



— 广东实验中学天文社 —



DO NOT GO GENTLE
INTO THAT GOOD NIGHT.

星系物理 Galactic Physics

2024 春 汤柏添

21305337 黄日

主要参考资料:

[1] 汤柏添老师的课件与课堂

[2] L. S. Sparke and J. S. Gallagher, III. Galaxies in the Universe An Introduction (second edition)

光度 Luminosity	辐射功率	$[\text{erg/s}]$
流量 Flux	单位面积 接收功率	$[\text{erg/s/cm}^2]$
辐射强度 (辐射率) Intensity	单位立体角 单位面积 接收功率	$[\text{erg/s/cm}^2/\text{sr}]$

关系: $F = \frac{L}{4\pi r^2}$

Tip: 类太阳恒星, 大部分辐射 ($\int L d\tau$) 在红巨星阶段; 大质量, 主序。

恒星的金属丰度.

— 符号约定:

$$[A/B] := \log_{10} \frac{A_*/A_\odot}{B_*/B_\odot}$$

— $[\text{Fe}/\text{H}]$ 常用于表示重元素丰度。

— 丰度低 $\rightarrow$ 不透明度 κ 低 $\rightarrow$ 更蓝 (解光球层更厚)
 $\rightarrow$ 寿命更短.

两套星等系统

— Vega system.

定义 Vega (Type A0V) 在所有 filter 的星等均为 0.
需要在 mag-Flux 公式中为每个波段定义零点.

$$m_{\lambda} = -2.5 \log F_{\lambda} - Z_{\lambda}$$

— AB system (基于流量的)

直接将零点固定为 Vega system 中 V 波段的零点, 即取 $m_{V, Vega} = 0$.

热改正 (Bolometric Correction)

热光度: 所有波长积分的总光度.

热改正: 把 M_{λ} 换算成 M_{bol} .

$$M_{bol} = M_v - BC$$

也有 +BC 的. M_v 用得最多, 但其它波段也有!

不同光谱型、光度型的恒星, BC 不同.

氢的辐射

① 电离氢区 — 复合线

O B 型星 UV 光子电离附近的 H 原子, 产生一片电离氢区 (斯特龙根球)
Strömgren sphere.
(光致电离).

② HI 区 — 21 cm 谱线 (超精细) / 精细

禁戒跃迁及禁线. 是电四与磁偶 (一般谱线都是电偶极辐射, 满足 Selection rules)

特点: ① 亚稳态, 时标很长 (需要低密度)

② 跃迁概率极小 (需要大量样本)

Tip: 禁线标识是方括号, 如 $[OIII]$ 有

$\lambda = 5007 \text{ \AA}$ 绿线

精细: 电子的 l 与 s 耦合, 远 UV 外为主.

③ 分子云

分子能级跃迁
(往往有分子带)

电子跃迁 (主要 UV & Opt)
转动跃迁 主要 Radio
振动跃迁 主要 Infrared.

示踪分子 (与 CO, HCN, NH_3 , H_2O 成协)

Tips: H_2 没有电偶极辐射; 两个氢原子无法直接合成 H_2 , 需要做催化剂, 因为直接合成需要放出电偶极辐射

尘埃消光 硅酸盐 碳粒, 典型温度 $10 \sim 20 K$.

消光 (extinction)

$$A_x = (m - m_0)_x > 0$$

消光前星等

红化 (reddening) 即 色余 (color excess)

$$E(x-y) = A_x - A_y$$

消光与红化之比 与尘埃性质有关. 例如
银原子 ≈ 3.1 (Snedden et al 1978).

— 可用 21cm 线估算消光 (高银纬气尘比固定)

④ 椭圆星系.

ellipticals

$$\text{椭圆率 } n = 10 \cdot \frac{a-b}{a}$$

BCG: Bright Central Galaxy

星系团中 (一个或几个) 最亮的星系

种类

— cD 型 (巨椭圆星系) $> 100 L_{\text{Milky}}$

— 普通椭圆星系 $\sim$ 几倍 L_{Milky}

— 暗矮椭圆星系 $L \ll L_{\text{Milky}}$

有较多 旋转变运动, 不同于较多随机运动的
亮椭圆星系。

⑤ 旋涡星系

(SBa $\rightarrow$ SBc 棒状) $\rightarrow$

Sa $\rightarrow$ Sc / Sd / Sm 中心区小, 旋臂开展, 松散,
气体比例上升

几乎看不到核球

旋臂类型

— 宏象 (grand design)

明显的

— 絮状 (flocculent)
(feathered spiral)

多斑块状的

旋涡星系的谱线特征: 强发射线, 弱吸收线
(或谱带)

Tip: 不规则星系占 $1/4$, 质量不大, 年轻星族为主.

星系测光

- 星系的面亮度 单位: $\text{mag}/\text{arcsec}^2$
 L_0/pc^2

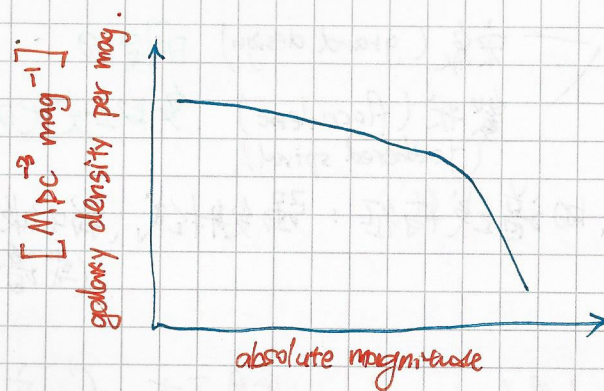
—— 通常选择 B 波段等照度线 (isophotes) 作为测量半径 R_{25} .

—— 有效半径: 面亮度一半,

- 夜空亮度

- 河外星系漫射光 (遥远、暗弱的)
- 未识别的河内恒星星光.
- 黄道光
- 大气红外辐射

- 光度函数 luminosity function



近似 Schechter function

$$\phi(L) dL = \phi^* \cdot \left(\frac{L}{L^*}\right)^\alpha \exp\left[-\frac{L}{L^*}\right] \frac{dL}{L^*}$$

光度函数的测量

- 样本: — 星系团样本: 在星系团中测量, 距离相同.
—— 场星系样本: 需要引入 V/V_{max} 修正.

修正 Malmquist bias (倾向探测到亮的物体).

其它困难: 分辨双星、面亮度太低的星系也不易分辨

银河系

恒星巡天: Hipparcos: 12 mag effective distance ~ 1 kpc
 GAIA: 20 mag ~ 1 Mpc
 (也有恒星巡天)

(spectroscopic parallax)

Tip: 分光视差 指的是用光谱型(主序)与视星等测量距离。

	星族	$[α/Fe]$
薄盘 $h \sim 400 pc$	有同年龄的	低
厚盘 $h \sim 1 kpc$	年老	高

pseudo budge 富金属

classical budge 贫金属

SN II 抛出大量 $α$ 元素?

银河 bar + budge = peanut.

核球星族: 高核球越老, 金属丰度越富,
 核球中很多恒星 $\sim 10 Gyr$.

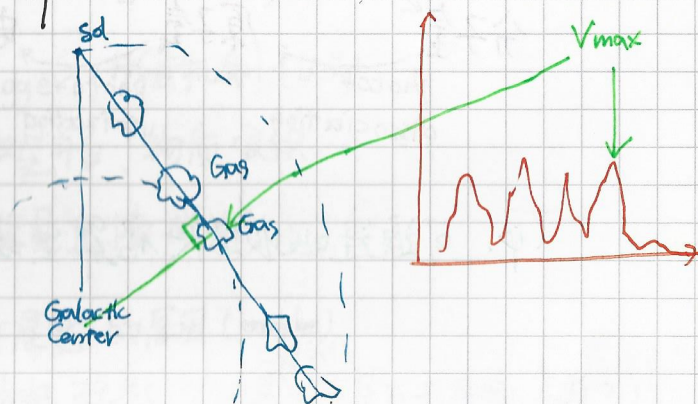
Gould's belt 跨度 $\sim 1 kpc$, 与银盘夹角 16° ,
 有大量 O B 星,
 起因可能是 暗物质泡 与 分子碰撞.

星团测距: red clump / HB / MS.
 RR Lyr / Cepheid / other variables.

Galactic Rotation.

银河系较差自转的测量.

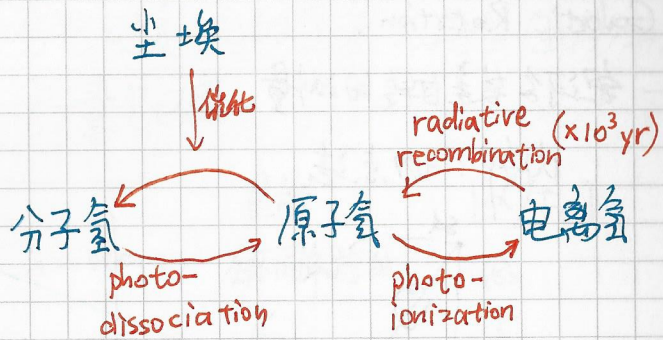
内部: 切点法.



外部: 分子云中年轻恒星
 主序的分光视差测距
 Doppler effect.

星际介质

银河系中，中性氢比分子氢分布更广。
银心附近二者都没有。



Tip. 可通过吸收波长估算尘埃大小

星团

分类	GC	年轻	引力束缚	质光比	位于	恒星数
	OC	年轻	弱	小	晕或核球	$\times 10^{4-5}$
	星协 (stellar association)				旋臂	$\times 10^3$

质量偏小，更疏散的星团
银河系不再含OC.

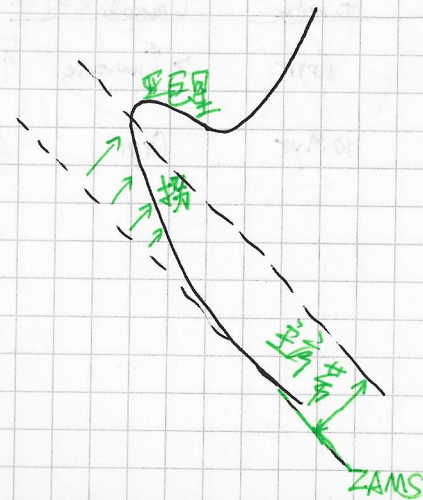
GC 亮度半宽仅有 $\sim \text{pc}$

Blue Stagger 开链机制 (认为)

- 双星并合、物质吸积
- 恒星直接碰撞

主序转折展宽的原因 (maybe)

- 年龄弥散 (但是 ^{观测上} 亚巨星支未展宽, 不符?)
- 自转速度弥散



强交会 时标 $t_s \sim \frac{1}{N \pi r_s^2} \sim \frac{1}{N \pi V} \left(\frac{V^2}{2Gm} \right)^2 = \frac{V^3}{4\pi G^2 m^2 n}$

两颗恒星 $d \sim 1 \text{ au}$, 完全改变轨道

仅在星团等致密条件下重要. b : 强交会的最近距离

$t_{\text{relax}} = \frac{t_s}{\ln \Lambda}$, $\Lambda = \frac{b_{\text{max}}}{b_{\text{min}}}$

弛豫时标

tip: $\frac{t_{\text{relax}}}{t_{\text{cross}}} \sim \frac{N}{6.0(N/2)}$

① $\sim 10^{13} \text{ yr}$
恒星速度分布:
Maxwell 分布

$f_n(\epsilon) \sim e^{-\frac{\epsilon}{kT}}$

$\langle \frac{1}{2} m v^2 \rangle = \frac{3}{2} k T$
运动学温度

恒星逃逸

Tip: 逃逸动能 $\sim$ 平均动能 $\times 4$.
virial theorem.

1° 恒星蒸发

占比 $\sim \frac{1}{136} \sim 0.74\%$

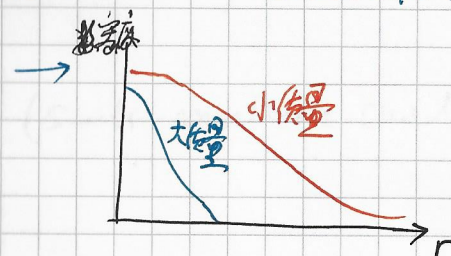
蒸发时标

$t_{\text{evap}} \sim 136 t_{\text{relax}}$

	t_{relax}	t_{evap} 蒸发时标	
球状星团	Gyr	$> t_{\text{universe}}$	不易瓦解
疏散星团	10 Myr	Gyr	易瓦解

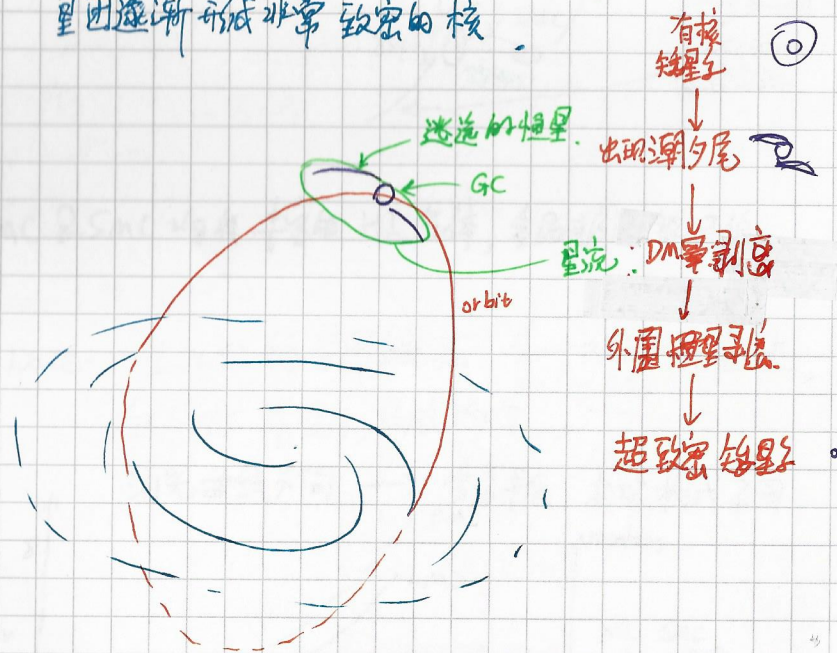
2° 质量分层效应

能均分 $\rightarrow$ 大质量恒星速度较低, 沉到星团中心



3° 核塌缩

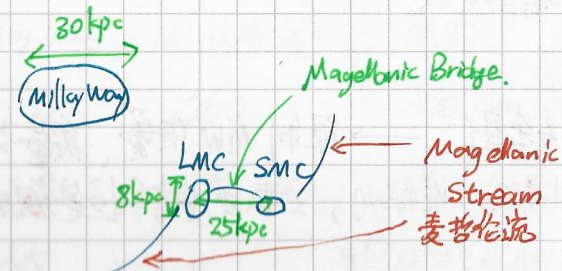
过程中, 内部恒星倾向于失去能量, 由此力更大, 外更外, 星团逐渐形成非常致密的核



LMC (Large Magellanic Cloud) M33.

$\sim 10\%$ L Milky Way

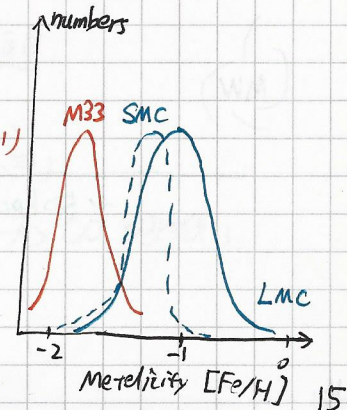
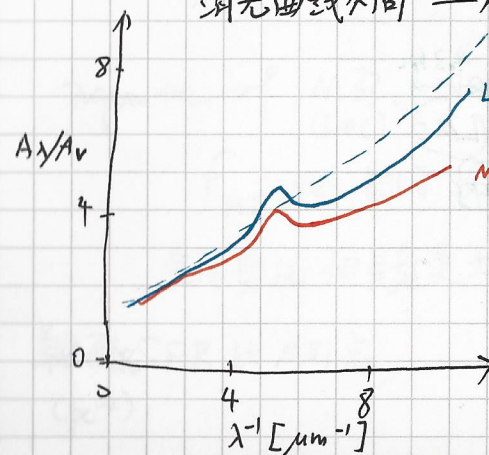
SMC (Small Magellanic Cloud)



LMC & SMC 均有丰富的 HI 气体, 金属丰度比银河低

Note: LMC 的星团年龄在 4~10 Gyr 有空缺, 而 SMC 并没有, 比较均匀.

消光曲线不同 $\rightarrow$ 金属丰度, 尘埃构成不同



(较小的). 光度相当, 质量相近
矮椭圆星系 (dSph) & 球状星团.

多次星爆

引力更强 (可能是因为 DM Halo)

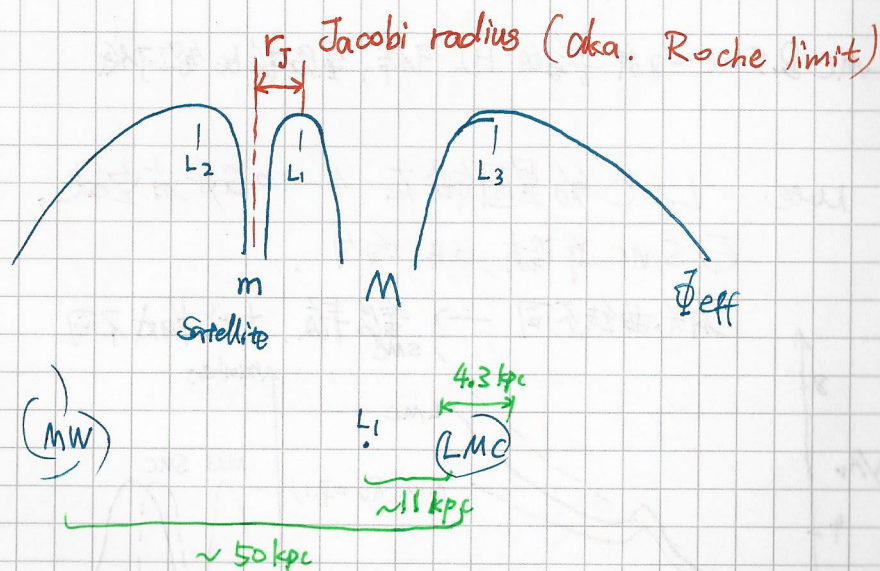
半径大很多

矮星系 金属丰度很低, 不超过 $\frac{1}{30}(Z_{\odot})$.

暗的更低

周围矮星系. $\rightarrow$ 限制 MW 质量、质量分布.

非常暗, 难探测; 主要由暗物质组成.



本星系群 Local Group. $R \sim 1.2 \text{ Mpc}$.

3个大的 spiral. — Milky way

— M31 大 770 kpc

— M33 小 (LMC, SSM) $\sim 0.2 L_{\text{MW}}$

	Milky way	M31 (仙女座)	M33
盘内旋转速度	~ 220	~ 260	$\sim 120 \text{ km/s}$
M_V	-20.9	-21.5	
SFR	$\sim 3 \sim 5$	~ 1	单位面积 SFR 比 M31 更高
Nuclear Star Cluster		$5 \times 10^7 M_{\odot}$	HI 占比高于 MW 与 M31.
Black Hole		$\sim 2 \times 10^8 M_{\odot}$	可能没有中心黑洞

properties of M31 (M31)

盘面积分外, 金属丰度越高. (与 Milky way 相反). ?!

ref: Gibson + 2023

properties of M33. NSC 有年代恒星.

f_{HI} 比银河 & M31 更高;

气体盘比恒星盘更大; 几乎无 CO 发射线;

单位面积 SFR 比 M31 高,
(pc^{-2})

Nuclear star cluster (核星团) ref:

距星子中心 < 50 pc. 发现明显的流量溢出.

extremely dense & ^{more luminous} massive (than typical GC)

星子质量越大, NSC 质量也越大.

NSC 有各代恒星.

形成机制.

① GC 坠落及并合

② 星子演化早期形成

③ 星子演化后期内部形成

不能解释年轻星族

缺乏决定性证据.

解释年轻星族?

形成与演化篇.

本星系群的形成

density fluctuation

gravity

中心附近的 clumps 合并形成 large galaxy

other clumps $\rightarrow$ small satellites

clumps collapse

proto galaxy

原始星系.

Some GC in galaxy (metal-poor globulars)

tidal torques

潮汐矩

(原星系互相拉扯)

begin to rotate

银河系早期演化.

1° 原星系阶段

gas cloud in protogalaxy

collides with each other

1°

a starburst. (metal-poor halo stars)

2° 厚盘阶段

gas fall inward, yield up some energy
rotate increases.

3° 薄盘阶段

fall inward, yield up more energy

form a thick-disk

thick-disk star

form a thin-disk

thin-disk star

$< 8 \sim 10$ Gyr,
(10~20% sol abund)

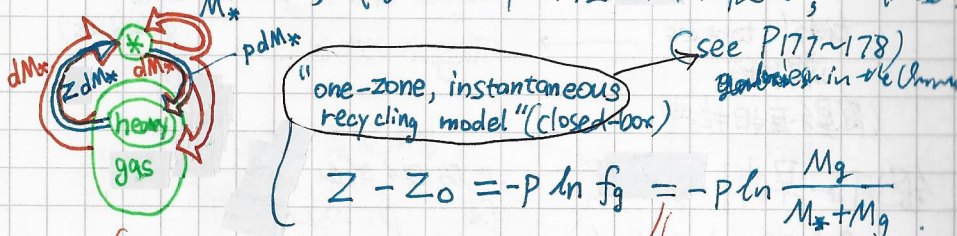
核球的演化.

核球恒星年若 Z 高.

Z 高 reasons:

1° 整个 MW 都为其束缚气体, 俘获 SNa 的增丰剂, 不断形成大量富金属恒星.

2° $\frac{M_g}{M_*}$ 低, 代表化学增丰进程已进行程度高, 因此 Z 高.



$$Z_{\text{star neighbourhood}} \approx 0.7 Z_0$$

$$M_* \sim 35 M_\odot / \text{pc}^2$$

$$M_g \sim 15 M_\odot / \text{pc}^2$$

$$Z_0 = 0.$$

$$p \sim 0.5 Z_0$$

$$M_*(Z < 0.25) \approx 0.4 M_*$$

G-dwarf problem.

观测: $\sim 2\%$ of F-G dwarf star

G-dwarf problem is

解决方法:

1° $Z(g) \rightarrow \text{eq. } 0.15 Z_0$

2° leaky-box model or accreting-box model

累积

不同质量恒星与不同增丰机制.

$> 10 M_\odot \rightarrow \text{SNI} (< 100 \text{ Myr}) \rightarrow \alpha \text{ elements } \lesssim 30 \text{ protons \& neutrons}$

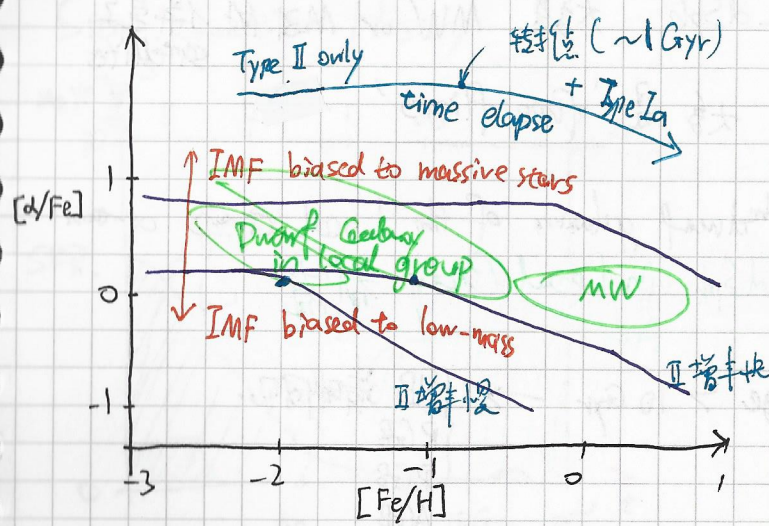
heavier elements are swallowed into NS or BH. $[O, Ne, Mg, Si]$

$\sim 1.4 M_\odot \text{ (WD)} \rightarrow \text{SNI} (> 1 \text{ Gyr}) \rightarrow [Fe, Ni, \dots]$
no remnant left. main source.

AGB eject their outer layers $\rightarrow C, N.$
(produced by He burning)

as for $[O/Fe]$ and $[Mg/Fe]$, or $[\alpha/Fe]$

halo/bulge star $>$ thick-disk star $>$ thin-disk star
less SNI $\leftarrow$ $\rightarrow$ more SNI



矮星系分类

dwarf elliptical (galaxies)

矮椭圆星系 (dE)

与 dEip. 长得
很像, 少气体

$10^5 \sim 10^7 L_\odot$
 $10^7 \sim 10^9 M_\odot$ $D \sim 1 \sim 10 \text{ kpc}$

dwarf spheroidal (galaxies)

矮棒状球星系 (dSph)

比 dE 更暗, 更弥散

$10^7 \sim 10^8 M_\odot$ $D \sim 0.1 \sim 0.5 \text{ kpc}$

dwarf irregular galaxies

矮不规则星系 (dIrr)

大于 $10^8 M_\odot$ 的不叫“矮”,
similar to irregular galaxies,

结构, 正在形成恒星, 气体延伸超
过主星盘

占 Local 的 galaxy luminosity function 的大部分,

building blocks of larger galaxies.

dE & dSph 大多是 MW or M31 的伴星系
satellites

dIrr 大多是 'free fliers'

all the dwarf galaxies of the Local Group contain
some stars on the horizontal branch.

age $> 10 \text{ Gyr}$ $\rightarrow$ $\begin{cases} \text{HB 清晰可见} \\ \text{sGB} \\ \text{RGB} \\ \text{AGB} \end{cases}$

引入指标 $\frac{V}{\sigma}$ — average speed of the stars in the direction
of rotation
velocity dispersion.

有序: $>> 1$, e.g. solar ~ 7 .

无序: $<< 1$

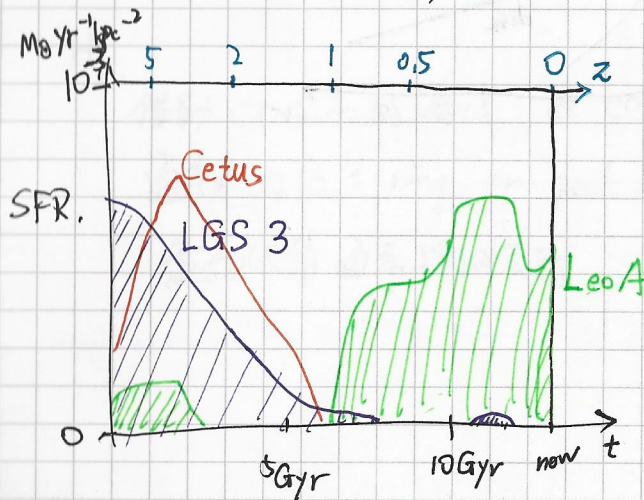
Tip: 有序 (disk) 与 无序 (halo) 之间: M32 ~ 1 .

Tip: dIrr & dSph. $\frac{V}{\sigma} \leq 1$.
dE $<< 1$.

Tip: 矮星系 金属丰度低 (大星留下的致密核? M32 是)

一般 $[M/H] < -1$, 且越暗越贫.

Star Formation History.



旋涡星系

面亮度分布

星系盘径向. $\sim e^{-R/h_R}$. R_{max} 指数部分终止半径

h_R 为标长. (scale length) $\sim 3-5 h_R$.

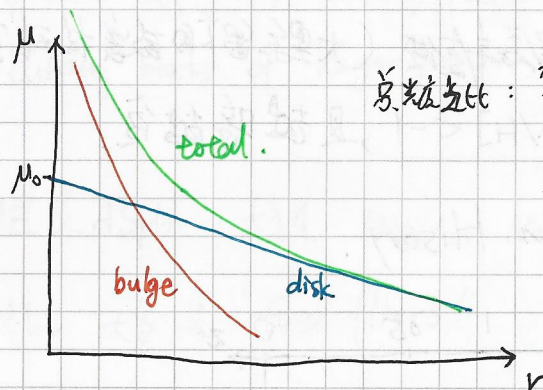
一般 $h_R \sim 1-10 kpc \sim \frac{1}{4} R_{25}$

星系盘垂直向. $\sim e^{-z/h_z}$

h_z 为标高.

核球 $\sim e^{-7.6 \left[\frac{R}{R_e} \right]^{1/4} - 1}$

R_e 为有效半径.



总光度比: $\frac{\text{核球}}{\text{盘}}, \frac{B}{T}$

核球/盘: $\frac{B}{D}$

S/SO 的气体分布.

HI 气体.

中心少, 分布在 $\sim kpc$ 的环状区域内.

比星光更均匀、更延展, (HI 盘 $\sim R_{25} \times 2$.)

$$M_{HI} \sim R_{25}^2, \sim D_{HI}^2$$

Tip: $\frac{M_{HI}}{D_{HI}^2}$ 在所有的旋涡星系中大致相同.

自遮蔽效应.

HII

H α emission 是 20 cm 射电连续谱类似,

均为盘中平面 + 垂直盘方向弥漫. (接近光学波段分布)

H₂.

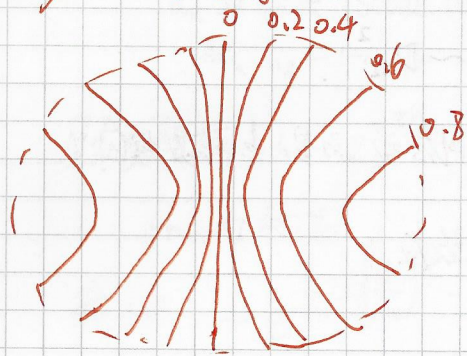
借助 CO 分子的谱线, 但 $CO/H_2 \sim 10^{-4}$ 之低

通常在内区: ring or peak at center.

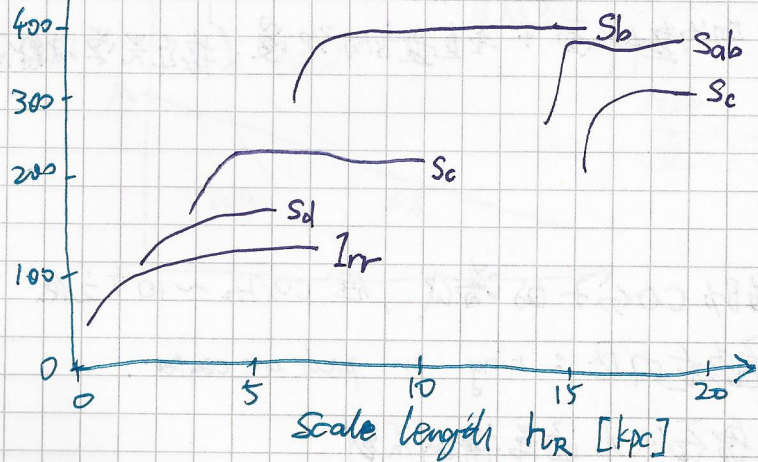
盘面以外, 通常探测不到

旋涡星系的气体运动. (disk galaxy)

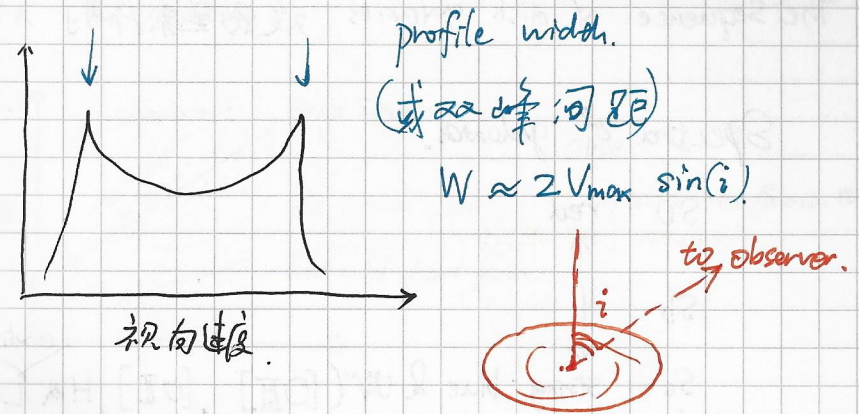
Contours of constant $V(R)$ connect points with the same value of $V(R)$ cosp. forming a "spider diagram" (蜘蛛图).



peak rotation speed
 V_{max} [km/s]



Rotation curves for disk galaxies of various types.



★ Tully-Fisher Relation (1977)

$L \propto V_{max}^{\alpha}$, $\alpha \sim 3 \sim 4$ (与波长有关).
(光度)
e.g. $\frac{L_I}{4 \times 10^{10} L_{I,0}} \approx \left(\frac{V_{max}}{200 \text{ km/s}} \right)^4$
Tip. 可用造父变星定标.

The Sequence of disk galaxies 旋涡星系序列

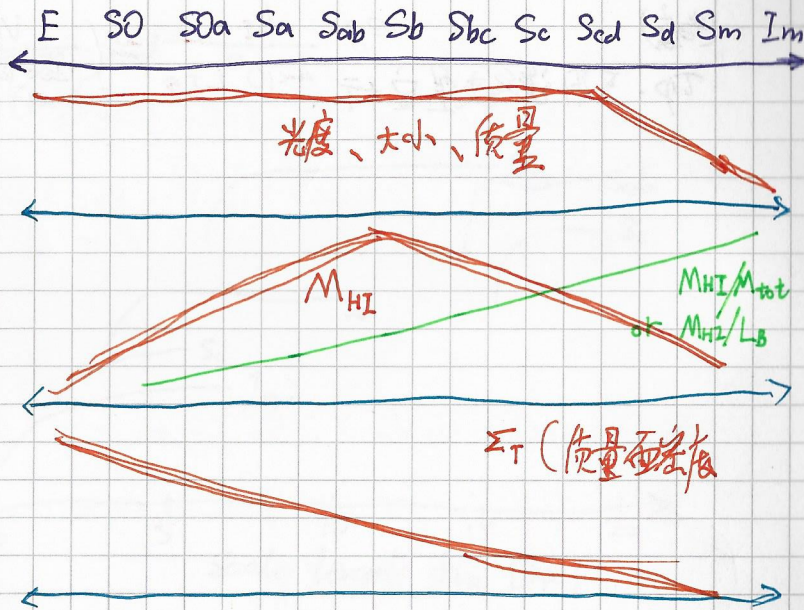
Spectra of galaxies.

SO : red

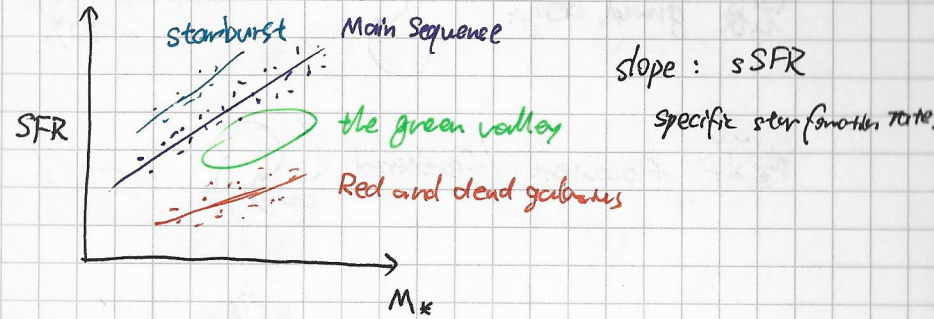
Sb

Sc : strong blue & UV ($[OII]$, $[OIII]$, H α Lines) ^{emission}
 ↳ have starburst

星系特性.



SFR - M_* relation.



Metallcity.



Tip: deeper potential wells retain more metals.

旋臂分类

宏象 grand design



~10%

多旋臂 multiple arms



~60%

絮状 flocculent / feathered



~30%

螺旋子指标

旋臂条数: $m = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

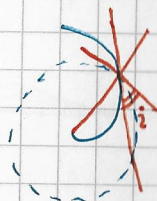
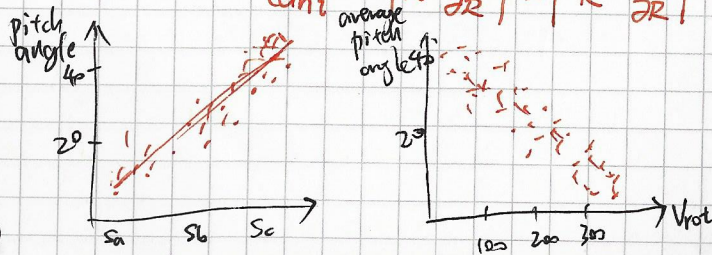
旋臂曲线: $\phi(R, t) = \frac{2k\pi}{m}$

或 $\cos[m(\phi + f(R, t))] = 1$

$\left| \frac{\partial f}{\partial R} \right|$ 大 $\rightarrow$ closely wrapped
小 $\rightarrow$ open.

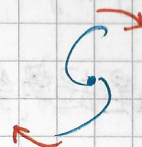
螺旋距角 (pitch angle) i

$$\frac{1}{\tan i} = \left| R \frac{\partial \phi}{\partial R} \right| = \left| R \frac{\partial f}{\partial R} \right|$$



前导型 leading

仅有外部物质供应时.



后随型 trailing

绝多数



Theories for spiral structures.

① density-wave theory.

基本前提: 星子内部不同半径处的质量 (* & g) 相互吸引, 有使旋臂缠绕的趋势.

星子内部引力扰动 $\rightarrow$ 以 oval orbit 运动. (即系带图)

$\rightarrow$ 运动速度变化. $\rightarrow$ 速度低处, 形成 spirals.

Lindblad resonance.

outer resonance: $\Omega = \Omega_p - \kappa/m$

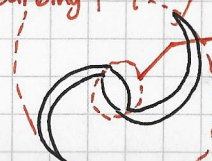
inner resonance: $\Omega = \Omega_p + \kappa/m$

只有二者之间的区域才能传播 a continuous spiral wave.

注: Ω_p : pattern speed.

$\kappa(R)$: epicyclic frequency (本轴的).

即 perturbing frequency $m|\Omega_p - \Omega|$ is slower than κ



inner Lindblad resonance (可以没有)
outer Lindblad resonance ($m \geq 2$ 时总是有)

② self-propagating star formation (自传播恒星形成)

大量恒星超新星/星风 $\rightarrow$ 压缩周围气体
 $\rightarrow$ more SF, SF propagates through the gas.

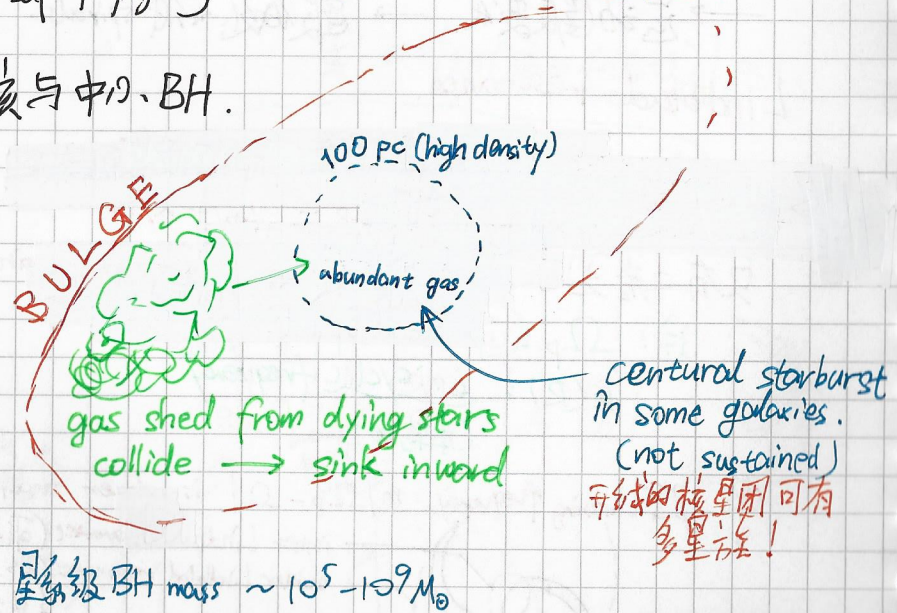
较差自转 $\rightarrow$ form trailing spiral arms.

较差自转, 旋臂太长, 气体耗尽, 恒星消亡.
 重新融入盘内.

Summary.

- density-wave. spiral $\rightarrow$ SF. 对称的整体旋臂
- self-propagating SF. SF $\rightarrow$ spiral. 缠绕的, 绒毛状

核与中心, BH.



星系棒的形成

引力 (互相吸引), 直接形成恒星棒. ①扰动 ②盘棒
 非密度波, 恒星被束缚在棒中. ③束缚

不对称引力 $\rightarrow$ 角动量向外转移, 产生内流
 进入星系中心

$\rightarrow$ 质量增加, 以致于瓦解盘

$\rightarrow$ 形成盘状伪核球

核球 $\left\{ \begin{array}{l} \text{classical bulge} \text{ 旋涡星系早期形成, 生成时较短} \\ \text{disk-like bulge (pseudo bulges)} \text{ 长期演化} \end{array} \right.$

classical	pseudo.
椭球状, 无明显子结构	存在棒, 旋臂, 环等子结构
年老恒星为主	常有年轻星族, 尘埃
运动学热, σ/v_{rot}	运动学冷, σ/v_{rot}
形成时有星暴	形成相对连续, 平缓

Elliptical Galaxies

Hubble type of elliptical galaxies depends on our view direction.

$$E0 - E7, e = 1 - \frac{b}{a}$$

Properties.

— gas & dusts.

— almost no cool gas except at the very center.

— hot X-ray gas. (strong X-ray for luminous ellip.)

— some have dusts.

— Shape.

1° triaxial (three unequal axes)

1° disk

2° boxy.

2° oblate (grapefruit shape 柚子)

— Rotation.

— not at equilibrium state

($t_{\text{relax}} \gg t_{\text{universe}}$)

— $\frac{\sigma}{V}$ 有大有小

Three kinds of ellipticals.

① Dwarf ellipticals

② Coreless ellipticals — lower luminosity
form from wet mergers
high $\mu(0)$

③ Core ellipticals — luminous. $M_V \sim -20.5$
form from dry mergers
low $\mu(0)$

Sersic (1968) 公式.

$$I(R) = I_0 \exp \left\{ -\beta \left[\left(\frac{R}{R_c} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}$$

I_0 / arcsec^2

$$\mu(R) = \mu_0 + 1.086 \beta \left[\left(\frac{R}{R_c} \right)^{1/n} - 1 \right]$$

$\mu_0 / \text{mag/arcsec}^2$

极亮 E

较亮 & 中等 E $n \sim 4$

dE. $n \sim 1$

cD (central Dominant) 星系.

即 BCG (Bright Central Galaxies)

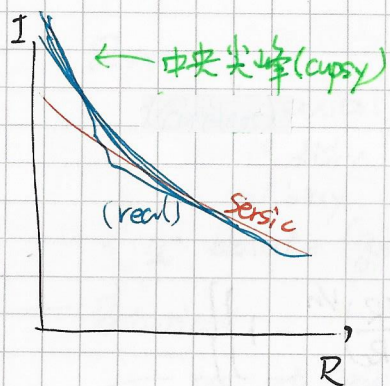
极高亮度的椭圆星系, 位于星系团中心.

子结构 (弧状亮, 不对称结构)、星晕

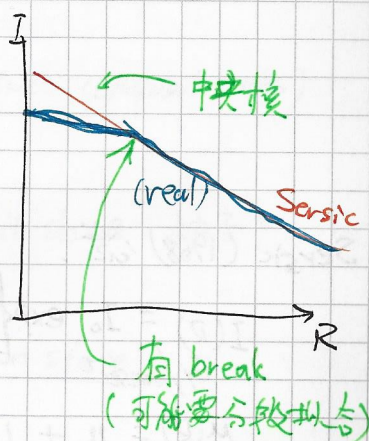
星系并合

椭圆星系 中心亮度与总亮度呈负相关!

中等亮E 往往是 cuspy 极高亮E 往往是 core.



wet merger



dry merger

等照度线扭转

indicate

triaxial (三轴形) (A, B, C 轴不等)

并且椭圆率随半径变化.

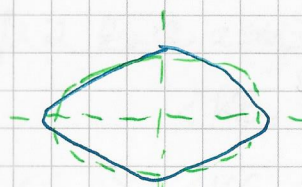


投影



暗/中等的多为盘状

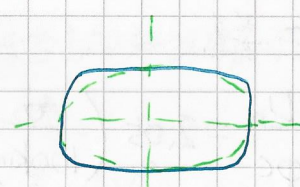
极亮的多为盒状的.



盘状 (disky)

def: $a_4 > 0$

$\Delta r(\theta)$ 的 Fourier 展开



盒状 (boxy)

$a_4 < 0$.

冷 (σ/V 小)

中心亮度大, 尖峰

强 radio & X-ray
吸积盘更活跃.

热 (σ/V 大)

中心亮度小

Faber-Jackson relation $\rightarrow$ 不是很准, 因为总光度不同
(椭圆) velocity dispersion σ 与总光度有关.

eg. $\frac{L_v}{2 \times 10^{10} L_\odot} \approx \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km/s}} \right)^4$

注: 是星系中心的速度弥散.

波段不同, 指数不同

$D_n - \sigma$ 关系

$$\frac{D_n}{\text{kpc}} = 2.05 \left(\frac{\sigma}{100 \text{ km/s}} \right)^{1.33}$$

椭圆. 四个基本参数

- 总光度 L_{tot}
- 有效半径 r_e
- 平面指数 $\langle I_e \rangle$ or $\langle \mu_e \rangle$
- 速度弥散 σ

这三者不独立

$$L_{\text{tot}} = 2\pi r_e^2 \langle I_e \rangle$$

基本参数椭圆星系分布在 (r_e, I_e, σ) 坐标下的一个平面附近:

$$\log R_e = a \log \sigma + b \log \langle I_e \rangle + c \quad (\text{课本})$$

$$R_e \propto \sigma^{1.2} I_e^{-0.8} \quad (\text{课本})$$

tensor virial theorem (部分).

$$2 \langle KE_{zz} \rangle + \langle PE_{zz} \rangle = 0.$$

z 方向运动贡献的动能

z 方向贡献的势能

$$PE_{zz} = - \sum_{a \neq b} \frac{1}{2} G m_a m_b \frac{(z_a - z_b)^2}{|\vec{r}_a - \vec{r}_b|^3}$$

假设星系绕 z 轴运动, 且各方向弥散速度相同, 那么

$$\langle KE_{zz} \rangle \approx \sigma^2$$

$$\langle KE_{xx} \rangle = \langle KE_{yy} \rangle \approx \sigma^2 + \frac{1}{2} V^2$$

所以 ellipticity. 椭圆率.

$$(1-e)^{0.9} \approx \frac{\langle PE_{zz} \rangle}{\langle PE_{xx} \rangle} = \frac{\langle KE_{zz} \rangle}{\langle KE_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma^2}{\frac{1}{2} V^2 + \sigma^2}$$

所以

$$\frac{V_{\text{max}}}{\sigma} \approx \sqrt{\frac{e}{1-e}}$$

实际观测上, 暗的椭圆星系相对符合, 而亮的椭圆星系 V_{max} 往往远小于 expected, 这是因为未弛豫 $\rightarrow \sigma$ 仍有各向异性, $\sigma_x \gg \sigma_z$

Simple Stellar Population (简单星族)

合成

IMF 初始质量函数

isochrones 恒星演化轨迹 $\rightarrow$ 光谱 (模型星族)

library 恒星光谱库

演化

10 Myr. 蓝. 强发射线, eg. [O II] [O III] H α [S II]

100 Myr. A型氢线明显 (Balmer limit 3646 Å)

> 1 Gyr 红 4000 Å 跃变明显

椭圆星系的 color-magnitude relation (CMR)

红 $\leftarrow$ 宽波段颜色 $\rightarrow$ 蓝

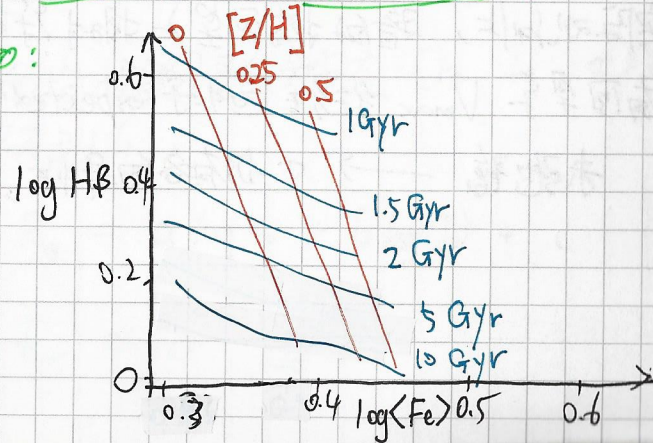
$\leftarrow$ [Fe/H]

$\leftarrow$ age

只观测颜色的话, 这两个参数解

利用 Balmer line, 金属吸收线解开简并.

例如:



UV upturn.

富金属巨椭圆星系的 UV 辐射强.

可能来自 blue stragglers, blue horizontal branches, 热亚矮星.

双星模型 韩占 et al. 2007.

Ellip 中的 热气体

占 10-20% Mass.

very diffuse, 密度极低, 分布极广 ~ 30 kpc.

温度 $T \sim 1-3 \times 10^7$ K,

mainly radiate X-ray.

来源: 星系合并时加热气体.

Ellip 吸积周围气体

RG & AGB's stellar wind.

Ellipt. 中的 冷气体

只有 5-10% 的 ellip 含有可探测到的 HI or H $_2$.

Tip: Sa 星系大多都能探测到

Ellipt. 中的 尘埃带.

Dust - settling sequence?

galaxy merger $\rightarrow$ 尘埃分布 $\rightarrow$ organized dust ring

GC in Ellipt.

存在于所有 $M > 10^8 M_\odot$ 的星系与所有环境。

致密 $r_h \sim 2-4 \text{ pc}$. HST: $d > 80 \text{ Mpc}$ 点源

星族 $> 10.5 \text{ Gyr}$. 矮矮

大质量星系的 GC 可达比例 $> 10-30 R_e$ ($\geq 100 \text{ kpc}$)

可用于研究 DM halo & 星系运动。

Origin

— Multiple collapse: 与星系一起形成, (multiple starburst)

— Merger: wet merger $\rightarrow$ luminous ellip & GC

— Accretion: blue GC 是拖来的。

Dark Matter. 测量方法.

— 旋转曲线 by HI 21cm or GC

— gravitational lensing.

$$\theta_{\text{Einstein ring}} \sim \sqrt{M}.$$

— X-ray halo. (最有效的方法)

假设 hot gas 热力学平衡 $\rightarrow M \text{ profile}$.

结果:

Stars (cluster), Galaxies, Group, cluster, Supercluster

$[M/L]$ 越来越高.

Central BH

$$M_{\text{BH}} \sim \sigma_{\text{core}}^n$$

$$(BH \text{ (MW)}) \sim 3 \times 10^6 M_\odot$$

$$(BH \text{ (M87)}) \sim 3 \times 10^9 M_\odot$$

$$n \sim 3.8-5.1 \quad \cdot 5.1 (2011)$$

椭圆星系形成的两种主流观点.

1. Monolithic-Collapse Scenario (Larson 1969).

整块云气坍塌形成.

2. Merging Scenario (Toomre 1977).

disk galaxies 碰撞形成.

Virial theorem 求星系群质量.

$$E_p \sim \frac{M^2}{a_p} \Rightarrow M.$$

$$E_k \sim \sigma^2 M$$

Galaxy groups $\lesssim 10^{14} M_{\odot}$ $V_{galaxies} \sim 300 \text{ km/s}$ $3 \sim 30 \uparrow \text{ galaxies}$
 (不太好分)
 Galaxy clusters $10^{14} \sim 10^{15} M_{\odot}$ $V_{galaxies} \sim 1000 \text{ km/s}$ $10^{12} \uparrow$
 $> 50 \text{ luminous}$

Group poor cluster rich cluster

Galaxy groups

— compact group 紧凑星系群. eg. Stephan's Quintet.

contain hot gas $\sim 10^7 \text{ K}$ & cool gas.

galaxies almost touch or interacting. (overlap)

— 松散星系群.

eg. local group, M81 group.

contain intergalactic HI gas.

— 化石星系群. fossil group

galaxies $\xrightarrow{\text{merge}}$ large ellipt (diffuse X-ray emission)

Galaxy group 质量估计

$$P = \frac{P}{\mu m_p} k_B T. \quad \frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM}{r^2}$$

$$M = \frac{k_B}{\mu m_p} \cdot \frac{r^2}{G\rho} \cdot \frac{d(-PT)}{dr}$$

X-ray spectrum.

X-ray intensity distribution.

Interaction between galaxies.

Close encounters: dynamical friction.

动能损失太多 $\rightarrow$ merger.

merger.

分类

Binary merger
Multiple merger

major merger: mass ratio $\lesssim 3$, destroy disk.

minor merger: mass ratio $\gtrsim 4$, disk distorted. (cores, ripples, shells, tails)

wet mergers
mixed mergers.
dry mergers

wet merger $\rightarrow$ starburst

dust-rich

$\rightarrow$ ULIRG/LIRG.

Ultra-Luminous Infrared

nearby cluster.

Virgo cluster (室女座). ~ 16 Mpc from LG.

Fornax cluster (天炉座) ~ 20 Mpc.

Coma Cluster (后发座) ~ 90 Mpc.

不同类型星系的分布:

Butcher-Oemler effect:

high-z :	f Blue galaxy	高	z	f _B
low-z :		低	1	0.7
			0.5	0.25
			0	0.03

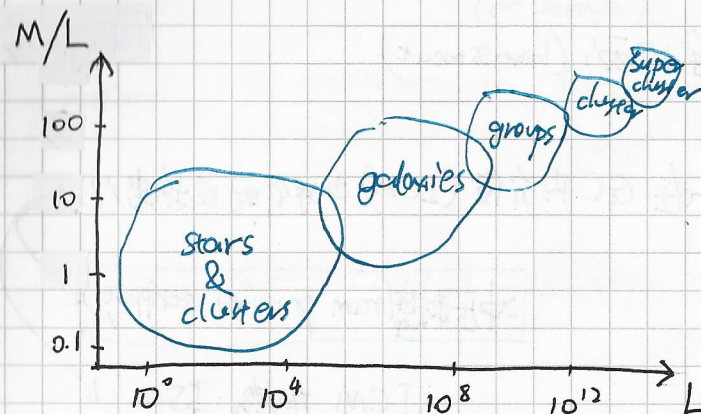
density of galaxies:

high density : more Ellipt & SO.

low density : more Spirals/Irr

(同一个 Cluster 的不同层、cluster 与 void 之间)

Hot gas in galaxy clusters



越大越亮的星系团, 将气体变为恒星的效率越低

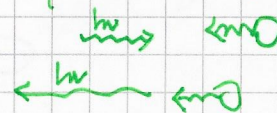
冷却时标: $t_{cool} \sim n^{-1} T^{-\frac{1}{2}}$

星系团内部 $n \sim 10^{-4}/\text{cm}^3$, $t_{cool} > 10 \text{ Gyr}$, 未有明显冷却。

注: X射线光度 $L_x \sim T_x^3$

$T > 10^7 \text{ K}$ 时 gas of roughly the Sun's composition loses energy mainly by free-free radiation (bremsstrahlung)

or inverse-compton scatter.



GC 中热气体的来源.

—— 星子扰动 (harassment)

—— 星子在 GC 内介质 (ICM) 中穿行时受拖曳力.

冲压剥离 (ram pressure stripping)

ICM 加热 ISM
使之逃逸

热蒸发
(thermal evaporation)

反馈 (feedback)

SNa

AGN 的反馈.

Composition of Galaxy Cluster.

DM ~ 25

hot gas ~ 4

stars/galaxies ~ 1

10-20% 恒星处于星系之间.

Galaxy formation: nature or nurture?

(or merger)

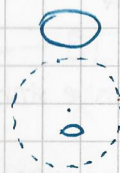
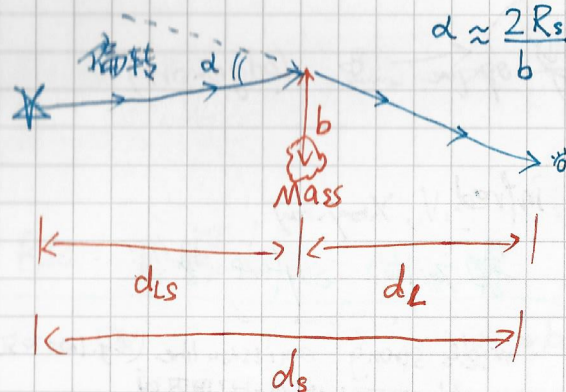
nature: high angular momentum, low $\rho \rightarrow$ spirals
low angular momentum, high $\rho \rightarrow$ elliptical.

nurture: 相互作用/碰撞决定演化

Gravitational lensing

Strong $\sim$
Weak $\sim$
micro $\sim$

$$d \approx \frac{2R_s}{b}, \quad R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



Einstein radius $\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_L d_S}}$

注: 只有中心面密度 $\Sigma > \Sigma_{crit}$ 才有 Einstein ring 多重像

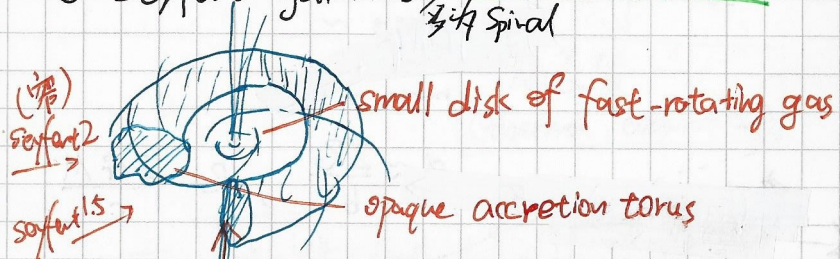
where $\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{d_S}{d_L d_{LS}}$

Active Galaxies

观测特征:

- 核心区特别亮
- 非热辐射
- 强发射线
- 短时标光变 (连续谱 & 谱线都有)

① Seyfert galaxies intense starbirth
多为 spiral



(暗) Seyfert 2
(暗) Seyfert 1.5
(暗) Seyfert 1
bright at IR, V, UV, X-ray
quasar

— Seyfert 1 宽的离子发射线 (eg. 1000 ~ 5000 km/s)
比 O B 星团的 H II 更电离

— Seyfert 2 强发射线 width ≤ 1000 km/s
often 吸收线 indicating hot massive stars.

— LINERs (Low ionization nuclear emission region)
faint

射电超过 $\sim 10^{34}$ W / $\sim 10^8 L_0$ 都 labelled 射电星系.
② Radio galaxies lack sign of starbirth.
多为 elliptical 高偏振度的同步辐射 Fanaroff & Riley (1974)

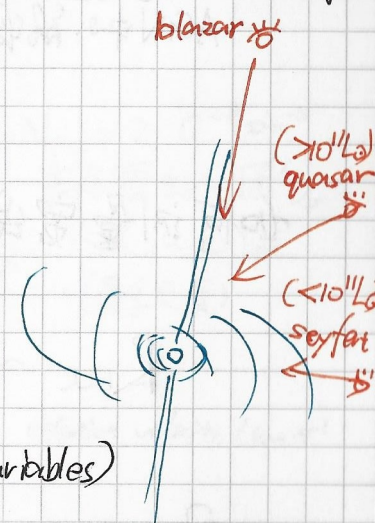
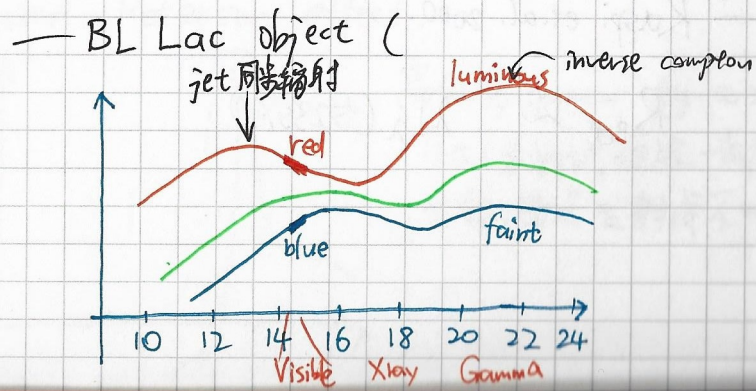
- FRI 核心区亮 lobes, optically thin
- FRII 射电非常亮 (总的来说 FRII 比 FRI 亮)
- BLRG (宽线 RG) 强发射线
- NLRG (窄线 RG) 强发射线

③ Quasars (first "quasars" 与 QSO 的统称)
具有多样的形态 (1A 14 等)

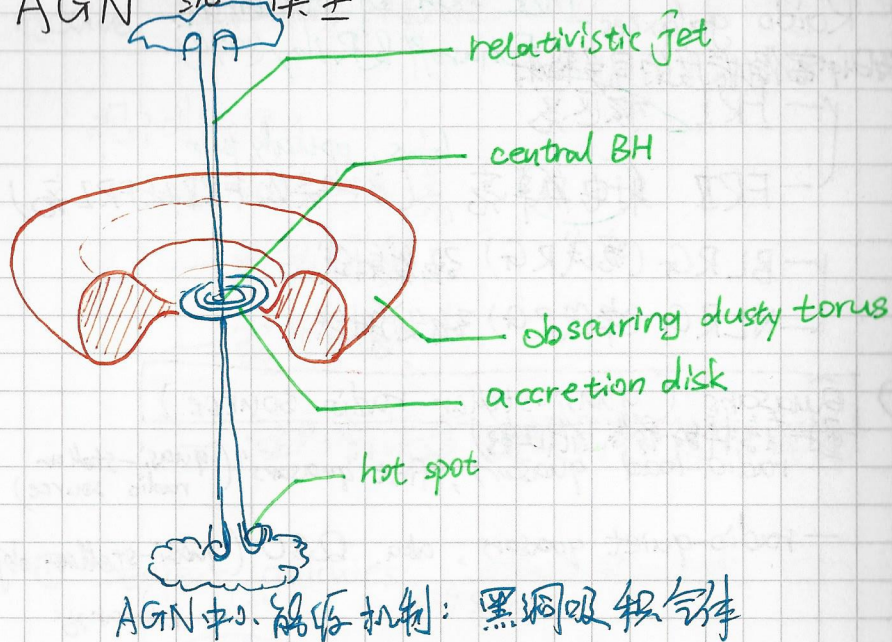
- radio-loud quasars, first "quasars" (quasi-stellar radio source)
- radio-quiet quasars, aka. QSO (quasi-stellar object)

④ Blazars 耀变体

- OVV (optically violent variables)



AGN 统一模型



Eddington 光度

如何测量宽线区的尺度 —— ① 反响映射 (reverberation mapping)

$$R_{BLR} \sim c \cdot t_{lag}$$

尺度极大

连续谱与宽发射线的延时

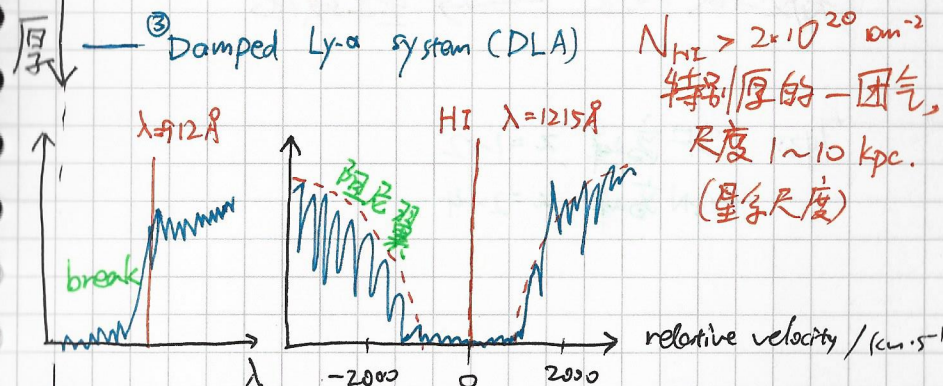
② Kaspi et al. 2000.

$$R_{BLR} \sim \lambda L_{\lambda}(5100 \text{ \AA})$$

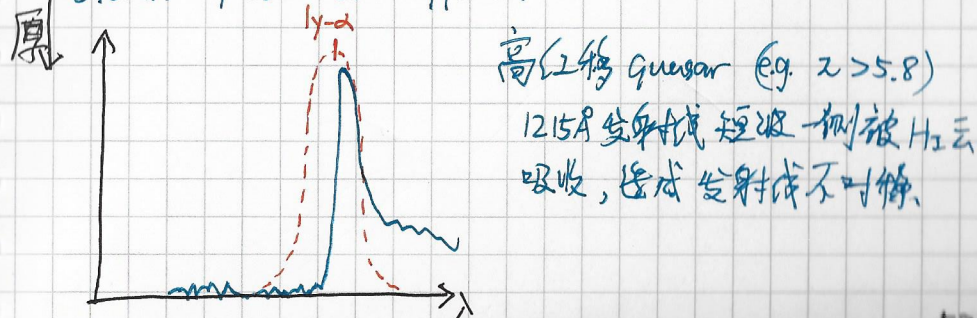
Intergalactic gas / 类星体吸收线

① Ly- α forest system. $N_{HI} = 10^{12} \sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$
 1216 Å, $n=2 \rightarrow 1$.
 低密度 HI 云, 一般不成团
 尺度很大, kpc ~ Mpc. (10^2 Mpc)

② Lyman-limit system (LLS) $N_{HI} > 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$
 可吸收所有 $\lambda < 912 \text{ \AA}$, 造成连续谱 break (partial break)



③ Damped Ly- α system (DLA) $N_{HI} > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$
 特别厚的一团气, 尺度 1~10 kpc. (星系尺度)

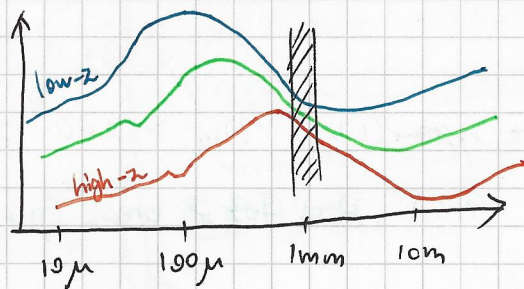


④ Gunn-Peterson effect.
 高红移 Quasar (e.g. $z > 5.8$)
 1215 Å 发射线短波一侧被 HI 云吸收, 造成发射线不对称.

High redshift galaxies

如何寻找 high- z galaxies?

亚毫米波段.



光度函数演化 $\xrightarrow{\text{支撑}}$ 星演化

Tips: SF 高峰, $z=1\sim2$
AGN 高峰, $z=2\sim4$.