

Notes of Extragalactic Astronomy

御条当琴

2024 年 10 月 30 日

目录

1	面亮度 Surface Brightness	3
2	Schechter 函数	3
3	漩涡星系的组成	3
3.1	核球 Bulges	3
3.2	盘 Disks	4
3.3	Baryonic halo	4
4	哈勃分类	5
4.1	分类依据	5
4.2	变化趋势	5
5	气体	6
5.1	中性氢观测	6
5.2	分子氢观测	6
5.3	HII 电离氢	6
6	蜘蛛图 Spider Diagram	6
7	星系旋转曲线	7
8	Double-Horn	7
9	Tully-Fisher Relation	8

10 旋臂	9
10.1 指向	9
11 共振	11
12 棒在星系形成演化的作用	11
13 伪核球	12
14 星系动力学	12
14.1 碰撞时标	12
14.2 Distant weak encounters	14
14.3 动力学弛豫	15
14.4 二体弛豫应用	15
14.4.1 蒸发效应	15
14.4.2 质量分层	15
15 椭圆星系	16
15.1 椭圆星系特征以及与漩涡星系区别	16
15.2 Isophote shapes: a_4	16
15.3 Projected Brightness Profiles	16
15.4 椭圆星系的二分 Bimodality	16
16 中心面亮度、核半径和星系光度密切相关	17
16.1 Giant elliptical	17
16.2 Normal-luminosity ellipticals	17
16.3 Faber-Jackson 关系	17
16.3.1 推导	18
16.4 Fundamental Plane	18
17 星族	19
17.1 简并效应	19
18 $[\alpha/\text{Fe}]$ chronometer	19
18.1 α 元素	20
18.2 EG $[\alpha/\text{Fe}] > 0$ 解释	20

19 测量恒星质量与动力学质量的方法	20
19.1 恒星质量	20
19.2 动力学质量	20

1 面亮度 Surface Brightness

单位面积上的 power 是一样的。单位面积上的光通量（星等/平方角秒）来衡量。与距离无关，因为 (power/area)/(solid angle), area $\propto d^2$, solid angle $\propto \frac{1}{d^2}$

[例] In a galaxy at a distance of D Mpc, $1''$ on the sky corresponds to D Mpc/206265 $\sim 5D$ pc. The surface brightness $I_B = 27 \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ is equivalent to ? $L_\odot \text{pc}^{-2}$

$$M = m - 5 \log\left(\frac{DMpc}{10pc}\right) = m - 25 - 5 \log D$$

$$M - M_{B,\odot} = -2.5 \log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \Rightarrow M = 5.48 - 2.5 \log\left(\frac{L}{L_\odot}\right)$$

$$27 - 25 - 5 \log D = 5.48 - 2.5 \log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \Rightarrow 2.5 \log\left(\frac{L/L_\odot}{D^2}\right) = 3.48$$

$$SB = \frac{L}{(5D)^2}$$

$$SB = \frac{1}{25} 10^{\frac{3.48}{2.5}} L_\odot = 0.99 L_\odot$$

2 Schechter 函数

$$\Phi(L)dL = \Phi_* \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_*}\right) \frac{dL}{L_*}$$

$$N(> L) = \int_L^\infty \Phi(L')dL' = \Phi_* \Gamma(\alpha + 1, L/L_*)$$

$$L(> L) = \int_L^\infty L' \Phi(L')dL' = \Phi_* L_* \Gamma(\alpha + 2, L/L_*)$$

3 漩涡星系的组成

3.1 核球 Bulges

从金属丰度低到富金属星均有，旋转速度等于速度弥散，中央部分可三轴 (triaxial) 或棒状 (bar-shaped)，尤其是 Sb, Sc 型中

面亮度遵循 de Vaucouleurs 的 $r^{1/4}$ 律

$$I(r) = I_e \cdot 10^{-3.3307((\frac{r}{r_e})^{1/4} - 1)}$$

分光半径 r_e (50% light)

3.2 盘 Disks

金属丰度富的星，有序旋转，旋转速度略大于速度弥散；恒星形成，有 HI, H₂ 气体，分子云，尘埃，热气体（被恒星形成和超新星加热）

面亮度

$$I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{R_0}}$$

3.3 Baryonic halo

金属丰度贫的星与围绕星系中心作平均小或没有系统性旋转的球状星团
早型旋涡星系与晚型漩涡星系有哪些系统变化，原理是什么

Older stars	On-going star formation
Gas poor	→ Gas rich
More massive	Less massive

4 哈勃分类

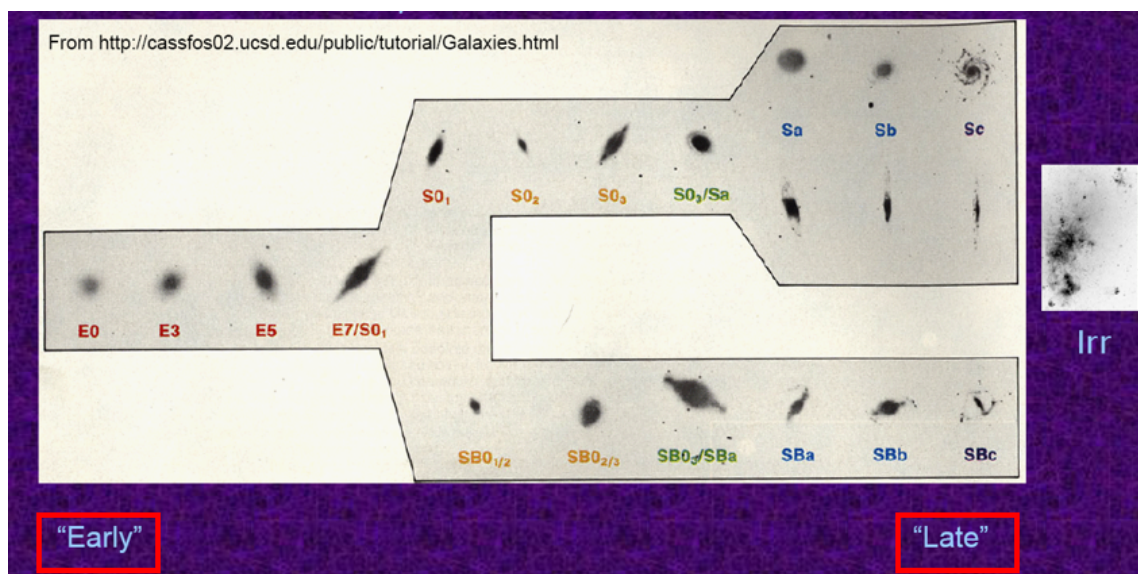


图 1: The Hubble tuning fork

4.1 分类依据

1. 核球相对于扁盘的大小;
2. 旋臂的特征;
3. 旋臂和 (或) 星系盘分解为恒星和电离氢 III 区的程度。

4.2 变化趋势

总光度下降 with ST(Sa→Sc)

$M(\text{HI})/M(\text{total}) \uparrow$ with ST(S0→Sm,Irr)

质光比下降 (i.e. 年轻恒星有低质光比)

(B-V) ↓ 质光比 ↓ (红星 = 早型, 蓝星 = 晚型)

核盘比 ↑ 旋臂由紧到松旋臂和星系盘分解为恒星和电离氢区的程度 ↑

5 气体

Table 1. Phases of the ISM

Phase	Acronym	State of H	Approx Kinetic Temp. (K)	Approx Density n (cm^{-3})	Exponential Scale Height (pc)	Mass (M_{\odot})
Molecular Gas	MNM	H ₂	15	>300	60	2.5×10^9
Cold HI	CNM	HI	80	40	130	2.5×10^9
Warm HI	WNM	HI	8000	0.4	350	1×10^8
HII Regions	WIM	HII	8000	$\gtrsim 1$	750	1×10^8
Coronal Gas	HIM	HII	10^6	0.003	3000	$\sim 1 \times 10^6$

5.1 中性氢观测

中性氢 21cm 吸收和发射线，莱曼 α 吸收。射电得到主要是近邻星系中的中性氢，

5.2 分子氢观测

mm 波段 CO

真正与恒星形成相关是致密分子的气体含量

CO 总是指数盘的。CO 分布集中在星系中心，影响 CO 主要原因是分子温度很冷故集中在盘上。CO 是光学厚的，故可以换 HCN 示踪

HI is the only component not following star formation

5.3 HII 电离氢

20cm 射电，H α

6 蜘蛛图 Spider Diagram

给出观测者视线中旋转星系所见的恒定径向速度线方程 (v_r 的等值线在二维平面上的分布)

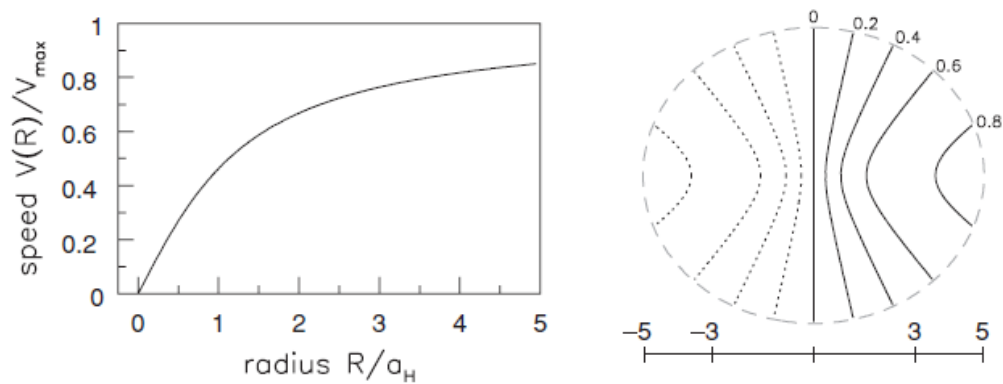


图 2: 中央竖线为 Kinematic major axis

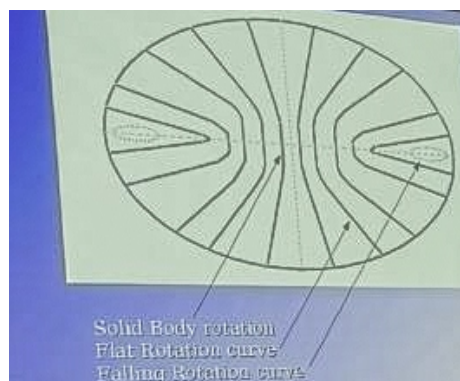


图 3: 蜘蛛图

7 星系旋转曲线

可以用不同组成成分来叠加

$$\Phi = \Phi_{halo} + \Phi_{disc} \Rightarrow v_c^2 = v_{c,halo}^2 + v_{c,disc}^2 \quad (v_c^2 = r \frac{\partial \Phi}{\partial r})$$

8 Double-Horn

盘星系的外部气体 $V(R)$ 几乎恒定，星系大部分气体具有相同的速度。利用射电望远镜，测量每个速度处的气体有多少，可得到速度-流量整体轮廓。气体在较大的半径范围，有几乎

恒定速度, 大多数发射在极大速度处拥挤成两个峰, 形成双角形轮廓

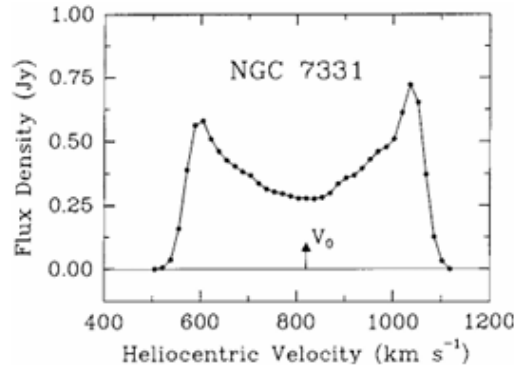


Fig. 5.22. The H I global profile for NGC 7331: radio power F_ν (in janskys) received from gas moving at each velocity, measured with respect to the Sun; $V_0 = V_{\text{sys}}$, the recession speed at the galaxy center – K. Begeman.

图 4: Caption

Because much of the gas lies at radii where $V(R)$ is nearly constant, most of the emission is crowded into two peaks near the extreme velocities. This double-horn profile is characteristic of galaxies where the rotation curve first rises, then remains roughly flat;

9 Tully-Fisher Relation

漩涡星系的自转速度与光度之间的经验关系

$$L \propto v^4$$

Tully-Fisher 关系可以在所有星系有相同的质量轮廓和旋转曲线，所有星系有相同的中心面亮度，以及所有星系有相同的平均质光比 M/L 这三个条件下，用基本物理规律推导而得^[4]。气体在引力作用下作圆周运动，有

$$M \approx r_d v^2, \quad (1)$$

面亮度表达式为：

$$I(r) = I_0 e^{-r/r_d}, \quad (2)$$

总光度表达式为

$$L = \int_0^{+\infty} 2\pi r I(r) dr, \quad (3)$$

由上两式得到：

$$L = 2\pi I_0 r_d^2, \quad (4)$$

式 (1) 的平方与式 (4) 相除，得到：

$$\frac{M^2}{L^2} L \approx \frac{v^4}{2\pi I_0}. \quad (5)$$

由前提条件“所有星系有相同的平均质光比”可知式 (5) 左侧 $\frac{M^2}{L^2}$ 为常数，即得

$$L \approx v^4. \quad (6)$$

但是星系的质光比、中心面亮度以及密度轮廓显然具有多样性，因此这仅作为对 Tully-Fisher 关系的理解的简单推导。

10 旋臂

密度波理论可解释宏象旋臂的形成和长期维持,但是不能解释具有絮状旋臂的星系。Mueller & Arnett (1976) 提出了随机自传播恒星形成模型，可以很好解释絮状旋臂形成。

10.1 指向

前导型（导臂）leading: 旋臂的前端指向与星系转动方向相同；

后随型 trailing（曳臂）：臂端的前端指向与星系转动方向相反。

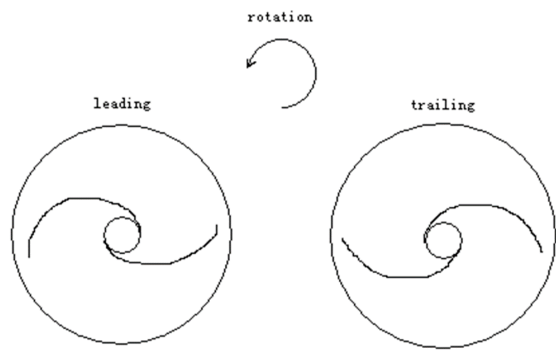
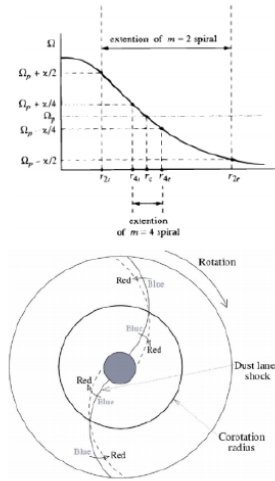


图 5: leading and trailing

11 共振

pattern speed Ω_p 与 $\Omega - \frac{\kappa}{2}$ 相交的—— (-) 内 Lindblad 共振 (+) 外 Lindblad 共振

- ◆ 图案速度: $\Omega_p = \Omega(r) - \kappa/m$ (m 为旋臂个数)
 - ◆ 图案速度是由引导中心为 R_p 的恒星所组成的图案 (即旋臂) 的角速度
 - ◆ 图案回到其原状态需要的时间 $T_p = 2\pi/\Omega_p$
 - ◆ 组成图案的恒星角速度是 Ω , 恒星围绕星系中心转动一圈的时间 $T = 2\pi/\Omega$
- ◆ 共转半径: $\Omega(r) = \Omega_p$ 处称为共转半径
 - ◆ 密度波在星系盘中传播速度为 Ω_p ; 恒星角速度 Ω 在盘的大部分区域非常数 (较差转动)
 - ◆ $\Omega(r) > \Omega_p$: 共转半径内, 恒星/气体速度比图案速度快, 气体受到压缩形成恒星
 - ◆ $\Omega(r)$ 由内到外, 逐渐减小; 对大多数星系, 图案速度 $\Omega_p = \Omega(r) - \kappa/m$ 接近常数
 - ◆ 星系外部转动曲线平坦处, 有 $\Omega_p/\Omega \sim 0.3$: 即恒星转动快, 旋臂 (图案) 转动慢



旋涡增强条件:

- $m |\Omega_p - \Omega(R)| < \kappa(R)$
 - 内Lindblad共振(ILR): $\Omega_p = \Omega - (\kappa/m)$
 - 外Lindblad共振(OLR): $\Omega_p = \Omega + (\kappa/m)$
 - 共转共振 (CR) : $\Omega = \Omega_p$
 - 密度波 (旋臂) 只能在内Lindblad共振(ILR) 和外Lindblad共振之间的区域出现
- 两臂和多臂旋涡总是有外Lindblad共振, 但是如果图案速度 Ω_p 很高, 可以没有内Lindblad共振。

图 6: Caption

12 棒在星系形成演化的作用

角动量转移。造成星系中物质、角动量及能量的重新分布

旋臂是转动的密度波, 盘的自引力使得旋臂特征增强; 如果自引力很强, 则可以形成星系棒: 如某一颗恒星轨道受到扰动, 区域密度增加; 附近恒星向其运动, 密度进一步增加; 更远处的恒星受到其引力, 向其运动: 该过程持续, 最终形成恒星棒。棒中恒星不再是圆轨道, 恒星轨道为沿着棒方向的拉长轨道, 恒星被束缚在棒中; 棒的强烈不对称引力, 有助于气体角动量向外转移, 产生内流, 进入星系中心; 内流使得星系中心质量增加, 中心质量增加影响盘星轨道变化, 盘被瓦解 – 可能形成盘状 (伪) 核球。

13 伪核球

伪核球类似于以旋转为主的旋涡星系，通常具有核棒、旋臂和内环等子结构。

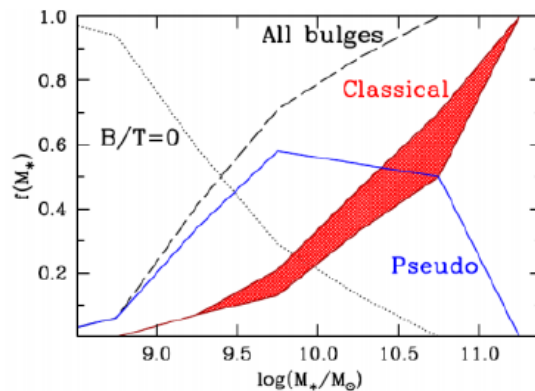
从理论上讲，经典核球被认为是通过 violent 的过程形成的，例如块状塌陷 (clumpy collapse) 和星系合并，而伪核球被认为是由长期演化 (secular evolution) 缓慢形成的，例如由棒状或旋臂诱导的气体流入和恒星向内迁移

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}
- ◆ 由星系合并形成，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) .

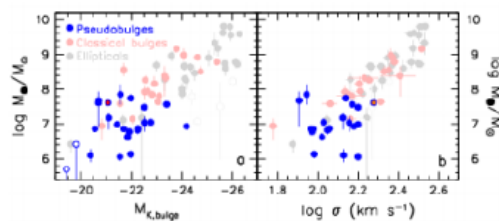


图 7: Caption

14 星系动力学

14.1 碰撞时标

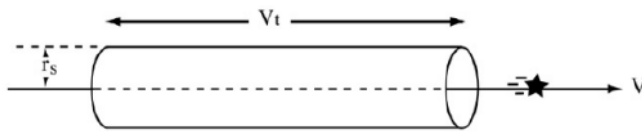
$$t_{coll} \sim 4 \times 10^{12} yr (v/10 km/s)^3 (m/M_{\odot})^{-2} (n/1 pc^{-3})^{-1}$$

为什么通常不考虑恒星与恒星碰撞，因为恒星碰撞时标很长，超过哈勃时标。Strong encounters 只在球状星团的致密核心才考虑

- ◆ 一颗恒星，以速度 V 运动了时间 t ，将会与中心在其轨道上，半径为 r_s ，体积为 $\pi r_s^2 V t$ 的圆柱内的任何其他恒星发生强交会
- ◆ 如果每单位体积内有 n 颗星，太阳在时间 t_s 内将有一次近交会，使得 $n \pi r_s^2 V t = 1 \rightarrow$ 强交会的平均时间是[其中 $r_s = 2GM/V^2$]:

$$t_s = \frac{V^3}{4\pi G^2 m^2 n} \approx 4 \times 10^{12} \text{ yr} \left(\frac{V}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{m}{M_\odot} \right)^{-2} \left(\frac{n}{1 \text{ pc}^{-3}} \right)^{-1}. \quad (3.49)$$

- ◆ **太阳附近:** $n \sim 0.1 \text{ pc}^{-3}$, $V \approx 30 \text{ km/s}$, $m = 0.5 M_\odot$, 所以有 $t_s \sim 10^{15} \text{ 年} = 10^6 \text{ Gyr} \gg 13.7 \text{ Gyr}$ 。恒星强交会时标很长!
- ◆ 太阳附近的恒星，发生强近交会的时标远远超过了**宇宙年龄**。恒星并不经常走得足够近，使一个恒星的引力造成另一个恒星轨道的发生大的变化。



强交会只有在**球状星团**的致密核心和**星系核**中才是重要的!

图 8: Caption

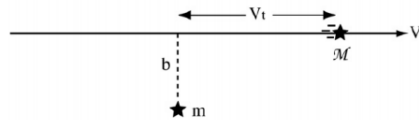
14.2 Distant weak encounters

- ◆ 弱远交会时 ($b \gg r_s$)，一颗恒星作用于另一颗的力很弱，交会时，恒星几乎不会偏离其原来的轨道：脉冲近似 $\delta V/V \ll 1$
- ◆ 质量M的恒星以速度V运动，其轨道离质量m的静止恒星垂直距离为b。m的拉拽给予M一个垂直于轨道的小运动 V_{\perp}

◆ 在最近点处，垂直方向的力是：
$$F_{\perp} = \frac{GmM}{(b^2 + V^2 t^2)^{3/2}} = \mathcal{M} \frac{dV_{\perp}}{dt}$$

◆ 交会发生很久以后，M的垂直速度是：
$$\Delta V_{\perp} = \frac{1}{\mathcal{M}} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp}(t) dt = \frac{2Gm}{bV}$$

- ◆ M沿其原来方向的速度V几乎不受影响；在时间 $t < 0$ 将它向前拉的力与 $t > 0$ 时将它向后拉的力严格平衡。



V越大 (M飞过m越快)，速度改变就越小；M沿其原来方向的速度V，几乎不受影响

◆ M的轨道近似为一曲线，在最近距离 (b处) 弯了一个角度：
$$\alpha = \frac{\Delta V_{\perp}}{V} = \frac{2Gm}{bV^2}$$

图 9: Caption

- ◆ F_{\perp} 方向动量守恒：交会后，m朝着M的轨道方向，以速度 $2GM/(bV)$ 运动。
- ◆ 在弱远交会中，一颗恒星作用于另一颗的力是十分弱：在交会发生时，恒星几乎不会偏离其原来的轨道，可以用“脉冲近似”来计算恒星沿未被干扰的轨道运动时所受的力
- ◆ 脉冲近似成立的条件：趋近的垂直速度 δV 同 V 相比必须很小， $\delta V \ll V$
$$b \gg \frac{2G(m + \mathcal{M})}{V^2}$$
- ◆ 恒星M穿过银河系时，许多恒星m都将拉拽它，每一个改变它的运动数量均为 ΔV_{\perp} ，但方向不同。
- ◆ 如果力是随机的，则垂直速度的期望值：
$$\langle \Delta V_{\perp}^2 \rangle = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} n V t \left(\frac{2Gm}{bV} \right)^2 2\pi b db = \frac{8\pi G^2 m^2 n t}{V} \ln \left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right)$$

图 10: Caption

$$\langle \Delta v_{\perp}^2 \rangle = v^2$$

$$t_{relax} = \frac{v^3}{8\pi G^2 m^2 n \ln \Lambda} = \frac{t_s}{2 \ln \Lambda} \approx \frac{2 \times 10^9 yr}{\ln \Lambda} \left(\frac{v}{10 km \cdot s^{-1}} \right) \left(\frac{m}{M_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{n}{10^3 pc^{-3}} \right)$$

由 Virial 定理

$$N \frac{1}{2} m v^2 \sim \frac{G(Nm)^2}{2R}$$

$$\Lambda = \frac{R}{r_s} \sim \frac{N}{2}$$

$$t_{cross} \sim \frac{R}{v}$$

弛豫时标与穿透时标之比

$$\frac{t_{relax}}{t_{cross}} \sim \frac{v^4 R^2}{6NG^2 m^2 \ln \Lambda} \sim \frac{N}{6 \ln(N/2)}$$

14.3 动力学弛豫

Suppose M passes through a region n*m stars/pc

$$-\frac{dV}{dt} = \frac{4\pi G^2(m+M)}{V^2} nm \ln \Lambda, \Lambda = \frac{b_{max}}{b_{min}}$$

14.4 二体弛豫应用

14.4.1 蒸发效应

一系列弱远交会，使得一颗恒星的能量逐渐增加，最终使得大于逃逸速度；恒星蒸发是逐渐进行的

14.4.2 质量分层

质量层化效应起因于星团的弛豫过程。星团由不同质量恒星组成，假定起始时恒星完全混合，轨道速度相似，质量较大的恒星将有较大的动能

弛豫，倾向使不同质量的恒星平均动能相同 [能均分]

大质量恒星在一次‘碰撞’后 V 将减小，沉入一个低能量轨道，向中心下沉，形成中心紧密核：中心恒星动能小，不能向外运动

质量较小的恒星则从其碰撞中获取能量，但将其花费在向外围的运动中，形成小质量恒星组成的外晕质量层化

15 椭圆星系

15.1 椭圆星系特征以及与漩涡星系区别

大多数/所有椭圆星系有热 X 射线气体，一些有灰尘，甚至有冷气体

椭圆星系会旋转，但大部分动能支持来自各向异性速度弥散

有些包含解耦核心或其他复杂运动学

有的有弱星盘

椭圆星系由两个漩涡星系并合产生或由小星系的分层聚集产生

15.2 Isophote shapes: a_4

$$R(\phi) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\phi) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\phi)$$

a_0 对应平均半径

a_1, b_1 椭圆中心

a_2, b_2 离心率与方位角

a_3, b_3 尘埃检测 diagnostic of dusts

a_4 defines boxiness or diskiness

15.3 Projected Brightness Profiles

sersic:

$$\mu_{ser} = \mu_0 \exp \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

$n=4$ 成为 de Vaucouleurs 律

15.4 椭圆星系的二分 Bimodality

高低光度

高光度		低光度
slow rotator		fast rotator
boxy	→	disky
core		cuspy/power-low

16 中心面亮度、核半径和星系光度密切相关

亮 E 星系有面亮度几乎不变的中央核；中心暗；核大；
中等亮度 E 星系有中央尖峰而不是核；中心亮；核区小。

16.1 Giant elliptical

$$n \geq 4$$

核心剖面有核

缓慢旋转

各向异性，三轴

变圆的趋势

可以有 boxy 等照度线

含 X 射线 emitting gas

有年老且 α 元素 enhanced 的星族

16.2 Normal-luminosity ellipticals

$$n \leq 3$$

无核

旋转迅速

各向同性扁圆

可以相当平坦

可以有 bdisky 等照度线

罕见 X 射线 emitting gas

可以有既不年轻也不 α 元素 enhanced 的星族

16.3 Faber-Jackson 关系

$$L \sim \sigma^4$$

较亮的椭圆星系中，恒星运动较快，速度弥散大

16.3.1 推导

由 Virial 定理

$$2\frac{1}{2}M\sigma^2 - \frac{3}{5}\frac{GM^2}{R} = 0 \Rightarrow \sigma^2 = \frac{3}{5}\frac{GM}{R}$$

假设质光比为常数 $C(M \propto L)$, 则

$$R \propto \frac{LG}{\sigma^2}$$

设表面光度 $B = \frac{L}{4\pi R^2}$ 亦为常数, 则

$$L \propto 4\pi \left(\frac{LG}{\sigma^2}\right)^2 B \Rightarrow L \propto \sigma^4$$

16.4 Fundamental Plane

R_e, I_e, σ (有效半径, 中心面亮度, 速度弥散) 组成的三维空间在一个平面附近 (对数空间)。如果加入第三参数有效半径, 可将 FJR 关系的弥散显著减小。这是质光关系 (反应在面亮度与有效半径上), FJR 等关系共同束缚的结果

$$R_e \propto \sigma^{1.24} I(R_e)^{-0.82}$$

$D - \sigma$ 尺度-速度弥散正相关

understanding can be based on the serial accretion by a galaxy with mass, kinetic and potential energies (m, T, V) of dwarfs ($\delta m, \delta T, \delta V$). Each is in virial equilibrium², so that $2T = -V$ and $2\delta T = -\delta V$. If energy D is dissipated in the interaction, the energy equation is

$$\frac{1}{2}\delta m\sigma_0^2 + \frac{1}{2}\delta m\sigma^2 + D = \frac{1}{2}\delta(m + g\delta m)(\sigma + \delta\sigma)^2 \quad (1)$$

where $\delta T = \frac{1}{2}\delta m\sigma_0^2$ and $T = \frac{1}{2}m\sigma^2$ and g is unity if mass is conserved.

If $D = fGm\delta m/r_e$, where f is a free parameter and r_e is the effective radius, then

$$\sigma\delta\sigma(m + g\delta m) = \frac{1}{2}\delta m(\sigma_0^2 - \sigma^2) + fGm\delta m/r_e \quad (2)$$

which yields the differential equation

$$\frac{d \log \sigma}{d \log m} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma^2} - g \right) + \frac{r_0}{r_e} \quad (3)$$

where r_0 has replaced f to keep a dimensionless equation simple.

We integrate Equation (3) numerically and adopt $M/L \propto \sigma^\epsilon$, following [Mould \(2014\)](#), and $r_e = r_0\sigma^{1.75}$ plus a dispersion, to obtain the fundamental plane shown in [Figure 1](#). In our adopted M/L ϵ is not a free parameter³. The proportionality constant will contain stellar population dependences, such as metallicity. The fit to [Figure 1](#) is $r_e \propto \sigma^{1.6}SB^{-0.4}$, where SB is surface brightness, which is not too dissimilar to that found for 6dF by [Magoulas et al. \(2012\)](#): $r_e \propto \sigma^{1.53}SB^{-0.89}$.

图 11: Caption

17 星族

认为同时形成，具有相同的年龄和化学组成

17.1 简并效应

金属丰度增加，或者星族年龄变老，宽波段颜色都会变红。通过宽波段颜色无法区分星族的年龄和金属丰度。

18 $[\alpha/Fe]$ chronometer

刻度计描述恒星形成的时标

18.1 α 元素

α 元素 (Mg、Si、Ca、Ti) 是短寿命 ($\sim 10^7$ 年) 大质量 II 型超新星爆发的产物, 而铁元素主要是长寿命 ($\sim 10^9$ 年) 的 Ia 型超新星爆发产生的, 因此, 恒星中的 $[\alpha/\text{Fe}]$ 可以作为“宇宙时钟”追踪星系的形成和化学演化。

SNII 产生 α 元素, SN Ia 产生铁元素

稳定的 α 元素 C O Ne Mg Si S Ar Ca

体现恒星形成时标刻度

椭圆星系中氧、硫、镁等原子与铁原子的比值 (数目), 比太阳中 $[\alpha/\text{Fe}]$ 要高。(α 元素增丰)

18.2 $\text{EG}[\alpha / \text{Fe}] > 0$ 解释

三种可能的解释:

椭圆星系形成恒星非常快, Ia 型超新星还没有开始把铁加入星际气体中 (主要);

椭圆星系形成了相对较多的大质量恒星或较少的双星; 缺乏 Ia 型超新星;

SN Ia 爆发的产物运动快, 离开星系; SNII 爆发气体运动慢, 留在星系中。

19 测量恒星质量与动力学质量的方法

19.1 恒星质量

用 K 波段光度, 用质光比也可以

19.2 动力学质量

用旋转曲线, 星系团里的速度 (运动学), X-ray (热气体), 引力透镜

(velocities of galaxies, Temperature of hot X-ray emitting gas, gravitational lensing)