有些地方没有星系（巨洞）

8.1 现在的大尺度结构

- 星系红移巡天：CfA2, 2dF, SDSS, etc
- 星系分布与星系特性有关：红星系成团性要比右边的蓝星系强，同星系的形态 - 密度关系一致。可能源于选择效应
- 星系成团量度：两点相关函数，功率谱，密度涨落

8.2 宇宙学观测基础

- 奥尔伯斯佯谬
- 宇宙学原理

8.3 均匀宇宙的膨胀

- FRW度规，空间曲率
- 共动坐标系，标度因子，哈勃参数：物理距离 $r(t) = \text{标度因子}a(t) * \text{共动距离}r(t_0)$ ，哈勃参数 $H(t) = (1/a) * da/dt$
- 宇宙学红移，宇宙密度演化，二者的关系
- 三种距离：proper distance $r(t_e)$, comoving distance $r(t_0)$, distance light travelled during its journey $r_{lbt} = c * (t_0 - t_e)$. $r(t_e) < r_{lbt} < r(t_0)$.
- 回溯时间，星系的年龄

8.4 星系特性与红移的关系

- 光度距离，角直径距离，与红移的关系
- 高红移星系的面亮度
- 宇宙膨胀对星系能谱的影响，K改正
- 测光红移
- 星系空间密度，与红移的关系

8.5 结构增长：由小到大

- 宇宙微波背景辐射的涨落，重子声波震荡
- 星系的本动，红移空间畸变：
 - 小尺度区域（靠近星系团中心处）：已经达到位力平衡，弥散速度造成的红移和蓝移，上帝的手指
 - 大尺度区域（星系团外围）：没有达到位力平衡，外围的星系向星系团中心下落，Kaiser Effect

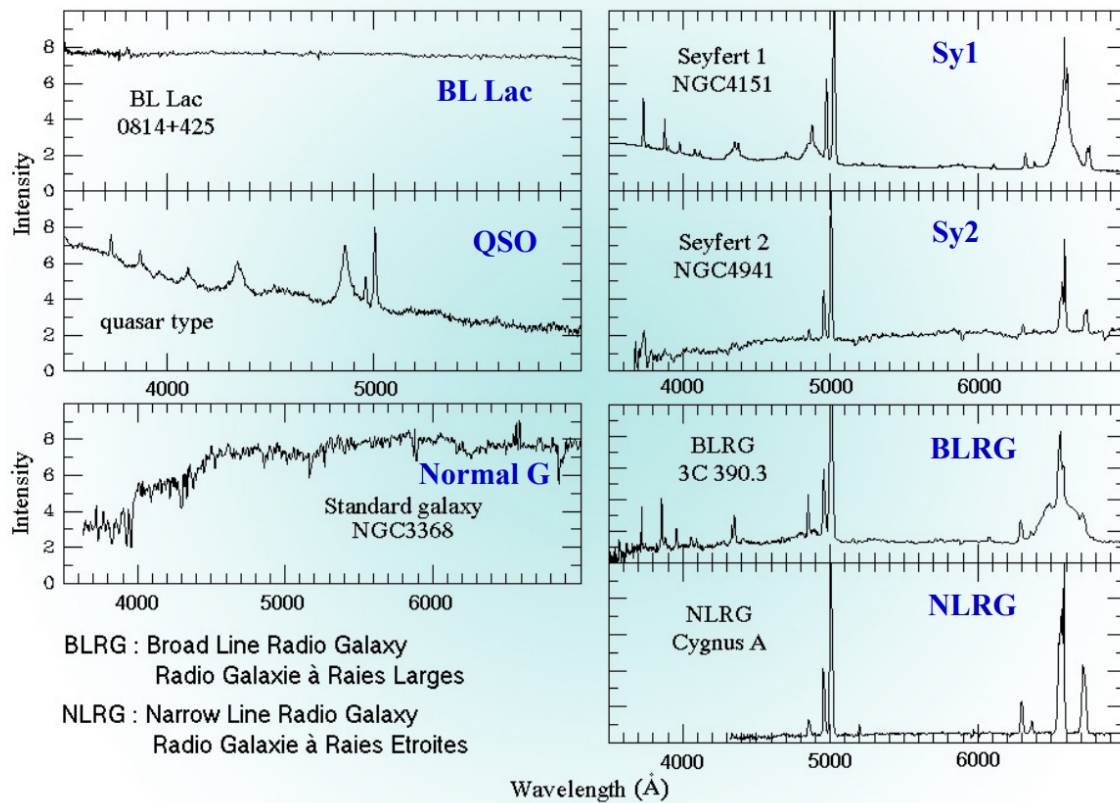
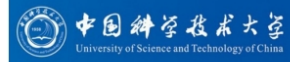
9. Active galactic nuclei and the early history of galaxies

- AGN和正常星系的区别
- AGN的研究意义

9.1 活动星系核分类

- 活动星系核的观测特征和分类依据
- 赛弗特星系 Seyfert: 宿主星系多为漩涡星系。Seyfert 1 允线较宽，禁线较窄；Seyfert 2 允线和禁线都较窄
- 射电星系: 宿主星系多为椭圆星系。分为宽线射电星系 (BLRGs) 和窄线射电星系 (NLRGs)
 - 射电形态分类: 致密型射电光度低，平谱；双瓣型射电光度高，陡谱
- 类星体 QSOs: 宿主星系形态多样。10%为射电噪；90%为射电宁静
- 耀变体 Blazar: OVs 和 BL Lac, 快速光变
- 低电离核发射区 LINERs, 利用BPT图区分
- AGN中的喷流: 视超光速运动，多普勒增亮

AGNs光谱



9.2 活动星系核模型

- AGN能源: 中心超大质量黑洞吸积周围物质，气体通过吸积盘进入黑洞，释放引力能
- 爱丁顿光度: 球对称条件下，天体辐射压力不超过引力时的光度上限
- 吸积盘模型:
 - SSD: 几何薄，光学厚，辐射谱为黑体谱
 - ADAF: 几何厚，光学薄，辐射谱为幂律谱
- AGN统一模型: 不同类型AGN由于观测取向、射电强弱、光学光度的差异引起
- AGN形成

9.3 星系际气体 IGM

- 类星体吸收线:
 - 本征吸收线: 起源于QSOs附近的介质和QSOs的物质外流
 - 插入吸收线: 产生于星系际介质, 红移比类星体低
- 阻尼赖曼 α 系统
- 赖曼 α 森林系统
- 赖曼系限系统
- Gunn-Peterson效应

9.4 高红移星系

- Why?
- How?