

# 星系天文学

PB19000166 胡旭凡

2021.9.14

## 一、导论

### 1. 恒星

恒星信息：图像和光谱

恒星特征：面亮度、光度、大小、距离、年龄、温度和内部化学成分

(1) 光度  $L$  ( $W, \text{erg/s}$  [ $1J = 10^7 \text{erg}$ ])、亮度  $F$ :  $L = 4\pi r^2 \cdot F$

① 恒星光度:  $10^{-4}L_{\odot} - 10^6L_{\odot}$

② 有效温度  $T_{eff}$ : 恒星辐射近似于黑体辐射;  $T_{eff}$  通常接近恒星表面温度, 即光球层气体温度的平均值

例:  $T_{\odot} \approx 5780K$

(2) 大小: 恒星的半径很难直接测量 (太阳除外)

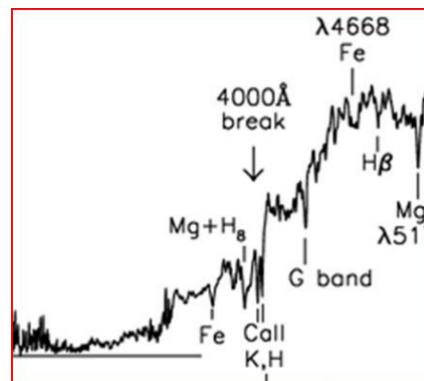
① 恒星大小测量: 利用间接方法  $\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4$

② 恒星光度: 与恒星的表面温度、恒星表面积有关

③ 如果知道恒星的温度和光度, 可以计算恒星半径 ( $0.1R_{\odot} - 1000R_{\odot}$ )

(3) 恒星光谱: 连续谱上叠加有吸收线; 极少有发射线

光谱中可能存在跃变, 如Balmer跃变和4000Å跃变



光谱在  $\lambda < 4000\text{\AA}$  处, 金属线吸收了许多光  $\rightarrow$  4000Å跃变

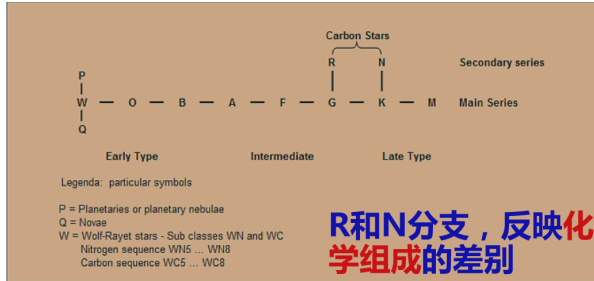
③ 元素丰度

- 谱线的强度, 取决于形成该谱线的恒星层的温度, 也取决于各种元素丰度。
- **金属元素**: 除氢和氦元素之外的所有元素总称
- **质量比例**: 按质量计, 太阳的表面层约有72%氢, 26%氦, 所有其他元素约为2% (称重元素或金属)。表示为  $Z = 0.02$
- **元素原子数目比**:  $\lg(Z/H) + 12 = \lg(N_Z/N_H) + 12$   
例: 太阳:  $12 + \log(O/H) = 8.66$
- **相对丰度[A/B]**: 表示一颗恒星中某一种特定的元素, 与太阳中的同一元素的丰度比值, 例如氧的比例

$$[Fe/H] = \lg\left(\frac{Z}{0.02}\right)$$

#### (4) 恒星分类

1 哈佛光谱分类：依据有效温度



光谱型	表面温度(K)	颜色	特征谱线
O	30,000	蓝	强电离He线, 重元素多次电离线
B	20,000	蓝白	中性He线, 重元素一次电离线, H线
A	10,000	白	H线, 重元素一次电离线
F	7,000	黄白	重元素一次电离线, H线和中性金属线
G	6,000	黄	重元素一次电离线, 中性金属线
K	4,000	红橙	中性金属线, 重元素一次电离线
M	3,000	红	中性金属线, 分子带

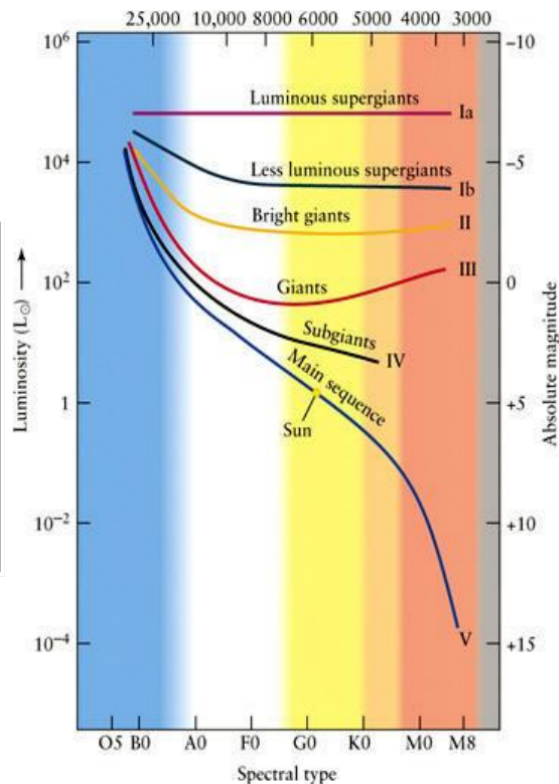
- 每型又分为十个次型，用阿拉伯数字表示：O0,...,O9；B0,...,B9；...
- 恒星光谱中的谱线与恒星表面引力也有关

3种A型恒星光谱：吸收线强度相似，但是矮星的巴耳末线比在巨星和超巨星中更宽（物质密度高，场强大，斯塔克效应明显）

矮星、巨星、超巨星差异：恒星光度分类

2 光度：Yerkes分类（2参数分类法：温度和光度）

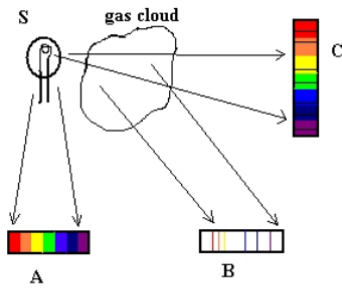
TYPE	Star
Ia	Very luminous supergiants
Ib	Less luminous supergiants
II	Luminous giants
III	Giants
IV	Subgiants
V	Main sequence stars (dwarf stars)
VI	Subdwarf
VII	White Dwarf



例：太阳是G2 V星

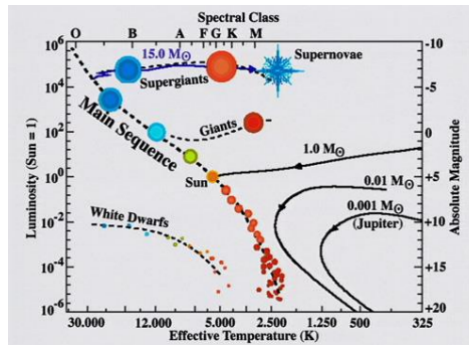
#### (5) 星系光谱

星系光谱是由不同温度恒星光谱混合而成：较热的恒星贡献了大部分蓝光；较冷的恒星产生了红光的大部分



A: continuous spectrum  
 B: bright line spectrum  
 C: absorption spectrum  
 S: incandescent source

(6) 恒星演化: 原恒星气体云 → 恒星 → 白矮星而消亡, 或是在超新星爆炸中火化 (恒星特性纷繁复)



1 主序带: 观测发现, 绝大部分恒星在HRD中的位置落在一条窄带上

2 主序带恒星的性质:

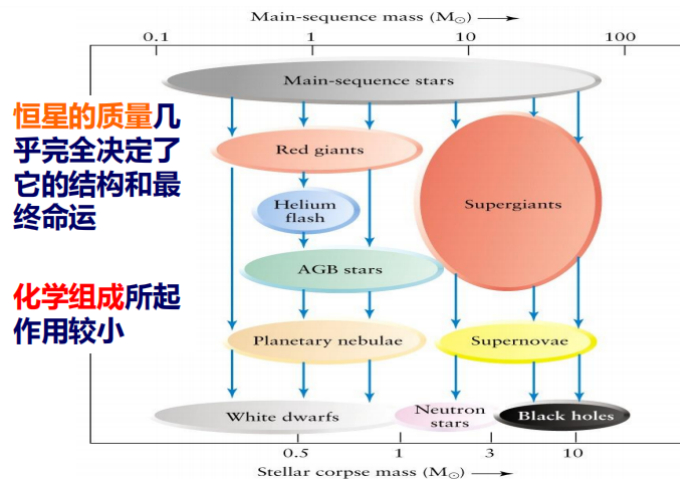
- 均匀的化学组成
- 核心氢燃烧
- 完全流体静力学平衡
- 质量范围:  $0.08 - 120 M_{\odot}$ ; 半径范围:  $0.1 - 25 R_{\odot}$

3 零龄主序: 刚刚开始核心H燃烧的恒星, 在H-R图上占据主序带左侧

$H \rightarrow He, \rho \uparrow \rightarrow$  核更热  $\rightarrow T \uparrow$ , 更亮

4 不同质量恒星演化主要区别:

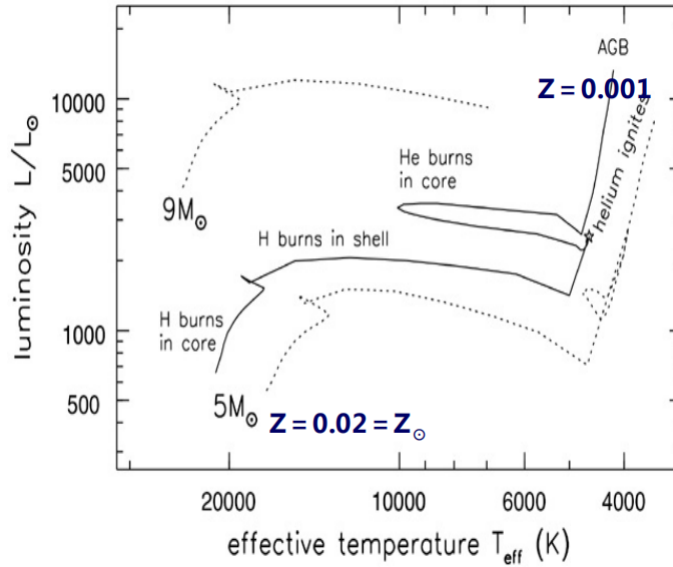
- 演化过程不同: 大质量恒星的内部碳可以点燃, 形成更重的元素
- 演化时标不同: 大质量恒星的内部温度更高; 主序星等寿命更短
- 演化产物不同: 大质量恒星通过超新星爆发, 形成中子星或黑洞



AGB:渐近巨星支。质量约小于2个太阳质量的恒星，演化到核心氦枯竭形成C-O核，随着核质量的增加，在赫罗图上向右上方移动的一段演化程。

5 金属丰度的影响

- 金属丰度低→恒星中的尘埃较少→不透明度低→光子运动到恒星表面就比较容易
- 贫金属星更致密，核心一定更炽热，并产生更多的能量→贫金属恒星更快用完它的核燃料→贫金属星更蓝、更亮、寿命更短

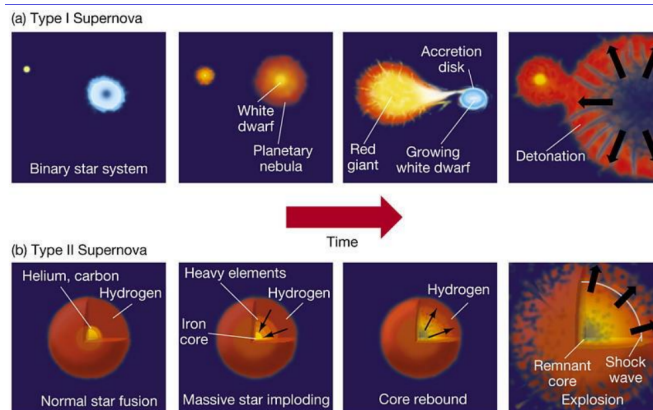


6 主序带的时间估计:  $lg(\frac{\tau_{MS}}{10Gyr}) = 1.015 - 3.49lg(\frac{M}{M_{\odot}}) + 0.83[lg(\frac{M}{M_{\odot}})]^2$

(7) 超新星

(a) I型超新星: 吸积伴星→ $M > 1.44 M_{\odot}$  →可能无遗留

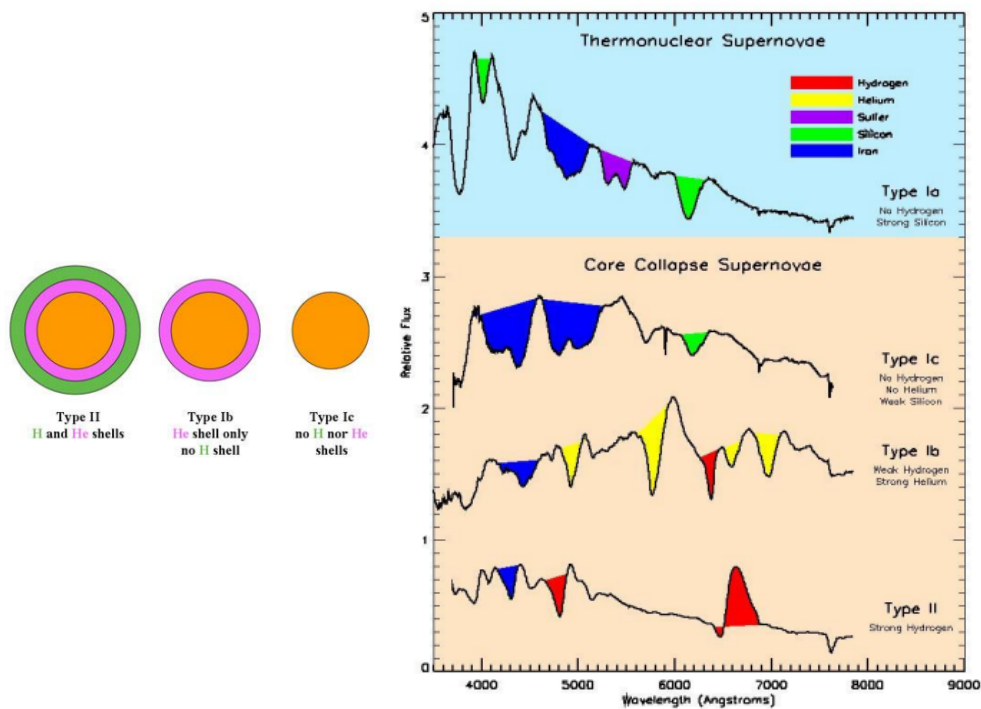
(b) II型超新星: 铁核塌缩→外层落入→中子星或黑洞



1 II型超新星: 光谱中有氢的吸收线; 大质量恒星临终产物;

2 I型超新星: 光谱中没有氢的吸收线

- Ia型: 没有氢、氦, 有硅吸收线; 白矮星吸积伴星物质(双星)发生爆炸
- Ib型: 弱氢吸收线, 有强氦吸收线
- Ic型: 没有氢和氦线, 弱硅吸收线



(8) 双星：大多数恒星不是孤立出现的；它们处于双星或聚星系统中

- 1 双星是由两颗绕着共同质心旋转的恒星组成。两者互相围绕，并且互相之间有引力作用
- 2 密近双星：一颗子星影响另一颗子星演化的双星系统

- 在密近双星系统中，一颗致密星（白矮星、中子星），可以从另一颗子星（红巨星或AGB星）移走物质
- 现象：新星、X射线源、Ia型超新星等

(9) **钱德拉塞卡极限**：一个质量M大于 $1.44 M_{\odot}$ 的星体（演化晚期的质量），当其氢核燃尽，将不可能变成白矮星，而会继续坍塌收缩，变成更致密的天体（中子星、黑洞）

1 Ia型超新星：双星系统中的白矮星吸积伴星物质，质量超过钱德拉塞卡极限，导致白矮星坍塌；坍塌开始，核区温度、密度急剧上升，C、O核开始发生剧烈的热核反应，导致整个星体瓦解

2 对白矮星而言，电子简并压力是其抵抗重力（引力）的唯一力量，因此这个值也是白矮星的质量上限

3 主序星质量若超过8倍的太阳质量，在演化结束前不能抛掉足够的质量成为稳定的白矮星，最终演化为中子星或黑洞

4 与大质量恒星晚期SN不同，白矮星中有热核反应燃料；短时间内整个星体C、O被耗尽，释放大能量

5 白矮星主要是碳氧元素组成，H很少：所以光谱中没有氢线

6 Ia型超新星在极亮时的绝对星等大约都是-19.5等：标准烛光 - 宇宙学测距

(10) 星等系统

1 光谱观测：

- 信息丰富（吸收线、连续谱、发射线）；
- 但是分光拍摄观测只能对较亮的恒星，且观测所需要的时间长

2 热光度(bolometric)观测

- 热光度：天体在整个电磁波段辐射的总光度，全波段测量困难！
- 大气吸收：只能在特定的波长窗口开展观测，如光学、近红外、射电
- 大气发射：人类造成的光污染；夜天本身也会发光（如黄道光）
- 解决办法：A测定在某一特定波长区间内天体辐射  
B滤光片：只能透过某些特定波长区间的光

$$\boxed{3} \text{ 滤光片: } F_{BP} = \int_0^{\infty} T_{BP}(\lambda) F_{\lambda}(\lambda) d\lambda \approx F_{\lambda}(\lambda_{eff}) \Delta\lambda$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda T_{BP}(\lambda) F_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int T_{BP}(\lambda) F_{\lambda}(\lambda) d\lambda}, \Delta\lambda = \int T_{BP}(\lambda) d\lambda$$

宽带: 带宽 > 30 nm

中带: 带宽 10-30 nm

窄带: 带宽 < 10 nm

**4 Vega星等系统:** 定义织女星 (Vega, A0型恒星) 在所有滤光片的视星等  $m = 0$

- $m = -2.5 \lg(F_{\lambda}) + 8.90 - ZP_{\lambda}$
- $m = -2.5 \lg(F_{\nu}) + 8.90 - ZP_{\nu}$

**5 AB星等系统:** 定义在紫外、远红外等波长区间, 没有准确测量的标准星组来定义星等系统, 发展了'基于流量'的星等系统来代替。 (Vega V波段为0)

- $m_{AB} = -2.5 \lg(f_{\nu}) - 48.60$
- $1 Jy = 1 \times 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
- $m = 25 - 2.5 \lg\left(\frac{f_{\nu}}{0.363}\right) (\mu Jy)$
- $f_{\nu} [\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}] = \frac{\lambda^2}{c} \cdot 10^8 \cdot f_{\lambda} [\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}]$
- $m_{BP} = -2.5 \lg \langle F_{BP} \rangle - 21.1$

**6 距离模数:**  $m-M$

**7 天体颜色:** 短波星等-长波星等, 越热越小

- B - V颜色蓝是A、F和G型早型恒星好的示踪; 但是不适合冷M型恒星 (辐射主要在红端, B-V颜色基本不变)
- V - K是M型恒星子类间以及其他晚型恒星的良好指标颜色

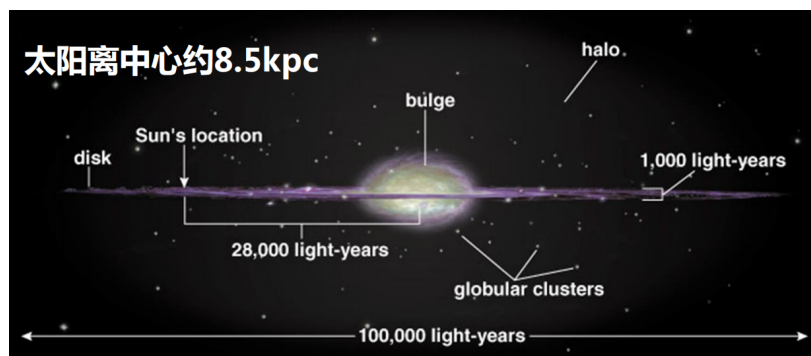
**8 热改正 (Bolometric Correction):** 把绝对星等 ( $M_V$ ) 换算成热星等须加的改正值

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

- 实际观测, 一般不能测量一颗恒星的所有光 (热光度); 只能用恒星大气模型来求得在不能直接观测的区域发射出来的能量
- 标度的零点通过将太阳的绝对热星等定为  $M_{bol, \odot} = 4.76$  来设定, 太阳的  $BC \approx 0.07$
- 对于辐射峰值主要在蓝、绿部分的恒星, 热改正很小。对于热星、冷星, 热改正较大

## 2. 银河系

(1) 银河系结构: 有旋臂结构的盘星系



**1 银盘 (disk):**

- 恒星的径向数密度变化可表示为:  $n(R) \propto \exp(-R/h_R)$
- 标长  $h_R$ : 即沿半径  $R$  向外移动距离为  $h_R$  时, 盘上恒星数密度  $n$  下降为原来的  $1/e$

- 标高 $h_z$ : 即垂直于星系盘方向恒星数密度下降 $1/e$ 倍所移动的距离
- 银盘可分为厚盘和薄盘。厚盘的恒星比薄盘恒星形成的早, 重元素较贫乏; 薄盘的标高是 $h_z \sim 300 - 400 pc$ , 下降快; 厚盘的标高是 $h_z \sim 1 kpc$
- 薄盘包含了盘星总数的95%; 年轻大质量恒星在薄盘中

2] 旋臂: 4条主要旋臂(矩尺、南十字、人马、英仙); 太阳位于猎户座旋臂(小)的内侧

3] 核球(bulge): 呈椭球形; 内部气体和尘埃少, 恒星形成活动弱; 主要是年老的恒星、分布十分密集

4] 银心: 在人马座方向; 银河系中心可能存在黑洞

5] 银晕: 由稀疏分布的小质量恒星、球状星团和星际物质组成的球状区域; 恒星密度很低, 为银盘的2%; 冷气体和尘埃少; 存在大量的热气体

## (2) 恒星运动

1] 晕星: 随机的椭圆轨道, 有不同倾角; 晕中, 运行慢; 盘附近运行快; 晕星不随着星系一起转动, 无规则

2] 盘星: 盘星随星系一起绕轴转动; 转动时, 恒星轨道在星系盘的上下穿越

3] 太阳绕银心的轨道大致是椭圆形(因受质量分布不均匀影响而略有偏离)

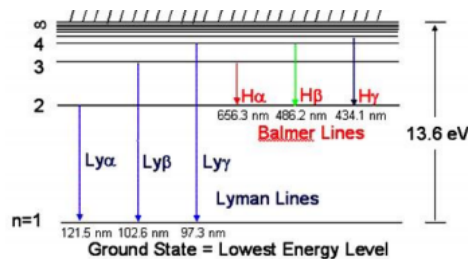
## (3) 银河系的气体

1] 星际介质: 恒星之间存在大量的稀薄气体和尘埃

- 尘埃: 吸收和散射穿过的星光, 或者本身产生热辐射, 而被探测
- 气体: 被电离的原子、中性原子和分子气体的辐射
- 气体和尘埃分布在盘很薄的层内, 在太阳位置附近(8kpc), 大多数中性氢气体(HI)分布在银盘中
- 平面的 $d < 100 pc$ 之内星系中的气体层厚度 $\propto$ 距银心的距离: 外厚、内薄
- 利用恒星光谱中的吸收线可研究星际气体的成份
  - 星际气体:  $>60\%$  H、 $\sim 25\%$  He
  - 星际尘埃 (C、Si等) 占星际介质总质量  $\sim 1\%$

2] 辐射过程

- **复合辐射**: 当离子的电子从较高能级跃迁到较低能级时, 产生的辐射称为复合辐射



Lyman-alpha线: H + 俘获一个电子变为中性, 从 $n=2$ 降到 $n=1$ 。释出光子的波长为 $1216 \text{ \AA}$ , 能量为 $10.2 \text{ eV}$

- **光致电离**: O、B型恒星表面温度高, 产生大量紫外(UV)光子

⇒ UV光子被气体中原子/离子 (H、O) 吸收, 引起光致电离

- 光致电离条件: 光子能量大于或者等于原子的电离能
- O、B型星产生 $\lambda < 912 \text{ \AA}$ 的UV光子、电离H: HIII区
- Lyman limit ( $912 \text{ \AA}$ ): 处于基态H原子电离对应的能量

⇒ 光致电离的结果: 产生大量的自由电子

⇒ 自由电子之间相互频繁碰撞, 建立电子气的平衡态速度分布

**斯特龙根球**: 年轻的O、B型恒星周围存在的电离氢区

- **韧致辐射**: 自由电子与离子发生近碰撞, 库仑力作用使电子获得加速度, 电子产生的辐射

- 电子在辐射过程前后都是自由的，又称自由-自由跃迁
- 韧致辐射是连续辐射
- **碰撞激发**：自由电子与气体内的原子或离子发生非弹性碰撞，引起它们被激发（动能→内能）
  - 被碰撞激发的原子或离子回到基态时，会发射出光子，这些光子组成的谱线称碰撞激发线



- 只有当A\*态在再次碰撞前衰变，才能看到一条发射线：1) 衰变要迅速，or 2) 气体密度相当低（通常每立方厘米只有几千个粒子，密度较高的气体，会进行相反的碰撞退激程序）

### 3 禁线

- **禁戒跃迁**：禁戒跃迁是指跃迁概率很小的跃迁，破坏了电偶极辐射选择定则：电四极辐射和磁偶极辐射
  - $P(\text{电偶极辐射}) \gg P(\text{电四极辐射和磁偶极辐射})$
  - $P(\text{容许跃迁}) \gg P(\text{禁戒跃迁})$ ：如果同时存在，则不会观测到禁线，禁线只能在密度非常低的环境
- 地球上，禁线不可能出现：处于亚稳态的原子在衰变前已被碰撞，离开亚稳态（容许跃迁只需  $10^{-8} s$ ，禁线  $> 1s$  或更长）
 

亚稳态时间： $\frac{1}{t_{coll}} = n_H \pi a_0^2 v_{th}$
- 禁线的发射谱线只在极低密度的外太空或地球极端的高层大气中出现
- 禁线强度非常强烈地依赖于发射禁线气体的密度  $n$  和温度  $T$  → 用来确定星系发射线区的密度和温度
- 禁线标识：用元素符号加方括号 [ ] 来标记；如  $I = 5007 \text{ \AA}$  的 [OIII] 线

### 4 精细/超精细结构线

- 精细结构：电子自旋和轨道角动量产生的磁矩之间的相互作用（耦合）
  - 相应的能量差大约只有主能级之间差的  $1/137^2$ ，所以辐射波长主要在远红外区域
- 超精细结构：是核自旋和轨道电子产生的磁场之间耦合结果。能级分裂比精细结构谱线还要小2000倍 - 21cm线
- **H原子21厘米谱线**：H原子中的电子自旋与原子核自旋处于平行状态和反平行状态间的跃迁，产生的辐射：频率1.42 GHz，波长21厘米
  - 尽管单个H原子的跃迁概率极低，但由于星际空间中的中性氢非常丰富，其产生的21厘米谱线仍然能够观测到
  - 射电波段受尘埃的影响小：21cm线是研究银河系、大尺度结构的重要手段。

### 5 示踪分子

- $H_2$  具有对称结构，无偶极距： $H_2$  辐射极弱
- CO 丰度仅次于  $H_2$ ：1.3mm 和 2.6mm 的转动跃迁在密度  $n(H_2) \sim 100-1000 \text{ cm}^{-3}$  通常最强
- 利用CO的毫米射电辐射，可研究  $H_2$  的分布

### 6 星际尘埃

- 星际物质中，尘埃粒子的质量 ~1%
- 主要是硅酸盐和碳粒，尺寸  $< 1 \mu\text{m}$
- 尘粒能有效地散射和吸收波长小于其自身尺度的辐射
- 被弥漫的星光加热的尘埃具有  $T \sim 10 - 20K$ ，在200微米处辐射；亮星附近的尘埃较热

### 7 尘埃消光

- 尘埃层的光深： $\tau_\lambda = 0.921 A(\lambda) = 0.921 E(B - V) \kappa(\lambda)$ ， $\kappa$  为不透明度
- 蓝和紫外辐射比红光被尘埃散射和吸收得更多：波长越短消光越严重 → 恒星显得更暗、更红



- 可见光波长  $3000\text{\AA} < \lambda < 1\text{nm}$  的范围内, 星际尘埃的  $k$  可取近似  $\kappa_\lambda \propto 1/\lambda$ .
- 尘埃和气体成团状分布, 高银纬处可假设尘埃量与气体量成正比
- 利用测量中性氢的21厘米线辐射, 可以估计银河系的消光  $A_V$  :

Def

$$A(\lambda) = -2.5 \lg \left( \frac{f_{\text{observed}}(\lambda)}{f_{\text{intrinsic}}(\lambda)} \right)$$

$$A_\lambda = (2.5 \lg e) \tau_\lambda \left( \frac{1}{2.5 \lg e} = 0.921 \right)$$

$$E(B - V) = A_B - A_V$$

$$R_V = \frac{A_V}{E(B - V)}$$

有

$$5 \lg(d) - 5 = m_\lambda - M_\lambda - A(\lambda)$$

$$k'(\lambda) = \frac{E(\lambda - V)}{E(B - V)} = k(\lambda) - R_V$$

$$\xi = \frac{\tau_V}{N_{21}} \approx \frac{0.921 R_V E(B - V)}{N_{21}}$$

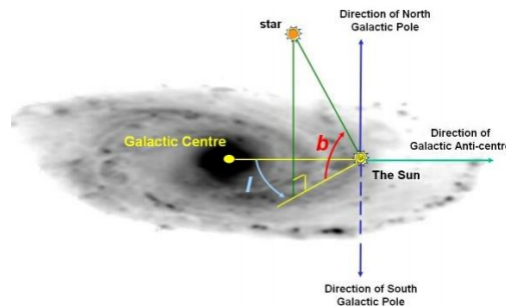
#### (4) 坐标系

##### 1 岁差: 地球自转轴进动引起春分点的位移现象

原因: 在日、月的引力作用下, 地球自转轴在空间指向并不固定, 而是缓慢而连续地运动 (陀螺运动)

##### 2 银道坐标系: 以太阳为中心, 以银道面作为基本平面的坐标系

- 银纬和银经, 分别以  $b$  和  $l$  标示
  - 银纬( $b$ ): 给出一颗恒星离开银盘平面的角度,  $0 - \pm 90^\circ$
  - 银经( $l$ ): 银经的起算点选为银心 (人马座方向). 银经从银心顺银道向东量度, 从  $0$  到  $360^\circ$



- 在银河系内的天体位置会保持着相对稳定; 但是对银河系外天体, 因为并未随着银河系一起自转, 便会在银道坐标系上产生显著的位置改变

## 3. 河外星系

- (1) Hubble 星系分类: 椭圆星系(E)、旋涡星系(S)、棒旋星系 (SB)



1基本组成：球，盘，棒，臂

(2) 椭圆星系

1按照椭率大小分为E0、E1...E7等八个次型； $n=10(a-b)/a$ ；a和b为半长/短轴

2椭圆星系特性：(分类、星族、气体、数量、光谱)

- 椭圆星系没有星系盘，颜色偏红；主要由年老的恒星构成
- 没有或仅有少量的冷气体和尘埃，有大量的热气体
- 富星系团中椭圆星系占主导地位；星系中心最亮，亮度向边缘递减

3光度不同的椭圆星系

- cD星系：巨椭圆星系，为星系团中最明亮的星系。巨大弥漫包层可以延伸到~数百kpc；比银河系亮100倍以上
- 普通椭圆星系：光度为银河系数倍，特征尺度为数十kpc
- 暗椭圆星系：光度不足银河系光度十分之一，分为致密矮椭圆星系；暗弱的弥漫矮椭圆星系；更暗的矮椭球星系。

4椭圆星系中的恒星运动

- 亮椭圆星系：恒星随机运动为主；旋转少
- 较暗椭圆星系：有较多的旋转运动；随机运动较小
- dE和dSph星系：矮星系内部恒星几乎没有有序旋转

5椭圆星系的光谱

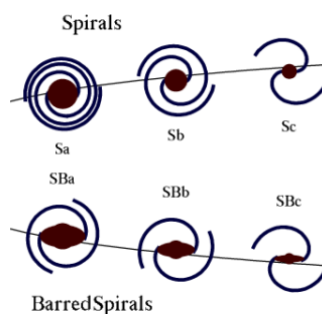
- 椭圆星系光谱的特征是强吸收线，这是由于低光度恒星大气中的金属元素。
- 很少或没有发射线，因为基本上没有年轻的恒星，也没有冷的气体。

(3) 旋涡星系

1旋涡星系构成：核球+ (棒、环) + 盘 + 旋臂 + 晕

2旋涡星系分类：核球大小和旋臂的缠卷程度

- Sa中心区最大，旋臂紧卷
- Sb中心区较小，悬臂开展
- Sc中心区成为一个小亮核，悬臂松弛
- Sa→Sc：星系盘中，年轻的恒星、气体比例增加



3 旋涡星系的光谱：强发射线，这是由于热的年轻恒星加热周围的气体，以及由于较老的潜在恒星群的吸收特征

**光谱的特征：**连续谱、吸收线、发射线

(4) 棒旋星系：由恒星组成的棒贯穿其核心部分的旋涡星系

1 旋臂源于棒的两端，~1/2 的旋涡星系中有棒

2 按照棒的大小和旋臂的缠卷程度可以分为：SBa, SBb, SBc：棒逐渐变弱；旋臂缠卷松散

3 银河系可能是一个SBb或SBc型的棒旋星系

(5) 透镜星系：介于椭圆星系和旋涡星系之间的过渡型星系

1 无旋臂的盘星系，外形像侧视的透镜而得名

2 根据核心是否有棒状结构，相应为S0或SB0

3 透镜状星系与旋涡星系的主要差别是没有旋臂

透镜状星系与椭圆星系的主要差别是有星系盘

4 透镜星系偏向于处在星系的密度较高的空间区域

5 主要由年老恒星组成，气体少，与椭圆星系相似

(6) 不规则星系：数目占星系总数的四分之一

1 小的不规则星系称为矮不规则星系；与矮椭圆星系的不同之处是它们有气体和年轻蓝星

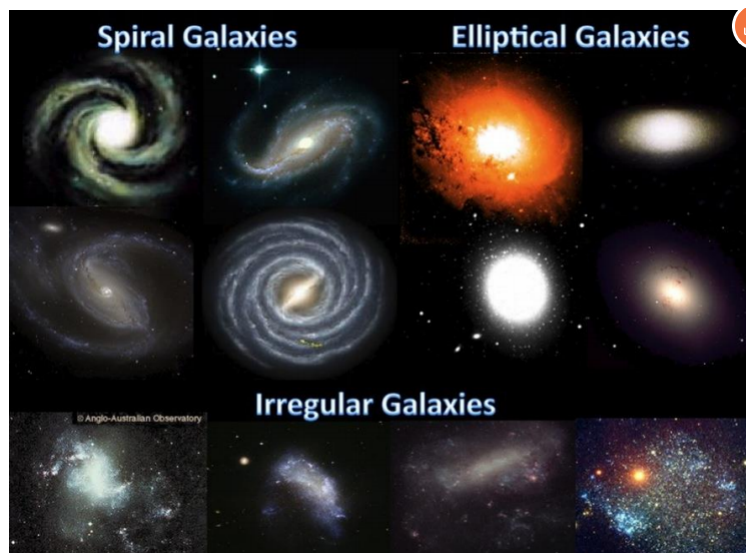
2 矮椭圆星系很可能是失去或用尽了气体的矮不规则星系

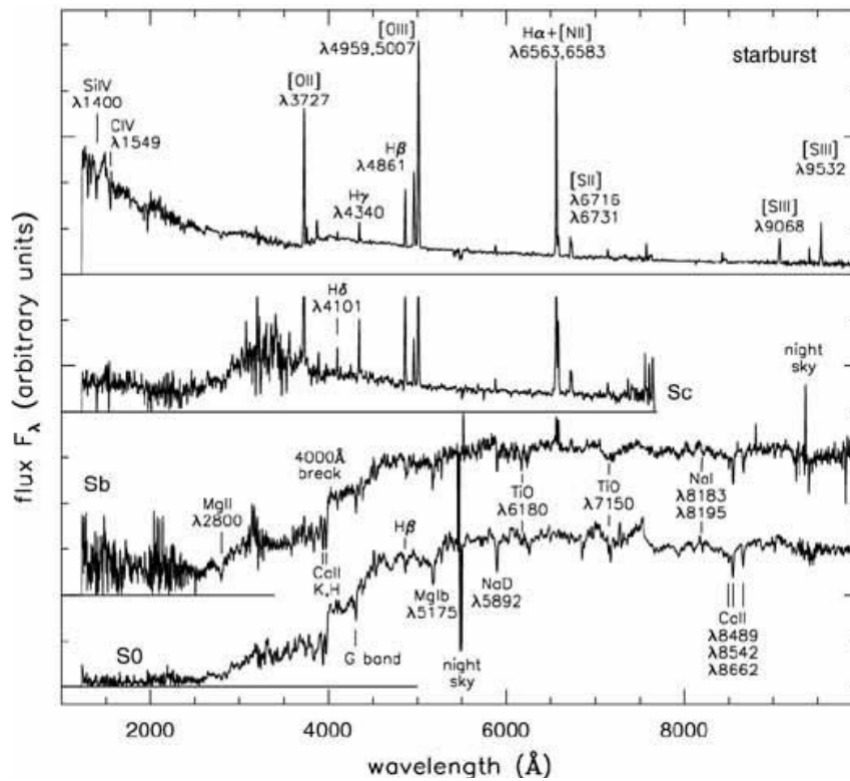
3 内部以年轻星族为主、气体含量多，质量不大： $< 10^{10} M_{\odot}$

4 不规则星系中包括星暴星系、并合星系等恒星形成星系

5 由于热的年轻恒星和周围的HII区域，不规则的星系光谱的特征是很强的发射线

晚期星系通常是低光度的星系；E和S0是高光度的





(7) 星系形态与环境

- 1 近邻星系样本中：旋涡星系比例~70%，~30%的E和S0星系，~3%的不规则星系（选择效应，星等限样本）
- 2 旋涡星系多位于星系群中（由几十个星系组成）；椭圆星系多位于星系团中（成百上千个星系组成）

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	只有年老的恒星	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 and 尘埃	富含气体和尘埃
旋臂中有恒星形成过程	近 $10^{10}$ yr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不规则运动	恒星围绕星系核心作不规则轨道运动	恒星和气体作不规则运动

(8) 星系测光（定量描述星系形态分类）

- 1 恒星是点源：利用孔径测光，可方便测量其积分星等 - 视星等 or 绝对星等

星系是延展源，尺寸可延展到几个角分，外围的亮度可能比天光还暗，积分范围很难确定

- 2 描述方法：

- 二维面亮度分布  $I(x)$ ：是指星系图像上的一个特定点x处，每平方角秒天空的光量  $mag/arcsec^2$

$$I(x) = \frac{F}{\alpha^2} = \frac{L/4\pi d^2}{D^2/d^2} = \frac{L}{4\pi D^2}$$

星系任何一点的面亮度，不依赖于星系光度距离 d（当d不是特别大时）

$$I(mag/arcsec^2) = M_{\odot} + 21.572 - 2.5lgL(L_{\odot}/pc^2)$$

- 等照度线：星系图像上面亮度相等像源（pixel）的连线（等面亮度轮廓线）

- 星系等照度线的位置与观测者的距离无关
- 星系面亮度随径向的分布，没有明显截断

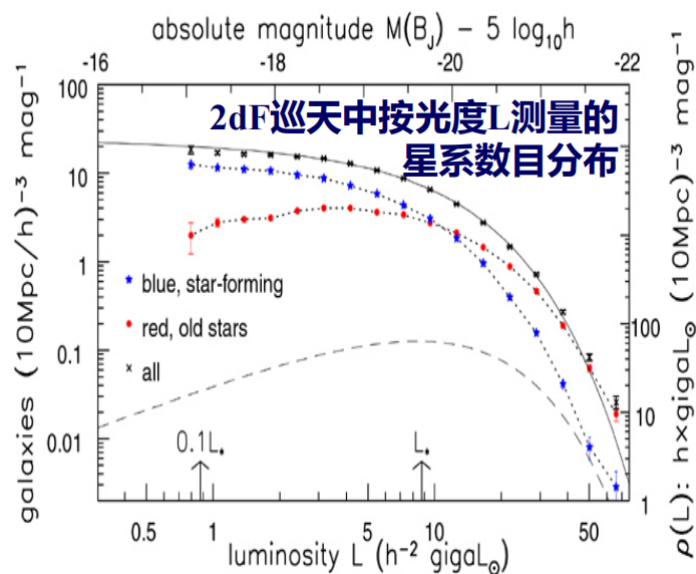
- 星系大小: 经常选择  $I_B(x) = 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (B波段25等的等照度线)处, 测量星系半径, 记为  $R_{25}$ ; 霍姆伯格半径:  $I_B(x) = 26.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$

- 测光星等:
  - 孔径星等
  - 总星等
- 一维径向分布  $I(r)$

### 3 夜天亮度

- 紫外—红外波段的平均天光面亮度
- 天空比星系的大部分区域亮。星系测光观测须在无月夜进行
- 天光背景
  - 遥远、暗弱河外星系漫射光; 银河系内暗弱、未分辨的恒星星光
  - 黄道光: 太阳系中的颗粒散射太阳光; 大气辐射产生的红外谱线

### 4 光度函数: $\phi(L)dL = \phi^*\left(\frac{L}{L^*}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right) \frac{dL}{L^*}$



(1) 多数非常亮的星系是红色的:多为椭圆星系和S0星系 (2) 多数暗星系是S和Irr:内部有新诞生的、大质量恒星, 呈现为蓝色 (3) 尽管S和Irr数目众多, E却包含了恒星总质量的大约一半

- 星系团样本:
  - 相对简单, 因成员星系有相同的距离
  - 将星系按视星等分区间, 求星系计数:  $\Phi(m)$
  - 利用星系团红移, 视星等  $\rightarrow$  绝对星等:  $\Phi(M)$
  - 修整前景和背景星系影响 (主要是低光度部分)
- 场星系样本: 样本的完备性
  - 样本有一定的面亮度极限, 暗星系无法观测到
  - 需要引入各种方法 ( $V/V_{\text{max}}$ ), 进行修正; 复杂
- 用途:
  - 约束星系形成模型
  - 星系演化机制
  - 星系特性

## 4.宇宙中的星系

### (1) 哈勃定律

1 星系的视向速度  $V_r$  有两个分量：宇宙膨胀 ( $H_0 d$ ) 和本动速度  $V_{pec}$

$$V_r = H_0 d + V_{pec}$$

2 宇宙学原理：宇宙在大尺度上是均匀的和各向同性的。

### (2) 宇宙的未来

1 Friedman方程:  $1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k$

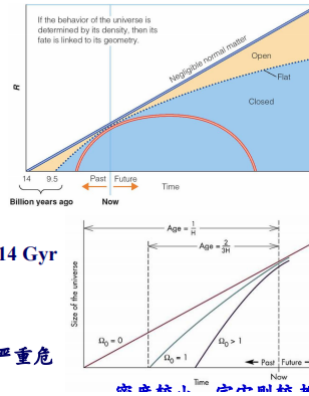
若不考虑暗能量(即  $\Omega_\Lambda = 0$ ):  $1 = \Omega_M + \Omega_k$

$\Omega_M > 1 \rightarrow \Omega_k < 0 \rightarrow k > 0$ : 正曲率空间  
束縛宇宙, 膨胀后收缩  $\rightarrow$  热死亡

$\Omega_M < 1 \rightarrow \Omega_k > 0 \rightarrow k < 0$ : 负曲率空间  
开放的宇宙, 无限膨胀  $\rightarrow$  冷死亡

$\Omega_M = 1 \rightarrow \Omega_k = 0 \rightarrow k = 0$ : 平直空间,  
宇宙无限膨胀(临界  $\rho = \rho_c$ )  $\rightarrow$  冷死亡

- 如果  $H_0 \approx 71 \text{ km/s/Mpc}$ 
  - $\Omega_0 = 0$ ,  $v$  不随时间变化,  $t = 1/H_0 \approx 14 \text{ Gyr}$
  - $\Omega_0 = 1$ ,  $t = 2/(3H_0) \approx 9 \text{ Gyr}$
  - $\Omega_0 > 1$ ,  $t < 9 \text{ Gyr}$
- 宇宙加速膨胀发现之前, 宇宙学面临严重危机: 球状星团的年龄大于宇宙年龄



### (3) 密度和年龄

1 暗能量：观测 Ia 型超新星更暗  $\rightarrow$  距离更遥远  $\rightarrow$  宇宙在加速膨胀  $\rightarrow$  宇宙中存在很大比例的具有负压物质

2 加速膨胀的宇宙

- 观测到的宇宙微波背景辐射涨落表明宇宙的位形是平直的
- $\Omega_k = 0.00$ ;  $\Omega_M = 0.32$ ;  $\Omega_\Lambda = 0.68$ : 宇宙现在正在加速膨胀
- 宇宙的年龄:  $t = 137 \text{ 亿年} = 13.7 \text{ Gyr}$

### (4) 宇宙中的星系

1 星系是研究宇宙的重要探针

- 年老的恒星是宇宙化学演化的化石
- 高红移星系反应了宇宙早期的特征

2 宇宙的历史约束了星系特性

- 约束星系年龄: 不可能比宇宙更老
- 宇宙膨胀影响我们对星系特征观测

3 宇宙学红移: 由于宇宙空间的膨胀, 使天体发出的光波被拉长, 谱线因此“变红”

- 标长  $R(t)$ : 宇宙尺度如何随时间改变的量, 只依赖于  $H_0$  和现在的密度  $\rho(t_0)$

$$V_r = \dot{d} = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} d = H(t) d$$

- 光波长正比于  $R(t)$  膨胀, 频率按因子  $1+z$  减小。遥远星系中的所有时间过程, 看起来将按此因子拉长, 观测遥远宇宙时看到事件将以慢节奏发生

$$1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_e} = \frac{R(t_0)}{R(t_e)}$$

4 红移:

- 多普勒红移: 由于辐射源在固定空间中远离所造成

- 引力红移：由于光子摆脱引力场向外辐射所造成的
- 宇宙学红移：由于宇宙空间自身的膨胀所造成的
- 引力红移只有在中子星或者黑洞强引力场周围较大
- 宇宙学红移在100Mpc尺度上非常明显
- 近邻星系，星系在星系团中运动（本动）所造成的多普勒红移和宇宙学红移的量级差不多

## 5.前星系时代

### (1) 炽热的早期宇宙

- 1 宇宙膨胀倒推：早期宇宙必然是致密和高温的，宇宙中存在大量高能粒子
- 2  $T \sim 10^{32} \text{K}$  (普朗克时期)：时空创生
- 3  $T > 10^{12} \text{K}$  (强子时期)：充满了可以把任何原子核粉碎为其组成粒子的高能光子
- 4 宇宙组成是高度相对论性的基本粒子和及其反粒子；光子和粒子数目大致相等
- 5  $T \sim 10^{12} \text{K}$ ：温度下降，发生重子（质子、中子）和反重子湮灭反应，留下大量轻子；轻子包括光子、正负m介子、正负电子(e)、中微子(n)、以及极少的核子
- 6  $T = 10^{12} - 5 \times 10^9 \text{K}$ 时：正负m介子湮灭消失；中微子开始与其他粒子退耦，成为自由粒子
- 7 宇宙中的中微子、辐射、正负电子和残存的核子其时处于热平衡（轻子时期）
- 8  $T = 5 \times 10^9 - 10^4 \text{K}$ ：正、负电子对开始迅速大量湮灭，宇宙中余下的主要成分为光子、中微子和反中微子（辐射时期）

### (2) 制造元素

- 1 较重的核，完成宇宙轻元素合成（早期核合成时期）
- 2 中子的平均寿命为  $\tau_n = 886 \pm 1 \text{s}$ 。经过  $\tau_n$  之后，中子数将减小一个因子  $1/e$
- 3 大约25%（以质量计）的物质变成氦，还有少量的氘、锂和其他氢原子核
- 4 多余的质子将变为氢原子核，约占总质量的75%

### (3) 复合时期

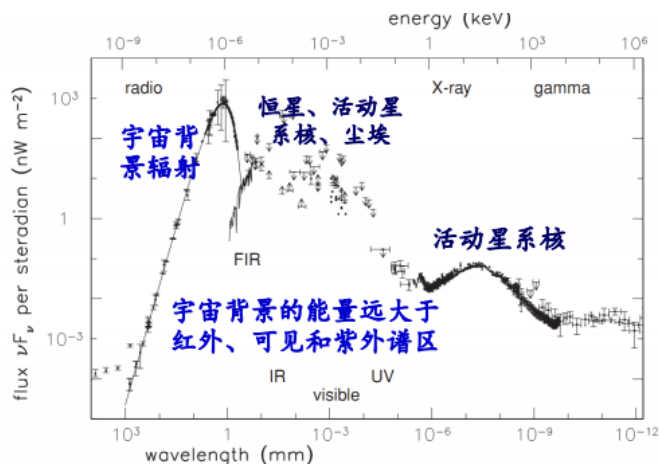
#### ——光和物质脱耦

- 1  $T > 3000 \text{K}$ ：高温使得氢和氦处于电离状态，大量的自由电子导致光子自由程短。辐射与自由电子之间强烈耦合，光传不出来（**黑暗时期**）
- 2  $T \sim 3000 \text{K}$ ：光子能量不能电离氢，绝大部分氢核与自由电子复合形成中性氢原子。物质与辐射退耦，光子可自由运动，宇宙变得中性而透明（**复合时期**）
- 3 复合时期的历史遗迹：**宇宙微波背景辐射**

#### ——星系形成

- 1 只要物质和辐射之间有耦合，物质分布中的微小扰动都会被光子的扩散所牵制，发生粘滞性衰减
- 2 物质和辐射解耦，物质变为独立后，质量稍有超出的区域，其范围就会由于对周围的引力作用而增长
- 3 向外的光子压强不再能阻止物质塌缩，星系和星系团开始形成：第一代天体

#### ——CMB



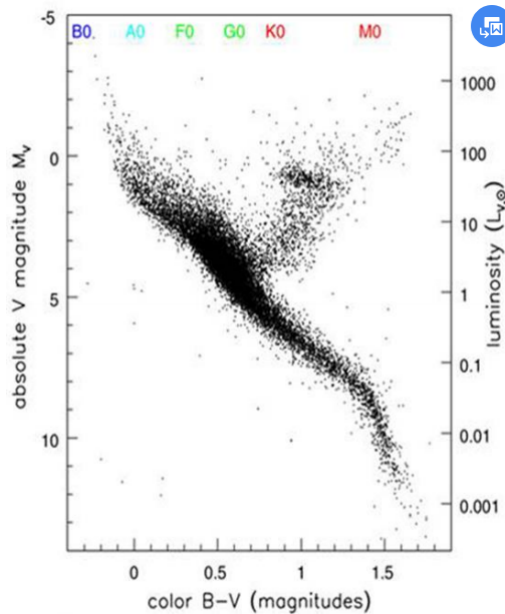
### 河外背景辐射

- 从亚毫米波到  $E \leq 0.1\text{keV}$  的紫外区：恒星、活动星系核、尘埃辐射
- X射线和 $\gamma$ 射线的高能尾：活动星系核
- 射电-mm：能量远大于红外、可见和紫外谱区。要想把这样巨大的能量解释为来自大爆炸以外的任何其他源，会是非常困难的事

## 二、概论银河

### 1.太阳的邻域

(1) 太阳附近恒星HRD



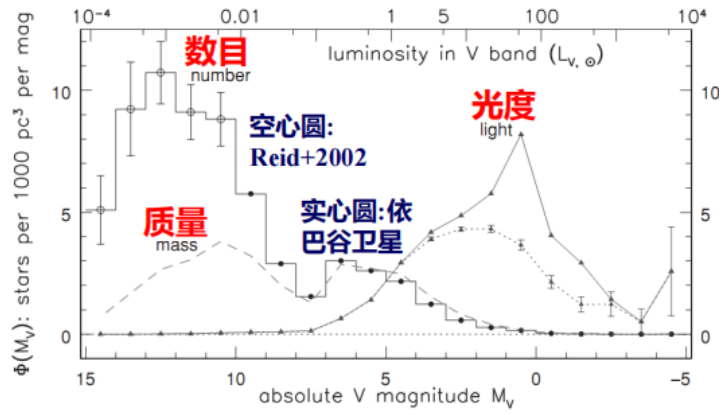
1主星序宽：对于比太阳亮的恒星，主要是因为它们的年龄不同；对于较暗的星，金属丰度变化导致主序带比较宽

2三角视差：

- 视差小于 $0.01''$  将很难区分:利用三角视差法，在地球上观测  $d > 100\text{pc}$  的恒星困难（空间可更远、卫星）
- 只适合测量太阳周围的恒星

(2) 光度函数和质量函数



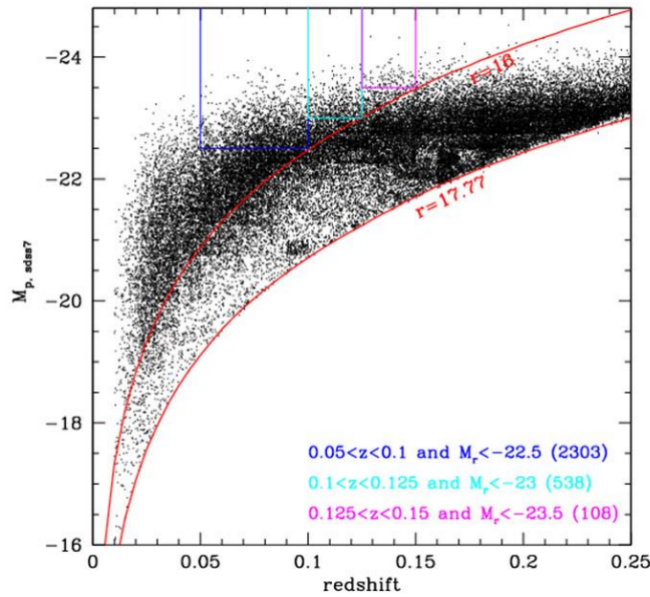


1 光度函数：描述某一类天体在内禀光度上的分布形式，常表示为每立方秒差距中某种光度的恒星（星系）数目多少

2 测量光度函数的困难

- 亮端：亮天体数目很少，且恒星的空间分布不均匀
- 暗端：受星等极限影响，暗星观测不到或很难发现
- 双星、星协因靠得非常近难以区分，影响光度函数

3 马姆奎斯特偏差(Malmquist bias)：流量限巡天，距离越远处的暗天体，被观测到的概率就越低；因而在较远距离上，低光度天体的数量，将会被过低估计



4 改正马姆奎斯特偏差 → Volume Weighting

每个恒星（星系）对光度函数的贡献可以乘以一个权重因子： $1/V_{max}$ ； $V_{max}$ 表示在某一极限星等时，某一光度的恒星可以被观测的最大体积（最远距离）。

$$\text{Flux limit } f_{lim} \quad f_{lim} = \frac{L}{4\pi d_{max}^2} \quad d_{max} = \left(\frac{L}{4\pi f_{lim}}\right)^{1/2} \quad V_{max} = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{L}{4\pi f_{lim}}\right)^{3/2}$$

$$\Phi(L) = \frac{N(L)}{V_{max}}$$

5 恒星对光度、质量的贡献

- 几乎所有的光都来自较亮恒星
  - 稀少亮星对星系光度的贡献，远多于比太阳( $M_V = 4.83$ )暗的恒星对光度的贡献
  - 星系总光度强烈依赖于它最近有没有形成大质量的、短寿命的恒星：SFH（恒星形成历史）
- 发出大多数光的亮恒星对质量却没有贡献

- 红巨星质光比(M/L)比主序星还小，对质量贡献极微
- 太阳邻域，几乎全部的质量都在K和M等晚型矮星中

## 6 初始光度函数

假设盘在其整个历史中一直在以均匀的速率形成恒星, 即  $SFR = \text{const.}$

$$\Psi(M_V) = \Phi_{MS}(M_V) \quad \text{for } \tau_{MS}(M_V) \geq \tau_{gal},$$

$$= \Phi_{MS}(M_V) \times \frac{\tau_{gal}}{\tau_{MS}(M_V)} \quad \text{when } \tau_{MS}(M_V) < \tau_{gal}.$$

## 7 初始质量函数(Initial Mass Function): 单位体积内新形成恒星的相对数目在质量上的分布

- Salpeter's IMF:  $\xi(M) = \xi_0 M^{-2.35}$
- 星云破碎后, 形成的小质量恒星数目远大于大质量恒星的数目.
- 大质量恒星少: 寿命短, 形成少

## 2. 银河中的恒星

分光视差: 假设“具有相同光谱型的恒星, 光度相同”。只适用于主序星

### (1) 运动学距离

#### 1 恒星相对于太阳系 (LSR) 的运动速度可分解成两个分速度

- 视向速度  $V_r$ : 朝向或远离观测者的速度分量
- 可利用恒星或气体光谱中的发射线或吸收线的Doppler移动测量
- 切向速度  $V_t$ : 恒星在天空横向视运动角速率

#### 2 自行 $\mu$ : 恒星相对于太阳系的质量中心, 单位时间其位置在角度上的变化, 单位是“角秒/年”

#### 3 自行 $\mu$ 非常小, 常以每年毫角秒(mas)测量; 切向速度 $V_t$ 是距离 $d$ 和自行 $\mu$ 的乘积

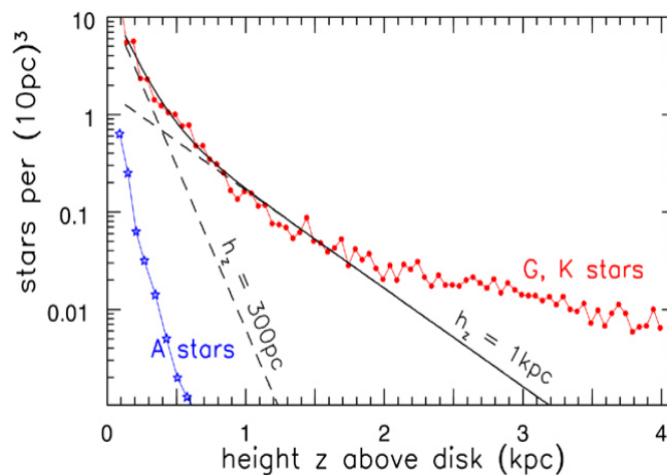
如果知道  $V_r$  和  $V_t$  关系, 则可通过测量  $V_r$  (计算  $V_t$ ) 和自行  $\mu$ , 求出天体距离  $d$

### (2) 测光视差: 利用恒星颜色等观测信息, 确定恒星光谱类型, 计算恒星距离的一种方法

#### 1 对许多暗星拍摄高质量的光谱, 需要在望远镜上进行长时间观测

#### 2 变通办法: 由恒星的色指数估计其光谱型, 并用其他指标来认定它是巨星还是矮星

### (3) 银盘的垂直结构--南银极方向



#### 1 恒星标高

- 晚型F、K型矮星:  $h_z \approx 300 - 350 \text{ pc}$ ; 早型A型矮星:  $h_z \leq 200 \text{ pc}$
- 盘内的气体, 以及与之混合的尘埃, 被约束在甚至更薄的层内

#### 2 为何较老的恒星有较大的标高?

- 恒星在绕转时会受到银盘内和旋臂内的恒星和气体团块的引力作用
- 引力作用，使得恒星在径向运动和垂直方向运动速度会随时间累加
- 年龄较老的恒星，运动得更快，标高较大：较老恒星一般运动较快

### 3 盘的垂直结构

- 距银盘面  $d < 400\text{pc}$  区域，为薄盘；外面为厚盘， $h_z \approx 1\text{kpc}$ ，厚盘的恒星数密度较小
- **薄盘**：有不同年龄的星族，金属丰度高： $0.5Z_{\odot} \leq Z \leq Z_{\odot}$
- **厚盘**：年老的星族；金属丰度低： $0.1Z_{\odot} \leq Z \leq 0.5Z_{\odot}$
- 厚盘可能是银河系早期薄盘的遗迹：
  - 与伴星系相互作用，盘会受到震动，将大部分能量转换为恒星随机运动
  - 气体会落入盘的中平面；后来从中形成的恒星，构成我们今天观察到的薄盘

(4) **古尔德带 (Gould's Belt)**：银河系中横跨3,000光年直径，与银盘面夹角 $\sim 16 - 20^\circ$ 的恒星带

1 星族：由大量年轻O、B型恒星组成

2 古尔德带大约形成于30--50Myr前

3 起源：可能是一个暗物质泡(blob)与银河系分子云碰撞，形成一个离开银盘的恒星形成带。其他星系也发现了类似的结构

4 HI气体云形成一个类似的倾斜环，从离我们约150 pc处以1 -- 2 km/s的速度向外膨胀

5 等太阳绕银河系再转几圈，古尔德带的恒星将可能进入银盘中，最终变成盘星

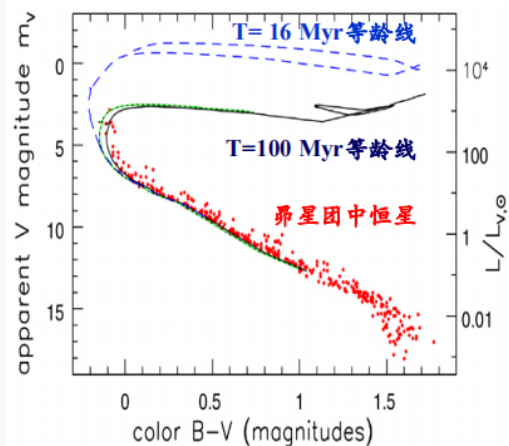
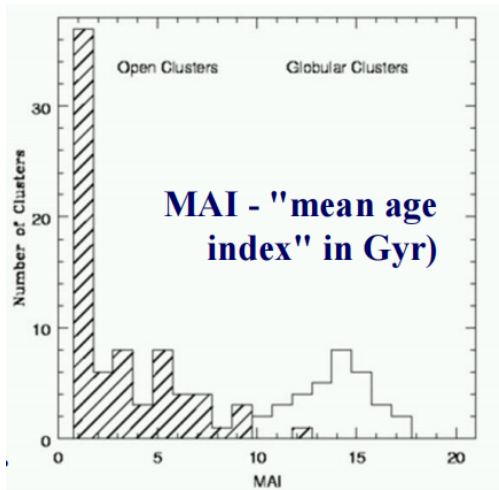
(5) 星团测距

1 **星团**：由十几颗至上百万颗恒星组成的有共同起源、相互之间有较强的力学联系的天体系统

- 星团有很多颗恒星组成，亮度大 $\rightarrow$ 可以更大范围的测距；
- 从同一气态原始物质中几乎同时形成，金属丰度一样 $\rightarrow$ 可以更加精确测量距离

2 **疏散星团**

- 光度范围较大；中心密度可达  $\sim 100L_{\odot}\text{pc}^{-3}$
- 核半径大小 $r_c$ 一般为数秒差距 (a few pcs)
- 内部恒星具有小的随机速度， $\sigma < 1\text{ km/s}$
- 质光比 $M/L < 1$ ：随年龄增大， $M/L$ 会增加
- 疏散星团多处于靠近银河系盘平面、旋臂
- $\sim 1200$ 个已知OC， $\sim 5\%$  $T > 1\text{Gyr}$ ，多数 $T < 300\text{Myr}$



3 **等年龄线**：年龄相同的各种质量的恒星在赫罗图上的位置线

- 星团中所有恒星具有相同的年龄和相同的重元素丰度，主序很窄

- 利用邻近星团观测，结合恒星演化理论，把星团的颜色同其年龄和金属丰度联系起来：颜色→年龄、金属丰度
- 观测其它星系中星团时，只需测量积分光：将其颜色同银河系星团比较，得到河外星系中星团年龄和化学组成

例：将理论的等龄线进行移动，拟合星团中恒星在HRD上的分布→获得星团的距离模数  $(m - M)_0 = 5 \log_{10}(d/10\text{pc})$  → 昴星团的距离  $d = 132\text{pc}$

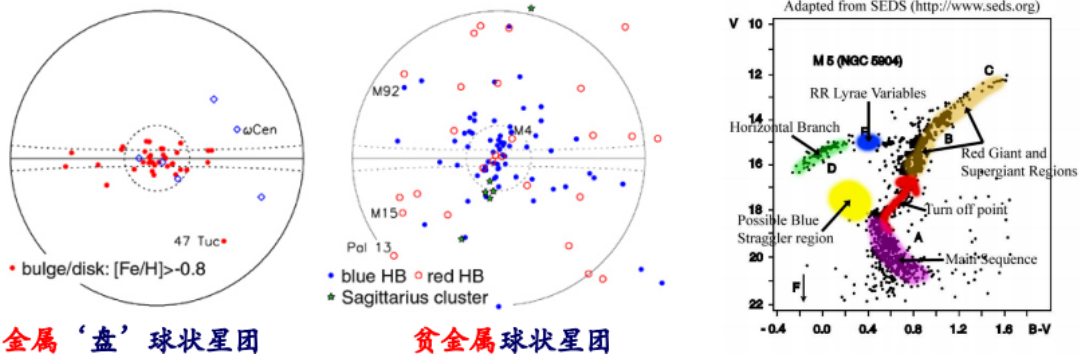
#### 4 球状星团

- 球状星团包含的恒星数目多，结构更紧密。光度  $L \approx 10^4 \sim 10^6 L_{\odot}$
- 内部恒星具有较高随机速度  $\sigma_r$ ；星族的金属丰度低，星族年老
- 在核半径  $r_c$  以内，恒星的数密度大致为常数
- 在潮汐半径或截断半径  $r_t$  处，恒星数密度锐降至零

#### 5 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

#### 6 银河系球状星团分布



富金属‘盘’球状星团

贫金属球状星团

- 富金属球状星团在银河系内区为数较多，而且离中平面较近；可能是同核球和厚盘一起形成的。
- 贫金属球状星团围绕银河系中心形成一个大致球形
  - 有红水平支的球状星团(相对年轻)，分布区域更加弥散
  - 有蓝水平支的球状星团(相对年老)，向银河系中心聚集
- 多数贫金属球状星团不遵循圆轨道：晕星团的轨道几乎是随机取向的，富金属球状星团像盘中的恒星一样旋转

#### 7 晕区恒星：球状星团和晕星

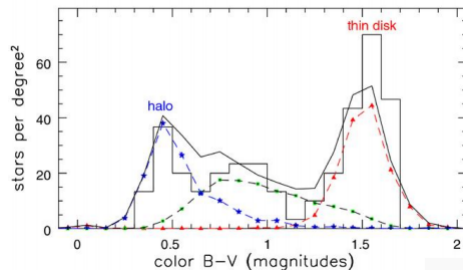
- 银河系晕中包括贫金属的球状星团和贫金属、年老的晕星(不属于星团)
- 晕星数目比球状星团多  $\sim 100$  倍，某些晕星金属丰度为太阳金属丰度的  $10^{-5}$
- 太阳周围（银盘附近）的贫金属晕星极少，晕星轨道类似于贫金属球状星团
- 晕星相对于太阳运动非常快，可以通过高自行速度发现近邻的晕星
- 有些晕星是被银河系引力瓦解或撕碎的球状星团的遗迹

例：球状星团帕洛马5可能已失去90%的恒星；从它伸出的两条长的恒星尾跨天空大于  $10^\circ$

- 有些贫金属晕星遵循共同的轨道，可能是被俘获的伴星系的遗迹

#### 8 贫金属晕星

- 贫金属晕星的总质量只有约  $10^9 M_{\odot}$ ，比盘或核球中的恒星总质量小得多
- 几乎所有蓝星都是晕星，而几乎所有红星(消光红移)都在薄盘中：利用颜色区分不同区域的星族



## (6) 红外观测：核球

- 太阳在银盘附近，银盘中存在大量尘埃：观测研究银河系核球和核心的最佳方法是使用红外（IR）观测
- 近红外图像显示银河系有一个扁平的中央核球：它贡献了银河系总光 ~ 20%；恒星金属丰度和年龄范围大

### 1 核球星族：相对年老，年龄和金属丰度分布较宽

- 金属丰度：气体耗散了其主要的能量，形成一个稳定的旋转盘，星系恒星形成由内而外，导致星系中心金属丰度高，外面金属丰度低
- 球与棒的起源：
  - 棒来源于盘的不稳定性。
  - 棒自身的不稳定产生了核球

## (7) 银河系：核心

- 核心消光30等，使光学观测不可能
- 观测到电离气体，线发射，尘埃，星团

### 1 星系形成

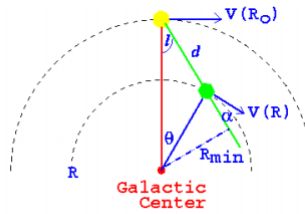
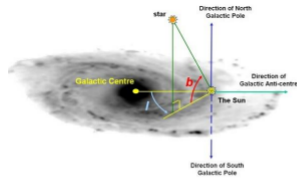
- 内部200pc的分子材料相对热和致密
- 高密度有助于恒星的形成，但高温则不能
- 恒星形成率(SFR)~ $1 M_{\odot}/\text{yr}$
- 银河系SFR估算
  - 取质光比 $M/L_V \approx 2$  (星系的 $M/L_V$ 介于2~10) 银盘光度  $L_V \sim 1.5 \times 10^{10} L_{\odot}$ ；由质光比  $\rightarrow$  银盘恒星质量  $M^* \sim 3 \times 10^{10} M_{\odot}$
  - 为了在10Gyr内把盘建构起来，必须每年产生 (3 - 5)  $M_{\odot}$ 的恒星，即为SFR

## 3. 星系旋转

### (1) 较差自转：是指一个天体在自转时，不同部位的角速度互不相同的现象

- 较差自转在大多数非固体的天体中存在，比如星系、巨型气体行星等等
- 由于旋涡星系的自转是较差自转，内部的自转角速度大于外部的角速度，旋臂会越缠越紧，最终完全缠绕在一起：旋臂缠绕问题  $\rightarrow$  密度波理论

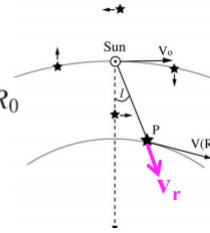
### (2) 测量银河系转动曲线：切点法



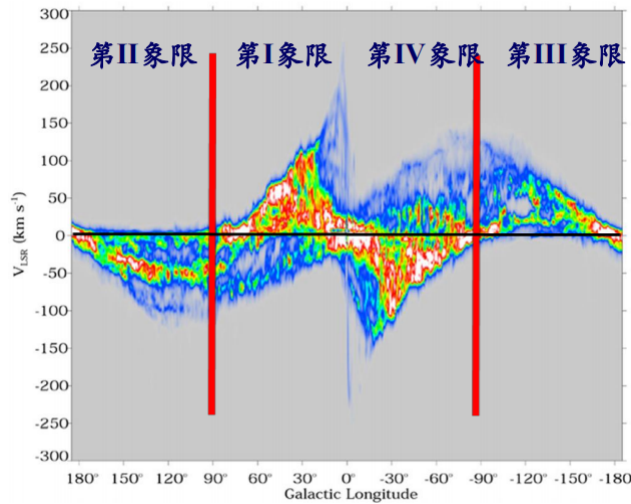
- ◆ 在半径 $R_0$ 处，太阳以速度 $V(R_0) = V_0$ 运转  
(假定轨道为圆轨道)
- ◆ 半径 $R$ 处的一颗恒星 $P$ ，轨道速度为 $V(R)$ ；  
视向速度为 $V_r$  (离开我们的速度)：

$$V_r = V \cos \alpha - V_0 \sin l. \quad \sin l/R = \sin(90^\circ + \alpha)/R_0$$

$$V_r = R_0 \sin l \left( \frac{V}{R} - \frac{V_0}{R_0} \right) \quad V_r = R_0 \sin l (\omega - \omega_0)$$



沿着某一视线方向，观测银河系：利用21cm谱线的多普勒效应，测量银河系气体的运动



若令 $\Omega = \frac{V}{R}$ ，展开：

$$\Omega(R) = \Omega(R_0) + \frac{d\Omega}{dR} \Big|_{R_0} (R - R_0) + \dots$$

$$V_r \simeq \left( \frac{dV}{dR} \Big|_{R_0} - \frac{V_0}{R_0} \right) (R - R_0) \sin l$$

$$V_t = (\Omega - \Omega_0) R_0 \cos l - \Omega d \simeq \left( \frac{dV}{dR} \Big|_{R_0} - \frac{V_0}{R_0} \right) (R - R_0) R_0 \cos l - \Omega_0 d$$

$$R_0 = d \cos l + R \cos \theta \simeq d \cos l + R$$

定义： $A = -\frac{1}{2} \left( \frac{dV}{dR} \Big|_{R_0} - \frac{V_0}{R_0} \right)$ ,  $B = -\frac{1}{2} \left( \frac{dV}{dR} \Big|_{R_0} + \frac{V_0}{R_0} \right)$ ，有

$$V_r \simeq A d \sin 2l$$

$$V_t \simeq A d \cos 2l + B d$$

本轮： $\kappa_0^2 = -4B(A)$

1 **转动曲线**：描述星系各部分的转动速度与到转动轴距离的关系曲线。其形状由星系中的质量分布所决定

- 如能测量不同区域恒星的距离和速度，即得到转动曲线 $V(R)$ 
  - 盘星和星团的辐射 (UV-IR波段) 受尘埃消光影响大
  - HI 21cm辐射受尘埃影响小，但不知发射气体的距离
- $R > R_0$ ：分子云
  - CO发射线得到 $V_r$
  - 从在云中形成的恒星的光谱视差中得到 $R$

2] 暗物质：可分为重子暗物质和非重子暗物质两类

- 重子暗物质
  - 参与电磁相互作用，但缺乏发光条件（不发光）
  - 晕族大质量致密天体（Massive Compact Halo Objects, MACHOs）：如黑洞、中子星、衰老白矮星、褐矮星（ $M < 0.08 M_{\odot}$ ）、行星
  - 观测表明，MACHO占宇宙中暗物质的比例很小。
- 非重子暗物质
  - 不参与电磁相互作用，因而不会发光。只能通过引力产生的效应得知宇宙中有大量暗物质的存在。
  - 统称为大质量、弱相互作用粒子（Weakly Interacting Massive Particles, WIMP）
  - 热暗物质：静质量不为零的中微子（ $mc^2 < kT_d$ ）
  - 冷暗物质：质量大、速度慢的粒子（ $mc^2 > kT_d$ ）
  - 温暗物质：温度介于两者之间， $T_d = 10^{11} K$
- 探测
  - 加速器上模拟宇宙大爆炸
    - 通过高能粒子碰撞，模拟宇宙大爆炸，将暗物质粒子打出来，然后去探测
  - 地下直接探测
    - 通过探测暗物质粒子与普通原子核碰撞产生微弱信号来探测暗物质粒子
    - 放在地底下：把宇宙射线本底屏蔽掉
  - 空间间接探测
    - 间接探测暗物质粒子在与暗物质粒子碰撞以后，会产生看得见的粒子
    - 通过探测这些看得见的粒子去探测看不见的暗物质粒子

## 4. 星际气体

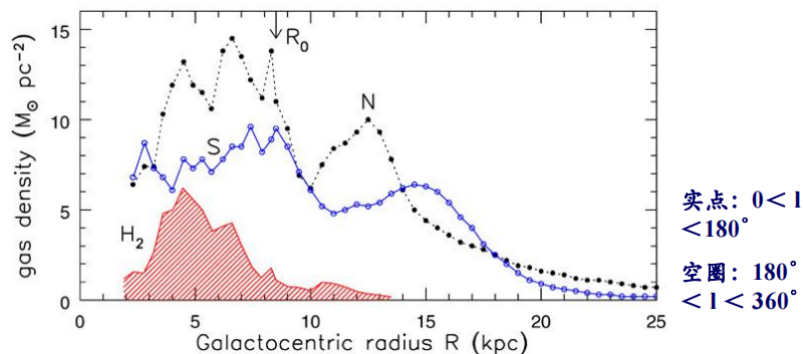
- 星际介质：恒星之间存在的星际气体和星际尘埃等
- 星系中气体的质量少于恒星质量的10%，尘埃质量比例更小（~1%）
- 气体（温度 $10^6 - 10K$ 、密度 $10^{-3} - 10^6/cm^3$ ）为恒星形成提供原料；决定了星系的特性和星系演化
- 尘埃催化了 $H_2$ 形成

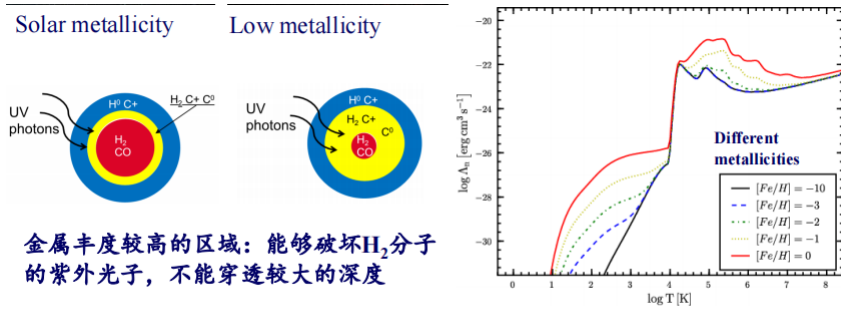
(1) 银河系HI和 $H_2$ 的面密度

1] 银河系中性氢(HI)的质量 $M_{HI} \sim (4 - 8) \times 10^9 M_{\odot}$ ；分子氢质量 $M_{H_2} \sim 1/2 M_{HI}$

2] 分子氢（ $H_2$ ）主要分布在 $R < R_0$ 区域，但在星系中心几百pc内无HI和 $H_2$

3] HI比 $H_2$ 分布在更大区域，HI也比恒星分布的更延伸，垂直盘方向HI比 $H_2$ 分布在更厚的层





金属丰度较高的区域：能够破坏 $H_2$ 分子的紫外光子，不能穿透较大的深度

Cooling function 冷却速率 ( $\Lambda$ )： $\Lambda(T)$ 依赖于气体温度和金属丰度；高温气体，冷却的更快；高金属丰度，冷却的更快。

(2) X factor: CO的积分线光度与 $H_2$ 线成正比

- $X = N(H_2)/W_{CO} = 2 \times 10^{20} \text{ mol/cm}^2 / (K \text{ km/s})$
- ! 在星系的其他部分使用或其他星系时要小心

(3) HI

1 HI密度和温度范围宽：低温 $n_H \sim 25 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \leq 80 \text{ K}$ ; 高温 $T \sim 8000 \text{ K}$ ,  $n_H \sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$

2 光深

$$\tau_{\text{peak}} = 2.2 \left( \frac{N_{\text{HI}}}{10^{21} \text{ cm}^{-2}} \right) \left( \frac{T_{\text{spin}}}{100 \text{ K}} \right)^{-1} \left( \frac{\sigma_V}{1 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

- HI线通常在光学上很薄；但大冷云团( $A_V > 1 \text{ mag}$ ,  $T_{\text{spin}} < 100 \text{ K}$ )可能在光学上很厚
- 自旋温度 $T_{\text{spin}}$ 是HI的激发 (=动力学) 温度

3 HI柱密度：正比于线积分强度

$$N_{\text{HI}} = 3 \times 10^{18} \left( \frac{T_b \Delta v}{\text{K km/s}} \right) \text{ cm}^{-2} \quad T_b \equiv 2\lambda^2 I_\nu / 2k = T_{\text{spin}} \tau_\nu$$

4 HI质量：HI的质量与21cm的线光度成正比，不依赖于密度或温度！

$$M_{\text{HI}} = 2.3 \times 10^5 (1+z) \left( \frac{D_L}{\text{Mpc}} \right)^2 \left( \frac{\int F_\nu dv}{\text{Jy km/s}} \right) M_\odot$$

(4) H II

1 HII区域的演化

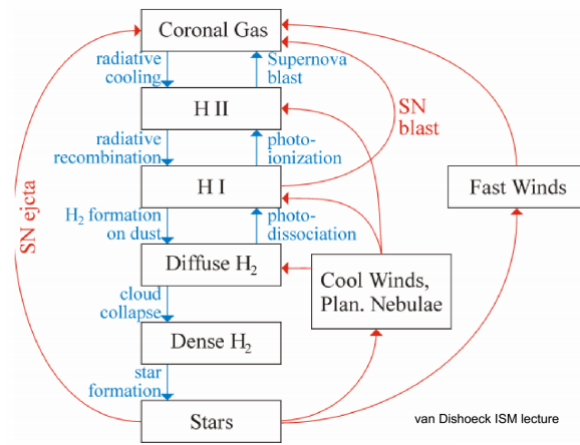
- 在一个非常热的恒星周围形成的。
- 原始HI,  $T \sim 100 \text{ K}$ ; 现在HII,  $T \uparrow (T \sim 10^4 \text{ K})$
- 电离产生自由电子, 所以 $n \uparrow$ , 因此压力 $\uparrow \uparrow$
- HII区域膨胀, 热气体 $10 \text{ km/s}$
- HI声速 $\sim 1 \text{ km/s}$ , HII高超音速冲击前沿
- HII继续膨胀( $n \downarrow$ ), 直到与HI区域压力平衡: 所有HII区域都在膨胀

2 PDR (光致电离区) 是星际介质的主要中性区域。

- PDR的物理和化学结构取决于FUV (远紫外线) 通量密度和气体的密度

(5) 星际介质的加热与冷却





1] 冷却：星系形成极为重要过程，冷却效率与温度和密度有关

- $T \geq 10^7 \text{K}$ : 气体完全电离，冷却主要通过自由电子的韧致辐射
- $10^4 \text{K} < T < 10^6 \text{K}$ : 包括不同的激发和退激发过程
  - 电子与离子复合，辐射光子
  - 原子 (or 离子) 与其他粒子碰撞激发，后退激发到基态
  - 不同的原子有不同的激发能，冷却效率与气体化学组成相关
- $T < 10^4 \text{K}$ : 中性H和分子氢，碰撞激发 (弱)、分子转动、振动谱

2] 冷却的要求

- 高频碰撞 (取决于气体的化学成分)
- 交换能量小于气体的热能 (动能) 激发能量
- 激发能通过光子转移
- 在下次粒子碰撞发生之前被激发的原子/离子发射
- 光子离开气体分布沿路径没有任何光电吸收事件

◆ 星际气体需要连续的能量供应：否则将迅速冷却，云的随机运动逐渐减小，并最终耗散掉

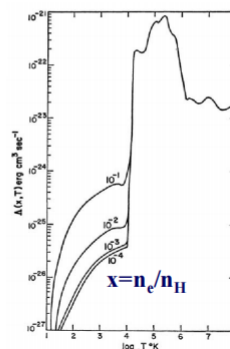
◆ 复合时间： $p^+ + e^- \leftrightarrow \text{H}(1s) + \text{photons}$   

$$t_{\text{rec}} = \frac{n_e}{|dn_e/dt|} = \frac{1}{n_e \alpha(T_e)} \approx 1500 \text{ yr} \times \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}}\right)^{3/4} \left(\frac{100 \text{ cm}^{-3}}{n_e}\right)$$

当气体较热时，电子和质子碰撞比较频繁但粘在一起的可能性较小，所以  $t_{\text{rec}}$  较长

- ◆ 冷却时间  $t_{\text{cool}}$ : 表征气体辐射掉它的热能效率
- ◆ 原子数密度为  $n/\text{cm}^3$ ，单位体积的能量正比于  $nT$ ；辐射光度为  $L$ ，则有  $t_{\text{cool}} \sim nT/L$
- ◆ 光学薄气体的辐射能量的冷却速率 ( $\Lambda$ ) 和光度有  $L = n^2 \Lambda(T)$ ，则有  $t_{\text{cool}} \sim T/[n \Lambda(T)]$
- ◆  $\Lambda(T)$  依赖于温度和金属丰度，致密气体 (密度  $n$  大时)，冷却的更快

在HII区内， $t_{\text{rec}}$  只有几千年。当恒星不再提供紫外光子，电离气体便迅速复合。温度越高，密度越小，复合时间越长。



(6) 银河系尘埃

- 尘埃粒子小：尘埃能最有效地吸收波长小于尘埃颗粒尺度的光，对紫外吸收有效 → 大多数尘粒尺度  $r \leq 0.3 \mu\text{m}$
- 尘埃再辐射：尘埃吸收了银河系紫外和光学波段的星光，又将吸收的能量在红外波段进行辐射
- 尘粒有不同尺寸：
  - 大尘粒 (温度  $T \sim 30\text{K}$ ) 产生峰值在  $100\mu\text{m}$  的辐射。
  - $T \geq 100\text{K}$  的较热的颗粒辐射峰值在  $30\mu\text{m}$  附近
  - 小尘埃粒子 (PAHs) 辐射短于  $30\mu\text{m}$

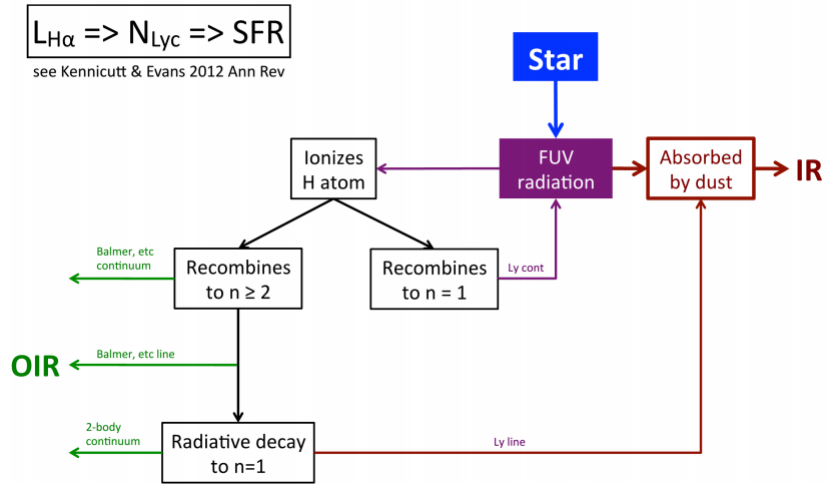
### 1 多环芳香类烃 (多环芳烃) PAH

- 星际尘埃质量的10% - 20%可能在最小的粒子中，如多环芳香烃 (PAHs)
- 多环芳香烃：只有 100 个或更少碳原子排列成环状扁片；性质更像一个大的分子

### 2 星系形成率

A relation connecting  $\Sigma_{\text{SFR}}$  to  $\Sigma_{\text{gas}}$ :  $\Sigma_{\text{SFR}} = A \cdot \Sigma_{\text{gas}}^N$

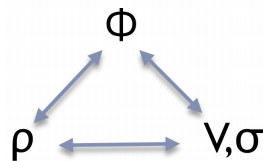
- 驱动SF的物理机制 (例如，通过比较经验关系与理论的预测)
- 星系形成的SPH模型
- 预测效率：测量气体 (表面) 密度并估计SFR (表面) 密度
- SFR指示



## 三、恒星轨道

### 1. 质量测量

星系运动

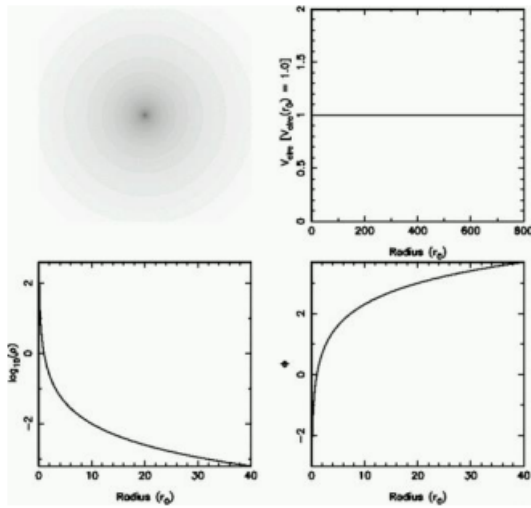


(1) 势与密度

#### 1 均匀球

$$\phi(r) = \begin{cases} -\frac{GM(3a^2 - r^3)}{2a^3} & r < a \\ -\frac{GM}{r} & r > a \end{cases}$$

2 奇异等温球(暗物质晕)  $\rho(r) = \frac{\rho(r_0)}{(r/r_0)^2}$ ,  $\phi(r) = V_H^2 \ln(\frac{r}{r_0})$ ,  $V_H = 4\pi G r_0^2 \rho(r_0)$



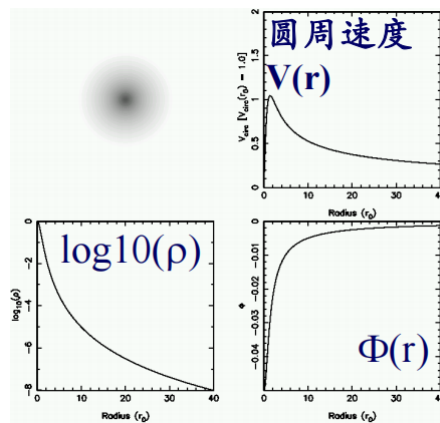
3 Plummer球：常用于近似描述星团和球形星系的势和密度分布。

$$\Sigma_P(R) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_P(\sqrt{R^2 + z^2}) dz = \frac{\mathcal{M}}{\pi} \frac{a_P^2}{(a_P^2 + R^2)^2}$$

$$M(< r) = 4\pi \int_0^r r^2 \rho_P(r) dr = M \frac{r^3}{(r^2 + a^2)^{3/2}}$$

$$\Phi_P(r) = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a_P^2}}$$

$$\rho_P(r) = \frac{1}{4\pi G} \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\Phi_P}{dr} \right) = \frac{3a_P^2}{4\pi} \frac{\mathcal{M}}{(r^2 + a_P^2)^{5/2}}$$



核半径  $r_c$ ：定义为面密度  $\Sigma_P(R)$  降到中心值的一半处时的半径，有  $r_c = 0.644 a_P$

4 Kuzmin盘：简单的盘模型

$$\Phi_K(R, z) = -\frac{GM}{\sqrt{R^2 + (a_K + |z|)^2}}$$

$$\Sigma_K(R) = \frac{a_K}{2\pi} \frac{\mathcal{M}}{(R^2 + a_K^2)^{3/2}}$$

(2) 位力定理的质量估计

1 适用对象：星团或星系接近球对称形状、自转不明显，接近于稳定状态

2 利用位力定理求质量

- 假设质光比  $M/L$  在系统中处处相同，测量到的面亮度  $I(x)$  代表质量密度
- 测量恒星相对于星团平均运动的视向速度  $V_r$ ，可求得恒星速度弥散  $\sigma_r$ 
  - $\sigma_r^2 = \langle V_r^2 \rangle$ ,  $\langle \rangle$  代表对星团所有恒星的平均
- 对于距离远的星团，切向运动难测量：假设恒星平均运动是各向同性
  - $\langle v_\alpha \cdot v_\alpha \rangle \approx 3\sigma_r^2$ ，星团的动能为  $KE \approx \frac{3\sigma_r^2}{2} \left( \frac{M}{L} \right) L_{tot}$

- 估计势能PE (假定  $M = L_{tot} \times M/L$ ) : 假设星团是球对称的, 可从它的面亮度, 求出恒星的体密度, 从而得到势能
- $2KE + PE = 0 \rightarrow M$

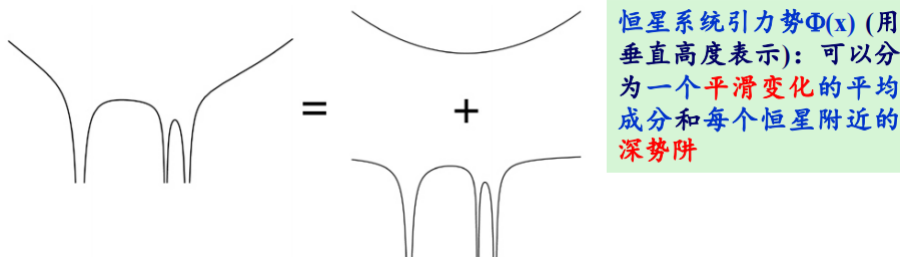
3 星系: 因为  $M = L_{tot} \times M/L$  需要测量星系总光度, 但总光度  $L_{tot}$  不容易测量, 常利用测量星团核半径  $r_c$  或者星团中心面亮度  $I(0)$  方法, 求星团的质量

- 星团核半径  $r_c$  + 速度弥散  $\sigma$ :  $M \approx \frac{6\eta\sigma^2 r_c}{G}$ , 对均匀球  $\eta \approx 0.96$ ; 对Plummer球,  $\eta \approx 2.6$
- 星团中心面亮度 + 速度弥散  $\sigma$ :  $\frac{M}{L} \approx \frac{9}{2\pi} \frac{\sigma^2(0)}{GI(0)r_c}$
- $G \approx 4.33 \times 10^{-3} km^2 pc/s^2 M_\odot$ ,  $I(0)$  单位为  $L_\odot/pc^2$

Cluster		$\sigma_r$ (km s <sup>-1</sup> )	$\log_{10} \rho_c$ ( $M_\odot pc^{-3}$ )	$r_c$ (pc)	$t_{relax,c}$ (Myr)	Mass ( $10^3 M_\odot$ )	$M/L_V$ ( $M_\odot/L_\odot$ )
NGC 5139	$\omega$ Cen	20	3.1	4	5000	2600	2.5
NGC 104	47 Tuc	11	4.9	0.7	50	800	1.5
NGC 7078	M15	12	>7	<0.1	<1	900	2
NGC 6341	M92	5	5.2	0.5	2	200	1
NGC 6121	M4	4	4-5	0.5	30	60	1
	Pal 13	~0.8	2	1.7	10	3	3-7
NGC 1049	Fornax 3	9	3.5	1.6	600	400	~3
Open cluster	Pleiades	0.5	0.5	3	100	0.8	0.2

- 球状星团典型的质光比  $1 \leq M/L \leq 4$ ; 大于对太阳近邻的测量值: 年老星团中所有明亮的大质量恒星现在都已经死亡
- 球状星团  $M/L$  比银河系整体  $M/L$  的值小很多: 内部暗物质少
- 疏散星团的质光比比球状星团还低: 因为亮星仍然在主序上

## 2. 星系中无碰撞



- 1 平滑势: 遥远恒星微小拉拽的积累效应
- 2 深势阱: 恒星在彼此非常近交会时产生
- 3 在改变恒星运动进程方面, 平滑势比势阱更为重要: 遥远恒星微小拉拽的积累效应更重要

(1) 强近交会  $t_s$

- 1 强交会: 一颗星近距离与另一颗恒星相遇, 碰撞完全改变了它的速度和运动方向 ( $\delta V \sim V$ )
- 2 假设恒星质量都为  $m$ , 并且在随机方向上以平均速度  $V$  运动 [忽略来自星系或星团其余部分的引力]
- 3 两颗星相距很远时, 相互势能为零。无限接近 (强交会) 时, 势能转换为动能, 满足:

$$\frac{Gm^2}{r} \gtrsim \frac{mV^2}{2}, \quad \text{which means } r \lesssim r_s \equiv \frac{2Gm}{V^2}; \quad (3.48) \quad r_s \text{ 强交会半径}$$

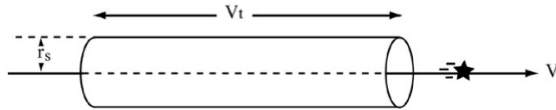
◆ 一颗恒星，以速度V运动了时间t，将会与中心在其轨道上，半径为 $r_s$ ，体积为 $\pi r_s^2 V t$ 的圆柱内的任何其他恒星发生强交会

◆ 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!

### (2) 弱远交会

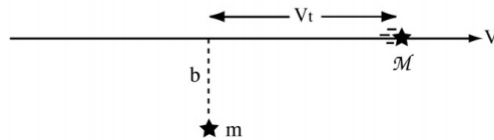
◆ 弱远交会时 ( $b \gg r_s$ )，一颗恒星作用于另一颗的力很弱，交会时，恒星几乎**不会偏离**其原来的轨道：**脉冲近似**  $\delta V/V \ll 1$

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

◆ 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的轨道近似为一直线，在**最近距离** (b处) 弯了一个角度：
$$\alpha = \frac{\Delta V_\perp}{V} = \frac{2Gm}{bV^2}.$$

◆  $F_\perp$ 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 $\delta V$ 同V相比必须很小， $\delta V \ll V$  
$$b \gg \frac{2G(m+M)}{V^2}.$$

◆ 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 $\Delta V_\perp$ ，但方向不同。

◆ 如果力是随机的，则垂直速度的期望值：
$$\langle \Delta V_\perp^2 \rangle = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} n V t \left( \frac{2Gm}{bV} \right)^2 2\pi b db = \frac{8\pi G^2 m^2 n t}{V} \ln \left( \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right)$$

### (3) 弛豫时标 $t_{relax}$

- ◆ 弛豫时间  $t_{\text{relax}}$ : 初始轨道‘记忆’失去, 即  $\langle \Delta V_{\perp}^2 \rangle = V^2$ , 恒星垂直于其原轨迹的预期速度大约等于其原来的向前速度

$$\langle \Delta V_{\perp}^2 \rangle = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} n V t \left( \frac{2Gm}{bV} \right)^2 2\pi b db = \frac{8\pi G^2 m^2 n t}{V} \ln \left( \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right)$$

$$t_{\text{relax}} = \frac{V^3}{8\pi G^2 m^2 n \ln \Lambda} = \frac{t_s}{2 \ln \Lambda}$$

$$\approx \frac{2 \times 10^9 \text{ yr}}{\ln \Lambda} \left( \frac{V}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left( \frac{m}{M_{\odot}} \right)^{-2} \left( \frac{n}{10^3 \text{ pc}^{-3}} \right)^{-1}$$

- ◆  $\Lambda = b_{\max}/b_{\min}$  ( $b_{\min}$  一般取  $r_s$ , 而  $b_{\max}$  等于整个恒星系统的大小): 对于太阳附近的恒星,  $b_{\min} = r_s = 1 \text{ AU}$ , 而  $300 \text{ pc} \leq b_{\max} \leq 30 \text{ kpc} \rightarrow \ln \Lambda = 18 - 22$
- ◆ 虽然遥远恒星之间的弱相互作用比小概率的近交会 ( $t_s = 10^{15} \text{ yrs}$ ) 能更迅速地改变恒星的运动方向, 但所需时间  $t_{\text{relax}} = 10^{13} \text{ yrs} > \text{宇宙年龄}$
- ◆ 在计算像太阳这样恒星的运动时, 可以忽略单个恒星间的相互作用, 认为所有恒星都在整个银河系的平滑势中运动.

#### (4) 穿越时标 $t_{\text{cross}}$

- ◆ 在一个由质量  $m$  以平均速度  $V$  运动的  $N$  颗恒星组成的孤立星团中, 穿越时间  $t_{\text{cross}} \sim R/V$  ( $R$  为星团或者星系的大小)
- ◆ 星团中, 恒星间平均距离约为系统尺度  $R$  的一半, 由位力定律:
 
$$\frac{1}{2} N m V^2 \sim \frac{G(Nm)^2}{2R}, \quad \text{so } \Lambda = \frac{R}{r_s} \sim \frac{GmN}{V^2} \cdot \frac{V^2}{2Gm} \sim \frac{N}{2}, \quad N = 4n\pi R^3/3,$$

$$\frac{t_{\text{relax}}}{t_{\text{cross}}} \sim \frac{V^4 R^2}{6NG^2 m^2 \ln \Lambda} \sim \frac{N}{6 \ln(N/2)}. \quad \text{N 越大, 两种时标的差别也就越大.}$$
- ◆  $t_{\text{relax}} \sim [N/6 \ln(N/2)] t_{\text{cross}}$ ; if  $N \sim 10^{11}$  (星系); 弛豫只有在  $10^9$  倍穿越时间以后才是重要的.
- ◆ 半人马座  $\omega$  (最大球状星团) 中,  $t_{\text{relax}} \sim 5 \text{ Gyr}$ , 远远长于一颗恒星穿过其核心所花的时间  $t_{\text{cross}} \approx 0.5 \text{ Myr}$
- ◆ 疏散星团密度  $n \sim 10 \text{ pc}^{-3}$  or 更小,  $\sigma_r \sim 1 \text{ km/s}$ .  $t_{\text{relax}} \sim 50 \text{ Myr}$ ; 对于  $r_c = 2 - 3 \text{ pc}$ , 穿越时间  $t_{\text{cross}} \sim 5 \text{ Myr}$ : 在 10 倍穿越时间之内, 弱交会的累积效应可以完全改变疏散星团中恒星的轨道

#### (5) 其他时标

##### 1 直接碰撞时标 $t_{\text{direct}}$

Consider a system of size  $r$  consisting of  $N$  bodies of radius  $r_p$ . The cross-section for a direct collision is  $\sigma_d = \pi r_p^2$ , and the mean free path of a particle is  $\lambda = 1/(n\sigma_d)$  with  $n = 3N/(4\pi r^3)$  the number density of particles. The collision time, defined as the characteristic time scale on which a particle experiences a direct collision, is then

$$t_{\text{direct}} = \frac{\lambda}{v} \simeq \left( \frac{r}{r_p} \right)^2 \frac{t_{\text{cross}}}{N}, \quad (5.87)$$

Thus, for all practical purposes, galaxies, as  $N$ -body systems with  $N \gg 100$ , can almost always be considered collisionless, with

$$t_{\text{direct}} \gg t_{\text{close}} \gg t_{\text{relax}} \gg t_H \gg t_{\text{cross}}. \quad (5.99)$$

$$t_{\text{close}} = \left( \frac{r}{b_1} \right)^2 \frac{t_{\text{cross}}}{N} \simeq N t_{\text{cross}}. \quad \frac{t_{\text{relax}}}{t_{\text{cross}}} \sim \frac{V^4 R^2}{6NG^2 m^2 \ln \Lambda} \sim \frac{N}{6 \ln(N/2)}.$$

#### (6) 二体弛豫效应

##### 1 逃逸: 所需的平均动能, 是每颗恒星动能平均值 ( $3kT/2$ ) 的 4 倍

- 恒星抛射: 一颗恒星和另一颗恒星发生密近交会, 使得一颗恒星速度大于当地的逃逸速度  $v_e$ . (概率极小)

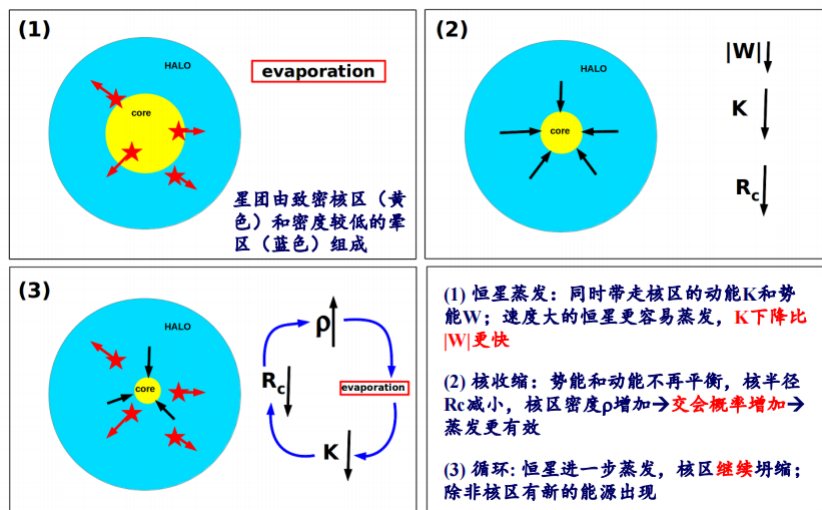
- 恒星蒸发：一系列弱远交会，使得一颗恒星的能量逐渐增加，最终使得 $v > v_e$ ；恒星蒸发是逐渐进行的
  - 蒸发时间：恒星系统丢失其大部分恒星的时标  $t_{evap} \sim 136 t_{relax}$ 
    - 球状星团中  $t_{relax} \sim \text{Gyr}$ ,  $t_{evap} > 13.7 \text{Gyr}$ :  $t_{evap}$ 比宇宙的年龄还长→年老球状星团
    - 疏散星团,  $t_{relax} \sim 10 \text{Myr}$ ,  $t_{evap} \sim \text{a few Gyr}$ : 容易瓦解→为什么没有年老的疏散星团。

**2 质量层化**：在一些星团中，不同质量的恒星在星团内的分布并不是均匀的，而是随着团心距的变化而变化

- 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——质量空间层化效应
- 星团内大质量恒星的速度弥散度较小，而小质量恒星的速度弥散度较大——质量速度层化效应
- 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]:  $mV^2/2 = 3kT/2$
  - 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

### 3 核塌缩

- 即使星团中所有恒星具有严格的相同质量，靠近星团中心的恒星，其轨道速度会比更外面恒星轨道速度要高
- 二体弛豫：内部的恒星倾向于失去能量，外部恒星则倾向于获得能量
- 结果有些恒星被从星团内区推出，进入膨胀的晕；而余下的核则发生收缩：核变得更致密，而外部胀大，变得更松散
- 计算发现，在 $(12 - 20)t_{relax}$ 后，核半径将收缩到零，中心密度无限增加：核塌缩
- 接近核塌缩的星团，有一个很小的致密核和一个弥漫的晕，如M15。

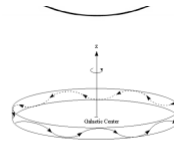


## 3. 盘星的轨道

- (1) 本轮

- ◆ **轴对称系中恒星运动**:  $\phi$ 方向没有受到力的作用 ( $z$ 轴向角动量和能量守恒), 运动方程  $d^2\vec{r}/dt^2 = -\nabla\Phi$ 在圆柱坐标系  $(R, \phi, z)$  可写为

$$\begin{aligned} \ddot{R} &= R\dot{\phi}^2 - \frac{\partial\Phi}{\partial R} && \text{径向运动方程} \\ \frac{d}{dt}(R^2\dot{\phi}) &= 0 && z\text{轴方向角动量守恒} \quad L_z \equiv R^2\dot{\phi} = \text{constant.} \\ \ddot{z} &= -\frac{\partial\Phi}{\partial z}(R, z) && \text{垂直方向运动方程} \end{aligned} \quad (3.64)$$



- ◆ 因为势不随时间改变  $\Phi = \Phi(R, z)$ 与  $t$ 无关, 径向/垂向运动方程可写作:

$$\begin{aligned} \ddot{R} &= R\dot{\phi}^2 - \frac{\partial\Phi}{\partial R} = -\frac{\partial\Phi_{\text{eff}}}{\partial R} && \ddot{z} = -\frac{\partial\Phi}{\partial z}(R, z) = -\frac{\partial\Phi_{\text{eff}}}{\partial z}(R, z). \end{aligned}$$

where  $\Phi_{\text{eff}} \equiv \Phi(R, z) + \frac{L_z^2}{2R^2}$ . (3.65)  $\Phi_{\text{eff}}(R, z; L_z)$ 称为有效势

## (2) 均轮

- ◆ **径向运动方程**:  $\ddot{R} = R\dot{\phi}^2 - \frac{\partial\Phi}{\partial R} = -\frac{\partial\Phi_{\text{eff}}}{\partial R}$  where  $\Phi_{\text{eff}} \equiv \Phi(R, z) + \frac{L_z^2}{2R^2}$ . (3.65)

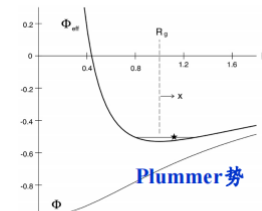
- ◆ 径向运动方程两边乘  $\dot{R}$ 后积分, 得到在 **平面  $z=0$  的恒星径向运动方程**:

$$\frac{1}{2}\dot{R}^2 + \Phi_{\text{eff}}(R, z=0; L_z) = \text{constant.}$$

- ◆ 因为  $\dot{R}^2 \geq 0$ ,  $\Phi_{\text{eff}}$ 中的  $L_z^2$ 项的作用就像一个‘**角动量势阱**’

- ◆  $\Phi_{\text{eff}}$ 在  $(R, z) = (R_g, 0)$ 处有极小值, 半径  $R_g$ 圆轨道是对于给定角动量  $L_z$ 的能量最小轨道 (即**稳定轨道**), 其处有:

$$\frac{\partial\Phi_{\text{eff}}}{\partial R} = \frac{\partial\Phi}{\partial R} - \frac{L_z^2}{R^3} = 0. \quad \frac{\partial\Phi}{\partial R}(R_g, z=0) = \frac{L_z^2}{R_g^3} = R_g\Omega^2(R_g).$$



在Plummer势  $\Phi_p$  (下面的曲线) 中运动的角动量  $L_z = 0.595$  的恒星的有效势  $\Phi_{\text{eff}}$  (上面的曲线)

- ◆  $R_g$ 对应为能量  $E = \Phi_{\text{eff}}$  圆轨道运动, 其角速度  $\Omega(R)$ :  $\Omega(R) = \frac{V_c(R)}{R} = \left[ \frac{1}{R} \left( \frac{\partial\Phi}{\partial R} \right)_{(R_g, 0)} \right]^{1/2} = \frac{L_z}{R^2}$ .
- ◆ 角动量为  $L_z$ 的恒星, 能在  $R = R_g$ 遵循**严格圆轨道** ( $dR/dt = 0$ ) 的条件是:  $R = R_g$ 处, **有效势  $\Phi_{\text{eff}}$ 对于  $R$ 是稳定的**
- ◆  $(R, z) = (R_g, 0)$ 称为**引导中心**, 表示半径  $R_g$ , 角速度  $\Omega(R_g)$ 的圆轨道运动, 称为**均轮**

$$\ddot{R} = R\dot{\phi}^2 - \frac{\partial\Phi}{\partial R} = -\frac{\partial\Phi_{\text{eff}}}{\partial R}, \quad \text{where } \Phi_{\text{eff}} \equiv \Phi(R, z) + \frac{L_z^2}{2R^2}. \quad (3.65)$$

令  $R = R_g + x$ , 且假设  $x \ll R$ ; 将(3.65)式Taylor展开, 忽略小项

$$\ddot{x} \approx -x \left[ \frac{\partial^2\Phi_{\text{eff}}}{\partial R^2} \right]_{R_g} \equiv -\kappa^2(R_g)x, \quad \text{so } x \approx X \cos(\kappa t + \psi)$$

$X$ 和  $\psi$ 是任意积分常数

当  $\kappa^2 > 0$ 时, 方程描述本轮频率为  $\kappa$ 的**谐运动**

当  $\kappa^2 < 0$ 时, 圆轨道是**不稳定的**, 恒星将以指数速率离开

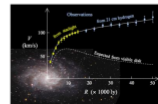
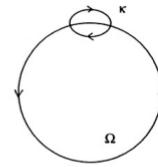
根据定义, 有:  $\Phi_{\text{eff}} \equiv \Phi(R, z) + \frac{L_z^2}{2R^2}$   $\frac{\partial\Phi}{\partial R}(R_g, z=0) = \frac{L_z^2}{R_g^3} = R_g\Omega^2(R_g)$

$$\kappa^2 \equiv \left( \frac{\partial^2\Phi_{\text{eff}}}{\partial R^2} \right)_{(R_g, 0)} \quad \kappa^2(R) = \frac{d}{dR} [R\Omega^2(R)] + \frac{3L_z^2}{R^4} = \frac{1}{R^3} \frac{d}{dR} [(R^2\Omega)^2] = -4B\Omega, \quad (3.71)$$

$B = -12.4 \text{ km/s/kpc}$ : Oort常数

$\kappa$ 与  $\Omega$ 讨论: 密度均匀球内 (如**靠近星系中心区域**),  $V$ 随半径呈线性增加,  $\Omega$ 基本保持不变, 而  $\kappa = 2\Omega$ ; 质点引力场中,  $\kappa = \Omega$ .

银河系的势介于密度均匀球和质点势之间:  $\Omega < \kappa < 2\Omega$ , 即**恒星绕银心转一圈, 径向作  $\kappa$ 次震荡**. 太阳附近  $\kappa = 1.4 \Omega$  银河系每转一圈, 太阳附近的恒星要做约 1.4 次进出振荡





在本轮运动中，角动量 $L_z$ 守恒 (3.64)，恒星方位速度的变化：

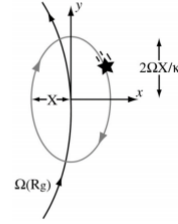
$$L_z \equiv R^2 \dot{\phi} = \text{constant.}$$

$$\frac{L_z}{R_g^3} = R_g \Omega^2(R_g), \quad \dot{\phi} = \frac{L_z}{R^2} = \frac{\Omega(R_g) R_g^2}{(R_g + x)^2} \approx \Omega(R_g) \left( 1 - \frac{2x}{R_g} + \dots \right).$$

代入方程 (3.70) 并作积分，有：

$$\ddot{x} \approx -x \left[ \frac{\partial^2 \Phi_{\text{eff}}}{\partial R^2} \right]_{R_g} \equiv -\kappa^2(R_g) x, \quad x \approx X \cos(\kappa t + \psi) \quad (3.70)$$

$$\phi(t) = \phi_0 + \Omega(R_g) t - \frac{1}{R_g} \frac{2\Omega}{\kappa} X \sin(\kappa t + \psi), \quad (3.74)$$

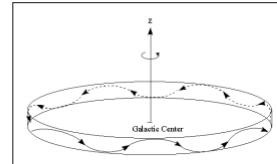


- ◆ 第1项、第2项给出了引导中心的运动：均轮运动
- ◆ 第3项代表频率与 $x \approx X \cos(\kappa t + \psi)$ 径向振荡相同的谐运动，但位相差90度，振幅大 $2\Omega/\kappa$ 倍：本轮（方位速度变化）
- ◆ 本轮运动与引导中心（均轮）运动相反（逆行）：在离中心较近时使恒星速度增加（同向），在较远时使它变慢（反向）。

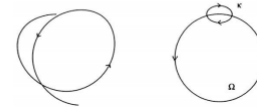
垂向运动方程： $\ddot{z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}(R, z) = -\frac{\partial \Phi_{\text{eff}}}{\partial z}(R, z).$

- ◆ 如势关于 $z=0$ 镜像对称， $\Phi(R, z) = \Phi(R, -z)$ ：在 $z=0$ 平面， $z$ 方向力为零
- ◆ 将势 $\Phi(R, z)$ 在轨道平均半径（ $R_g, z=0$ ）处，作Taylor展开，保留到二阶项 $(z/R)^2$ ， $(R-R_g)^2/R^2$

$$\ddot{z} \approx -z \left[ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}(R_g, z) \right]_{z=0} \equiv -\nu^2(R_g) z;$$



- ◆ 恒星在 $z$ 方向的运动，几乎与它在 $R, \phi$ 方向的运动无关：为角频率为 $\nu$ 的谐振子方程。
- ◆ 盘中平面附近谐振子方程： $z = Z \cos(\nu t + \theta)$
- ◆ 在扁平星系中， $\nu(R)$ 大于圆轨道上的角速度 $\Omega(R)$ ： $\nu(R) > \Omega(R)$ ，恒星绕星系中心转动慢， $z$ 方向振动快



## 4.无碰撞的Boltzman方程

$$n(\mathbf{x}, t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) dv_x dv_y dv_z, \quad \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nv)}{\partial x} = 0.$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, t) \cdot \frac{\partial f}{\partial v} = 0$$

无碰撞Boltzmann方程：同连续性方程推导类似，但容许速度变化，并且将 $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$ 的改变同作用在个别恒星上的力联系起来，恒星交会不重要

(1) 测量银盘的质量密度

- ◆ 用CBE和观测到的恒星垂直运动→太阳附近银盘的质量密度：
  - (1) 挑选示踪恒星，测量其在盘的中平面上方 $z$ 处的密度 $n(z)$
  - (2)  $Z$ 方向，选取坐标 $(z, v_z)$ ；代替坐标 $(x, v)$
- ◆ 假定：
  - (1) 势 $\Phi(z)$ 不随时间变化，平滑势；
  - (2) 恒星已经很好混合，分布函数 $f$ 和密度 $n$ 不随时间改变；
  - (3) 平面上方高处有 $\langle v_z \rangle n(z) \rightarrow 0$ ，处处有 $\langle v_z \rangle = 0$ 。

$$\frac{d}{dz} [n(z) \sigma_z^2] = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} n(z) \quad \text{测量} n(z) \text{及其速度弥散} \sigma_z \text{如何随} z \text{变化} \rightarrow \text{任何高度的垂直力} F_z$$

$$4\pi G \rho(R, z) = \nabla^2 \Phi(R, z) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial \Phi}{\partial R} \right) \quad \text{泊松方程将} F_z \text{同银河系质量密度} \rho(x) \text{联系起来, 银河系轴对称, } \rho \text{和} \Phi \text{只依赖于} (R, z)$$

$$4\pi G \rho(R, z) = \frac{d}{dz} \left\{ -\frac{1}{n(z)} \frac{d}{dz} [n(z) \sigma_z^2] \right\} + \frac{1}{R} \frac{d}{dR} [V^2(R)] \quad \leftarrow \partial \Phi / \partial R = V^2(R) / R$$

- ◆ 可以准确测定离中平面某个距离 $z$ 内的面质量密度 $\Sigma(<z)$   $2\pi G \Sigma(<z) \equiv 2\pi G \int_{-z}^z \rho(z') dz' \approx -\frac{1}{n(z)} \frac{d}{dz} [n(z) \sigma_z^2]$

## 四、本星系群

(1) 暗物质存在和引力相互作用，使得星系在空间分布不是随机：星系团、群

(2) **本星系群**：以银河系和M31的公共重心为中心，半径约为1.2 Mpc 的空间内的星系总称。

1 两个质量最大的成员星系：银河系与M31；M31比银河系亮约50%。

2 第三亮星系为M33， $L(M33) \sim 0.2L(MW)$ ；M31/MW/M33辐射了本星系群可见光  $\sim 90\%$

3 M31、MW、M33 (大麦哲伦星云) 旋涡星系；M32为椭圆星系；其余是主要是矮星系 (矮不规则星系，矮椭圆星系和矮椭圆星系)

4 测量本星系群中星系之间的距离不能利用哈勃定律：本星系群中星系之间的相互引力非常强，克服了随宇宙膨胀 (宇宙学红移)；只能利用造父变星的周期 - 光度关系等其它方法，测量距离

(3) 研究意义

1 本星系群是宇宙中典型的星系环境，提供了研究星系特性的一般环境

2 多样性：不同类型的星系

3 宽光度范围

4 距离近：为近距研究星系提供了机会

## 1. 银河系的伴星系

1 大、小麦哲伦云

- 南半球肉眼可见
- 富气体、正在形成恒星和星团
- 恒星和星团年龄范围分布宽

2 矮椭圆伴星系

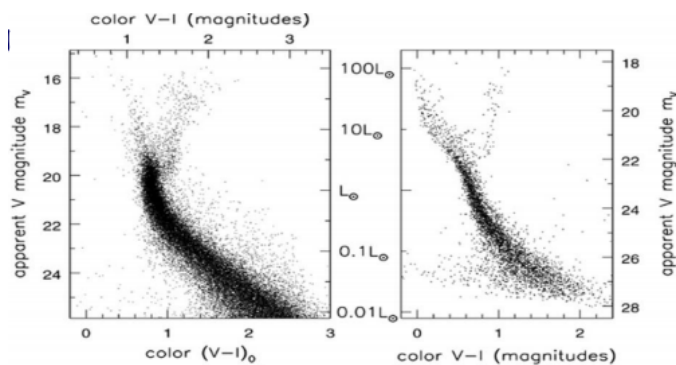
- 弥漫得在天空中几乎不可见
- 主要由老年和中年恒星组成
- 内部气态物质很少或者没有
- 易被银河系引力场扯碎、瓦解

(1) 大麦哲伦云

1 光学图像：Irr/SB(s)m型，强的星系棒 + 短而粗的旋臂；以前可能是正常的棒旋星系，银河系引力扰动使得旋臂变化

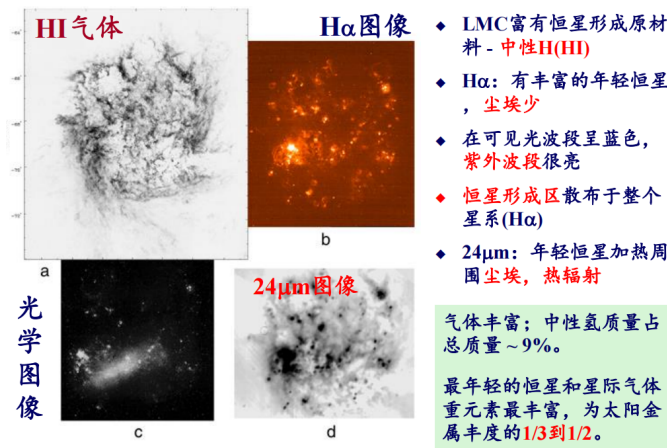
2 LMC星族

- 同时有年老球状星团和年轻的星团和星协
- 年龄  $T \sim 4 - 10 \text{ Gyr}$  星团少：这期间LMC内部没有恒星形成



左：银河系核球中恒星的色 - 星等图。主序宽，恒星年龄范围大 右：大麦哲伦云盘内一区域的恒星。存在明亮的蓝星；LMC的主序比MW的核球蓝，恒星金属丰度低

3 多波段图像



## (2) 小麦哲伦云

1 不规则星系(Irr), 内部恒星显示出无序的运动

2 存在丰富的气体和年轻星团, 金属丰度比 LMC 更低, 只有太阳丰度的 20% - 30%.

## (3) 麦哲伦流

1 大、小麦哲伦云都含有丰富的中性氢气体

2  $M(HI)/L_B$ : 银河系  $\approx 0.1$ ; LMC 约为 0.3; SMC 约为 1.0

3 麦哲伦流: 连接大、小麦云之间的气体'桥', 内部有年轻星团; 包含  $\sim 2 \times 10^8 M_\odot$  的 HI 气体

4 LMC 的引力吸引, 把 SMC 中性氢气体拉出

## (4) 变星测距

1 天琴座 RR 型变星

- 位于脉动水平支、核心区正在燃烧氦的小质量 ( $\sim 0.5 M_\odot$ ) 恒星。
- 具有相近的绝对星等  $L \approx 50 L_\odot$ , 周期  $T < 1$  天; 多出现在球状星团中

2 脉动不稳定带: 赫罗图上接近垂直的, 脉动变星分布的区域, 底部在赫罗图上的赫氏空隙。不稳定带的恒星脉动, 起因于氦 (双电离 He 比单电离 He 不透明度大)

3 光变: 加热  $He^+ \rightarrow He^{2+} \Rightarrow$  不透明度上升  $\Rightarrow$  热压, 膨胀  $\Rightarrow$  降温,  $He^{2+} \rightarrow He^+$

4 应用

- 经典造父 (I 型造父) 变星:
  - 星族 I (年轻、富金属) 恒星的变星:
  - $M \sim 4 - 20 M_\odot$ ,  $L \sim 10^5 L_\odot$ ; 光变周期  $T \sim 1.5 - 50$  天
- II 型造父变星:
  - 星族 II (年老、贫金属) 恒星的变星, 小质量 ( $M \sim 0.5 M_\odot$ )
  - 光变周期  $T \sim 1 - 50$  天
- 利用变星测距须注意:
  - 金属丰度对星光输出影响;
  - 星际尘埃对星光吸收散射

## (5) 矮椭圆星系

1 矮椭圆星系内气体、尘埃少; 几乎没有年轻的恒星; 全都含有一些非常老的恒星: 形成早

2 矮椭圆星系(dE)的特性与普通E差别大

3 大矮椭圆星系(dSph): 面亮度更暗的矮椭圆星系, 本质和dE无区别

## (6) 矮星系、核星团、球状星团的比较

①矮星系和球状星团质量相近，但空间尺寸差别很大：

小的矮椭圆星系只有大的球状星团那么亮，但半径要大得多

②矮星系并不是一次就形成了它们所有的恒星：

它们全都包含着在数十亿年间从具有不同重元素丰度的气体中诞生的恒星

④矮椭圆星系中有大量暗物质，球状星团中没有

⑤所有的矮椭圆星系，重元素丰度低，最亮的矮椭圆星系的元素丰度 $\sim 1/30 Z_{\odot}$ ：

星系越暗，金属丰度越低

⑥贫金属原因：形成恒星困难；引力弱，金属增丰的气体丢失到星系际空间

## 2.本星系群中的旋涡星系

(1) M31 (Sb)

①星系核

- 核球在紫外波段很暗，几乎不含年轻恒星
- 双核：可能一个是黑洞，一个是星团

②球状星团：随机运动轨道；星团系统很少或几乎没有有序转动

③气体：HI质量约  $4 - 6 \times 10^9 M_{\odot}$ ，集中于  $r \sim 10$  kpc 处的环形恒星形成区

(2) M33

①晚型旋涡星系：核球很小；旋臂开放且不平滑，主要由新近形成恒星的明亮蓝色聚集区组成

②M33比MW、M31 HI气体丰富

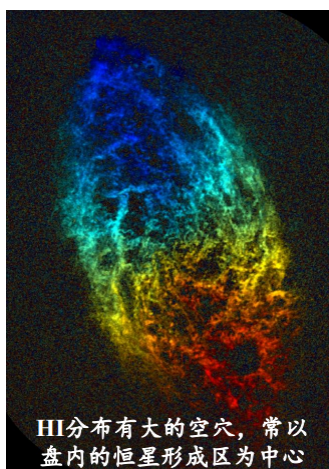
③分子气体少：几乎没有CO发射线

缺乏分子气体（年轻恒星诞生于致密分子云）<sup>x</sup>

CO对 $H_2$ 的比小于银河系中的值：可能性更大

④星系核

- 无大质量黑洞存在的迹象
- 致密核心星团



### 3.本群星系的形成

- ◆ 宇宙膨胀温度降低,  $T \sim 350000 \text{ yrs}$ , 光子能量不能电离氢和氦: 质子和电子结合成中性原子, 光子可自由传播: **宇宙透明**
- ◆ 气体不再受到**光子压**支持: 高密区引力大, 导致向内塌缩: 中心附近的团块相互吸引, **并合成大星系**; 靠外团块则可能变成较小的伴星系 (**原初星系**)
- ◆ 早期宇宙小, 原初星系彼此靠近, 原星系的引力相互拉拽: **潮汐矩**会拉着原星系慢慢转动起来
- ◆ 原星系内气体云彼此碰撞, 它们会失去其部分能量而**内落**; 因**角动量守恒**, 原星系的旋转逐渐**增加**。

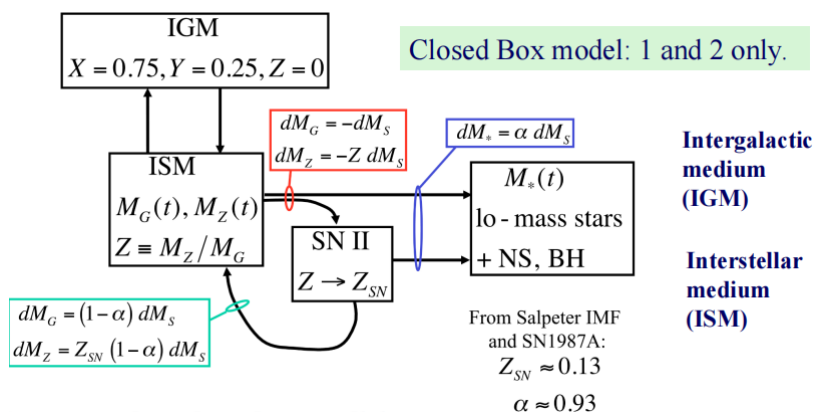
#### (1) 银河系形成——塌缩模型

- 1 宇宙早期引力扰动导致星云塌缩, 形成第一代恒星: 超新星爆炸使得元素增丰, 但金属丰度很低
- 2 贫金属气体云相互运动碰撞, 压缩气体, 形成球状星团、晕星: 年老 (宇宙早期)、贫金属
- 3 气体云在形成恒星前, 还没有向中心下落太远: 球状星团和晕星的轨道取向随机; 有序转动少
- 4 气体云塌缩时角动量损失缓慢 (垂直轴方向), 沿着旋转轴方向下落: 形成有序运动扁平盘结构
- 5 气体塌缩时标  $t \sim 1/\sqrt{\rho}$ : 密度较高云快速形成恒星, 超新星爆炸使得气体进一步增丰, 厚盘星
- 6 厚盘超新星爆发, 增丰气体。气体进一步下落, 星系逐渐变为扁平状, 形成由离心力支撑的薄盘
- 7 薄盘星开始诞生: 较早代恒星产生的重元素已使气体增丰, 薄盘星年轻、金属丰度高、有序运动
- 8 **星族**: 年龄、化学组成、空间分布与运动特性较接近的恒星集合。星族可分为三类:

- 星族I: 年轻恒星, 形成较晚, 金属丰度高, 圆轨道。位于银盘、旋臂等区域
- 星族II: 年老恒星, 形成较早, 金属丰度低, 随机运动。位于星系晕、核球等区域
- 星族III: 诞生于宇宙极早期, 零金属、大质量的恒星。没有被发现, 理论预言。

#### (2) 重元素的合成

- 1 原初气体  $\rightarrow$  第一代恒星  $\rightarrow$  合成重元素  $\rightarrow$  SN爆炸  $\rightarrow$  星际介质丰度增加  $\rightarrow$  第二代恒星 ...
- 2 恒星燃烧H、He气体, 形成重元素: 恒星年龄与金属丰度相关; 较老恒星几乎不含金属, 年轻恒星则有较高金属丰度  $\rightarrow$  化学演化



#### 3 单区瞬时循环模型——化学演化

◆ 假设:

- ◆ 星系的气体充分混合, 处处具有相同**化学组成**
- ◆ 恒星将它们核聚变的产物**瞬时**返回到星际气体
- ◆ 无气体从星系逃离, 也无气体流入: **闭区模型**
- ◆ 所有**比氦重的元素**, 彼此保持完全相同的比例

**one zone, instantaneous recycling, closed box model**

- ◆  $M_g(t)$ : t时刻, 星系(ISM)中**气体**的质量;
- ◆  $M_s(t)$ : t时刻, 小质量**恒星和恒星遗迹**质量(被锁定在这些天体中的物质质量);
- ◆  $M_h(t)$ : t时刻, 星系气体(ISM)中**比氦重**的**元素总质量**;
- ◆  $Z(t) = M_h(t) / M_g(t)$ , **气体**的金属丰度

时刻t, 星系中形成了质量为 $\Delta^*M$ 的恒星。大质量恒星SN爆炸后, 留下质量 $\Delta M$ 。在小质量恒星和遗迹中, 向ISM中返回(瞬时)**重元素质量**为 $p\Delta M$ 。气体

**产额(stellar yields) p:**  $Yield = p = \frac{\text{mass of new metals added to ISM by SNe}}{\text{mass of ISM converted to long-lived stars}} = \frac{p\Delta M_s}{\Delta M_s}$

星际**气体**中的**重元素质量** $M_h$ 变化: 大质量恒星产生的**重元素**返回( $p\Delta M_s$ ), 被锁定在小质量恒星和遗迹中的**重元素**( $Z\Delta M_s$ ):  $\Delta M_h = p\Delta M_s - Z\Delta M_s$

气体中的金属丰度增加量:  $\Delta Z \equiv \Delta \left( \frac{M_h}{M_g} \right) = \frac{p\Delta M_s - Z[\Delta M_s + \Delta M_g]}{M_g}$   
 $M_g$ 为星系气体质量

如果没有气体进入或离开系统(**闭区**), 则气体和恒星总量保持不变:  
 $\Delta M_s + \Delta M_g = 0 \rightarrow \Delta Z / \Delta M_s = p / M_g \rightarrow \Delta Z / \Delta M_g = -p / M_g$

如果**p不依赖于Z**, 积分 $\Delta Z / \Delta M_g = -p / M_g$ ,  $Z(t) = Z(t=0) + p \ln \left[ \frac{M_g(t=0)}{M_g(t)} \right]$   
 可得到气体中的金属丰度随时间变化:

随着恒星形成和**气体耗尽**, 气体的金属丰度随时间增加

时刻t, 星系中气体的质量 $M_g(t)$ 、金属丰度为 $Z(t)$ ; 时刻t之前形成的恒星金属丰度小于 $Z(t)$ , 恒星质量为 $M_s(<Z)$ , 则有 $M_s(<Z) = M_g(t=0) - M_g(t)$ :

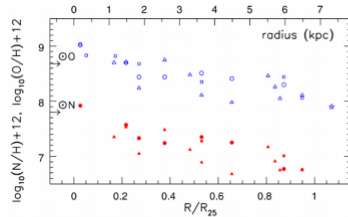
$$M_s(<Z) = M_g(0) [1 - \exp\{-[Z - Z(0)]/p\}]$$

$M_s(<Z)$ 不显含时间t; 时刻t之前形成的、长寿命(小质量)恒星的质量, 只依赖于**t时刻**, 星系中**金属丰度为Z**气体量 $M_g(t, Z)$ 。

$$\frac{dM_s(<Z)}{dZ} \Delta Z \propto \exp\{-[Z(t) - Z(0)]/p\} \Delta Z$$

$dM_s(<Z)/dZ$  随着 Z 指数下降

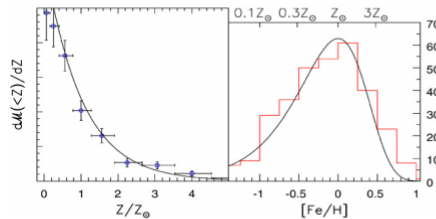
4 模型检验



M33中盘气体的**金属丰度**(氧元素O、氮元素N)与随**半径( $R/R_{25}$ )**的变化关系

在旋涡星系外盘等**富气**区域, 恒星和气体是相对**贫金属**的: 与恒星形成相关的**气体密度**高的地方, **重元素**的平均**丰度**低预言一致

$$Z(t) = Z(t=0) + p \ln \left[ \frac{M_g(t=0)}{M_g(t)} \right]$$



银河系核球(Baade's Window)中G和K型巨星的数目随Z分布:

左图是每个 $Z/Z_\odot$ 区间的相对数目

右图为每个 $[Fe/H]$ 间隔内的数目

实线为模型:  $p = 0.5Z_\odot$ ,  $Z(t=0) = 0$

银河系核球中G和K型**巨星**的金属丰度: 核球可能成功地留住了所有气体, 并完全将其变成了恒星  $\rightarrow$  所以观测结果能够与**单区瞬时循环模型**预言复合较好

5 矛盾: G型矮星问题

- ◆ 太阳附近，银盘含有：
  - ◆ 恒星  $\sim (30-40) M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ ，气体  $M_g(t) \sim 13 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ ， $M_g(t=0) \sim 50 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$
- ◆ 局域盘气体具有大致同太阳一样的平均丰度： $\langle Z \rangle \sim Z_{\odot}$
- ◆ 如果  $Z(t=0) = 0$ ，原初气体中不含重元素。假设没有气体进入或离开太阳邻域，则有：

$$Z(t) = Z(t=0) + p \ln \left[ \frac{M_g(t=0)}{M_g(t)} \right]$$

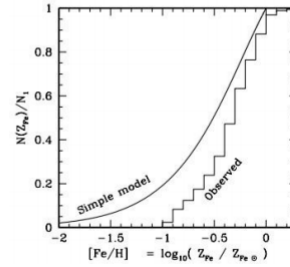
$$Z(\text{now}) \approx Z_{\odot} \approx p \ln(50/13), \quad \text{so } p \approx 0.74 Z_{\odot}$$

当  $p = 0.74 Z_{\odot}$  时，贫金属盘星比例：

$$\frac{M_*(\langle Z \rangle / 4)}{M_*(\langle Z \rangle)} = \frac{1 - \exp[-Z_{\odot}/(4p)]}{1 - \exp(-Z_{\odot}/p)} \approx 0.4$$

对于太阳邻域，闭区模型给出太阳附近局域盘星几乎一半有  $Z < Z_{\odot}/4$ 。

观测与闭区模型矛盾：  
G型矮星问题



解决办法：

- 形成恒星的气体金属丰度  $Z(t=0)$  不等于 0：
  - 以前恒星产生的重元素已同形成盘的气体混合，使其‘预增丰’，令  $Z(t=0) \approx 0.15 Z_{\odot}$ ，可以近似给出局域金属丰度的观测分布
- 气体外流、内落存在：闭合假定不成立
  - 外部贫金属气体的内流，阻止丰度上升得像闭区模型预言的那样快
  - 矮星系或者星团等引力势不足以束缚其中气体，发生外流，带走重元素
  - 外流和内落，导致形成恒星的气体金属丰度不均匀：瞬时混合假定不成立

6 考虑内流与外流的模型：内流  $\mathcal{A}(t)$ ，外流  $\mathcal{W}(t)$

$$\frac{dM_{gas}}{dt} = -\Psi(t) + \xi(t) + \mathcal{A}(t) - \mathcal{W}(t)$$

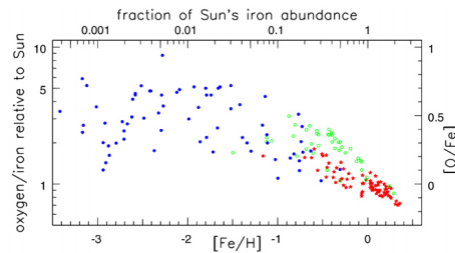
金属丰度变化：
$$\frac{d(ZM_{gas})}{dt} = -Z\Psi(t) + \xi(t) + Z_A\mathcal{A}(t) - Z(t)\mathcal{W}(t)$$

假定： $\mathcal{A}(t) = 0$  and  $\mathcal{W}(t) = \alpha(1 - \mathcal{R})\Psi(t)$   $yz/(1+\alpha)$  is called the effective yield.

$$Z(t) = Z(0) + \frac{yz}{1+\alpha} \ln \left[ \frac{M_{gas}(0)}{M_{gas}(t)} \right]$$

$$M_*(\langle Z \rangle) = M_{tot}(t) - M_{gas}(t) = \frac{M_{tot}(0)}{1+\alpha} \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{Z - Z(0)}{yz/(1+\alpha)} \right] \right\}$$

7 贫金属星  $\alpha$  元素增丰

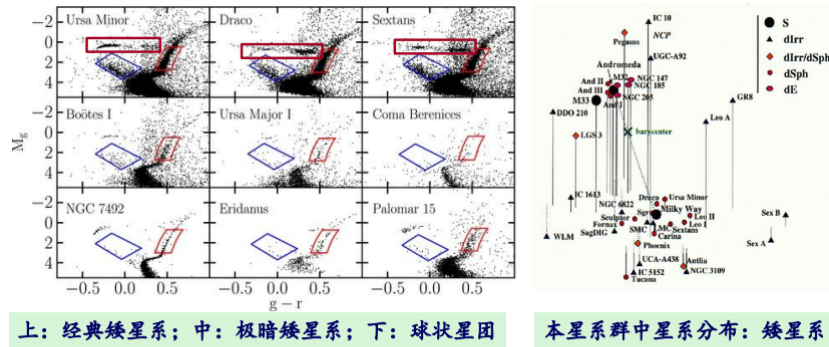


不同金属丰度恒星的氧元素与铁元素丰度比  $[O/Fe]$ ：贫金属星中氧相对于铁更丰富

蓝色点：银晕中的恒星  
绿色点：厚盘星  
红色点：薄盘星

- ◆  $\alpha$  元素和 Fe 元素产生机制不同
  - ◆ 星际气体中的铁元素主要是由 Ia 型超新星爆炸释放到 ISM 中，发生 SN Ia 爆炸的恒星为小质量恒星，年龄在 1 Gyr 或以上
  - ◆ 星际气体中  $\alpha$  元素主要 II 型超新星爆发时抛到 ISM 中，II 型超新星为大质量恒星产物 ( $T < 100 \text{ Myr}$ )：SN II 的 Fe 保留在中子星、黑洞中
  - ◆ 贫金属晕星形成的早 ( $t < 1 \text{ Gyr}$ )，Ia 型超新星还没有开始把铁加入星际气体中： $\alpha$  元素同铁的比  $[\alpha/Fe]$  要高于在太阳中的值

## 4.本星系群中的矮星系



◆ 本群中所有的矮星系都含有一些**水平支恒星**: 水平支恒星的**年龄至少有 10 Gyr**, 所以矮星系形成其首批恒星是在宇宙历史开始的 2-3 Gyr

◆ 矮椭圆星系(dE)和矮椭圆球星系(dSph)基本都是银河系或者M31的伴星系; 而矮不规则星系(dIrr)大多**都不是**较大系统的伴星系, ‘自由飞行者’

### (1) 矮椭圆星系

- 相同特性
  - 年老星族
  - 冷气体少
  - SFR较低
- dE尺度类似于dSph, 但更亮, 恒星密度高
- dE呈现为椭圆形, 内部恒星没有显示出有序运动

### (2) M32

- 1 M32是M31最亮的伴星系, 星族年老、无冷气体
- 2 光度属于正常dE, 但其密度非常高: M32是微型版正常或‘巨’椭圆星系
- 3 M32可能是一个大的旋涡星系的遗迹: 外区被剥离, 留下致密核球(?)
- 4 M32具有大质量星系的典型特征: 中心恒星颜色红; 重元素和太阳一样丰富
- 5 M32中恒星运动介于银盘(有序)和银晕星(随机)之间:  $V/\sigma \sim 1$  (银盘  $V/\sigma \sim 7$ )

### (3) 矮不规则星系

- 1 不规则星系和矮不规则星系光度分界:  $L \sim 10^8 L_{\odot}$

### 2 dIrr 与 dSph区别:

- dIrr中存在大量年轻星族, 年轻星族使得它们一般比矮椭圆星系亮
- dIrr含有气体和含有大量的中性氢气体, 且气体层延伸超过主星盘

### (4) dIrr 与 dSph 相似:

- 1 有序旋转运动不重要,  $V/\sigma \leq 1$
- 2 金属丰度低, 一般小于太阳丰度的10%。光度越小金属也越贫

### (5) 观测到低金属丰度与高SFR矛盾?

富金属气体外流 (如超新星驱动的星际风)



## 5.星系的束缚：拉格朗日点

(1) 两体问题：

$$\text{有效势: } \Phi_{eff}(x) = -\frac{GM}{|D-x|} - \frac{Gm}{|x|} - \frac{\Omega^2}{2} \left(x - \frac{DM}{M+m}\right)^2$$

$$\text{拉格朗日点: } x = \pm r_J, r_J = D\left(\frac{m}{3M+m}\right)^{1/3}$$

此即双星系的束缚边界

(2) 暗物质晕中的两体：如银河与矮星系

$$M = \frac{rV_H^2}{G}$$

$$r_J = D\left(\frac{m}{2M(<D)}\right)^{1/3}$$

## 五、旋涡星系和透镜星系

### 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

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

① 真轴比:  $q_0 = \frac{c}{a}$

② 视轴比:  $q = \frac{b}{a}$

③ 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

(2) 面亮度径向分布

① 星系盘:  $I(R) = I(0)\exp(-R/h_R)$

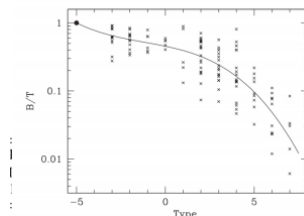
- $R_{max}$ : 恒星盘指数部分终止处半径。
- $R_{max} \sim 10 - 30kpc \sim (3 - 5)h_R$
- $h_R > R_e$  ( $R_e$ 有效半径; eg MW:  $h_R \sim 5kpc, R_e \sim 2.7kpc$ )
- 积分光度:  $L_{tot}(disk) = 2\pi h_R^2 I(0)$

② 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  $R^{1/4}$  律描述

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

- 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  $\gamma = D/B = (B/T)^{-1} - 1$

**B/T (B/D) correlates Hubble type**

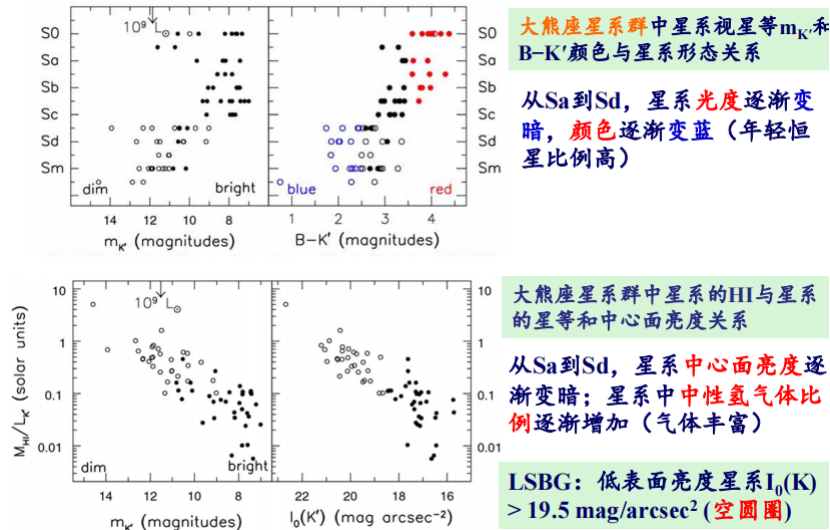


3 星等:  $m_\lambda = \int I(R, \theta) dA$

- 银河系前景消光影响,  $A_g$
- 星系内部消光影响,  $A_i$
- 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

(3) 面亮度垂向分布:  $I(R, z) = I(R) \exp(-|z|/h_z)$

(4) 盘星系序列



(5) 低面亮度星系: **Low Surface Brightness Galaxy (LSBG)**, 一般指中心面亮度暗于  $23 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (B波段) 的星系

1 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

2 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

## 2.观测气体

1 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

2 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

3 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H $\alpha$

4 中性氢在星系中分布, 比恒星盘更延展

(1) 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

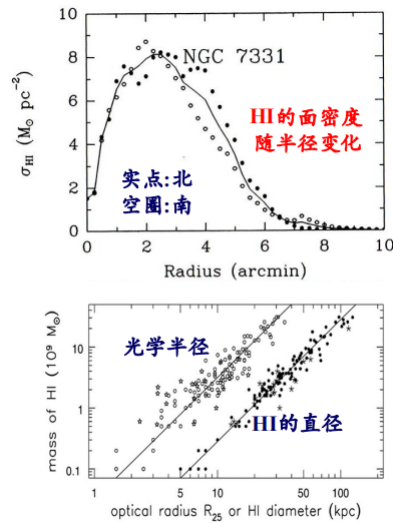
- 综合孔径射电望远镜: 具有高空间分辨率、高灵敏度、能够成像、适合于探测强度不变的射电源

(2) 盘中的冷气体

- 射电21cm线被尘埃吸收的少, 星系盘中HI是光薄的: 盘中气体的质量同21cm线发射的强度成正比
- 射电波段分辨率较低 + 射电辐射信号弱: 利用相对较低空间分辨率观测, 得到较高信噪比射电HI图像
- 气体在星系中运动, 谱线在视向以速度  $V_r$  发生了移动: 让望远镜在许多相隔很近的频道进行同时观测, 将来自所有频道的发射相加  $\rightarrow$  气体分布

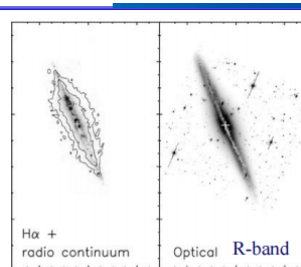
### 1 HI气体分布

- 径向：比星光均匀；中心贫；
- 垂向：中平面附近、很薄的层中



### 2 电离氢H II分布

- 光学波段：一条薄的吸收尘埃带，将星系平分
- $H\alpha$ 发射
  - 被热星紫外光子电离的气体（HII区）分布在盘中平面附近
  - 半径较小区域辐射最强，但弥漫发射在垂直于盘方向可延伸到  $\sim 5\text{kpc}$
- 20cm射电连续发射（热电离气体的自由-自由辐射和在超新星遗迹中被加速的快速运动电子的同步辐射）的分布和 $H\alpha$ 分布相似
- 射电连续发射和 $H\alpha$ 分布延展：紫外光子和快电子都能逃离星系盘  $\rightarrow$  盘内的气体必定是块状的
- 在盘上方更高区域，某些盘星系可能有温度接近百万度的热气体晕

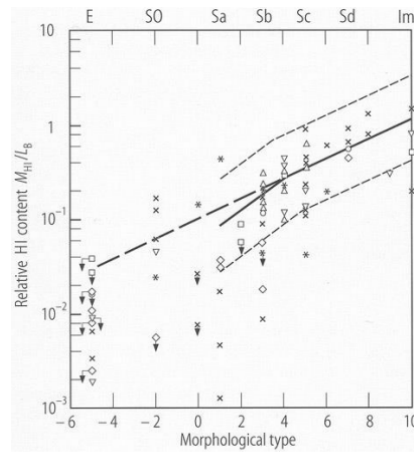


NGC891的光学和射电图像。十字表示星系中心。左：H $\alpha$ 像，轮廓线显示20 cm射电连续发射；右，R波段光学像。

### 3 冷分子氢 $H_2$

- 观测：辐射在mm波段
  - 劣势：分子气体的观测没有H I观测灵敏
    - 现有的cm波段接收机比mm波段更灵敏
    - CO分子与 $H_2$ 的比例只有约 $10^{-4}$ ：信号弱
    - 给定质量原子气体比同量分子气易探测
  - 优势：分子辐射在毫米波段，波长较短，分子气体图像的分辨率，高于厘米波段
- 旋涡星系中的CO发射一般在内区最强；内区气体主要是分子气体
  - 不像HI，分子气体在星盘以外一般探测不到；盘中的气体绝大部分是原子气体

(3) **富气程度**: 通常用HI质量 $M(\text{HI})$ 同B波段的光度 ( $L_B$ ) 的比, 表征星系的富气程度: 光学波段视亮度和射电辐射都随  $1/d^2$ 减小, 比值与星系的距离 $d$ 无关



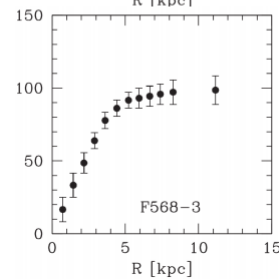
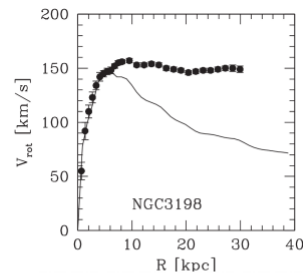
星系富气程度与星系形态关系 (图中不同符号表示不同的星系群和星系).

1 晚型盘星系消耗其气体速度慢, 内部仍然有丰富的HI气体

### 3. 盘星系气体运动和质量

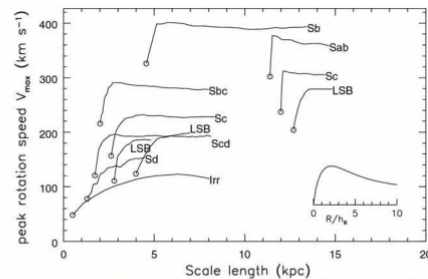
(1) 转动曲线

- ◆ 星系盘上的气体和恒星, 绕星系中心转动
- ◆ **转动曲线**: 描述盘星系中气体和恒星转动速度  $V$  和半径  $R$  的关系
- ◆ 转动曲线特征:
  - ◆  $R=0$  (星系中心) 时  $V=0$ ; 后  $V$  随  $R$  快速增大
  - ◆ 在  $R_{\text{max}}$  处  $V=V_{\text{max}}$ ;  $R > R_{\text{max}}$  后,  $V$  基本保持不变
- ◆ 转动曲线与星系光度关系
  - ◆ 光度越大的星系, 转动曲线的  $V_{\text{max}}$  也越大
  - ◆ 转动曲线在  $R > R_{\text{max}}$  区域的斜率  $\alpha$  与光度成反比;  $L$  小,  $\alpha > 0$ ;  $L$  大,  $\alpha < 0$ .
  - ◆  $V(R) \sim R^\alpha$ ,  $\alpha$  in the range -0.2 to 0.2
  - ◆ 在小半径处, 高光度星系 (早型盘星系) 的  $V(R)$  随着半径快速增加; 而低光度星系  $V(R)$  增加较为缓慢



1 盘星系转动曲线

- ◆ 旋涡星系中的  $V_{\text{max}} \sim 150 - 300 \text{ km/s}$ . 很少有  $V_{\text{max}} > 400 \text{ km/s}$ .
- ◆ 星系越大, 标长  $h_R$  越长, 转动越快: 多是早型盘星系, 而非晚型盘星系 ( $S_c$ ,  $S_d$ ,  $S_m$ )
- ◆  $S_a$ 、 $S_b$  星系, 转动曲线在小半径处陡升: 星系中心区域物质致密
- ◆  $S_d$ 、 $S_m$  星系, 转动速度增加缓慢: 没有大核球, 盘具有低中心面亮度
- ◆ **LSBGs**: 多数转动缓慢, 类似  $S_d$  或  $S_m$  星系转动曲线; 但也有些LSBGs 具有较高速度和快升的转动曲线



各类盘星系的转动曲线。空圈位置显示每个星系星盘的标长  $h_R$  和峰值转动速度  $V_{\text{max}}$ 。曲线的横坐标以  $R/h_R$  为单位, 即水平长度显示转动测量向外达到的标长数。

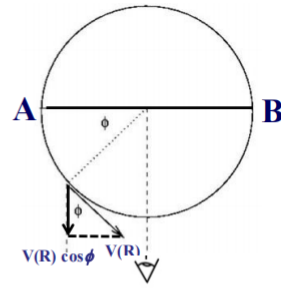
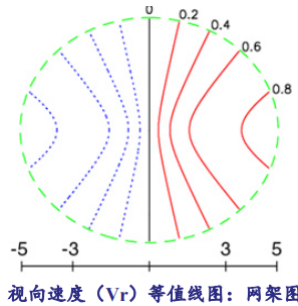
2 盘的转动

因为随机速度很小，可假设在半径R处气体云遵循速度为V(R)的**近圆轨道**运动。该运动的**视向速度** $V_r$ ：

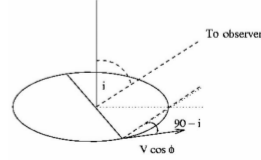
- ◆ 在星系**中心**处， $V(R)=0$ ，所以视向速度  $V_r = V_{sys}$  ( $V_{sys}$ 为星系**运行速度**或**红移**)
- ◆ 当星系是**面向** (face on,  $i=0$ )，盘的转动在视线方向没有分量， $V_r = V_{sys}$
- ◆ 当星系是**侧向** (edge on,  $i=90$ )，盘的转动在视线方向的分量与方位角 $\phi$ 有关：  
 $V_r = V_{sys} + V(R) \cos \phi$
- ◆ 星系盘的转动轴和观测者视线方向**夹角**为*i*，星系的运行速度 $V_{sys}$ ；半径R、方位角 $\phi$ 处的恒星或气体云视向速度记作 $V_r(R, i)$ ，则有：

$$V_r(R, i) = V_{sys} + V(R) \sin i \cos \phi$$

$V_r$ 和 $V(R)$ 关系



edge on ( $i=90$ ) :  
 $V_r = V_{sys} + V(R) \cos \phi$



## (2) Tully-Fisher关系

- 1 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 $V_{max}$
- 2 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
- 3 气体在较大的半径范围，有几乎恒定速度 $V_{max}$ ：大多数发射在极大速度处拥挤成两个峰，形成双角形轮廓
- 4 双角形轮廓两峰间隔是： $W \approx 2V_{max} \sin i$

$$\frac{L_I}{4 \times 10^{10} L_{I,\odot}} \approx \left( \frac{V_{max}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4$$

## 4 估计星系距离

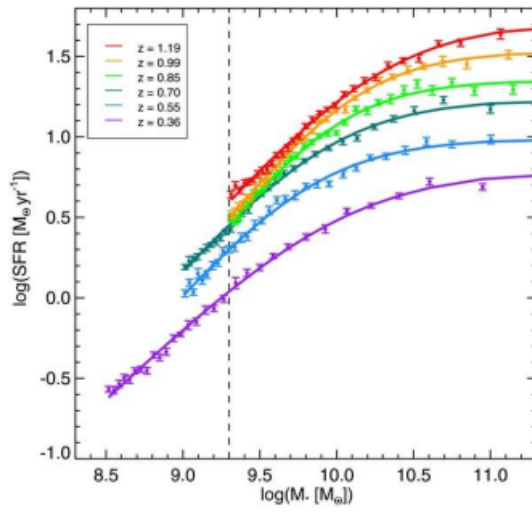
- 利用造父变星测距，定标近邻旋涡星系TFR
- 利用射电望远镜，观测更远星系的HI轮廓，测出 $V_{max}$ ，然后用TFR得到星系光度
- 将此光度同观测到的星系视星等比较，可得到距离： $V_{max} \rightarrow L + m$  (视星等)  $\rightarrow d$

## 4. 盘星系序列

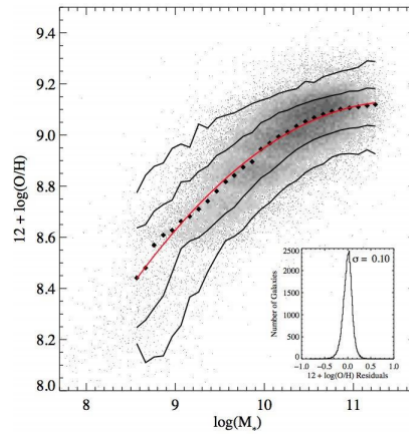
### (1) SFR

- 1 **specific star-formation rate (sSFR)**:  $sSFR = SFR/M^*$
- 2 **Birthe rate (b)**:  $b = SFR / \langle SFR \rangle$ ,  $\langle SFR \rangle = M^*/t_0 \Rightarrow b = sSFR \times t_0$ ,  $t_0$ 为宇宙年龄
- 3 更亮的星系具有更低的b

### (2) SFR- $M^*$ 关系



(3) 金属丰度：小质量星系形成早？



## 5.旋臂和棒

- 1 旋臂结构：盘星系中恒星形成增强区域，丰富的年轻恒星形成区、分子致密区
- 2 旋臂结构为星系盘中密度扰动的区域，有m个旋臂的盘星系，物质密度：

$$\Sigma(R, \phi) = \Sigma_0(R) + \Sigma_1(R) \cos [m\phi + f(R)].$$

- $\Sigma_0(R)$ : 盘的面密度
- $\Sigma_1(R)$ : 旋臂区域密度扰动幅度
- $\phi$ 为方位角； $f(R)$  描述旋臂形状的函数（螺距角）

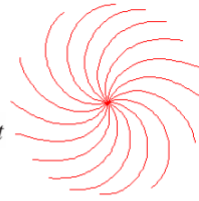
(1) 旋臂分类

- **宏象旋臂 (Grand Design)**: 星系有2条很明显旋臂、约 ~10%
- **絮状旋臂 (Flocculent)**: 星系有许多不连续的短臂，约 ~30%
- **多旋臂(Multiple)**: 星系有多条旋臂，内部明显，外部不连续，~ 60%

1 宏象旋臂数学描述

- ◆ 漩涡星系的形状一般具有**旋转不变性**
  - ◆  $m$ 条宏象旋臂，星系在旋转 $2\pi/m$ 角度后，形状保持不变
  - ◆ 两重对称： $2$ 条旋臂星系，转动 $\pi$ 角度，图像保持不变
  - ◆  $m$ 个旋臂的漩涡星系，在星系中心极坐标系  $(R, \phi)$ ，旋臂可描述为：

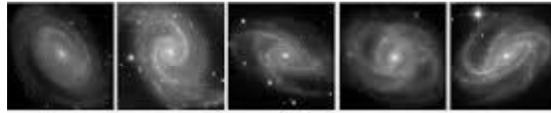
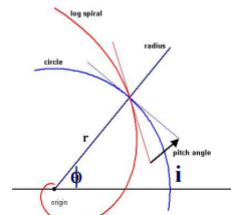
$$\cos\{m[\phi + f(R, t)]\} = 1. \quad f(R, t) = -\phi_0 - \Omega(R)t$$



- ◆  $f(R, t)$ 可以描述星系旋臂松紧程度：
  - ◆ 如果 $|\partial f/\partial R|$ 很大，卷得紧； $|\partial f/\partial R|$ 很小，卷得松

- ◆ 螺距角(Pitch Angle)  $i$ : 旋臂与半径 $R$ 处圆的切线之间的夹角

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



$m=1$

$m=2$

$m=3$

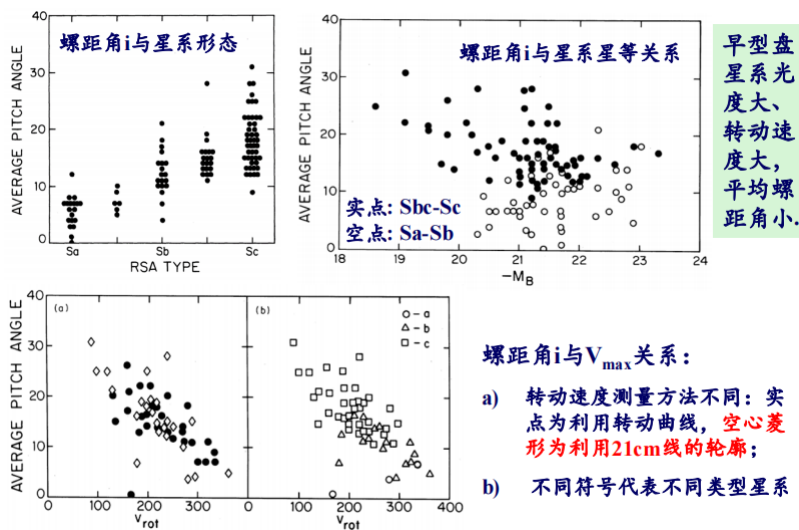
$m=4$

$m=5$

$\phi$  方位角

$i$  螺距角

## 2 螺距角 $i$ 与星系特性关系



## 3 指向: 根据星系旋臂末端所指方向与星系转动方向一致或相反: 前导型旋臂和后随型旋臂

- **前导型(leading):** 旋臂的前端指向与星系转动方向相同
- **后随型(trailing):** 旋臂的前端指向与星系转动方向相反
- 旋臂几乎总是后随型的
  - 后随旋臂中，内盘施予外盘一个转矩，使得小半径处的物质能够向内运动
  - 仅当有能量从外面供应时，盘才能发展出前导旋臂：如星系相互作用
- 观测确定是导臂或者随臂
  - 转动方向：利用星系光谱红移、蓝移或网架图
  - 旋臂远近：确定旋臂 (which side) 离我们近or 远。常根据尘埃对旋臂遮挡程度确定，远的旋臂光被尘埃遮挡严重，更暗

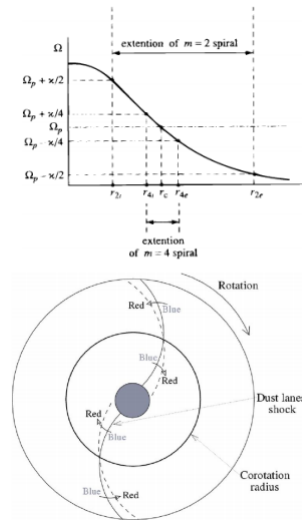
## (2) 漩涡结构理论

### 1 密度波理论: 恒星在绕星系中心转动时，绕转速度和空间密度都是变化的，解释宏象旋臂

- 旋臂密度波如同交通堵塞：旋臂处密度大，恒星、气体进入旋臂时加速；离开是受旋臂引力作用减速；加速和减速使得旋臂处密度进一步增大，气体受压缩，形成新的恒星（旋臂处有年轻恒星）。大质量恒星寿命短，超新星爆炸；只有长寿命的小质量恒星可以离开旋臂
- 旋臂引力对气体的影响比对恒星影响更大
  - 气体云随机速度 $\sigma \sim 5 - 10$  km/s, 远小于恒星的随机速度
  - 气体云以速度 $V \sim 100$ km/s 接近星系旋臂

- 旋臂的引力势，使得气体速度下降，HI云被压缩，形成大小不同的分子云；巨分子云中形成恒星，恒星辐射又破坏分子云
- 恒星和气体的速度比旋臂速度快，较古老的恒星离开旋臂；新的物质又进入旋臂
- 旋臂中的恒星与气体不是一成不变的，而是有进有出，但旋臂图案却保持不变，旋臂不会缠卷起来

- ◆ 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 $R_g$ 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 $\Omega$ ，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 $\Omega_p$ ；恒星角速度 $\Omega$ 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 $\Omega_p$ 很高，可以没有内Lindblad共振。

## 2 随机自传播恒星形成模型：解释絮状旋臂

- 星系中的气体云因密度涨落形成了首批恒星，大质量恒星寿命短 → 短寿命大质量恒星发生超新星爆发(或星风)，所产生的冲击波将压缩周围的气体 → 气体被压缩，触发更多的恒星诞生，导致恒星形成过程从气体的一边传播到另一边 → 较差自转将云拖出一段后随旋臂；当这段旋臂伸长较长时，气体被耗尽，恒星消亡，该区域融回盘内
- 局域盘的不稳定性，导致短时间、小区域的恒星形成
- 该过程可以产生弧形结构，不能产生大的、宏象旋臂
- 正在形成恒星区域，激波可触发周围区域的恒星形成
- 星系转动，较差自转导致恒星形成区域呈现旋臂图案

## (3) 星系棒

- 棒的图形不是静态的
  - 棒以图案速度 $\Omega_p$ 转动；
  - 棒不是密度波，其大部分恒星总是留在棒内部

## 1 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



2] 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

3] 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 - 形成盘状（伪）核球

## (6) 盘星系核球和中心

### 1] 分类

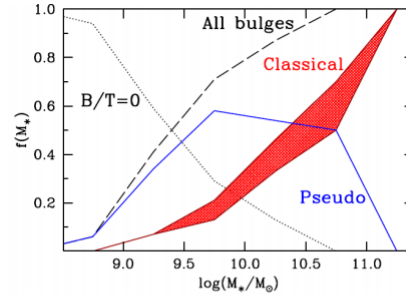
- 经典核球：可能形成于盘星系之间的并合；星系并合时标短
- 伪核球：星系核球形成于盘气体长期向星系中心移动（下落），长期演化

#### 经典核球

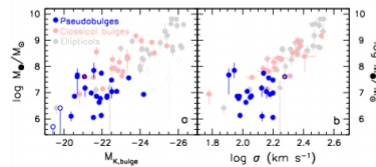
- ◆ 核球区域明显比盘厚；呈椭球状
- ◆ 无明显子结构（棒、旋臂、环）
- ◆ 年老恒星为主（尘埃和恒星形成区少）
- ◆ 运动学热，恒星速度弥散 $\sigma$ 大，转动速度小 $V_{rot}$
- ◆ 由星系并合形成，形成剧烈，气体通过星暴形成恒星

#### 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 $\sigma$ 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) .



### 2] 核和中央黑洞

- 星系中心引力强，气体倾向于流入星系中心
  - 核球中，从死亡恒星流出气体彼此碰撞失去能量，下沉形成一个快速转动内盘
  - 棒的作用（不对称势），将星系盘的气体向里带，进入星系中心区域
- 星系中心区域有丰富的气体
  - 中心区域星系转动曲线 $V(R)$ 线性上升，角速度 $V(R)/R$ 近乎不变：不存在剪切
  - 气体云不会被较差转动拉散；气体在自身引力作用下塌缩，变得足够致密
  - 多数旋涡星系中央100pc以内有丰富的气体，致密气体中有恒星形成
- 星系中心有致密的核心星团
  - 位于星系中心，质量  $\sim 10^7 M_{\odot}$ ，半径  $\sim 3$  pc
  - 疏散星团和球状星团：所有的恒星同时诞生
  - 气体持续的进入星系中心：核心星团中有不同年龄恒星；核心星团的质量大、速度弥散高

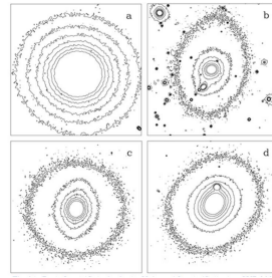
### 3] 黑洞搜寻

- 运动学方法：通过测量星系核区气体（电离气体、CO分子、maser）和恒星运动，搜寻星系中心是否存在黑洞
  - 银河系中心：恒星运动轨道  $\rightarrow M_{BH} \sim 3 \times 10^6 M_{\odot}$
- 恒星运动（近邻黑洞搜寻）
  - 不能直接观测星系中心单个恒星运动轨道，但是可以通过观测星系中心区域恒星的平均运动
  - 星系中心有越大质量黑洞，恒星平均运动会越快：黑洞引力使其周围恒星速度加速
  - 局限性：只能用于近邻星系，只能用于大质量黑洞（小质量黑洞，恒星加速不明显）
  - 因为黑洞只能对其附近的恒星作用，需要观测星系中心较小区域：哈勃空间望远镜/自适应观测扣除大气seeing影响
- 电离气体

## 六、椭圆星系

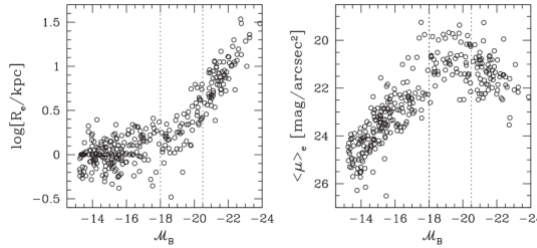
# 1. 星系测光

- ◆ 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：  $L > L_s \approx 2 \times 10^{10} L_\odot$ ,  $M_B < -20.5$
  - ◆ 中等椭圆星系：  $L \sim 0.1-1 L_s$ ,  $M_B = -18$  -  $-20.5$
  - ◆ 矮椭圆星系：  $L < 0.1 L_s$ ,  $M_B > -18$  mag



- a) 标准椭圆的等照度线
- b) 内外等照度线轴垂直
- c) 盘状 (disky) 等照度线
- d) 盒状 (boxy) 等照度线

椭圆星系的哈勃型依赖于观测者的视线方向。



## (1) 核外径向亮度分布

- ◆ 椭圆星系的光向中心聚集的程度比旋涡星系的盘高得多
- ◆ De Vaucouleurs (1948) 发现，多数椭圆星系面亮度  $I(R)$  与半径  $R$  的关系可以表示为：  
 $\mu \sim R^{1/4}$  ( $n = 4$ )

$$I(R) = I_e \exp(-7.67((R/R_e)^{1/4} - 1))$$

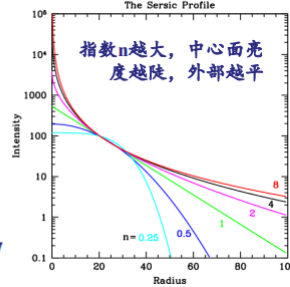
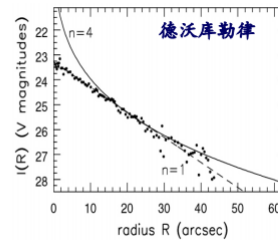
$I_e$  为半径  $R_e$  处的面亮度；单位：mag/arcsec<sup>2</sup>

- ◆ Sérsic (1968) 公式：星系面亮度的一般描述

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

$$\mu \propto -2.5 \log(I) \quad \mu(R) = \mu_c + 1.086 \beta_n \left[\left(\frac{R}{R_c}\right)^{1/n} - 1\right]$$

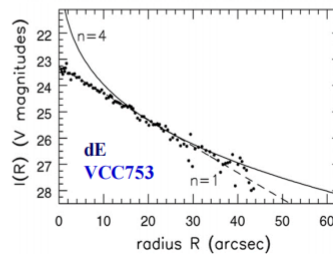
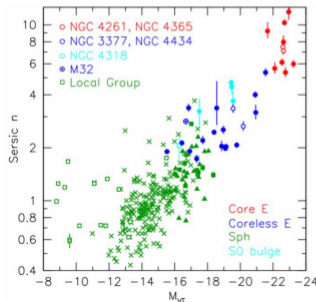
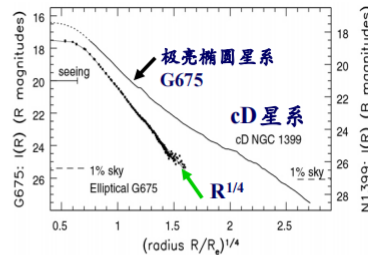
$R_e$ : 有效半径，包括星系50%光； $n \geq 1$ :  $\beta = 1.999n - 0.327$   
 $n=4$ :  $\beta = 7.67$ ,  $R^{1/4}$ 律； $n=1$ :  $\beta = 1.67$ , 指数面亮度分布



在非星系中心， $R^{1/4}$ 律对亮和中等亮椭圆星系面亮度提供了很好的描述

但是不适合矮椭圆星系和极亮E星系

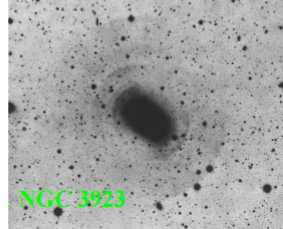
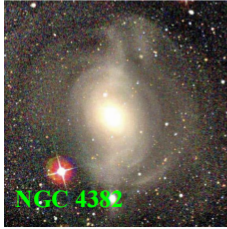
- ◆ 矮椭圆星系的面亮度接近于  $n \approx 1$  的指数轮廓
- ◆ 极亮椭圆星系在星系外围面亮度高于  $R^{1/4}$ 律预期，存在‘光富余’的外区



## 2 特殊椭圆星系

◆ cD (central Dominant) 星系

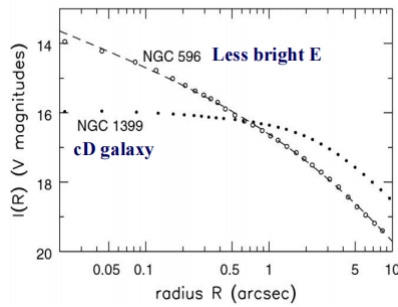
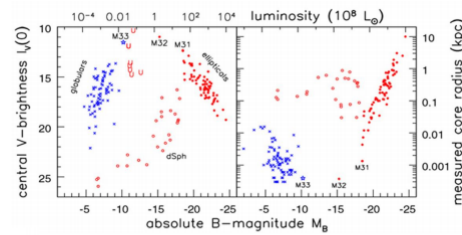
- ◆ 极高光度椭圆星系，有很大弥散的恒星晕，多位于星系团中心
- ◆ 星系团中最亮星系吞噬次亮星系；星系晕可能为次亮星系的遗迹，可以延伸达~100kpc
- ◆ 有子结构椭圆星系
  - ◆ ~10-20% 椭圆星系外区有弧状‘壳’和其他不对称的结构
  - ◆ 子结构显示最近的星系合并，为大星系引力撕碎然后吞进去的小星系的遗迹



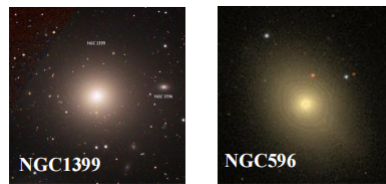
- 数个Gyr后，壳等结构会逃逸

(2) 核区径向面亮度分布

- ◆ 椭圆星系的中心面亮度、核半径和星系光度密切相关
- ◆ 中心面亮度分布与光度相关
  - ◆ 亮椭圆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



V波段的中心面亮度、核半径与B波段光度关系：实圈是E星系和S星系核球；空圈是dSph；叉符是球状星团；星符是M33核。‘U’表示天炉座和室女座星系团中超致密矮椭圆星系



1 三种椭圆星系

• 矮椭圆星系

- M与μ(0)类似盘星系。
- 亮度剖面更像是盘(n~1)。
- 在  $R_e - M - \mu_e$  图中，它们不同于真正的Es。本星系群有多个星族
- 是气体剥离的dIrr和dS星系

• 无核椭圆星系

- 中心轮廓不断裂，陡峭的内部幂律到最小半径。
- 较低亮度的椭圆星系， $M_V > -20.5$ ；较高的中心亮度；
- 可能是由其他Es的湿式合并而形成的。气体向中心移动，形成新的恒星，留下一个更密集的核心

• 有核椭圆星系

- 中心剖面有较浅的斜坡，它们是明亮的椭圆星系，比MV~-20.5更亮。
- 它们的中心亮度相对较低
- 它们可能是由其他椭圆星系的干燥合并而形成的（没有气体耗散）

2 The Kormendy Relation:  $\mu_{B,e} = 3.02 \lg(r_e) + 19.74$

(3) 椭圆星系形状

1 视轴比

假定观测者在x-z面，视线同z轴夹角为*i* ( $0 < i < 90^\circ$ )。视线在它同该椭圆相切的点T掠过恒密度面  $m^2 = x^2/A^2 + z^2/B^2$  [ $y=0$ ]

夹角*i*:  $\tan i = dx/dz = -(z/x)(A^2/B^2)$

椭圆的图像有半长轴 (视半长轴)  $a = mA$ , 视半短轴  $b = OR = OQ \sin i$ .

其中OQ:  $OQ = OP + PQ = z + (-x)\cot i = B^2 m^2 / z$

扁椭圆星系 ( $A > B$ ) 视轴比:

$$q_{obl} \equiv \frac{b}{a} = \frac{OQ \sin i}{mA} = \frac{B^2 m}{zA} \sin i = \left( \frac{B^2}{A^2} + \cot^2 i \right)^{1/2} \sin i$$

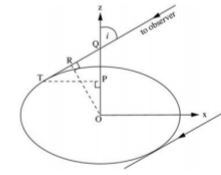
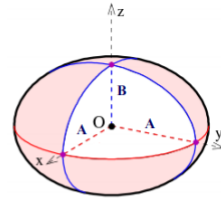
$$q_{obl}^2 = (b/a)^2 = (B/A)^2 \sin^2 i + \cos^2 i$$

长椭圆星系 ( $A < B$ ) 视轴比:

$$q_{prol}^2 = [(B/A)^2 \sin^2 i + \cos^2 i]^{-1}$$

视轴比  $q = b/a$ , 本征轴比  $\gamma = B/A$

$$\gamma^2 \sin^2 i + \cos^2 i = \begin{cases} q^2 & (\text{oblate}) \\ q^{-2} & (\text{prolate}) \end{cases}$$



- 如果全是真轴比为B/A的扁椭圆球，则视轴比在q和q + Δq之间的份额:

$$f_{obl}(q)\Delta q = \frac{\sin i \cdot \Delta q}{|dq/di|} = \frac{q\Delta q}{\sqrt{1 - (B/A)^2} \sqrt{q^2 - (B/A)^2}}$$

- 当  $B/A \ll 1$  (星系非常扁平) 时, 有  $f_{obl}(q) \sim 1$ , 即为近似均匀分布
  - 观测发现旋涡星系盘的视轴比  $q > 0.2$  的比例大致相等: S星系的盘大多有  $B/A \leq 0.2$
  - 极少盘星系显示外围等照度线是  $q \leq 0.1$  的椭圆 → 很少有星系的盘扁平到  $B/A \approx 0.1$
  - 观测发现: 星系盘垂直标高与水平标长范围  $h_z/h_R \sim 0.1 - 0.2$ , 轴比与此相互一致。
- 很少有比E7或  $q = 0.3$  更扁的椭圆星系: 更扁的E星系会是动力学不稳定的

## 2] 等照度线扭转

- 三轴对称椭圆星系的等光密度面投影后的等照度线为椭圆, 椭圆的方向和视轴比q: 1) 与视线方向有关, 2) 三轴椭球的真轴比A、B、C有关
- 如果等照度线长轴方位角随半径发生变化, 则会发生等照度线扭转: 原因是椭圆轴比B/A、C/A随半径变化
- 观测到星系等照度线的扭转, 看作是星系为三轴形 (A、B、C不相等) 的证据: 轴比A: B: C随半径m改变

## (4) 等照度线形状: 盘状, 盒状

- ◆ 椭圆星系的等照度线经常不是严格的椭圆, 而是有少许的偏离 (~ few %)

- ◆ 椭圆星系等照度线可分为:

- ◆ 沿等照度线的长轴有富余的星光: 盒状等照度线
- ◆ 星光较多的光分布在椭圆的角落: 盒状等照度线

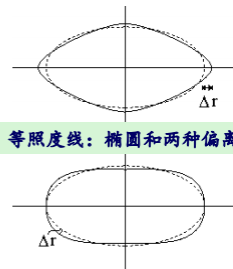
- ◆ 数学描述:

参数  $t$  描述环绕椭圆的角。令  $\Delta r(t)$  为拟合椭圆和星系等照度线之间的距离

$$\Delta r(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(kt) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(kt)$$

对于可以利用椭圆较好拟合的等照度线,  $n \leq 2$  项应该很小。

$r_0$ : 平均半径;  $a_1, b_1$ : 椭圆中心;  $a_2, b_2$ : 椭圆偏心率和方位角



等照度线: 椭圆和两种偏离

- ◆ 因此, 只需考虑更高级的偏离:

$$\Delta r(t) \approx \sum_{k \geq 3} a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)$$

- ◆  $a_3$ 和 $b_3$ : 描述稍呈蛋形等照度线, 很小

- ◆  $b_4$ : 通常也很小
- ◆  $a_4 > 0$ : 等照度线为盒状, 在长轴和短轴上被推出最佳拟合椭圆之外
- ◆  $a_4 < 0$ : 等照度线在与轴成  $45^\circ$  处膨出, 显示出 '盒状' 或花生形外貌

## 1] 星系等照度线的形状与光度相关

- 亮椭圆星系的等照度线多显示为盒状
- 较暗椭圆星系的等照度线多显示为盘状
- 盒状星系: 高光度、转动缓慢、速度弥散大, 有中心核、中心面亮度低、X射线和射电辐射强, 更可能是三轴的

- 盘状星系：低光度、转动相对较快、中心面亮度高、有中央尖峰、X射线和射电辐射弱，多为扁椭圆
- 盒状 ( $a_4 < 0$ ) 椭圆星系有强的射电波段和X射线的辐射

## 2. 恒星运动

1 椭圆星系中的恒星并不遵循有序转动，大部分动能都在恒星的随机运动中

2 较亮的椭圆星系有较高的速度弥散：可以用于测定距离（Faber-Jackson关系）

3 测量椭圆星系中恒星的轨道运动速度，比较困难（利用光谱吸收线）

### (1) 恒星速度测量

1 盘星系

- 星系中有年轻恒星形成区 (HII) 和大量的HI气体
- 利用星系光谱中的电离气体发射线或中性氢的21cm线，可较容易地测量冷或热气体云的运动速度

2 椭圆星系

- 没有年轻恒星和冷气体，只能利用星系光谱中的吸收线测量恒星运动
- 利用狭缝或光纤，观测星系不同区域的光谱：谱线宽度和谱线位置
- 通过与恒星模版比较，获得星系光谱的宽度（速度弥散，恒星随机运动速度）和谱线中心位置（退行速度）
- 星系外围面亮度较暗，吸收线观测更加困难：测定椭圆星系运动，需要长时间观测，以获得高信噪比的光谱

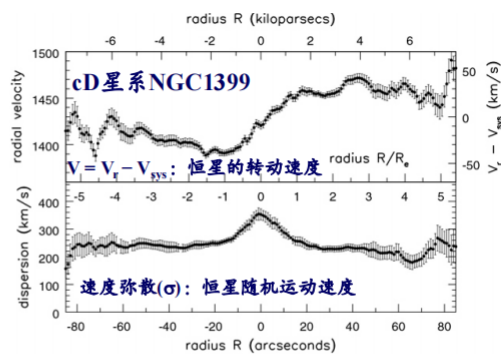
3 测量原理

- 椭圆星系几乎不含冷气体，星系光谱主要是其内部单个恒星的光谱叠加
- 每条恒星光谱，由于恒星的运动，发生了多普勒移动
- 大量恒星的轨道运动，使得星系谱线比单个恒星谱线更宽
- 利用展宽的恒星光谱去拟合星系光谱，可获得星系的速度弥散
- 改正仪器效应：星系和模版光谱最好用同样的望远镜和摄谱仪设置来观测

沿cD星系NGC1399主轴测量的视向速度 $V_r$ 和速度弥散 $\sigma_r$ 的分布

$$(V_r - V_{sys})/\sigma_r \ll 1$$

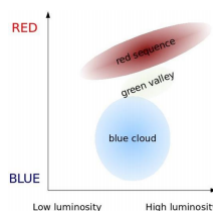
- ◆ 椭圆星系存在转动，但一般不是星系动能的主要成分；
- ◆ 星系速度弥散( $\sigma_r$ )在星系中心处远大于星系的其它区域



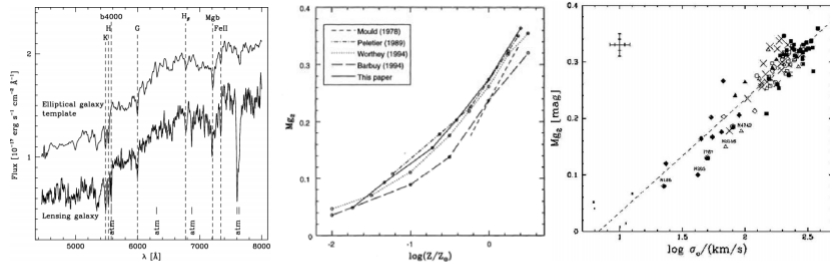
- ◆ 星系盘(如银河系):  $V = 220 \text{ km/s}$ ,  $\sigma = 30 \text{ km/s} \rightarrow V/\sigma \sim 7$ , 称运动学冷盘
- ◆ 椭圆星系速度弥散更高,  $\sigma \sim n^* 100 \text{ km/s}$ ,  $V/\sigma$  介于 0 - 1, 称运动学热体系

### (2) 标度关系

1 CMD



2 金属丰度 - 速度弥散关系



$$[\text{Fe}/\text{H}] = 7.41\text{Mg}_2 - 2.07$$

星系光谱中的Mg<sub>2</sub>谱线强度和星系金属丰度相关：星系金属丰度指数

椭圆星系和S0星系核球区域的Mg<sub>2</sub>金属丰度指数和星系的速度弥散相关：速度弥散大的星系，金属丰度高。

### 3 Faber-Jackson关系

- 较亮的椭圆星系中，恒星运动较快，速度弥散σ大：亮椭圆星系中心σ~500 km/s；最暗的椭圆星系σ~50 km/s

#### 法贝尔-杰克逊关系

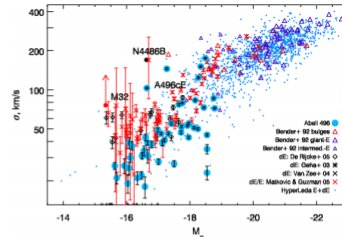
- 1976年由Sandra Faber和Robert Jackson提出的关于椭圆星系光度(L)和星系中心恒星速度弥散(σ)的经验关系

- 椭圆星系光度L和星系中心速度弥散σ满足： $L \sim \sigma^n$ ，指数n接近于4 (with  $3 < n < 5$ )

$$\frac{L_V}{2 \times 10^{10} L_\odot} \approx \left( \frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4$$

- 利用FJR测量星系距离

- 测量星系速度弥散，利用法贝尔-杰克逊关系，可以估计L，利用测得的视星等，求得星系距离d
- 但是，椭圆星系外部暗弱，导致测定星系总光度困难；另外从FJR关系导出的距离不精确（弥散大）



FJR的弥散~0.6 mag，大于观测误差：弥散不是由于观测误差引起

### 4 $D_n - \sigma$ Relation

- 测得星系速度弥散，利用 $D_n - \sigma$ 关系求得D
- 星系光度 $L_{tot} = 2\pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 < \mu >$
- 结合视星等m，可测得星系距离

### 5 椭圆星系基本面

- 椭圆星系有四个基本参数（其中三个是独立的）：
  - 星系光度  $L_{tot}$  (or  $M_{tot}$ )
  - 有效半径  $r_e$
  - 平均面亮度  $< I_e >$  (or  $< \mu_e >$ )
  - 速度弥散  $\sigma$
- 基本面：椭圆星系分布在由其有效半径 ( $r_e$ )，表面亮度 ( $I_e$ ) 和中心速度弥散 ( $\sigma$ ) 组成的三维‘空间’中的一个平面附近

#### (3) 椭圆星系转动

1 椭圆星系的转动速度比假定随机运动是各向同性的模型，给出的预计转动速度要慢得多

2 许多椭圆星系，包括一些很扁的椭圆星系，转动速度慢

3 有些椭圆比较扁平，完全是因为转动引起；有些椭圆星系比较扁，是因为随机运动速度各向异性引起的

4  $(V_{rot}/\sigma_e)^*$

$(V_{rot}/\sigma)^*$  定义：观测值与模型值的比较

$$\left(\frac{V_r}{\sigma_e}\right)^* = \left(\frac{V_r}{\sigma_e}\right)_{obs} / \left(\frac{V_r}{\sigma_e}\right)_{expect}$$

低、中光度椭圆星系的  $(V_{rot}/\sigma)^*$  接近 1

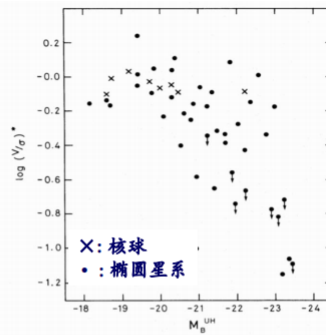
高光度椭圆星系的  $(V_{rot}/\sigma)^*$  快速减小：  
转动速度比速度弥散各向同性的模型给出的预计转动速度慢得多

$(V_{rot}/\sigma)_{obs} \ll (V_{rot}/\sigma)_{exp}$ ：慢的转动速度 ( $V_{rot}$ ) 必须由随机运动 ( $\sigma$ ) 来补偿

由 [eq.6.27] 推断其应该有  $\sigma_x \gg \sigma_z$

$$\frac{\langle PE_{zz} \rangle}{\langle PE_{xx} \rangle} = \frac{\langle KE_{zz} \rangle}{\langle KE_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2}V^2 + \sigma_x^2}$$

星系变扁不是由于其转动，而是由速度各向异性产生的：x 方向速度  $\sigma$  大



- ◆ 低光度椭圆星系有  $(V_{rot}/\sigma)^* \sim 1$ ：转动导致星系扁平
- ◆ 亮椭圆星系有  $(V_{rot}/\sigma)^* < 1$ ：非转动，而是速度各向异性致平

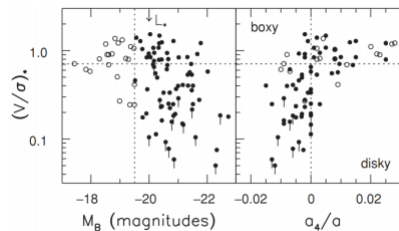
## 5 恒星运动与等照度线形状关系

盘状等照度线 ( $a_4 > 0$ ) 的 Es

- ◆  $(V_{rot}/\sigma)^* \sim 1$ ；转动重要

盒装等照度线 ( $a_4 < 0$ ) 的 Es

- ◆  $(V_{rot}/\sigma)^* < 1$
- ◆ 比速度弥散各向同性时，应有的转动速度慢得多
- ◆ 转动不重要，速度的各向异性重要



$(V/\sigma)^*$  与光度和等照度线形状关系：实圆代表壳星系 ( $M_B < -19.5$ )；空圆表示暗星系。

椭圆星系的慢转动

- ◆ 气体原子间频繁碰撞改变原子运动方向，原子速度倾向于接近其最可几整体状态（弛豫）：椭圆星系平滑的形状可以把恒星当作气体原子来解释？
- ◆ 星系中恒星弛豫时标  $t_{relax} \sim 10^{13}$  年（第三章），形状平滑不能利用恒星之间的碰撞解释 → 剧烈弛豫
- ◆ 剧烈弛豫：两个旋涡星系相互碰撞，剧烈的相互作用使得原来分布在两个盘上的恒星快速转化成椭球分布

椭圆星系的慢转动显示，剧烈弛豫尚未完成，保留着有关它们形成途径的信息：如运动学退耦核（KDC）

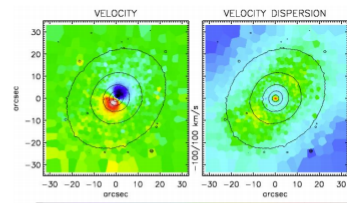
(4) 运动学退耦核：可能是耗散盘捕获的副产品

~25% 的椭圆星系，有一个分离的、转动的核区 (~1kpc; 0.1 - 0.3 Re)：称作运动学退耦核，Kinematically Decoupled Cores (KDCs)

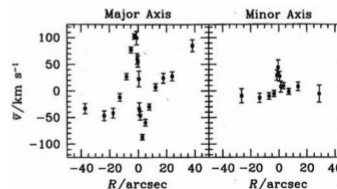
考虑到投影效应和区分困难（核区），估计 ~30% - 60% 的椭圆星系中有 KDCs

KDCs 特性：

- ◆ 快速转动： $(V_r/\sigma) > 1$ ,  $(V_r/\sigma) = 1 - 4.5$
- ◆ 反相转动：有些KDC和星系整体的转动方向相反，可能有不同的起源
- ◆ 金属丰度高：KDC的金属丰度比星系其它部分高 (Mg2 line)
- ◆ 有子结构：有KDC的椭圆星系，常含有由气体和尘埃组成的子结构 (~40%)



NGC5813：第一个被发现有KDC的星系。左图为其速度分布（核区有转动，外圈无显著转动）；右图为其速度弥散。



椭圆星系 IC1549 视向速度分布：主轴（左）；次轴（右）

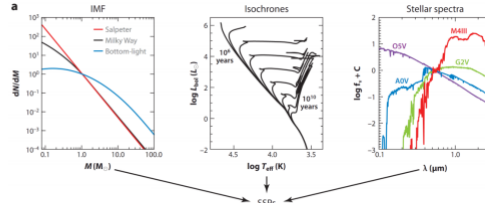
## 3. 星族和气体

- 椭圆星系缺乏明亮蓝星：
  - $D < 20$  Mpc 的 E 星系：观测研究其中红巨星和渐近巨星支恒星 (AGB)
  - 主要利用星系积分特性：光谱和光度
- 椭圆星系光谱
  - 光谱和 K 型恒星光谱类似，有钙和镁等重元素的吸收谱线

- o  $\lambda < 3500\text{\AA}$  UV波长区间辐射弱, 年轻星族少: 近期无恒星形成发生
- o 椭圆星系的光主要来自  $M < 2M_{\odot}$  红巨星 ( $T > 1\text{ Gyr}$ ): 星族年老
- 椭圆星系金属丰度高
  - o 椭圆星系的星族为年老、富金属 (星系中心  $Z \sim Z_{\odot}$ ): 与银河系核球相似, 与球状星团差别大 (贫金属)
  - o 光谱中  $4000\text{\AA}$  跃变明显 (D4000): 年老恒星大气中的金属吸收了短波长的光

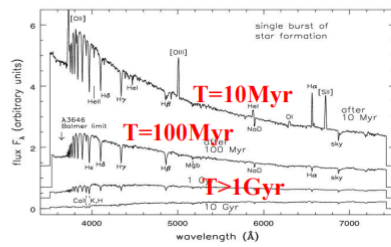
(1) 简单星族 -- 演化的星族合成方法

- ◆ 演化的星族合成方法: EPS
  - ◆ 研究星系中星族特性随时间演化的方法
  - ◆ 初始质量函数: IMF
  - ◆ 恒星演化轨迹: HRD
  - ◆ 恒星光谱库: HRD  $\rightarrow$  观测

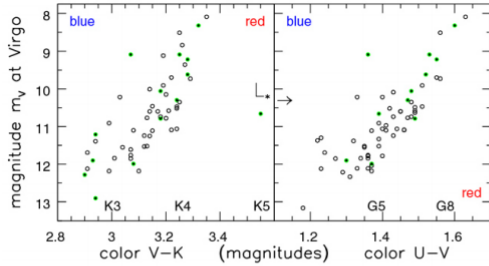


$$f_{\text{SSP}}(t, Z) = \int_{m_{\text{lo}}}^{m_{\text{up}}(t)} f_{\text{star}}[T_{\text{eff}}(M), \log g(M)|t, Z] \Phi(M) dM$$

- ◆ 简单星族 (SSP) 随时间  $T$  演化
  - ◆ 模型星族谱: 恒星形成持续时标  $\tau = 100\text{ Myr}$  (SFH)
  - ◆ 暴发开始  $T = 10\text{ Myr}$ : 光谱蓝、有强的气体发射线, 星族年轻
  - ◆  $T = 100\text{ Myr}$ : 谱变暗、变红, A型星氢线明显, E+A (后星暴) 星系
  - ◆  $T \geq 1\text{ Gyr}$ : 谱更暗、更红; 变化很慢;  $4000\text{\AA}$  跃变明显 (椭圆星系)



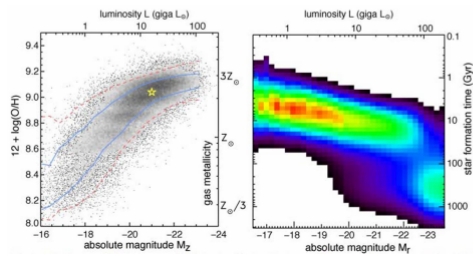
(2) E星系的颜色--星等关系 (CMR)



室女座星系团 (空圈) 和后发座星系团 (实点、绿) 中的椭圆星系在颜色--星等图上分布。

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富
- ◆ 高光度星系星族更年老

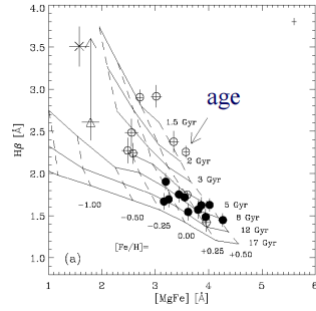
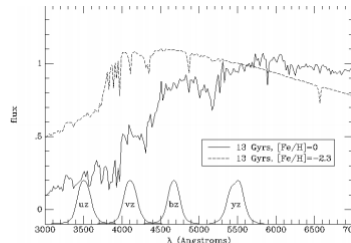


- ◆ 高光度, 星系金属丰度高; 暗星系金属丰度低: 金属丰度高的星系颜色红  $\rightarrow$  CMR关系由于金属丰度效应引起
- ◆ 高光度星系现在的恒星形成率 (SFR) 低: 早期的SFR高  $\rightarrow$  恒星形成早、星族年老  $\rightarrow$  CMR关系由于星族年龄效应引起

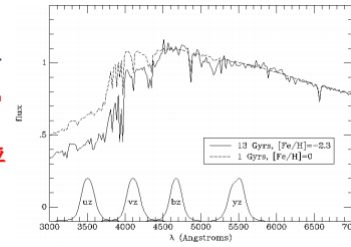
(3) 简并效应



- ◆ 金属丰度增加，或者星族年龄变老，宽波段颜色都会变红
- ◆ 简并效应：宽波段颜色无法区分星族的年龄和金属丰度，称作年龄和金属丰度的~
- ◆ 年龄和金属丰度对**不同谱线**的影响有差异



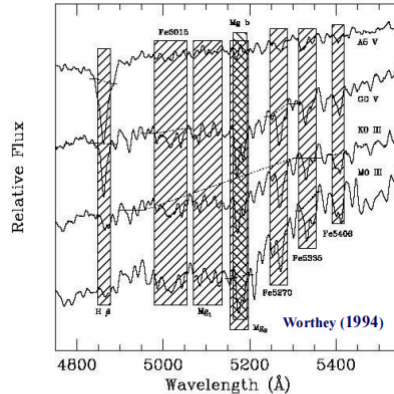
年轻的星族有强的 **Balmer lines** (如Hβ、Hγ)  
 富金属的星族有强的 **金属吸收线** (如Mg、Fe)  
 → 解开简并效应  
**Lick谱指数**



#### (4) Lick谱指数

- ◆ **Lick谱指数**：Lick天文台定义的一套光学谱中的**吸收线系统**，共包括21条吸收线
- ◆ **谱指数测量**：
  - ◆ **连续谱**：利用吸收线两边没有发射、吸收线的区域插值，得到 pseudocontinuum
  - ◆ **谱指数**：积分星系观测光谱和 pseudocontinuum之间的区域，单位是埃 (Å) 或星等 (mag)

INDEX DEFINITIONS				
Name	Index	Bandpass	Pseudocontinua	Units
09	Hβ	4847.875-4876.625	4827.875-4847.875 4876.625-4891.625	Å
10	Fe5015	4977.750-5054.000	4946.500-4977.750 5054.000-5065.250	Å
11	Mg <sub>1</sub>	5069.125-5134.125	4895.125-4957.625 5301.125-5366.125	mag
12	Mg <sub>2</sub>	5154.125-5196.625	4895.125-4957.625	mag

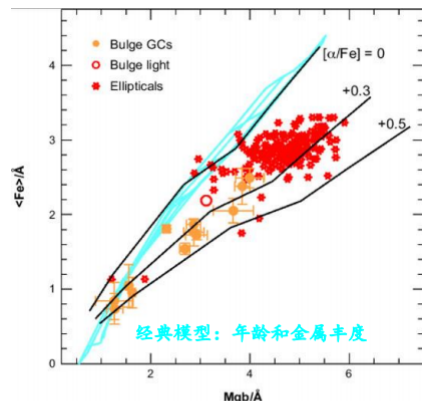


$$F_p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda} d\lambda / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad EW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{F_{\lambda}}{F_{C\lambda}}\right) d\lambda$$

$$Mag = -2.5 \log \left[ \left( \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_{\lambda}}{F_{C\lambda}} d\lambda \right]$$

- 1 星系的年龄和金属丰度简并，可以利用对年龄变化敏感的谱指数 (e.g. Hβ) 和对金属丰度敏感的谱指数 (e.g. Mg or Fe) 来解除简并
- 2 光度越大的星系，速度弥散越大 (FJR)
- 3 速度弥散越大的星系，金属丰度越高
- 4 高光度星系，金属丰度高
- 5 高光度椭圆星系的颜色红：由于金属丰度更高，而不是星族年龄更老引起的

#### (5) [α/Fe] 丰度比



- ◆ 椭圆星系 [α/Fe] > 0：三种可能的解释

- ◆ 椭圆星系形成恒星非常早，Ia型超新星还没有开始把铁加入星际气体中
- ◆ 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
- ◆ SNIa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

- ◆ 椭圆星系中氧、硫、镁等原子 (α元素) 与铁原子的比值 (数目)，比太阳中 [α/Fe] 要高：α元素增丰
- ◆ 经典星系演化模型只有2个参数：年龄和金属丰度；不能拟合椭圆星系在谱指数图上的分布
- ◆ 新的星系演化模型包括三个参数：Age、[Fe/H]、[α/Fe]
- ◆ α元素增丰：
  - ◆ SN II：α元素 (T < 100 Myr)
  - ◆ SN Ia：Fe元素 (T > 1 Gyr)

## (6) 紫外超 UV upturn

1 UV upturn: 观测发现, 有些富金属、巨椭圆星系紫外波段辐射较强, 紫外超

2 椭圆星系的紫外超: 可能是由一类失去氢包层的年老的、氦核 (He) 燃烧的热星贡献, 包括热亚矮星, 蓝离散星等

## (7) 椭圆星系中冷气体

1 椭圆星系内部年轻恒星少 (颜色红): 几乎不含形成恒星的冷气体

2 只有5% - 10%的正常椭圆星系含有可探测的原子或分子气体

- 多数大椭圆星系的冷气体  $M < 10^8 - 10^9 M_{\odot}$
- 少数具有壳或明显尘埃等特征的椭圆星系含有大量的冷气体: 外部俘获得到?

## (8) 椭圆星系中热气体

1 椭圆星系中, 含有大量炽热 (气体温度  $T \sim 1 - 3 \times 10^7$  K)、电离气体

2 X射线波段辐射源: 活动星系核; 双星; 以及温度  $T \geq 10^6$  K的热气体

3 热气体太弥漫 (密度低): 在光学和射电波段发射或吸收少, 不可见

4 热气体可延伸到离中心至少  $\sim 30$  kpc

5 光度高/速度弥散大的Es: 热气体多

- 亮椭圆星系有气体 ( $10^9 - 10^{11}$ )  $M_{\odot}$ , 占星系质量10 - 20%
- 低质量椭圆星系气体少; 较弱的引力难以阻止气体逃入星系际空间

6 热气体来源

- 椭圆星系热气体和盘星系冷气体质量相当: 星系并合时冷气体被加热
- 红巨星和AGB星等年老恒星演化到晚期, 外壳膨胀: 星风抛出气体;
- 位于星团和群中的椭圆星系吸积周围环境中的气体

7 分析: 椭圆星系常有高温气体组成的X射线晕, 其延伸区域远大于恒星区域

- X射线谱  $\rightarrow$  椭圆星系周围的热气体金属丰度  $Z \sim 0.5 Z_{\odot}$
- 如果是超新星爆发抛出的物质, 金属丰度应当更高
- 热气体主要是正在变老恒星的外包层物质流出

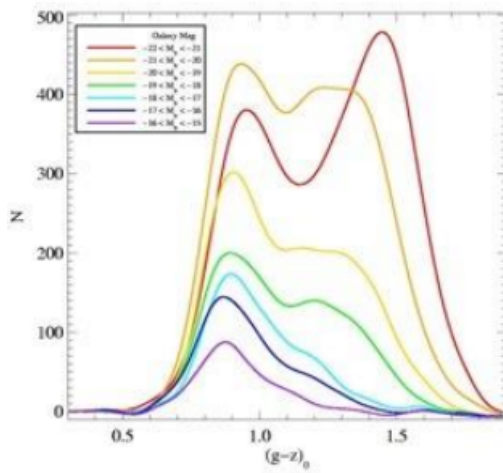
## (9) 球状星团

1 球状星团数目在不同E星系之间变化很大

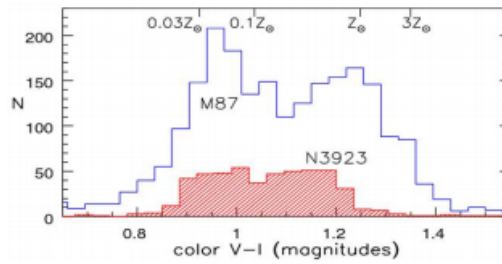
2 平均来说, 光度相同的椭圆星系和盘星系, E星系球状星团数目是盘星系数目  $\sim 2$ 倍

3 双模

- 多数高光度椭圆星系中的球状星团颜色分布呈双模: 红群和蓝群
- 颜色双模 = 金属丰度双模 = 年龄双模
  - 蓝色球状星团: 金属丰度低
  - 红色球状星团: 金属丰度高
  - 蓝色球状星团较年老, 形成于  $z_f \sim 4 - 8$  (before most SF and feedback)
  - 红色球状星团较年轻, 形成于  $z_f \sim 2 - 4$
- 颜色分布与星系形成有关
  - 等级形成: 蓝色、年老球状星团 (10.5 - 13 Gyr) 形成于星系早期的剧烈恒星形成, 'fossil record' of earliest stages of hierarchical galaxy formation
  - 星系并合: 红色、年轻、富金属球状星团形成于后期的星系并合和吸积周围气体过程



Colour distributions for GCs in Es of differing magnitudes.

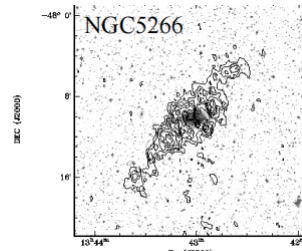


## 4.暗物质和黑洞

### (1) 暗物质晕测量

**冷气体**: 对于极少数有冷气体的椭圆星系, 可以利用与盘星系相似的方法求质量

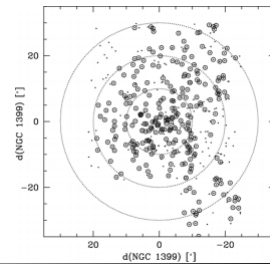
- ◆ NGC 5266
  - ◆ 利用中性氢21cm线观测: 近圆轨道 $V(R) \approx 250 \text{ km/s} \rightarrow M_{\text{HI}}(R < 4') \sim 10^{11} M_{\odot}$
  - ◆  $R < 50 \text{ kpc}: M/L \approx 10 - 20 (M_{\odot}/L_{\odot})$
  - ◆ 大于星系中心的  $(M/L_{\nu}) \sim 7 (M_{\odot}/L_{\odot})$
  - ◆ 含有冷气体的椭圆星系外部存在大量暗物质



HI分布(轮廓)和光学图像

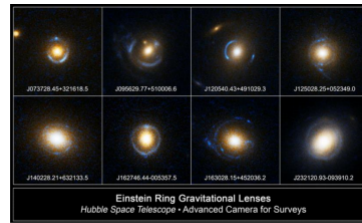
**球状星团**: 利用近邻椭圆星系中的球状星团的运动, 可以检验椭圆星系外区物质分布

- ◆ NGC 1399:
  - ◆ 对  $r < 9'$  的468个球状星团进行速度测量
  - ◆ 球状星团随机运动, 没有整体旋转运动
  - ◆  $\sigma_r \sim 275 \text{ km/s}; r < 50 \text{ kpc}$ , 质光比  $M/L_{\nu} \sim 50$
  - ◆ 有球状星团的椭圆星系外部存在大量暗物质



**引力透镜效应**: 根据广义相对论, 由背景光源发出的光在引力场附近经过时, 光线会像通过**透镜**一样发生**弯折**

- ◆ 一个遥远的星系发出的光在经过另一个较近的椭圆星系后被扭曲了, 形成了“**爱因斯坦环**”: 由环的大小 ( $\theta_E$ ) 可求星系质量 ( $M$ ),  $\theta_E \sim \sqrt{M}$



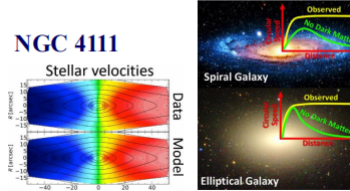
**X射线晕**: 研究椭圆星系暗物质**最有效**的方法是利用其X射线晕

- ◆ 椭圆星系存在一个延展的X射线晕, 典型尺寸大于 50 kpc
- ◆ 假定热气体是流体静力学平衡, 有:

$$M(<r) = \frac{rk_B T_g}{G \mu m_p} \left[ -\frac{d \ln \rho_g}{d \ln r} - \frac{d \ln T_g}{d \ln r} \right]$$

$\rho$ 是气体密度;  $T$ 是气体温度,  $\sim 10^7 K$ ,  $m$ 是热气体质量,  $\sim 10^{10} M_\odot$ ,  $M$ 为星系总质量

- ◆ **恒星旋转速度**: 少量椭圆星系, 恒星绕星系中心旋转运动, 可利用旋转速度测量星系质量



## (2) 中心黑洞

### 1 星系核区黑洞搜寻方法

- 需要示踪天体: 用于测量近核区的速度场
- 示踪天体包括气体或者恒星, 利用多普勒效应或者自行方法, 测量运动速度
- 需要更多的信息: 速度各向同性/各向异性; 旋转/无旋转

### 2 椭圆星系: 测量困难

- 非旋转体系, 速度有无各向异性不清楚
- 黑洞影响区域很小: 高空间分辨观测 + 星系中心光度集中 ( $R^{1/4}$ 律)
- 投影效应等可能影响结果的因素, 需扣除

3 黑洞附近的恒星比外围的恒星运动得快。如果它们旋转的方向是随机的, 将在由星系光谱吸收线测得的速度弥散中看到一个中央升起

### 4 $M-\sigma$ 关系:

$$M_{BH} \approx 2 \times 10^8 M_\odot \times \left( \frac{\sigma_c}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{4.86}$$

## 5. 早型星系的形成演化

(1) **星云整体塌缩模型 (top-down)**: 早型星系形成于宇宙早期的快速塌缩, 早期恒星形成快速, 持续时标短, 后来没有恒星形成

1 依据: 椭圆星系是有古老星族的星系

2 最初的气体云必须是成团块的, 这样气体才能迅速冷却, 在主体坍缩之前形成亚团块。

3 气体云也必须相对没有角动量, 否则它会在坍缩时自旋

4 问题: 不依赖初始条件

(2) **等级并合形成模型 (bottom-up)**: 大质量早型星系是由小质量星系经过多次并合, 最终形成的

- 干并合(dry mergers): 两个没有气体的星系并合, 无新的恒星形成
- 湿并合(wet mergers): 两个气体丰富星系的并合, 触发剧烈的恒星形成

1 依据

- 局域宇宙中的恒星形成活动主要是螺旋星系和星暴; 星系合并确实存在于局域宇宙中;
- 数值模拟表明, 两个星盘的合并可以产生与现有的Es具有相似性质的星系

2 问题

- 无法解释E0、E1和E2;
- 虽然合并产物的表面密度轮廓与 $r^{1/4}$ 轮廓很吻合, 但合并残留具有显著的恒定表面密度核心, 而观测到的椭圆星系的核心要小得多

(3) SFH与 $M^*$  -- downsizing

- 1 质量越大的星系, 形成恒星越早, 形成恒星越快 (恒星形成时标短)
- 2 红移  $z < 1$ , 只有小质量早期星系中还有重要的恒星形成发生
- 3 恒星形成历史与星系质量关系, 与星云整体塌缩模型一致, 与等级并合形成模型矛盾

(4) 混合:

- 1 原初星系多次相互作用和并合, 形成更大质量星系
- 2 高密度区域星系相互作用和并合, 触发剧烈的恒星形成, 快速消耗完其内部气体: sSFR大,  $\tau$ 短
- 3 相对孤立的星系, 相互作用概率低, 恒星形成缓慢, 星系内部还有气体 → 现在的旋涡星系

## 七、星系群和星系团

### 1. 星系群

1 致密星系群: 包括几个星系, 星系数密度很高; 星系之间正在并合或强烈的相互作用

- 致密群中有大量高温热气体, X射线辐射强
- 致密群中有丰富的冷气体, 星系中冷气体少
- 冷HI气体可能是从星系盘剥下来; 某些气体云被加热到温度很高, 辐射X射线

2 松散星系群: 如本星系群; M81群等

- 星系之间的恒星数目很少, 但存在大量的中性氢气体
- 盘星系中HI的分布比恒星盘范围大: 星系交会时, 气体盘更易受损
- 松散群中的气体是从星系中撕下来的, 大部分仍是冷的, 无X辐射

3 化石星系群:

- 正常星系群完成星系并合 (动力学摩擦) 后, 形成了一个高质量的椭圆星系
- 前身星系群X射线晕保留: 弥散X射线辐射, 辐射强
- 化石群中存在矮星系, 但大的星系已经并合成为中心星系:  $\Delta M_{1,2} \geq 2.0 mag$

(1) 星系群中的气体

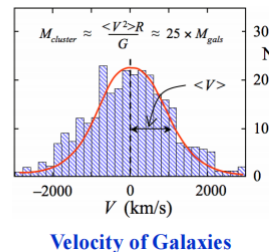
- 有热气体的星系群, 群的成员星系较多, 并且至少有一个是椭圆星系: 化石群

1 星系群质量估计

运动学方法

- 如果星系群是孤立、引力平衡, 则可以利用**位力定律**, 求星系群质量:  $\langle KE \rangle = -\frac{1}{2} \langle PE \rangle$
- NGC 1550群: 成员星系的速度弥散是 $\sigma_r = 310 \text{ km s}^{-1}$
- 星系群密度分布可用 $a_p = 100 \text{ kpc}$ 的Plummer球描述
- 则星系群的质量  $M \sim 2 \times 10^{13} M_\odot$

$$\frac{3M\sigma_r^2}{2} = \mathcal{KE} = -\frac{\mathcal{PE}}{2} = \frac{3\pi}{64} \frac{GM^2}{a_p}$$

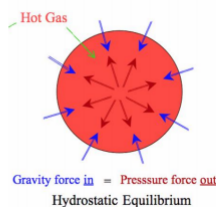


热气体方法

- 当星系群含有热气体时, 根据**流体静力学平衡**方程, 估计需要多大的引力才能阻止热气体外流, 可求引力质量

$$M(<r) = \frac{k_B}{\mu m_p} \frac{r^2}{G\rho(r)} \frac{d}{dr}(-\rho T) \quad \text{需要知道 } \mu, T \text{ 和 } \rho(r)$$

- 完全电离的氢:  $\mu = 0.5$ ; 太阳丰度的气体:  $\mu \approx 0.6$
- 利用X射线光谱谱线, 估计X射线发射区域温度  $T_x$
- 测量X射线面亮度分布, 计算星系群气体密度分布  $\rho(r)$



- 引力透镜

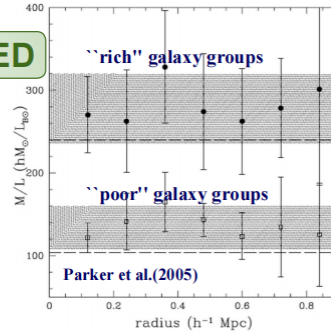
## 2 星系群的质光比M/L

利用星系群中**星系运动、热气体或者引力透镜**，测得星系群的**总质量** **APPROVED**

观测星系群中每个星系中恒星光度，根据恒星的质光比，求得星系群中**恒星质量**

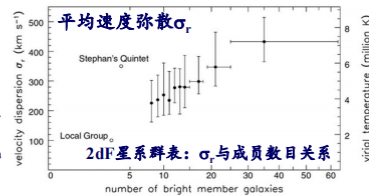
恒星和热气体的质量比例，小于星系群总质量的10%

- ◆ 每个星系的暗物质率，比HI盘分布更为延伸
- ◆ 大量物质作为'群晕'，位于群成员星系之间
- ◆ **星系群质光比**:  $80 \leq M/L \leq 300 M_{\odot}/L_{\odot}$



星系群中星系运动速度  $\sigma_r \sim 100 - 500$  km/s，与星系内的恒星运动速度相近

由于群星系的相对运动速度低，引力有**较长时间**强烈拉拽从其周围经过的其他星系中的气体和恒星：**星系相互作用**



### (2) 星系间近交会：动力学摩擦

一个星系 (I) 通过另外一个星系 (II) 附近 (星系发光区域或延展暗物质区域)

星系II的恒星和暗物质的“sea”的物质分布会发生变化，星系I受到星系II物质的**引力**作用，将导致星系I**速度变慢**：动力学摩擦 (dynamical friction)

两个星系彼此近交会时，它们**向前**运动能量的一部分转化为其**内部恒星的运动**：

- ◆ 当这两个星系分开时，两个星系运动速度将会比它们趋近时**慢**
- ◆ 如果这两个星系随后的运动太慢，以至不能彼此逃离，两个星系会被彼此**再度交会**，**最终并合**

星系II的恒星和暗物质的引力使得星系I速度**减慢**：星系I在运动中损失能量和角动量，效应等同于**摩擦力或粘滞力**

星系I：由质量为  $m$  的恒星组成， $n/\text{pc}^3$

星系II：质量  $M$  ( $M/m \sim 10^8 - 10^{11}$ )，速度  $V$

交会时， $M$ 在垂直于其原来轨道方向获得一个垂直速度：
$$\Delta V_{\perp} = \frac{2Gm}{bV}$$

恒星  $m$  获得数值相等，但方向相反的动量，**垂直方向**总动能变化是：

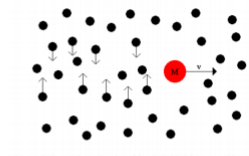
$$\Delta KE_{\perp} = \frac{M}{2} \left( \frac{2Gm}{bV} \right)^2 + \frac{m}{2} \left( \frac{2GM}{bV} \right)^2$$

**小质量天体获得了大部分能量** (第2项  $\gg$  第1项)：该能量只能由星系  $M$  的**向前**运动来提供

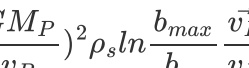
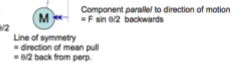
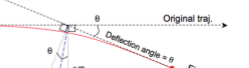
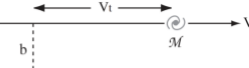
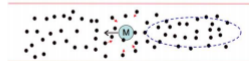
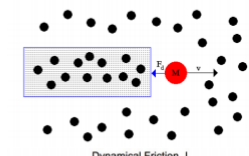
星系II ( $M$ ) 的**速度减小**，星系I中的恒星  $m$  的**速度增加**

$M$ 掠过得**越快**，将能量转移给  $m$  的时间就**越少**，星系  $M$  损失的速度**越少**

consider a mass,  $M$ , moving through a uniform sea of stars. Stars in the wake are displaced inward.



this results in an enhanced region of density behind the mass, with a drag force.  $F_d$  known as dynamical friction



- 星系骚扰 (galaxy harassment) :动力学摩擦和星系团与星系的相互作用

(3) 星系相互作用 (动力学摩擦、潮汐力、高速碰撞、星系团-星系、冲压剥离、粘滞剥离、Starvation(失去所有气体，不再有恒星形成)、Preprocessing(星系群在落入星系团之前成为化石群))

$$F_{df} = -4\pi \left( \frac{GM_P}{v_P} \right)^2 \rho_s \ln \frac{b_{max}}{b_{go}} \frac{\vec{v}_P}{v_P}$$

- 1 恒星随机运动增加→星系内能增加→系统的束缚减弱，星系开始进入膨胀状态
- 2 获得很大能量的恒星逃离星系；获得能量较少者仍保持松散束缚，成为一个膨胀的外包层
- 3 富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
- 4 星系群中，星系运动较慢，近交会产生的扰动大得多：处于并合过程中的几乎所有星系都在星系群中
- 5 近掠交会能够使星系产生棒或旋臂结构
- 6 并合和近掠也促使盘气体流向星系中心
- 7 星系碰撞 → 压缩气体 → 触发恒星形成

8 **星系次并合 (Minor Mergers)**：质量比大于 3:1 - 4:1；速度慢

9 **星系主并合 (Major Mergers)**：速度快，气体很快用完；暗物质晕起到重要作用

(4) 星暴星系和ULIRGs

1 星暴星系 (Starburst Galaxies)：正在发生剧烈恒星形成的星系。

- 如星暴能够保持稳定，星系将在短时间内消耗完其内部的气体，恒星形成只能是爆发式 ( $t < T$ )

2 **亮红外星系 (LIRGs)**：LIR  $> 10^{11} L_{\odot}$ ，亮红星系辐射主要在红外波段。

3 **极亮红外星系 (Ultra-Luminous Infrared Galaxies, ULIRGs)**：LIR  $\geq 10^{12} L_{\odot}$

- 几乎所有的ULIRG都处于并合的晚期阶段：SFR极高，SF时标短

4 星暴星系和极亮红外星系中，尘埃拦截了绝大部分紫外、可见光→红外再辐射强

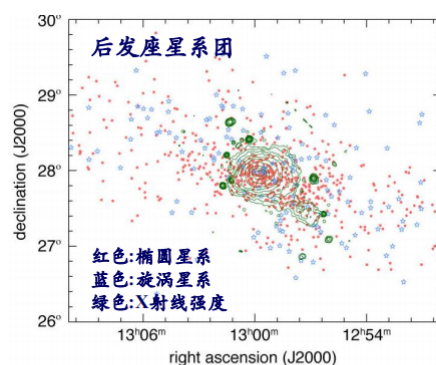
## 2.富星系团：S0和E

(1) **Butcher-Oemler Effect**：中等红移 ( $z \sim 0.3$ ) 星系团中心区域蓝星系比例高于低红移 ( $z \sim 0.0$ ) 星系团

1 BO效应约束星系恒星形成历史

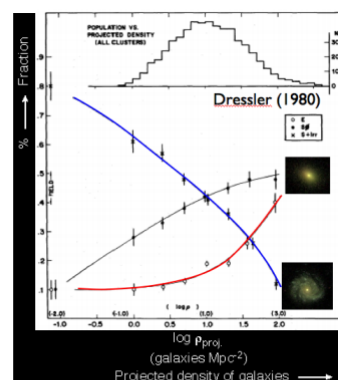
- 原初气体塌缩模型：星系中恒星形成发生于宇宙早期星暴，星系由年轻（蓝）逐渐变老（红）
- 星系并合模型：蓝色、晚型场星系掉入星系团中，气体被剥离or并合，形成红星系

(2) 环境影响 -- **形态-密度关系**



星系“形态-空间”分层：

- 星系团核心区主要是E、S0星系，S星系多分布在星系团的外围和星系群
- 松散团包含许多正在形成恒星的S星系；而富团最致密区域几无旋涡星系



星系团中E/S0/S-Irr和星系密度关系：密度高的区域，早型星系（E/S0）比例高。

1 星系团中：亮星系多是红的；亮蓝星系较少

2 空洞 (void) 区域：

- 亮星系有可能是蓝的恒星形成星系，也可能是‘红的死亡’星系
- 矮星系则绝大多数是蓝的、正在形成恒星的不规则星系

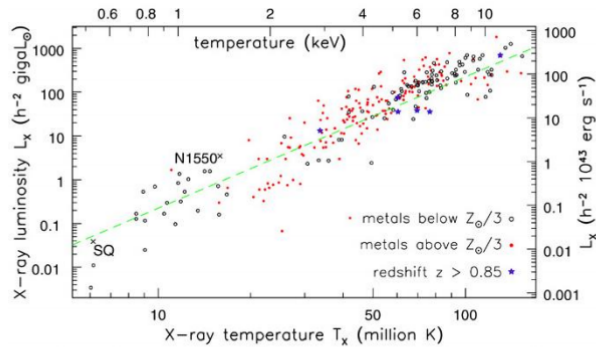
3 CMD: 亮星系更红

(3) 星系团中的热气体

1 星系团中存在大量热气体; 星系中热气体少

- 贫星系团中, 热气体的质量大致和恒星质量相等
- 富星系团中, 热气体的质量约是恒星质量的10倍
- 冷气体更致密, 塌缩形成恒星 → 越大越亮的星系团, 将气体变为恒星的效率越低

2 X射线光度与温度关系



星系团 X 射线光度与气体温度**相关**: 亮星系团, 气体温度更高;  $T \sim 10^8 K$   
 $L_X \propto T_X^3$ : 红移  $z \approx 1$  的星系 (蓝色星符) 与  $z \approx 0$  星系  $L_X$  与  $T_X$  关系几乎不变  
 星系团热气体金属丰度  $Z \sim Z_\odot/3$ ; 团中心附近的热气体, 金属丰度会**更高**

3 富星系团热气体来源

- 星系扰动
- 冲压剥离: 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]

$$F_{rps} = \rho_{IGM} v_P^2 > 2\pi G \epsilon_{star} \epsilon_{gas}$$

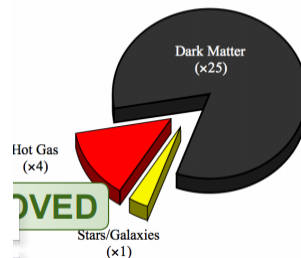
- 热蒸发:  $T_{ICM} \gg T_{ISM}, \sim T_{IGM}^{5/2}$
- 气体反馈(feed back): 星系中超新星爆发和核区活动星系核的喷流, 可将星系中的气体变为ICM [high-z宇宙重要]

4 寻找星系团

- X射线延展发射源
- red sequence寻找过密区域
- SZ效应 (毫米波段, 逆康普顿散射)

(4) 星系团组成: 重子物质+暗物质

Composition of Galaxy Clusters



1 暗物质:  $M_D \sim 5(M_{gas} + M_{gals})$

- 测量星系团内星系运动速度, 利用位力定律, 可求星系团的质量
- 星系团中存在热气体, 观测热气体光谱和分布, 求星系团的质量
- 根据星系团质光比M/L, 可求星系团中重子物质与暗物质的比例



### 3. 星系形成

(1) 先天因素：具有不同角动量气体云形成不同形态星系

- 1 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
- 2 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
- 3 实际观测表明：星系不是孤立形成和演化，碰撞和并合主导着星系演化

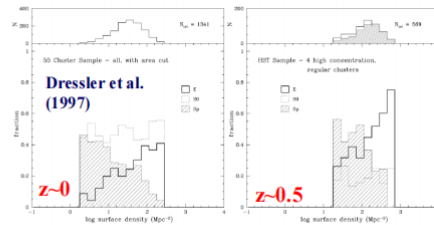
(2) 环境影响：星系间的相互作用和碰撞，决定了星系演化

- 1 星系密度高 → 星系并合频繁 → 形成更多的椭圆星系
- 2 宇宙早期（高红移）体积小，碰撞更频繁
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 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

(3) 混合的演化

星系团中的E/S0星系形成于宇宙早期，然后**被动演化**；同时有证据表明不同类型的**团成员星系之间存在演化**：

- ◆ 形态-密度关系随红移演化
- ◆ 红蓝星系比例随 $z$ 演化(BO)
- ◆ 星系谱型随 $z$ 演化 (EM/Abs/E+A)

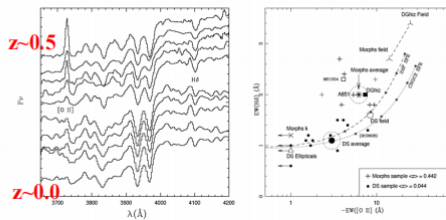


混合模型：塌缩模型+并合模型

- ◆ 不同质量星系形成恒星的时标和时间不同：**质量因素**
- ◆ 不同环境下星系并合概率不同：**环境因素**

- ◆  $z=0.5$ 星系团中S0比例低于 $z=0$ 团；S比例高：**低红移团中S0星系由S星系演化而来**

$z \sim 0.5$  星系团平均谱与 $z \sim 0.0$ 团比较：30%中等红移团成员星系谱有[OII]发射线；巴尔末吸收线强，**星暴后星系**



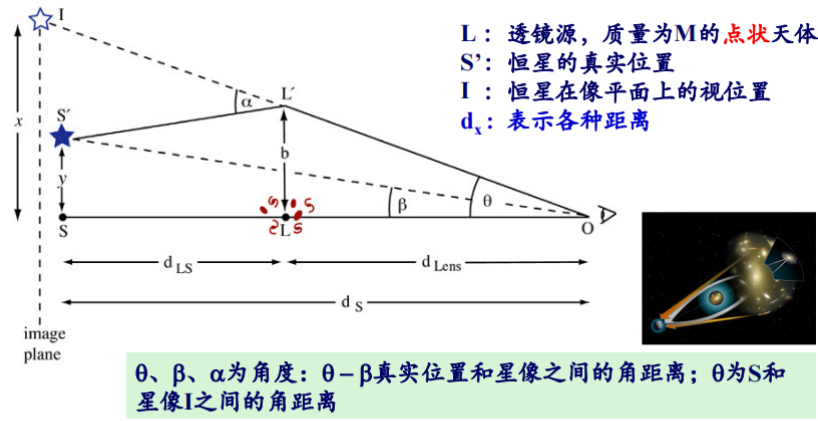
### 4. 星系际暗物质：引力透镜

1 利用星系运动或者热气体估计星系团质量：

- 假定星系系统已经位力化
- 气体处于流体静力学平衡
- 星系团系统是孤立的，结构不变化

对于多数星系群和星系团，这些假设都不成立

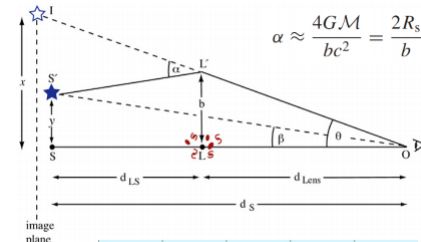
(1) 引力透镜



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,  $R_s = 2GM/c^2$

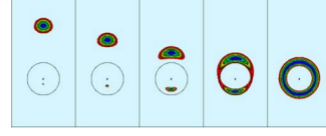
1 爱因斯坦半径

如果  $d_S \gg y$ : 则  $\beta \approx y/d_S$   
 如果  $d_S \gg x$ : 则  $\theta \approx x/d_S$   
 当偏折很小: 则  $x-y = \alpha d_{LS}$   
 当  $d_S \gg b$  时: 瞄准参数  $b = \theta d_{Lens}$



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

- $\theta_E$  称为**爱因斯坦半径**。透镜源L和星像之间的角距离θ, 有:  
 $\theta^2 - \beta\theta - \theta_E^2 = 0 \quad \theta_{\pm} = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{2}$
- $\beta=0$ : 恒星**正好**在透镜天体后, 在天球上看起来将是一个**半径为θ<sub>E</sub>的光环**
- 当  $\beta > 0$  时, 成2个像 ( $\theta_+$ 、 $\theta_-$ )
  - 在  $\theta_+$  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  $\theta_-$  处的像离透镜**较近**  $\theta_- < \beta$ , 且处于爱因斯坦半径**里面**:  $\theta_- < \theta_E$



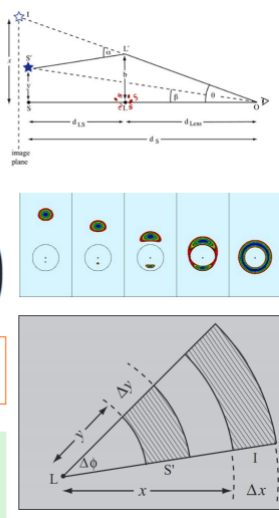
2 强度放大(增亮)效应

- **质点透镜**放在一个小亮斑(星系)前面, 亮斑的像将变为  $\theta_{\pm}$  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  $\theta_+$  总是比源亮, 且在切向**延长**; 较近的像  $\theta_-$  比较暗: 小亮斑通过引力透镜后, **至少有一个像比源本身亮—亮度增强**



(2) 星系和星系团的透镜效应

- ◆ 当透镜是**整个星系或星系团**时，可将它看作**质点集合**：将透镜内所有质量的效果**求和**来计算偏折
- ◆ 如透镜是致密的，则偏折只依赖于透镜**面密度** $\Sigma(x) = M(<b)/\pi b^2$  [b为距离]
- ◆ 如果透镜是**轴对称**的，光线偏折就好像投影在**半径b**里面的所有物质完全在中心一样

$$\theta - \beta = \alpha(\theta) \frac{d_{LS}}{d_S} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{4G\mathcal{M}(<b)}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_{Lens}d_S}. \quad (7.25)$$

$$\beta = \theta \left[ 1 - \frac{1}{\Sigma_{crit}} \frac{\mathcal{M}(<b)}{\pi b^2} \right], \quad \text{where } \Sigma_{crit} \equiv \frac{c^2}{4\pi G} \frac{d_S}{d_{Lens}d_{LS}}. \quad (7.26)$$

**临界密度**

如果中心面密度 $\Sigma > \Sigma_{crit}$ ，且 $\beta = 0$ （源在星系团中心位置），则源的像将是一个细而圆的**爱因斯坦环**， $\theta_E = b/d_{Lens}$

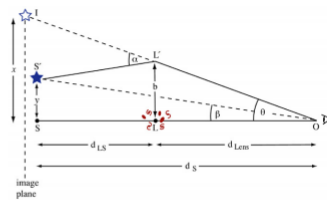
如果中心面密度 $\Sigma = M(<b)/\pi b^2 < \Sigma_{crit}$ ，后面的源**不能产生多重像**；看不见环

如果距离 $d_{Lens}$ 处的一个透镜，使一个远得多的星系发出的光发生偏折，即有 $d_S \sim d_{LS} \gg d_{Lens}$ ，可以证明此时**临界密度**可近似表示为（见书中Prob. 7.17）：

$$\Sigma_{crit} \approx 2 \times 10^4 \left( \frac{100 \text{ Mpc}}{d_{Lens}} \right) \mathcal{M}_{\odot} \text{ pc}^{-2},$$

投影在中心角 $\theta_E$ 内的质量为：

$$\mathcal{M}(<\theta_E) \approx \left( \frac{d_{Lens}}{100 \text{ Mpc}} \right) \left( \frac{\theta_E}{1''} \right)^2 10^{10} \mathcal{M}_{\odot}$$



利用像的位置和形状，可获得透镜星系或星系团内的**质量**以及**质量分布**

在同时观测到了**透镜光弧**和观测到**热气体X射线发射**的星系团中，可以比较利用这两种方法估计的质量

为了解释在非常远的星系团中半径数十角秒的光弧，需要的质量超过 $10^{14} \mathcal{M}_{\odot}$ ：**与X射线观测得出的结果符合得很好**

### (3) 弱引力透镜

1 一个星系虽然处于一个星系团后面，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、产生较小的扭曲

2 弱引力透镜方法通过对大量背景源像微弱畸变，统计分析星系形状剪切，得到星系团外部的质量分布

3 弱引力透镜法被认为是现在宇宙学中最好的测量暗物质的方法

(4) 微引力透镜：发生在恒星级天体中的一类引力透镜现象；

1 微引力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

2 银河系存在相当数量的恒星级黑洞、褐矮星、红矮星、白矮星等较暗弱的天体，它们造成的微引力透镜现象能够在短时间内令背景光发生畸变

## 八、星系大尺度空间分布

### 1. 大尺度结构

(1) 星系成团量度

1 两点相关函数 $\xi(r)$ ：计算在给定间距，发现成对星系的概率，得出两点相关性与距离的函数关系

假定星系的平均空间密度是  $n/\text{Mpc}^3$ ；随机选择两个小体积  $\Delta V_1$  和  $\Delta V_2$ ，则在  $\Delta V_1$  中找到一个星系的概率是  $n\Delta V_1$ ；在相距  $r_{12}$  的  $\Delta V_2$  中也找到一个星系的联合概率为：

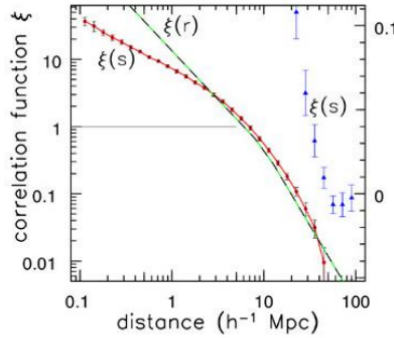
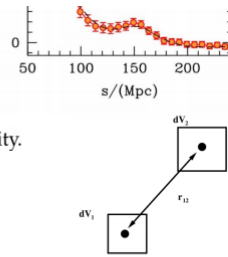
$$dP = \bar{n}^2 (1 + \xi(r_{12})) dV_1 dV_2 \quad \bar{n} \text{ is the mean galaxy density.}$$

$\xi(r)$ ：在距给定星系距离  $r$  处找到另一星系高出平均的几率

如果在小  $r$  处  $\xi(r) > 0$ ，则星系成团；如果  $\xi(r) < 0$ ，则反成团；较大体积  $\xi(r)$  的平均值应该为 0。

在  $r \leq 10 h^{-1} \text{ Mpc}$  尺度， $\xi(r)$  可近似表达为： $\xi(r) \approx (r/r_0)^{-\gamma} \quad (\gamma > 0)$

若  $r < r_0$  时，在距离一星系  $r$  以内找到一个星系的概率显著大于随机分布，则称  $r_0$  为相关长度 (correlation length)。



2dF巡天中星系的两点相关函数。左边的对数标度；右边的线性标度；圆为小间隔的相关函数，三角为大间隔的相关函数； $\xi(s)$  没有改正本动速度效应； $\xi(r)$  为改正了本动速度效应的相关函数。

## (2) 功率谱(Power Spectrum): 两点相关函数的傅里叶变换

功率谱是两点相关函数  $\xi(r)$  的三维傅立叶变换：
$$P(k) \equiv \int \xi(r) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d^3\mathbf{r} = 4\pi \int_0^\infty \xi(r) \frac{\sin(kr)}{kr} r^2 dr$$

因为  $\xi(r)$  是无量纲的，所以  $P(k)$  有体积的量纲

对于  $|kr| < \pi$ ，函数  $\sin(kr)/kr$  为正，且随  $kr$  变大做减幅振荡

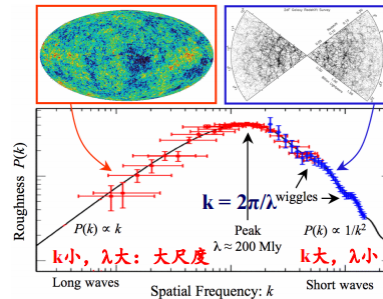
当  $k^{-1}$  接近使  $\xi(r)$  降为零的半径时， $P(k)$  将达到其最大值。

$\xi(r) \sim r^{-\gamma}$ ,  $P(k) \sim k^n \rightarrow n = \gamma - 3$ ;  $\gamma = 1.7$ ,  $n = -1.3$ ;

$k$  大 (小尺度)，功率谱可近似表达为幂律形式 (右)； $k$  小时，转折

结合不同测量信息 (红移巡天、CMB、Ly $\alpha$  forest, 弱引力透镜等)，约束  $P(k)$ : 大尺度区间变化

$k$  is the wavenumber, small values of  $k$  correspond to large physical scales.



功率谱可以很好的约束宇宙暗物质、暗能量性质和比例：是现代宇宙学中最主要的可观测量之一

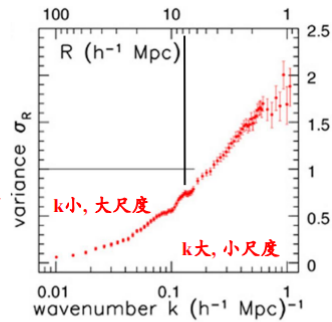
## (3) 密度涨落: $$\sigma^2(r) = \frac{1}{(\bar{n}V)^2} \sum_{i=1}^M (N_i - \bar{n}V)^2$$

星系空间成团，分布不均匀；描述星系分布不均匀性，可以通过测量对平均密度的偏离

- 位置  $x$  的密度  $\rho(x) = \langle \rho \rangle [1 + \delta(x)]$ ，其中  $\langle \rho \rangle$  为平均密度
- $\delta_R$  为  $\delta(x)$  在半径为  $R$  的球内的积分：对所有这样的球取平均， $\langle \delta_R \rangle$  必定是零。
- 方差  $\sigma_R^2 = \langle \delta_R^2 \rangle$  表征尺度  $R$  时，星系分布的不均匀性

方差  $\sigma_R$  随  $k$  增大而增加，随着  $R$  减小而增加：区域越小，找到星系密度高的概率越大

- 常用尺度  $R = 8 h^{-1} \text{ Mpc}$  上的平均涨落， $\sigma_8$  作为成团参数
- $k \sim 0.1$  处的涨落，对应于影响宇宙背景辐射的‘重子声波振荡’ (BAO)



2dF星系的方差  $\sigma_R$ ，描述尺度  $R$  的区域之间平均密度的变化

## 2.宇宙学观测基础

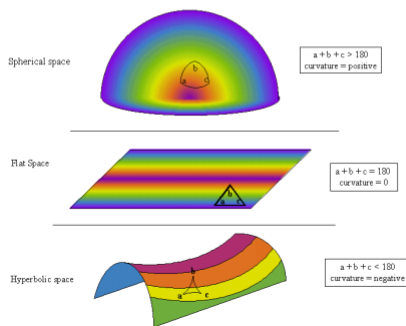
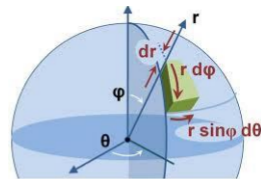
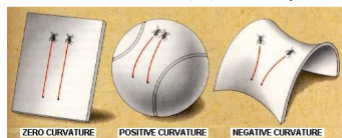
- (1) 夜空是黑的
- (2) 星系大尺度空间分布：宇宙在大尺度上是均匀的和各向同性的（宇宙学原理）
- (3) 哈勃定律
- (4) 微波背景辐射
- (5) 元素丰度：宇宙中绝大部分氦元素是由宇宙早期核反应产生（ $\alpha\beta\gamma$ 理论）
- (6) 宇宙的年龄：必定大于宇宙最古老天体的年龄，如球状星团（ $T \sim 12-13\text{Gyr}$ ）

## 3.均匀宇宙的膨胀

- ◆ 根据宇宙学原理，四维时空中三维球面上，两点之间的**距离**可表示为 [Weinberg 1972]:

$$dl^2 = a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\varphi^2) \right]$$

- ◆  $r$ 、 $\varphi$ 、 $\theta$  是弯曲空间中的球极坐标
- ◆ 常数  $K$  是**空间曲率**。 $a(t)$  是**曲率半径**
  - ◆  $K=1$ ，宇宙是**闭合的**，具有正曲率和有限的体积， $C/2r < \pi$
  - ◆  $K=-1$ ：**开放宇宙**，体积无限的负弯曲空间， $C/2r > \pi$
  - ◆  $K=0$ ：**无界平坦空间**， $C/2r = \pi$



- (1) **共动坐标系**：是相对膨胀宇宙静止，不随时间发生变化的坐标系

### 1 标度因子 $a(t)$

- ◆ 现在时刻  $t = t_0$ ：  $a(t_0) = 1$ ；  $r(t_0) = r_0$
- ◆  $r(t)$ ：时刻  $t$  两个星系的距离（又称固有距离、物理距离）；  $r_0$  为两个星系**共动距离**，则有：  

$$r(t) = a(t) \times r_0$$

- (2) 哈勃常数

方程微分  $dr/dt = v(t)$

- ◆  $dr/dt = da/dt * r(t_0)$
- ◆  $dr/dt = da/dt * (1/a) r(t)$
- $v(t) = dr/dt = da/dt * (1/a) r(t)$

定义哈勃参数  $H(t) = (1/a) * da/dt$

- ◆  $v(t) = H(t) r(t)$

哈勃参数  $H(t)$  和  $a(t)$  一样，是一个**随时间变化的量**：描述星系的**平均运动**

- ◆ 只在某个**固定**的时刻，才是常数
- ◆ 现在  $H(t_0) = H_0 = 72$ ，单位是 Hz

- (3) 宇宙学红移

$$dt = -\frac{a(t)}{c} \frac{dr}{\sqrt{1 - Kr^2}}$$

$$1 + z = \frac{1}{a(t_e)}$$

1 多普勒红移:  $1+z = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} \approx 1 + \frac{v}{c}$

2 实际红移:  $1+z_{obs} = (1+z_{cos})(1+\frac{z}{c})$

$z_{obs} = z_{cos} + \frac{v}{c}(1+z_{cos}) \Rightarrow \delta z_{cos} = \frac{\delta v}{c}(1+z_{cos})$

(4) 宇宙密度演化

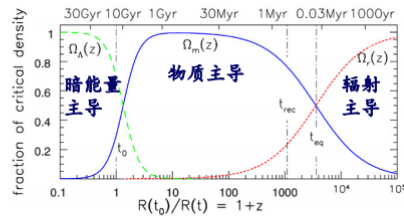
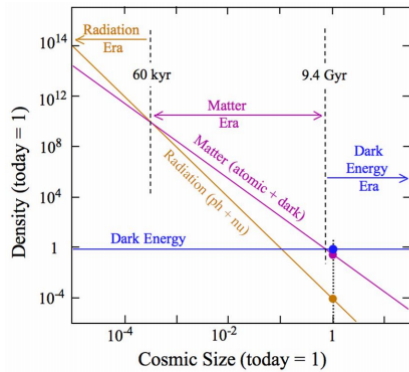
1  $\rho = \rho_M + \rho_K + \rho_\Lambda$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- ◆ 定义宇宙密度参数:  $\Omega_M = \rho/\rho_c$ ;  $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H^2\rho_c)$ ;  $\Omega_K = -K/(R^2 H^2)$
- ◆ Friedman方程可以表示为:  $1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K$

2 宇宙密度与红移



宇宙中各种组分密度随时间演化: 物质  $\rho \sim a^{-3}$ ; 辐射  $\rho \sim a^{-4}$ ; 暗能量为常数  $\rho = \text{const.}$   
 现在  $t=t_0$ :  $\Omega_r = 8.42 \times 10^{-5}$ ,  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$

- 标准宇宙学模型 ( $t=t_0$ :  $\Omega_r = 8.42 \times 10^{-5}$ ,  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ), 每个时刻辐射 (点线)、物质 (实线) 和暗能量 (长划线) 对临界密度贡献的比例。
- ◆ 物质-辐射均等:  $z_{eq} = 3570$ ,  $t_{eq} = 0.05$  Myr;
  - ◆ 复合完成:  $z_{rec} = 1100$ ,  $t_{rec} = 0.35$  Myr
  - ◆ 目前年龄  $t_0 = 13.7$  Gyr。

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \left[ \rho_{m,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 + \rho_{r,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4 + \rho_{\Lambda,0} \right] - \frac{Kc^2}{a^2}$$

$$\frac{8\pi G}{3} \rho_{\Lambda,0} = H_0^2 [1 - \Omega_{m,0} - \Omega_{r,0}] + \frac{Kc^2}{a_0^2}$$

3 回溯时间:  $t_e = \int_z^\infty \frac{1}{H(z')} \frac{dz'}{1+z'}$

$$H^2(t) = H_0^2 [1 + \Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + (1 - \Omega_{tot})(1+z)^2 + \Omega_\Lambda]$$

## 4. 星系特性与红移关系

(1) 光度距离

$$F = \frac{L}{4\pi a^2(t_0)r^2(t_0)(1+z)^2} \equiv \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

- ◆  $d_L$  为光度距离:  $d_L = (1+z)a(t_0)r(t_0)$

(2) 角直径距离

$$\alpha \text{ (in radians)} = \frac{D}{a(t_e)r(t_0)} \equiv \frac{D}{d_A}$$

$$d_A = a(t_e)r(t_0) = \frac{a(t_0)r(t_0)}{1+z}$$

- ◆ 角直径距离与光度距离之比仅仅是红移  $z$  函数:  $d_L = (1+z)a(t_0)r(t_0)$

$$d_A = d_{\text{now}}/(1+z) = d_L/(1+z)^2$$

- ◆ 如果已测量了给定红移处的光度距离, 再测量角直径距离不会给出关于  $a(t)$  的更多信息

(3) 面亮度

$$I(x) = \frac{F}{\alpha^2} = \frac{L/(4\pi d_L^2)}{D^2/d_\Lambda^2} = \frac{L}{4\pi D^2} \left(\frac{d_\Lambda}{d_L}\right)^2 = \frac{L}{4\pi D^2} \frac{1}{(1+z)^4}$$

(4) 星系能谱

由于宇宙膨胀，星系的观测能谱相对于其静止能谱，发生了**红移**

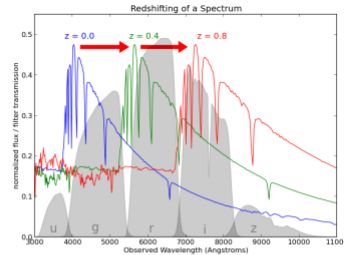
利用同一滤光片观测不同红移星系，观测的是星系不同波段静止波长辐射

开展星系研究时，需要改正宇宙膨胀的影响：**K改正**、**E改正**

- ◆ 星系**静止能谱** $L(\nu_c)$ ，单位时间频率 $\nu_c - \nu_c + d\nu_c$ 辐射为 $L(\nu_c) d\nu_c$
- ◆ **观测流量**为 $f(\nu_o) d\nu_o$  [其中 $\nu_o = \nu_c/(1+z)$ ]
- ◆ 则有：  

$$f(\nu_o) d\nu_o = \frac{L(\nu_c) d\nu_c}{4\pi d_L^2} \quad \text{or} \quad f(\nu_o) = \frac{L(\nu_c)}{L(\nu_o)} (1+z) \frac{L(\nu_o)}{4\pi d_L^2}$$
- ◆ 滤光片j的波长中心在 $\nu_o$ ；观测视星等 $m_j$ ，绝对星等 $M_j$ （静止波长在j）：

$$m_j = \mathcal{M}_j + 5 \log \left[ \frac{d_L(z)}{10 \text{ pc}} \right] + K_j(z) \quad K_j(z) = -2.5 \log(1+z) - 2.5 \log \left[ \frac{L(\nu_c)}{L(\nu_o)} \right]$$



- $K_j(z)$ 称为**K改正**
- ◆ 右边第1项表示由于宇宙学红移造成**波长被拉伸** ( $d\nu_c/d\nu_o$ )
- ◆ 第2项表示 $\nu = \nu_o$ 和 $\nu = \nu_c$ **能谱差异**
- ◆ 如果忽略谱演化，假定同一谱型星系能谱相同，可用**近邻星系谱**或者**星族合成谱**做模版

(5) 星系空间密度

介于红移  $z$  和  $z+\Delta z$  的天体数目正比于相应的空间体积 $\Delta V$

因为  $1+z = a(t_0)/a(t_c)$ ，令红移  $z$  处的体积为  $\Delta V$ ，则现在的体积为： $\Delta V \cdot (1+z)^3$ ：称为**共动体积**

$$\frac{dV}{dz} = \frac{4\pi c [a(t_0)r(t_0)]^2}{H(z)(1+z)^3} \quad (\text{Eq. 8.47})$$

如果宇宙中的星系数保持不变，则**共动密度**，即每单位共动体积内的数目不会改变

假定每  $\text{Gpc}^3$  中现有  $n_0$  个特定类型的星系，则在红移  $z$  和  $z+\Delta z$  之间它们的数目应为：

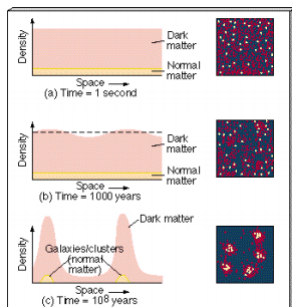
$$\frac{dN_c}{dz} = n_0 (1+z)^3 \frac{dV}{dz} = n_0 c \frac{4\pi [a(t_0)r(t_0)]^2}{H(z)}$$

将每个红移处**测量**到的星系数  $dN/dz$  同上式的  $dN_c/dz$  比较，可以知道**共动密度**是如何随红移变化。

### 3. 结构增长

(1) 宇宙微波背景辐射的涨落

1 辐射要从一个密度高的区域传播出来，需要克服引力势：从高密度区域到达我们的辐射较冷



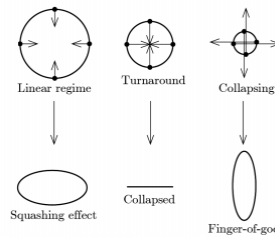
- ◆ 物质和辐射**退耦**以后，辐射不再与物质发生有效的相互作用：**重子声波震荡**得到物质分布涨落
- ◆ 线性增长阶段：密度比平均值稍大的区域，冷暗物质和重子物质在一起，膨胀速率比宇宙整体慢，密度增加，**两者一起坍塌**
- ◆ 非线性增长阶段：坍塌之后，重子物质通过辐射冷却失去能量，凝聚形成恒星和星系；冷暗物质粒子**不能**通过辐射冷却失去能量，保持在星系外围，形成一个很大的，且大致为球状的晕

(2) 星系本动

1 宇宙“均匀背景”运动，即所谓的**哈勃流**

2 **上帝的手指 (Fingers of God) 效应**: (小尺度, 位力化) 星系红移巡天观测时, 有一些细长结构沿视线 (径向) 方向分布。弥散速度造成的红移和蓝移叠加在宇宙学红移上, 使红移分布范围变宽, 在红移方向呈现细长的手指状结构

3 红移空间畸变: 大尺度



- 对于更大尺度的星系团, 还没有达到位力平衡: 外围的星系仍处于向星系团中心下落。
- 靠近观测者一侧的星系由于向星系团中心下落, 其总的红移要比宇宙学红移大一些
- 位于另一侧的星系由于下落方向和哈勃流相反, 总的红移小于宇宙学红移
- 因此, 在红移空间中看来, 整个星系团的结构将沿视线方向变扁: 这个现象称为“**挤压效应**” (squashing effect) 或者 **Kaiser效应**。

## 九、活动星系核和星系早期历史

研究意义:

1 研究星系形成

- 研究共同演化
- 绝大多数星系经历过核活动阶段

2 研究星际介质和早期宇宙

- 亮度高: 星系际物质和暗物质的探针
- 反馈

### 1. 活动星系核分类

1 分类:

- 物理 (质量、吸积率、光度)
- 视角 (宽发射线, 光变)

2 不同类型星系数密度: 现在AGN只占全部星系很小比例AGN比例小, 是因为核活动期间时标短, 所有星系都曾经历过一个或多个AGN阶段

(1) 赛弗特星系 (Seyfert)

1 特性

- 活动星系, 有明亮的、类恒星核的**旋涡星系**
- 非热连续谱, 有许多强、宽、高激发发射线
- 核区辐射有短时标剧烈的光变: 核区尺寸小

2 分类

- 1: 允线 FWHM ~ 1000 – 5000 km/s; 禁线 FWHM ~ a few hundred km/s
- 2: 允线和禁线都较窄, FWHM ~  $n * 100 \text{ km/s}$

(2) 射电星系: 射电波段辐射强的活动星系

1 射电辐射具有非热性质, 连续谱多为幂律谱



2 光学

- 光学图像：寄主星系的形态，多为椭圆星系
- 光学光谱：宽线射电星系(BLRGs)和窄线射电星系(NLRGs)光谱中都有强发射线，类似于Sy1和Sy2，又称作强射电赛弗特星系

3 射电形态(Fanaroff & Riley (1974) 分类)

- **FR I**
  - 致密型：大部分射电辐射来源于星系光学图像中心的一个很小的核； $r \sim a \text{ few pc}$
  - 射电光度低；核区射电辐射强；谱指数 $\alpha \sim 0$ （平谱）；瓣是光学厚；在高频射电波段最亮
- **FR II**
  - 双瓣型：射电辐射主要产生于在星系光学图像两边的两个巨大的射电瓣；尺度 $\sim n \times 100 \text{ kpc} - \text{Mpc}$
  - 射电光度高；射电瓣辐射强；谱指数 $\alpha \sim 0.7 - 1.2$ （陡谱）；瓣是光学薄的；在低频射电波段最亮

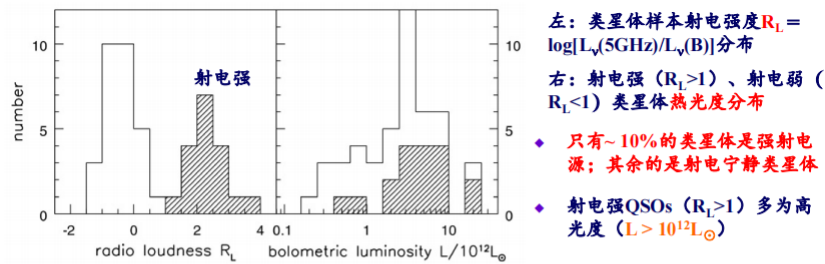
(3) 类星体 QSOs/Quasars

1 恒星状天体，颜色蓝，紫外超，光谱中有很多条发射线:quasi-stellar radio sources, quasars

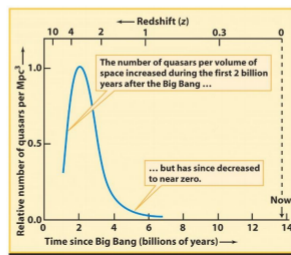
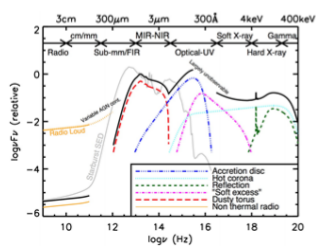
2 颜色蓝，射电弱的：quasi-stellar object (QSOs)

3 特征

- 类星体十分亮，使得其宿主星系显得暗。除极少数外，绝大多数类星体有类似恒星的光学像，十分致密；



- ◆ 类星体中，约有10%的为射电噪 (radio-loud)；90%为射电宁静 ('radio-quiet')，统称为QSOs



(4) 耀变体 Blazar：是光学激变天体 (optically violently variables, OVVs,  $\Delta m \geq 0.1 \text{ mag}$ ) 和蝎虎天体 (BL Lac) 的总称

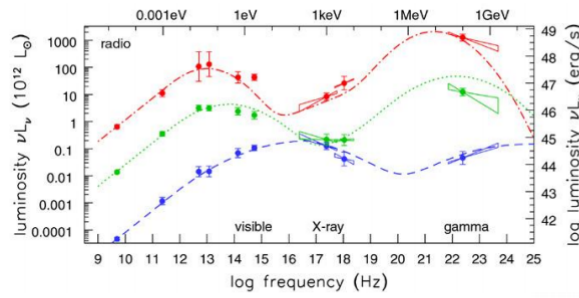
1 OVVs:

- 具有大幅度、快速光变的类星体；主要是射电噪类星体
- 除了快速光变外，OVVs的其他观测特性（光度高、强发射线等）与BL Lac天体不同：不属于同一子类

2 BL Lac天体

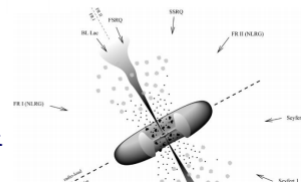
- 形态：类似于恒星，有快速而不规则的光变
- 与BL Lac具有相同特征的天体统称蝎虎天体
- 特征：快速光变、高偏振、非热连续谱；光谱中没有或者只有很弱的发射线和吸收线

### 3 Blazar能谱分布



按射电功率分组的Blazar的平均能谱分布：紫外和X射线区能量较低的峰代表来自喷流中电子的同步辐射；γ射线峰代表来自电子与光子之间逆康普顿散射。

- 能谱分布很宽：从射电到γ射线的整个谱区辐射都相当强
- 为射电噪声谱射电源：核区发射占了射电辐射较大的部分
- γ射线波段发射其大部分能量：γ射线波段的νFν能够大到能谱中射电、毫米波、光学或X射线部分的10倍；射电最亮者，γ射线也最亮



### (5) 低电离核发射区 LINERS

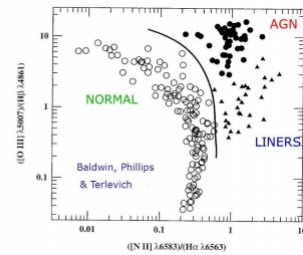
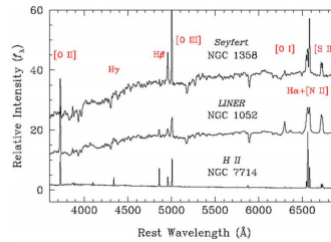
低电离核发射区 (low-ionization nuclear emission-line region, LINERs) 由 Timothy Heckman (1980) 根据星系谱线特征定义的一类活动星系核

星系中心存在一个低光度的核：光谱中低电离谱线如 [O I]λ6300, [S II]λλ6716, 6731 等很强；而高电离谱线如 [Ne V] 则观测不到

近邻宇宙中 (d < 20 - 40 Mpc), ~1/3 星系是 LINERs; ~75% 的 LINERs 为 E-Sab 等类型星系; Sb-Scd 星系中很少有 LINERs

初始认为是一类特殊类型的 AGNs, 现在一般认为 LINERs 是 Sy2 星系在低光度延伸

可以利用 [N II]λ6583/Hα 和 [O III]λ5007/Hβ 的比值 (BPT 图), 区分 LINER、Seyfert 和恒星形成星系。



### (6) AGN中喷流

#### 1 视超光速

观测者视线与喷流方向夹角为θ, 喷流物质速度是V

喷流圆块在时刻t=0经过点S, 时间Δt之后经过点T

在T点发出的辐射到达观测者晚于来自S点的辐射; 时间间隔记作Δt\_obs:

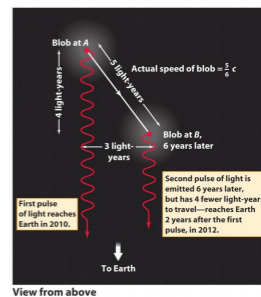
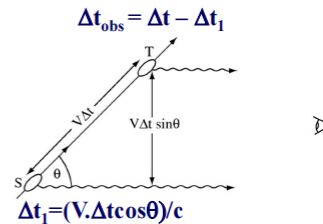
$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t(1 - V \cos \theta / c)$$

在Δt\_obs 时间间隔中, 圆块在天球上走过的距离是 VΔt sinθ, 所以它的视横向速度是:

$$V_{\text{obs}} = \frac{V \sin \theta}{1 - V \cos \theta / c}$$

当V接近光速c时, 圆块的运动看起来比光速快: 如V = 0.99c, θ = 5deg, V\_obs = 6.27c

定义γ = 1/sqrt(1-V^2/c^2), 则当θ = sin^-1(1/γ)时, V\_obs = V\_max = γc (极大值)



2 多普勒增亮 relativistic beaming: 辐射在喷流运动的方向上成束, 使得喷流指向我们的核看起来增亮 (所以观测到的喷流多为单侧)

相对论：对于静止的观测者，载于发射圆块上的原子钟显得慢 $\gamma$ 倍

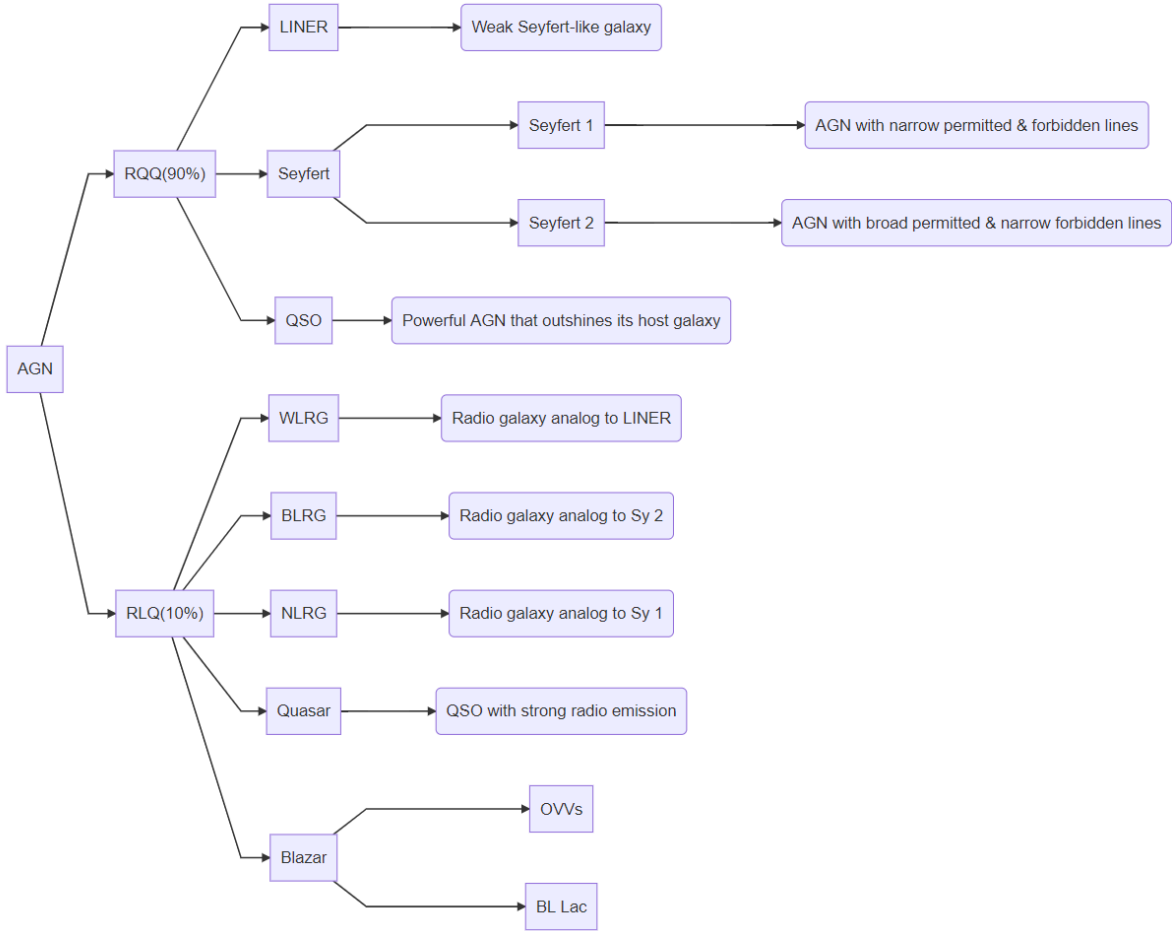
喷流向前运动，使观测到的时间间隔增加 $(1-V \cos \theta/c)$

在圆块静止系中，时间间隔 $\Delta t_{\text{blob}}$ 内以频率 $\nu_e$ 发出的辐射，则在时间 $\Delta t_{\text{obs}}$ 内以频率 $\nu_{\text{obs}}$ 到达，有：

$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t_{\text{blob}}[\gamma(1 - V \cos \theta/c)]$$

$$\nu_{\text{obs}} = \nu_e[\gamma(1 - V \cos \theta/c)]^{-1}$$

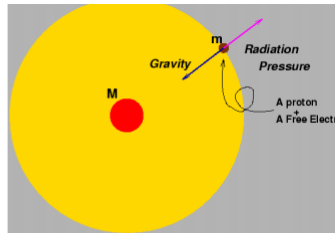
$$\mathcal{D} = 1/\gamma(1 - \beta \cos \theta)$$



## 2.活动星系核模型

### (1) 中心引擎：Eddington光度

- ◆ AGN中心能源机制是黑洞吸积气体：气体受到辐射压力 $F_{\text{rad}}$ 和黑洞引力 $F_{\text{grav}}$
- ◆ 如果辐射压太大， $|F_{\text{rad}}| > F_{\text{grav}}$ ，气体就不能落到星系中心，核的燃料就会耗尽
- ◆ 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； $|F_{\text{rad}}| \leq F_{\text{grav}}$
- ◆ 达到爱丁顿光度时，粒子上的引力与其受到的辐射压力达到平衡。



- ◆ 质量为M的天体，辐射压力和引力平衡的条件：
$$\frac{GM(m_e + m_p)}{r^2} \approx \frac{GMm_p}{r^2} = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c}$$
 公式推导见P371  $m_p$ 、 $m_e$ 是质子、电子的质量； $\sigma_T$ 是电子散射截面
- ◆ Eddington光度 $L_{\text{Edd}}$ ：
$$L_{\text{Edd}} \equiv \frac{4\pi G c m_p}{\sigma_T} M_{\text{BH}} \approx 1.28 \times 10^{46} M_8 \text{ erg s}^{-1} \quad M_8 \equiv M_{\text{BH}}/10^8 M_\odot$$
- ◆ 天体吸积所能达到的光度与其自身质量成正比：
$$M_{\text{Edd}} = 8 \times 10^7 L_{46} M_\odot, \quad [L_{46} \equiv L/(10^{46} \text{ erg s}^{-1})]$$
 如果AGN的光度是 $L \sim 10^{46} \text{ erg/s}$ ，为了避免吹走能够给AGN供能的所有气体，中心黑洞质量 $M_{\text{BH}} \sim 10^8 M_\odot$ 。

### (2) 吸积盘

黑洞吸积周围物质，高效释放能量: AGN能源机制

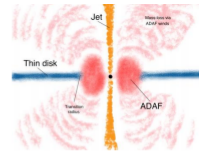
吸积物质具有角动量，下落进入星系中心: **吸积盘**

吸积盘模型

- ◆ Shakula & Suynaev (1973): 几何薄、光学厚吸积盘 (标准薄盘, SSD)
- ◆ Narayan & Yi (1995): 径移主导吸积流 (Advection-Dominated Accretion Flow, ADAF).
- ◆ SSD和ADAF分别适用于吸积流离黑洞较远和较近的区域: ADAF+SSD可对黑洞吸积盘进行完整描述

SSD: 几何薄, 光学厚

- ◆ 盘是几何薄, 盘处处垂直厚度  $H \ll r$  (离中心距离)
- ◆ 吸积物质所受引力=惯性离心力, 转动是开普勒的
- ◆ 盘在垂向处于流体静力学平衡, 绕中心天体旋转
- ◆ 吸积流是光学厚的, 能量转移和冷却机制是辐射
- ◆ 粘滞应力非零分量  $T_{r\phi} = \alpha P$  (吸积流总压强  $P$ ,  $\alpha$  盘)
- ◆ 盘的辐射谱为黑体谱: 可很好解释AGN的大蓝包等特征; 但盘的  $T < 10^5 K$ , 不能解释高能X、 $\gamma$ 辐射



◆ ADAF: 几何厚, 光学薄

- ◆ 粘滞系数  $\alpha$  大, 径向运动速度  $V_r$  很大, 可径向传热
- ◆ 旋转速度  $V_k$  较小, 亚开普勒旋转: 离心力  $<$  中心引力
- ◆ 粘滞耗散产生的能量储存在气体中: 高温, 几何厚
- ◆ 高温, 物质密度低: 电子冷却易, 离子冷却难,  $T_e \gg T_i$ .
- ◆ 辐射机制: 电子的韧致辐射、同步辐射以及康普顿过程
- ◆ 辐射谱为幂律谱 (射电- $\gamma$ 射线): 不同波段辐射机制不同

### (3) AGN统一模型

活动星系的观测特征

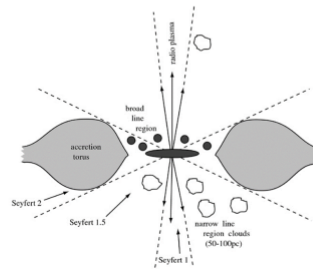
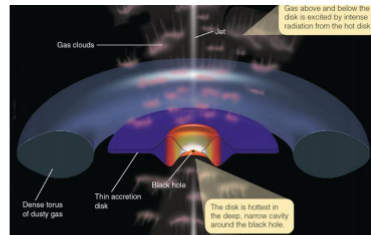
- ◆ 高光度; 非热连续谱; 宽发射线
- ◆ 快速光变  $\rightarrow$  辐射源大小  $< 1 pc$
- ◆ 特殊形态 (亮核、喷流)
- ◆ 全波段电磁辐射: 射电- $\gamma$ 射线

活动星系核分类:

- ◆ QSOs, Sy1、Sy2、NLRG、BLRGs、Blazar、LINER
- ◆ 各类活动星系核之间的差异是内禀的, 还是别的原因所引起的?

不同类型AGN: 由于观测取向差异引起

- ◆ 星系中心存在大质量的黑洞, 体积小
- ◆ 黑洞外围存在吸积盘: ADAF + SSD
- ◆ 吸积盘周围存在气体云: BLR、NLR
- ◆ 吸积盘可以产生垂直与盘的喷流: Jet
- ◆ 气体云外围有一个宽的冷尘埃环(torus)



观测者视线相对于AGN对称轴的取向、射电强弱、光学光度

Sy1和Sy2: 有无尘埃环遮挡

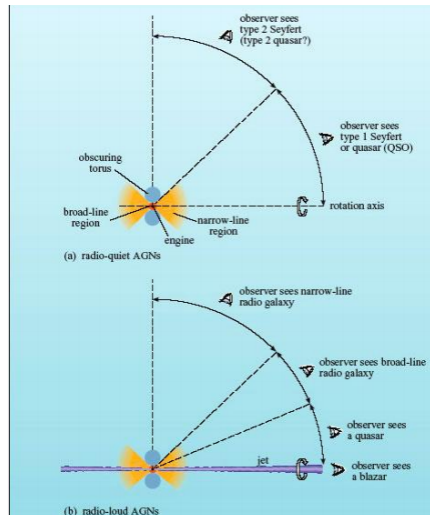
- ◆ 赛弗特1星系和赛弗特2星系本质没有区别
- ◆ Sy2光谱没有宽发射线: 视线方向上受到了冷尘埃环的阻挡

Sy1和QSOs: 光度高 or 低

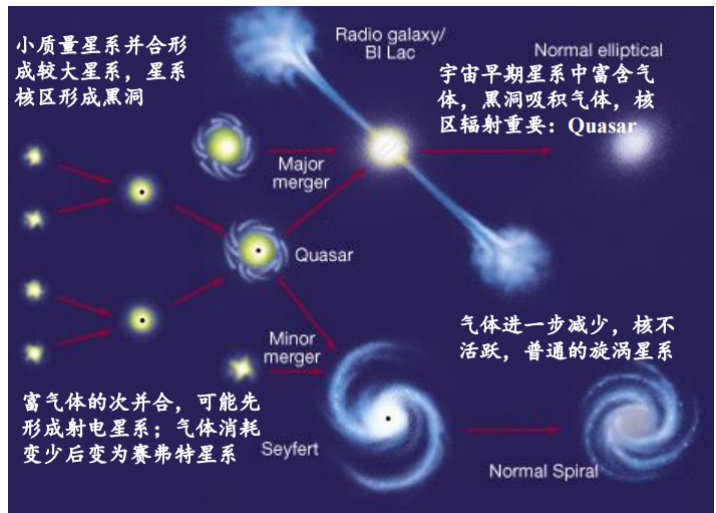
- ◆ Sy1是直接观测到的光度较低的活动星系
- ◆ QSOs是直接观测到光度较高的活动星系

Blazar和QSOs: 射电噪 or 宁静

- ◆ 沿着射电轴(喷流)方向观测射电噪AGN: Blazar天体
- ◆ 小角度偏离: 类星体, BLRGs
- ◆ 大角度偏离: 窄线射电星系



### (4) AGN形成



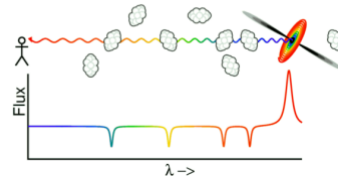
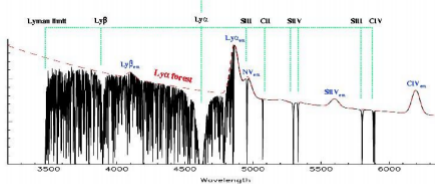
### 3. 星系际气体 IGM

#### (1) 类星体吸收线：本征吸收和插入吸收线

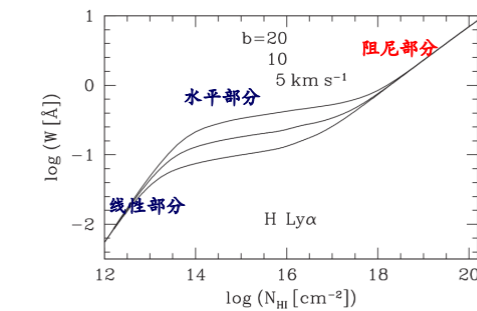
**本征吸收线：**起源于QSOs附近的介质和QSOs的物质外流， $z_{abs} \sim z_{em}$

**插入吸收线：**产生于星系际介质，红移比类星体低 ( $z_{abs} < z_{em}$ )

- ◆ **阻尼赖曼 $\alpha$ 系统 (DLA)：**HI的柱密度  $N_{HI} > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ，赖曼 $\alpha$ 线是光厚的，具有明显的阻尼翼
- ◆ **赖曼 $\alpha$ 森林系统 (Ly $\alpha$  forest system)：** $N_{HI} = 10^{12} - 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ；窄线，HI Ly $\alpha$ 吸收，QSOs蓝致谱，丰富
- ◆ **赖曼系限系统 (Lyman-limit system)：** $N_{HI} \geq 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ；吸收了波长  $\lambda < 912(1+z_{abs}) \text{ \AA}$  几乎所有光子；造成连续谱break
- ◆ **金属线系统：**MgII  $\lambda\lambda 2796, 2800$ ；CIV  $\lambda\lambda 1548, 1550$ ；位于Ly $\alpha$ 发射线红端，易观测



#### 2 谱线宽度W与 $N_{HI}$ 和b的关系

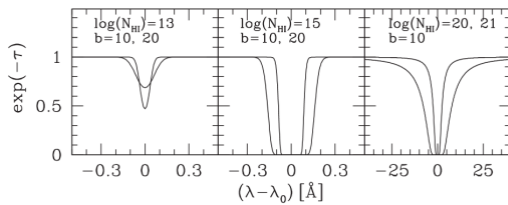


$$W = \frac{1}{f_0} \int [f_0 - f(\lambda)] d\lambda$$

W吸收线等值宽度； $f(\lambda)$ 观测谱； $f_0$ 为连续谱

$$b^2 = 2k_B T/m$$

b为多普勒参数；T为气体温度；m为吸收原子质量



上：The equivalent width of the Ly $\alpha$  line as a function of the HI column density  $N_{HI}$  and the b parameter.

下：The absorption line profiles for different values of  $N_{HI}$  and b.

(2) **赖曼 $\alpha$ 森林系统：**位于类星体视线方向低密度中性氢云的Ly $\alpha$ 吸收线；由于HI云处于视线方向不同的位置（红移不同），在Ly $\alpha$ 发射线蓝端产生了一系列吸收线

1 尺度：很大， $\sim 10^2 \text{ kpc}$ ，个别达 $10^5 \text{ kpc}$

2 形态：可呈球状、纤维状或盘状

3 重元素丰度： $\sim (10^{-4} - 10^{-2}) Z_{\odot}$

4 空间分布：一般不成团，仅在小尺度上有弱成团倾向

5 红移演化： $dN/dz = A(1+z)^\gamma$ ； $z \sim 2-4$ 时 $A = 3.5$ ， $\gamma = 2.7$ ，随红移演化剧烈； $z < 1.5$ 时 $\gamma \sim 0.15$ ， $A \sim 35$ ，演化小

6 起源：赖曼 $\alpha$ 森林系统起源于星系际气体的过密区。

(3) **赖曼系限系统 (LLS)**：窄吸收线系统，对可电离H原子的光子是光厚的；吸收了 $\lambda < 912(1+z_{abs})\text{\AA}$ 几乎所有光子，造成连续谱break

#### (4) 阻尼赖曼 $\alpha$ 系统 (DLAs)

1 尺度：1 - 10 kpc，与星系同量级。

2 形态：包含若干小云或者旋转气体盘

3 重元素丰度： $10^{-1} Z_\odot$ ，比赖曼 $\alpha$ 森林吸收体高一个量级。

4 空间分布：有强烈成团倾向

5 演化：不随红移演化

6 起源：可能与星系有关，产生于旋涡星系的盘或晕；富气体的矮星系；低表面亮度星系。

7 HI柱密度高

(5) **Gunn-Peterson效应**：介于观测者和高红移类星体之间的低密度HI云块，吸收了高红移类星体Ly $\alpha$ 发射线 (1215 $\text{\AA}$ ) 短波侧大部分的光，使得平均后的强度低于发射线的长波侧的光，造成Ly $\alpha$ 发射线不对称

1 **Gunn-Peterson槽**：类星体光谱的特征，由于早期宇宙中存在大量的中性氢，使得红移 $z > 5.8$ 的类星体 $\lambda < 1215\text{\AA}$ 波长区间几乎完全被吸收。

## 4.高红移星系

### (1) 寻找高红移星系

1 Lyman-断裂星系(LBGs)：高红移的星暴星系，通过它们在912 $\text{\AA}$  Lyman连续体间断周围的远紫外光谱能量分布的**颜色**来确定

2 Lyman- $\alpha$ 发射器(LAE)：是一种发射Lyman- $\alpha$ 辐射的遥远星系。

- 比较容易找，但只能找特定的谱线

3 Sub-millimeter galaxies (SMGs)：850 $\mu\text{m}$ 热尘埃红移发射线

4 极红移天体