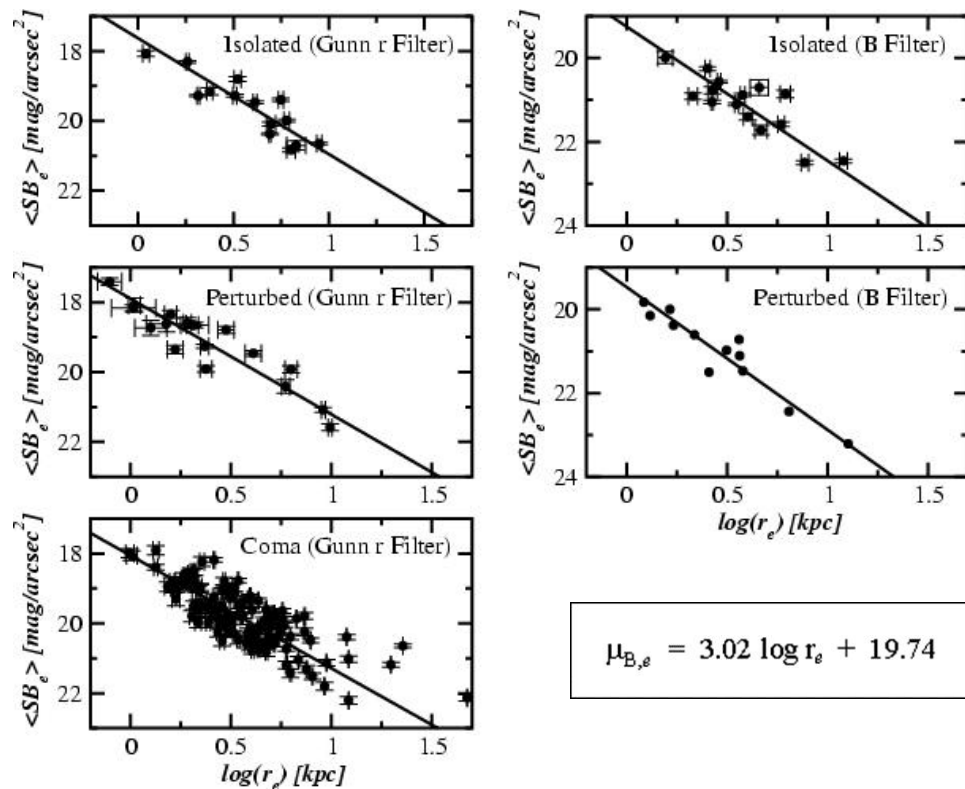
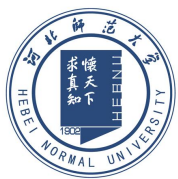


标度关系 I

➤ Kormendy Relation

- 椭圆星系越亮，中心面亮度越低
- 椭圆星系越亮，有效半径(R_e)越小

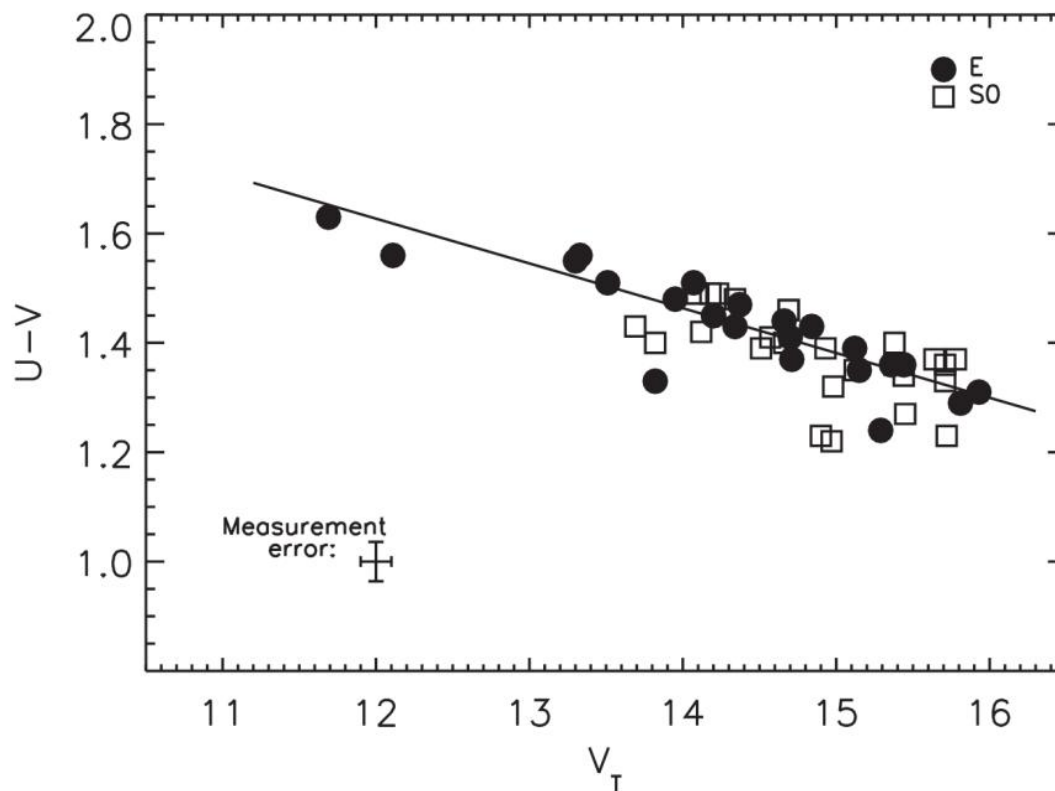




标度关系 II

➤ 颜色星等关系

- 光度越高的椭圆星系，颜色更红



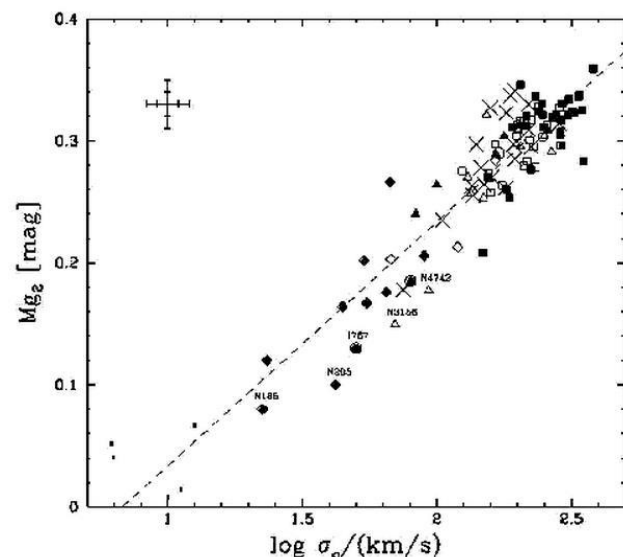
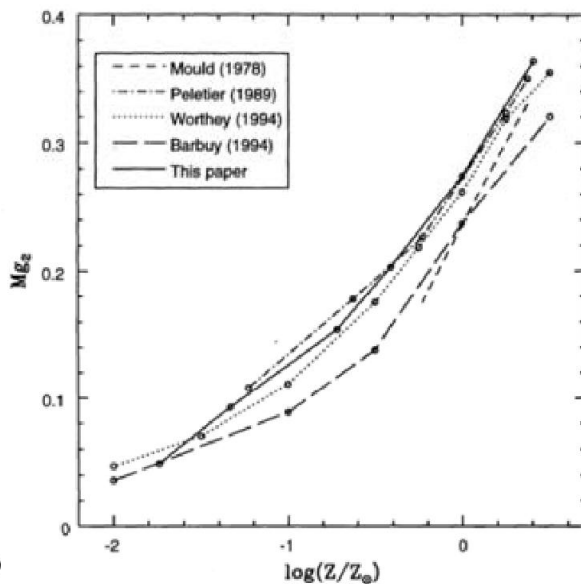
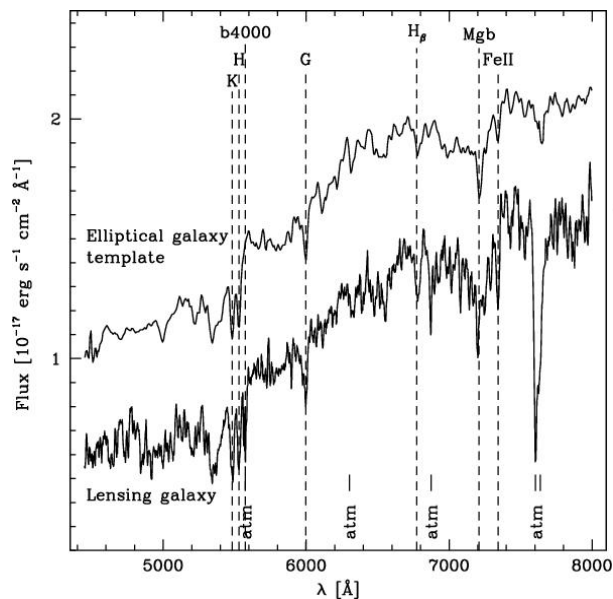
标度关系 III

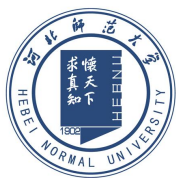
➤ 金属丰度 - 速度弥散关系

- 椭圆星系和SO星系核球区域的Mg2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。

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

- 更深的引力势阱可以有效的阻止ISM向外逃逸

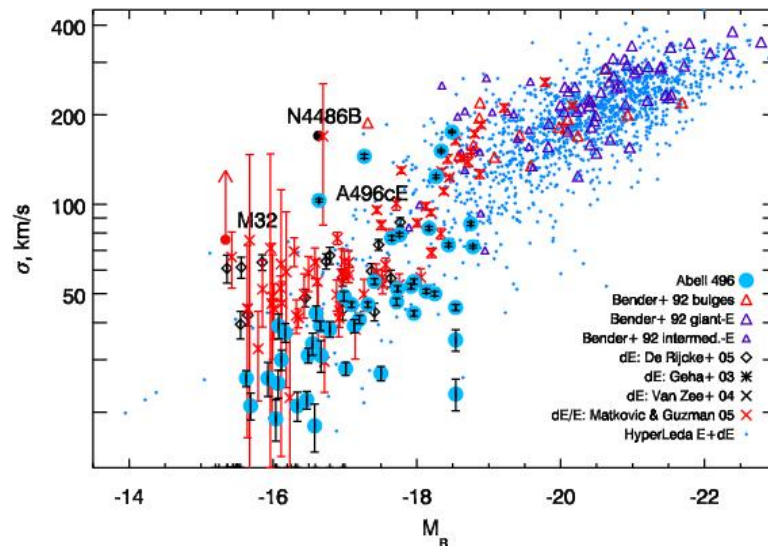




标度关系 IV

➤ 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 $\sigma \sim 500$ km/s；最暗的椭圆星系 $\sigma \sim 50$ km/s

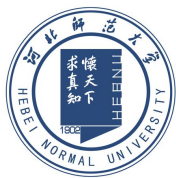


➤ 法贝尔-杰克逊关系

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

➤ 利用FJR测量星系距离

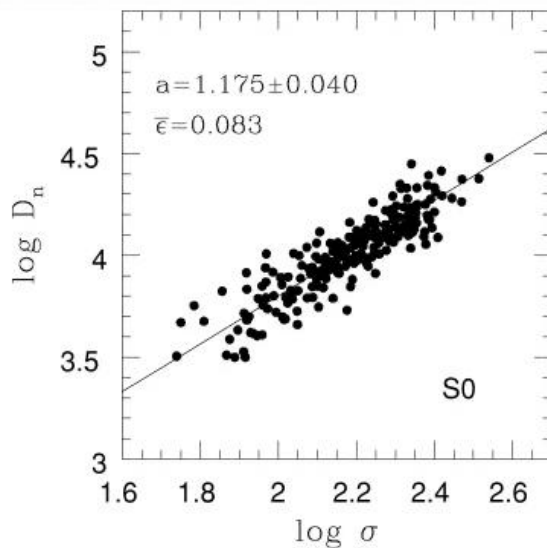
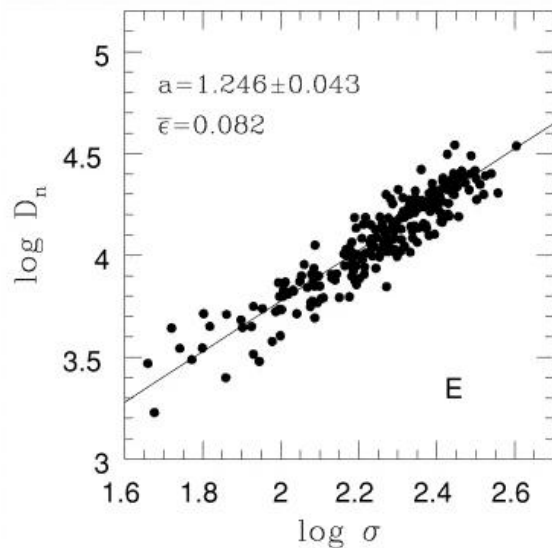
- 测量星系速度弥散，利用法贝尔-杰克逊关系，可以估计L，利用测得的视星等，求得星系距离d
- 但是，椭圆星系外部暗弱，导致测定星系总光度困难；另外从FJR关系导出的距离不精确（弥散大）



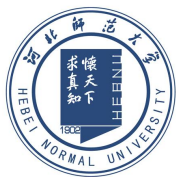
标度关系 V

➤ $D_n - \sigma$ Relation

- Dressler于1987年发现，椭圆星系的半径(D_n)与速度弥散(σ)显著相关
- D_n = Diameter (in kpc) where $\langle \mu \rangle = 20.75$ mag/arcsec² (**the actual value of 20.75 is not important**) at which the mean interior surface brightness is 20.75.

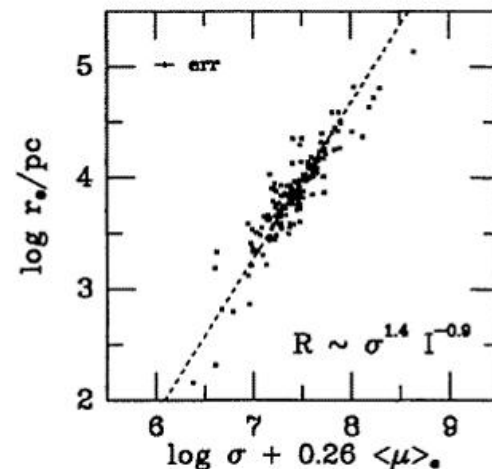
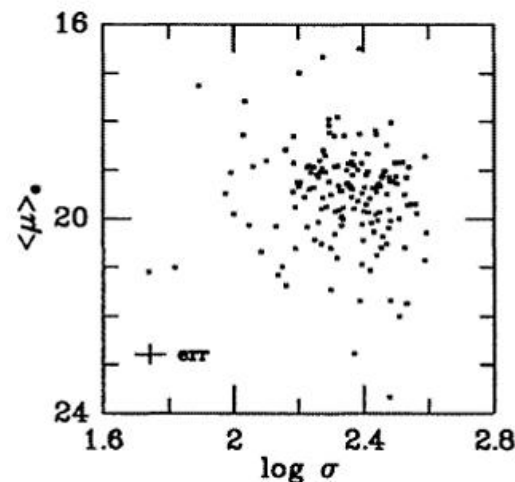
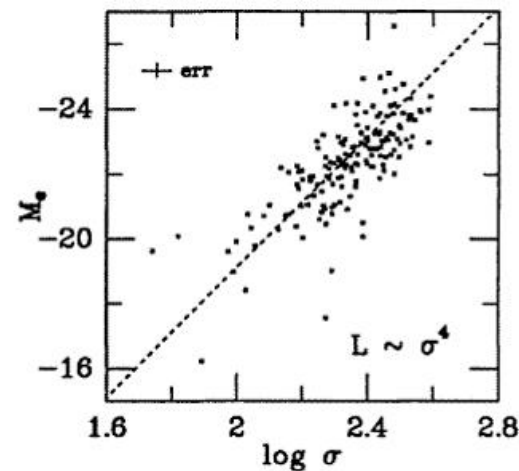
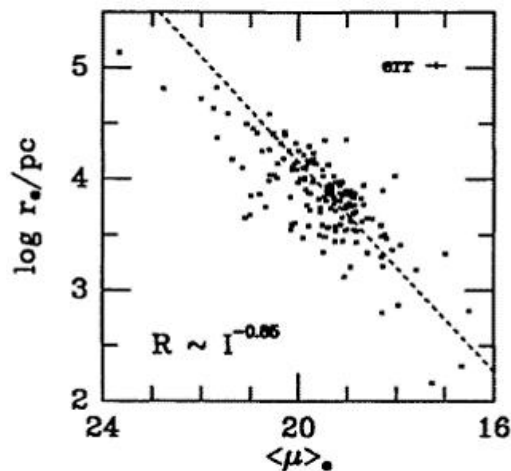


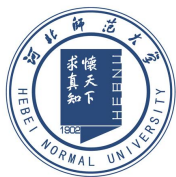
$$\frac{D_n}{\text{kpc}} = 2.05 \left(\frac{\sigma}{100 \text{ km/s}} \right)^{1.33}$$



标度关系 VI

- 椭圆星系的基本面
 - 两参数关系
(Kormendy关系, F-J关系, Dn-s关系)
存在较大弥散
 - 如果加入第三参数有效半径 (r_e), 可将FJR关系的弥散显著减小
- 椭圆星系有四个基本参数 (其中三个是独立的):
 - 星系光度, 有效半径, 平均面亮度, 速度弥散

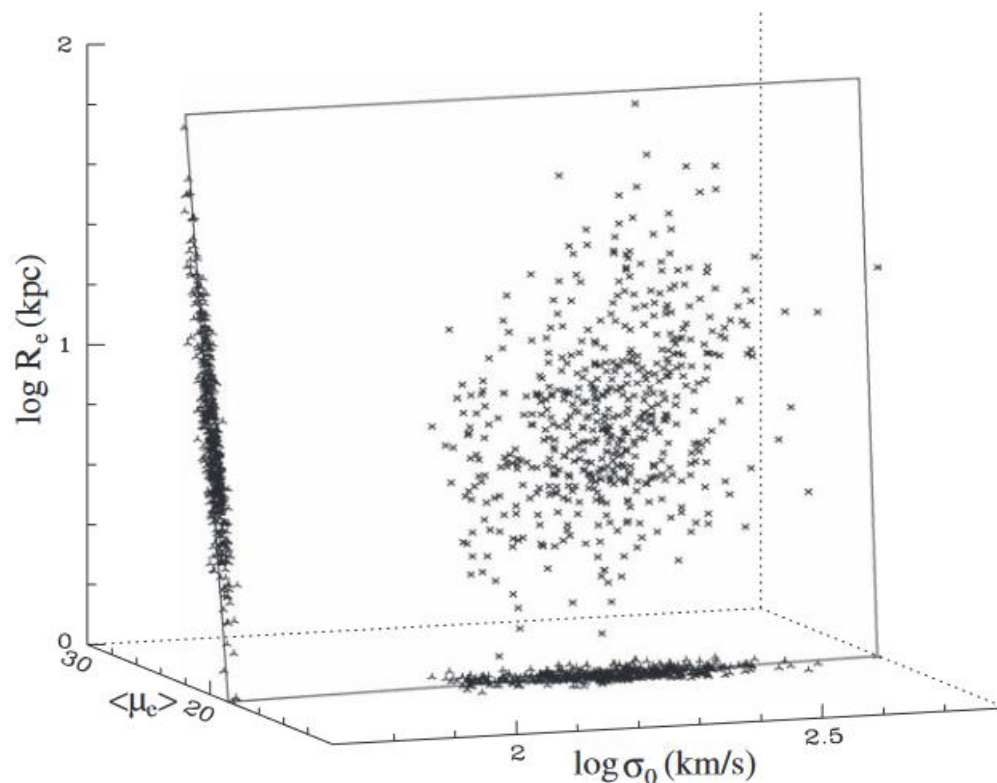




标度关系 VI

- 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 (σ) 组成的三维‘空间’中的一个平面附近
- 可以由这三个参数中的两项，估计另外一个参数

$$\log R_e = a \log \sigma_0 + b \log \langle I \rangle_e + \text{constant}$$



星族和气体

➤ 椭圆星系**缺乏**明亮蓝星:

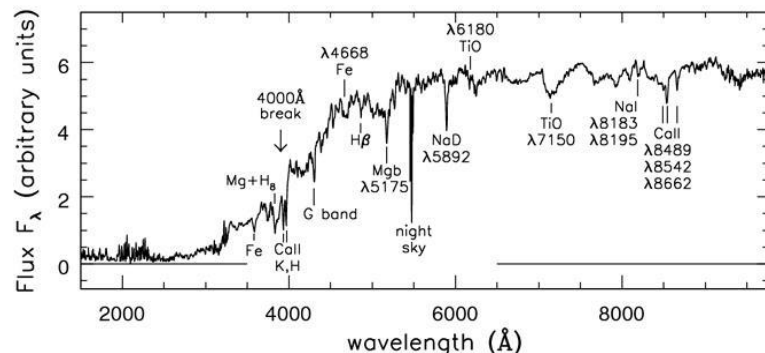
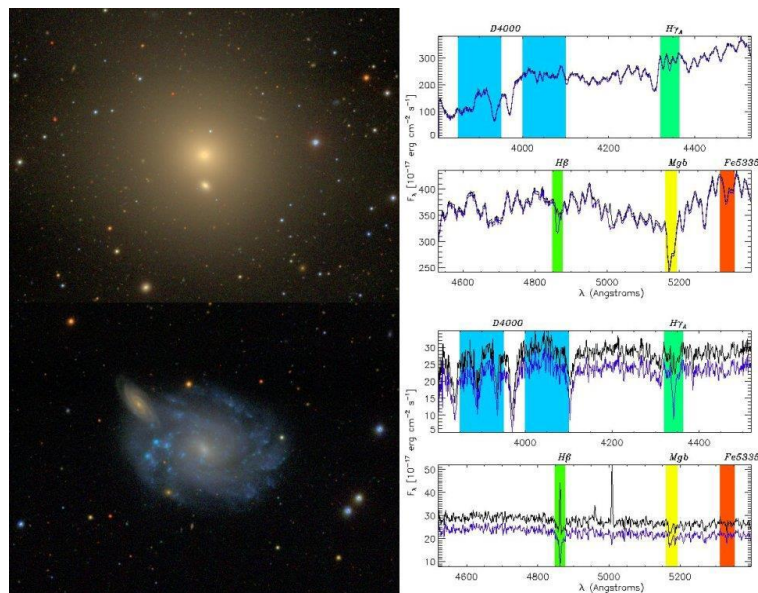
- $D < 20\text{Mpc}$ 的E星系: 观测研究其中红巨星和渐近巨星支恒星 (AGB)
- 主要利用星系**积分**特性: 光谱和光度

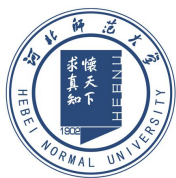
➤ 椭圆星系**光谱**

- 光谱和**K型恒星**光谱类似, 有钙和镁等**重元素**的吸收谱线
- $\lambda < 3500\text{\AA}$ UV波长区间辐射**弱**, 年轻星族少: 近期**无**恒星形成发生
- 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**

- 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)
- 光谱中**4000 Å 跃变**明显 (D4000): 年老恒星大气中的**金属**吸收了短波长的光





解读光谱——星族合成方法

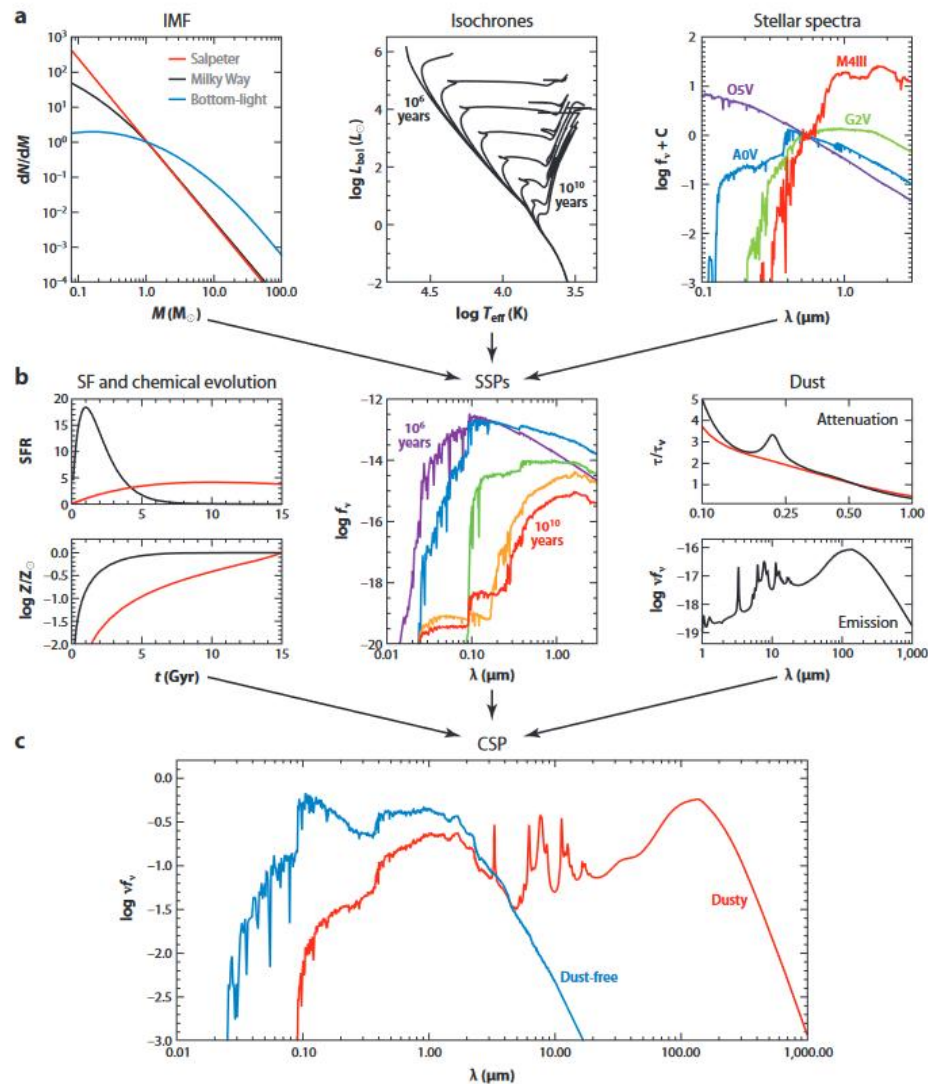
➤ **简单星族(SSP)**: 同时形成的恒星, 具有相同的年龄和金属丰度

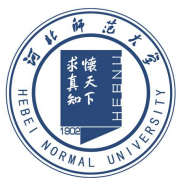
- 初始质量函数: **IMF**
- 恒星演化轨迹: **HRD**
- 恒星光谱库: 观测/理论模型

➤ **复合星族(CSP)**: 多个简单星族的叠加 → 星系光谱

➤ 需要知道各个SSP的权重

- 恒星形成历史: **SFH**
- 化学增丰历史: **CEH**
- 尘埃消光/发射

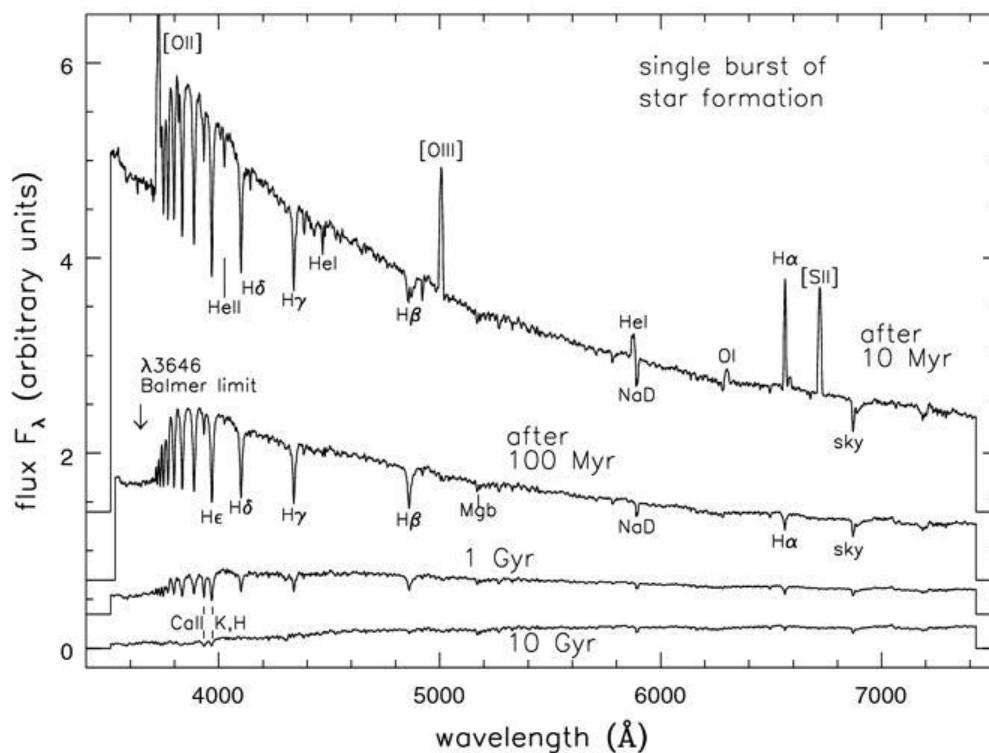


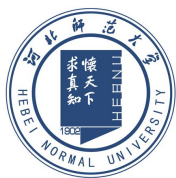


解读光谱——星族合成方法

➤ 简单星族 (SSP) 随时间T演化

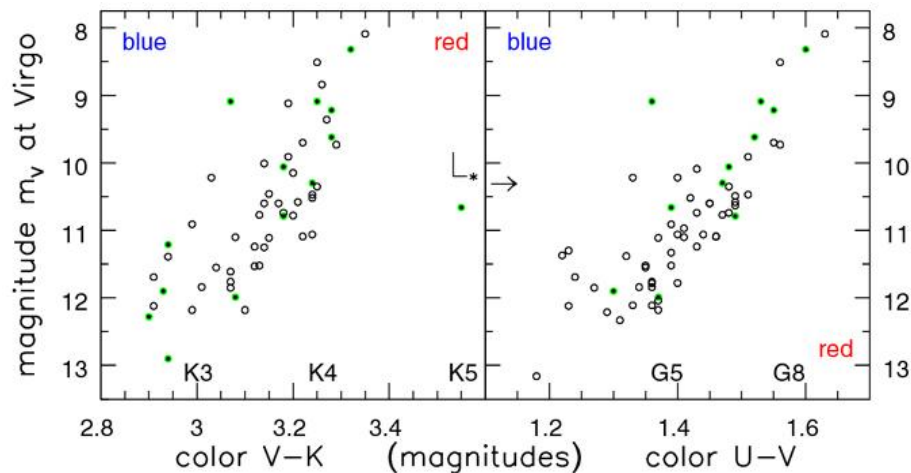
- 模型**星系谱**: 恒星形成持续时标 $t = 100 \text{ Myr}$ (SFH)
- 暴发开始 $T = 10 \text{ Myr}$: 光谱蓝、有强的气体发射线, 星族年轻
- $T = 100 \text{ Myr}$: 谱变暗、变红, A型星氢线明显, E+A (后星暴) 星系
- $T \geq 1 \text{ Gyr}$: 谱更暗、更红; 变化很慢; 4000\AA 跃变明显 (椭圆星系)



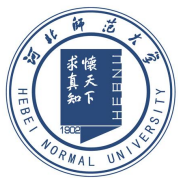


椭圆星系的颜色-星等关系

- 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高？
 - 高光度星系星族更年老？

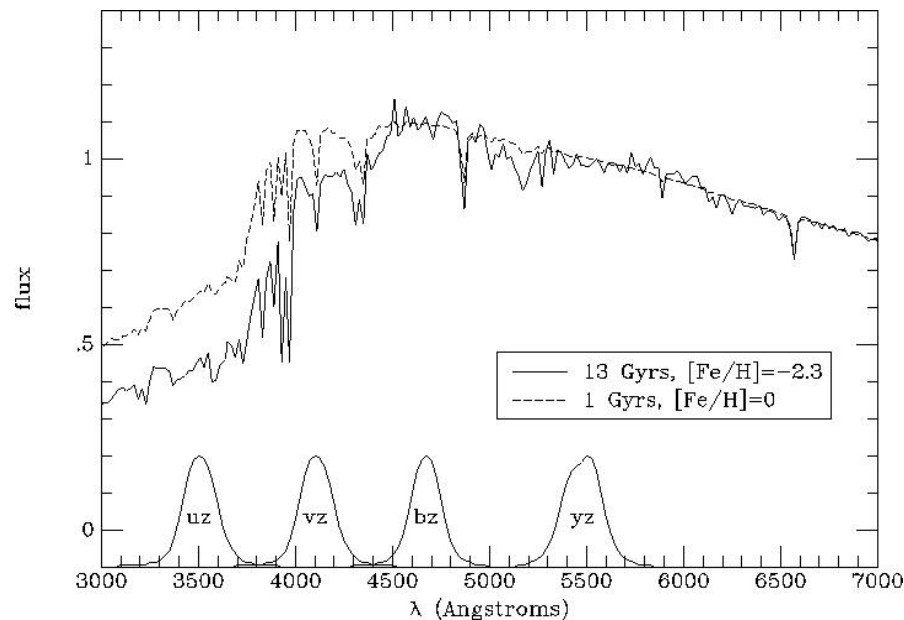
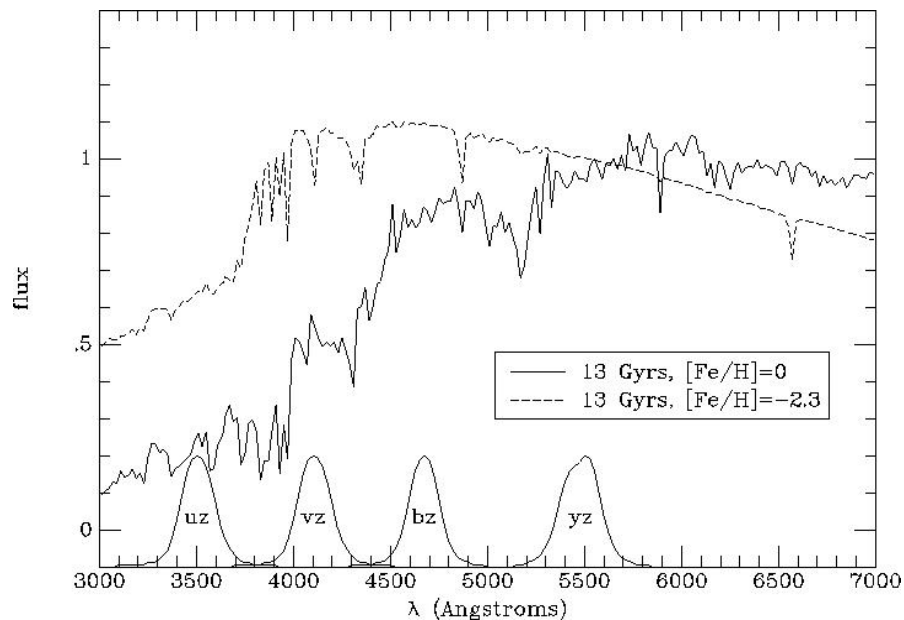


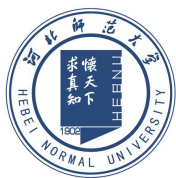
- 高光度，星系金属丰度高；暗星系金属丰度低：金属丰度高的星系颜色红→ CMR关系由于**金属丰度**效应引起
- 高光度星系现在的恒星形成率（SFR）低：早期的SFR高 → 恒星形成早、星族年老 → CMR关系由于**星族年龄**效应引起



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

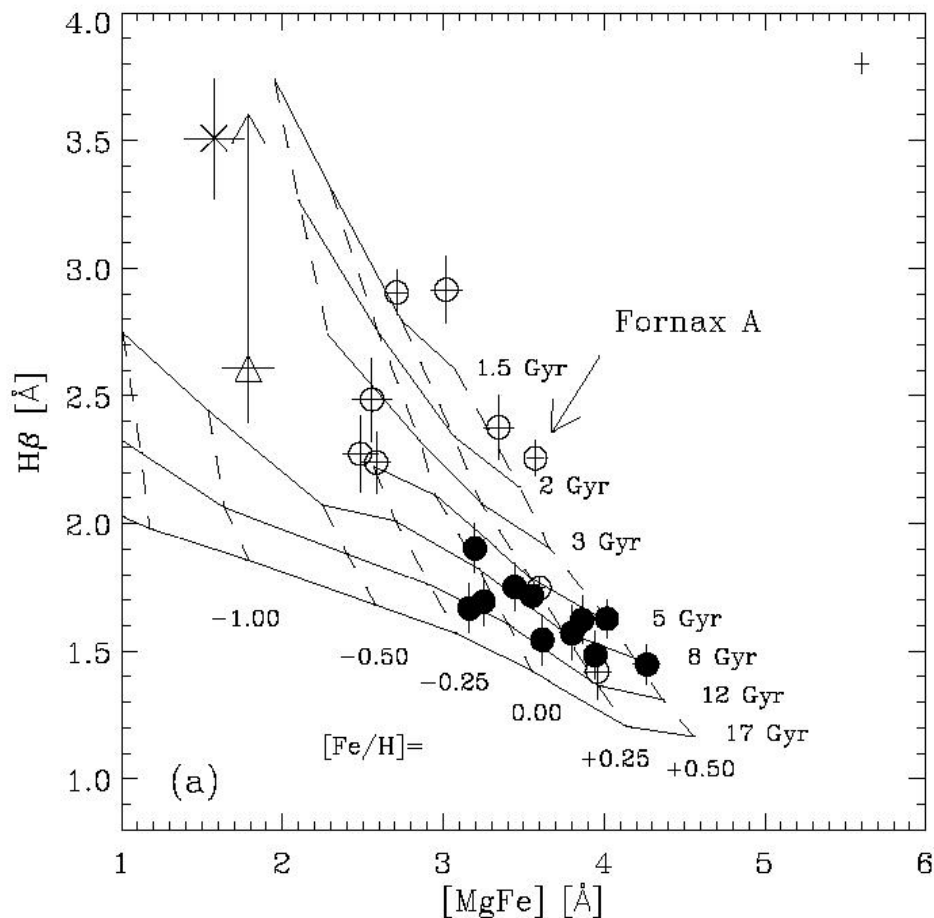


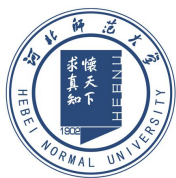


简并效应

- 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H β 、H γ)
 - 富金属的星族有强的**金属吸收线** (如Mg、Fe)
- ➔ 解开**简并效应**

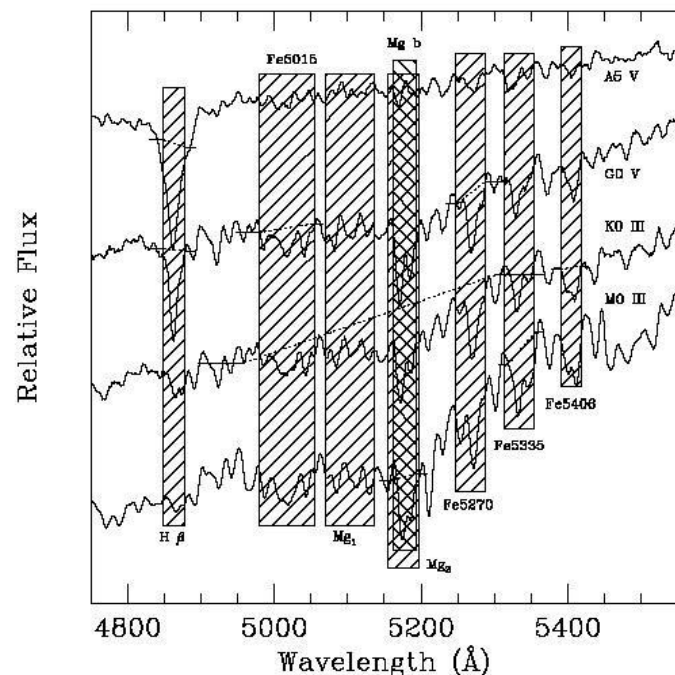
Lick指数





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pseudo continuum
 - **谱指数**: 积分星系观测光谱和pseudo continuum之间的区域, 单位是埃 (Å) 或星等 (mag)

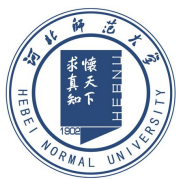


INDEX DEFINITIONS

Name	Index Bandpass	Pseudocontinua	Units
09 H β	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 ₁	5069.125-5134.125	4895.125-4957.625 5301.125-5366.125	mag
12 Mg ₂	5154.125-5196.625	4895.125-4957.625	mag

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

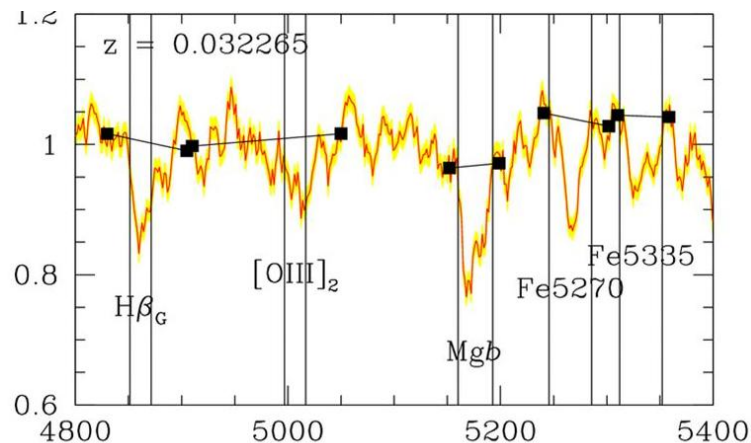
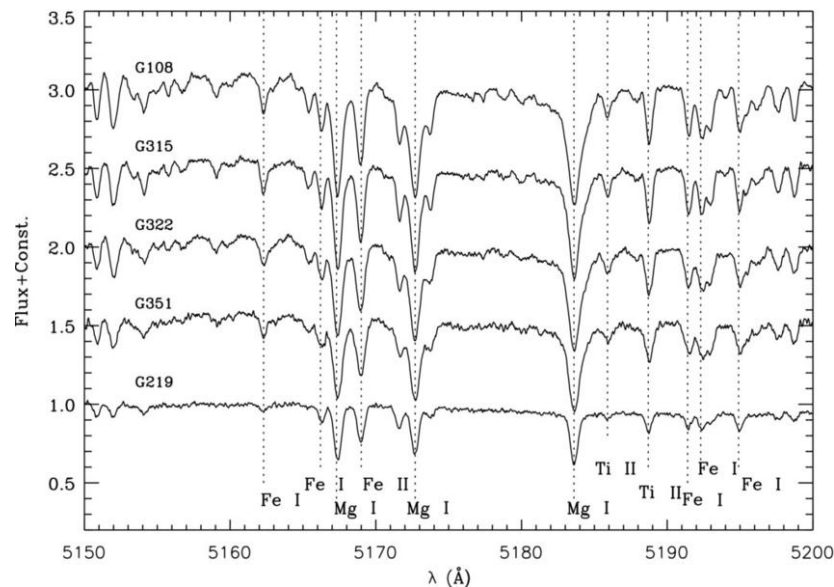
$$Mag = -2.5 \log \left[\left(\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_{\lambda}}{F_{C\lambda}} d\lambda \right]$$

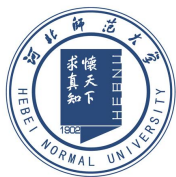


Lick 谱指数

INDEX DEFINITIONS

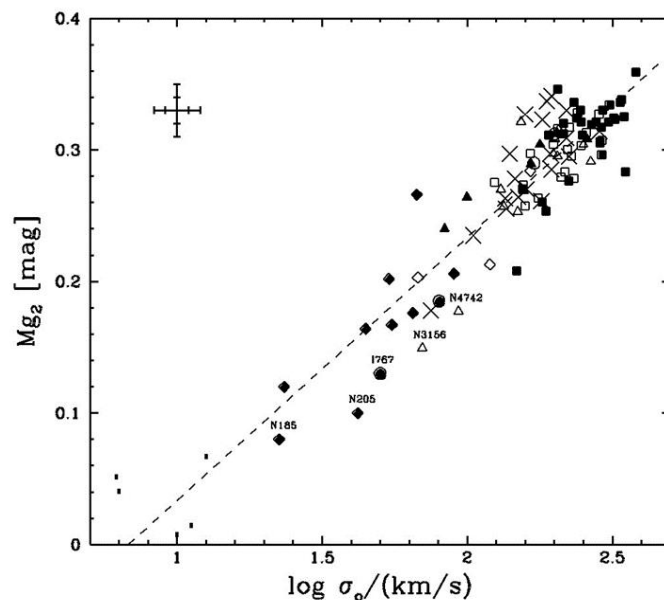
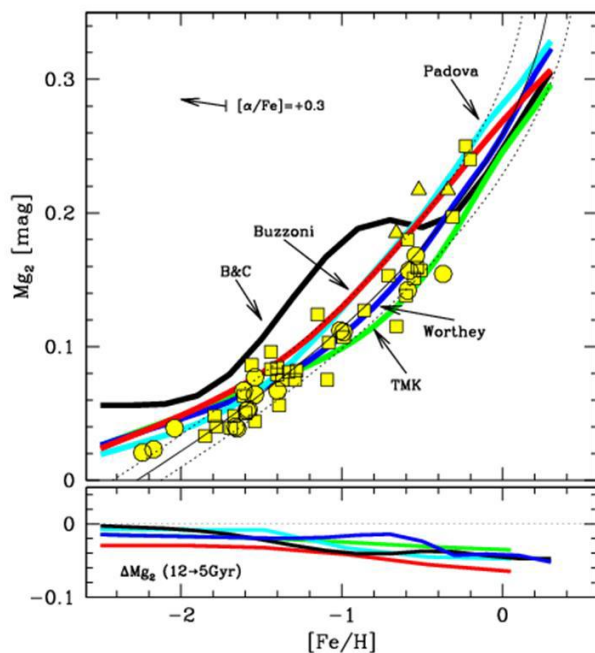
Name	Index Bandpass	Pseudocontinua	Units	Measures	Error ¹	Notes
01 CN ₁	4143.375-4178.375	4081.375-4118.875 4245.375-4285.375	mag	CN, Fe I	0.021	
02 CN ₂	4143.375-4178.375	4085.125-4097.625 4245.375-4285.375	mag	CN, Fe I	0.023	2
03 Ca4227	4223.500-4236.000	4212.250-4221.000 4242.250-4252.250	Å	Ca I, Fe I, Fe II	0.27	2
04 G4300	4282.625-4317.625	4267.625-4283.875 4320.125-4336.375	Å	CH, Fe I	0.39	
05 Fe4383	4370.375-4421.625	4360.375-4371.625 4444.125-4456.625	Å	Fe I, Ti II	0.53	2
06 Ca4455	4453.375-4475.875	4447.125-4455.875 4478.375-4493.375	Å	Ca I, Fe I, Ni I, Ti II, Mn I, V I	0.25	2
07 Fe4531	4515.500-4560.500	4505.500-4515.500 4561.750-4580.500	Å	Fe I, Ti I, Fe II, Ti II	0.42	2
08 Fe4668	4635.250-4721.500	4612.750-4631.500 4744.000-4757.750	Å	Fe I, Ti I, Cr I, Mg I, Ni I, C ₂	0.64	2
09 H β	4847.875-4876.625	4827.875-4847.875 4876.625-4891.625	Å	H β , Fe I	0.22	3
10 Fe5015	4977.750-5054.000	4946.500-4977.750 5054.000-5065.250	Å	Fe I, Ni I, Ti I	0.46	2,3
11 Mg ₁	5069.125-5134.125	4895.125-4957.625 5301.125-5366.125	mag	MgH, Fe I, Ni I	0.007	3
12 Mg ₂	5154.125-5196.625	4895.125-4957.625 5301.125-5366.125	mag	MgH, Mg b, Fe I	0.008	3
13 Mg b	5160.125-5192.625	5142.625-5161.375 5191.375-5206.375	Å	Mg b	0.23	3
14 Fe5270	5245.650-5285.650	5233.150-5248.150 5285.650-5318.150	Å	Fe I, Ca I	0.28	3
15 Fe5335	5312.125-5352.125	5304.625-5315.875 5353.375-5363.375	Å	Fe I	0.26	3
16 Fe5406	5387.500-5415.000	5376.250-5387.500 5415.000-5425.000	Å	Fe I, Cr I	0.20	2,3
17 Fe5709	5698.375-5722.125	5674.625-5698.375 5724.625-5738.375	Å	Fe I, Ni I, Mg I, Cr I, V I	0.18	2
18 Fe5782	5778.375-5798.375	5767.125-5777.125 5799.625-5813.375	Å	Fe I, Cr I, Cu I, Mg I	0.20	2
19 Na D	5878.625-5911.125	5862.375-5877.375 5923.875-5949.875	Å	Na I	0.24	
20 TiO ₁	5938.375-5995.875	5818.375-5850.875 6040.375-6105.375	mag	TiO	0.007	
21 TiO ₂	6191.375-6273.875	6068.375-6143.375 6374.375-6416.875	mag	TiO	0.006	

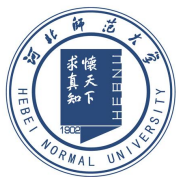




Lick 谱指数

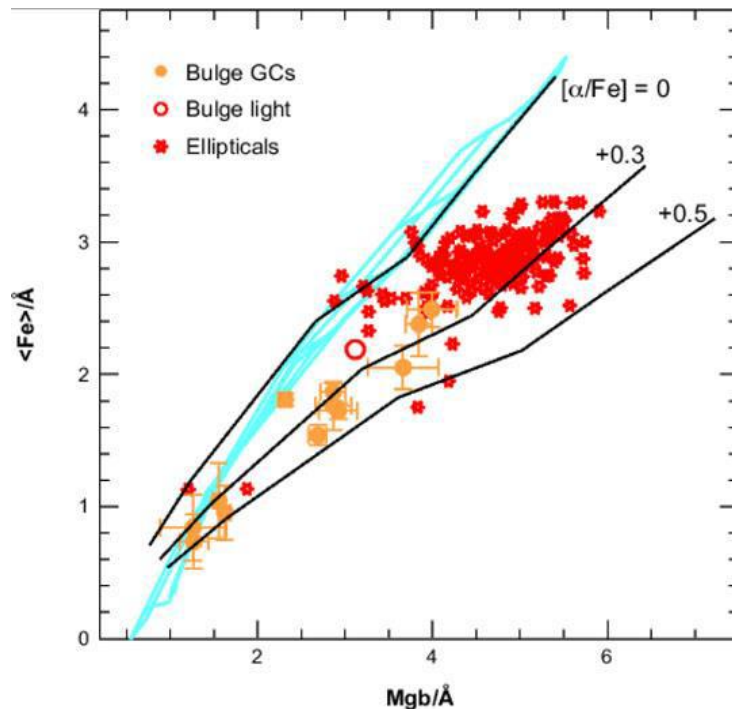
- 星系的年龄和金属丰度简并，可以利用对**年龄**变化敏感的谱指数 (e.g. H β) 和对**金属丰度**敏感的谱指数 (e.g. Mg or Fe) 来解除简并.
- 光度越大的星系，速度弥散越大 (FJR)
 - 速度弥散越大的星系，金属丰度越高
 - **高光度星系，金属丰度富**
- 高光度椭圆星系的颜色红：由于**金属丰度更高**，而不是星族年龄更老引起的.

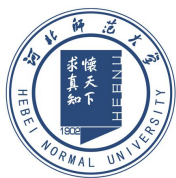




$[\alpha/\text{Fe}]$ 丰度比

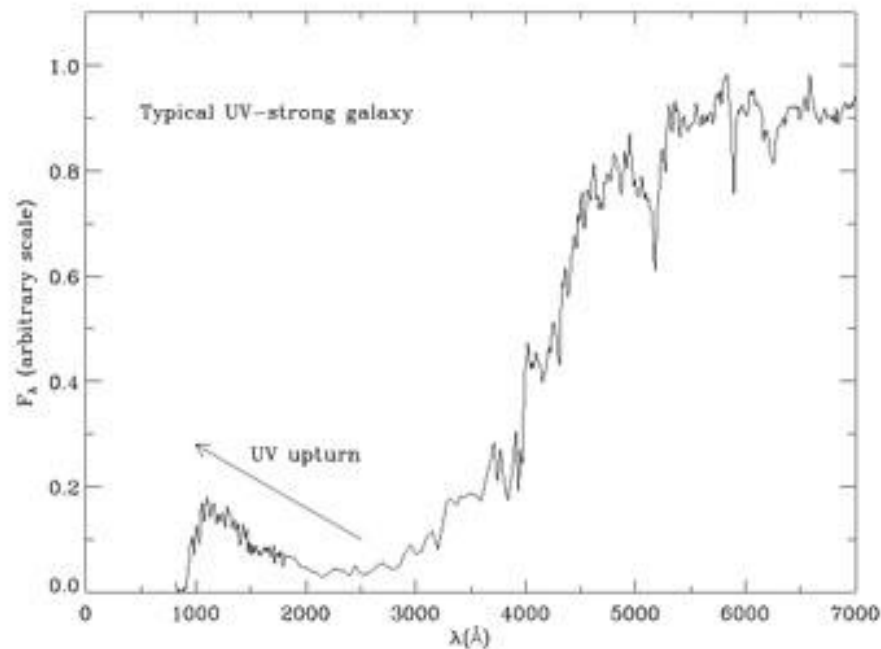
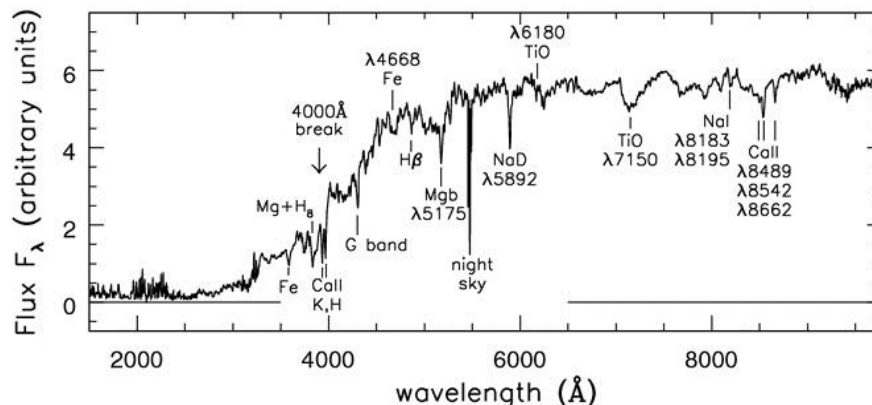
- 椭圆星系中氧、硫、镁等原子 (α 元素) 与铁原子的比值 (数目), 比太阳中 $[\alpha/\text{Fe}]$ 要高:
 α 元素增丰
- 经典星系演化模型只有2个参数: **年龄和金属丰度**; **不能**拟合椭圆星系在谱指数图上的分布
- 新的星系演化模型包括三个参数: Age、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、 $[\alpha/\text{Fe}]$
- α 元素增丰:
 - SN II: α 元素 ($T < 100$ Myr)
 - SN Ia: Fe 元素 ($T > 1$ Gyr)
- 椭圆星系 $[\alpha/\text{Fe}] > 0$: 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

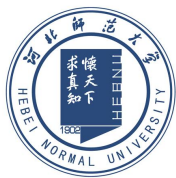




紫外超(UV upturn)

- 椭圆星系有**年老、富金属**星族组成，**没有**年轻的星族，**紫外波段**辐射应该**弱**
- 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**
- UV辐射源：年轻星族、低光度活动星系核、热气体…
- 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





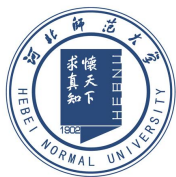
椭圆星系中冷气体

HI Detection Rates in Early-Type Galaxies.

Type	Number	Detected
E	64	5%
E/S0	23	17%
S0	103	20%
Ep, S0p	20	45%
S0a, S0ap	35	43%
Sa, Sap	103	78%

- 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
- 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 $M_{\text{HI}} < 10^8 - 10^9 M_{\odot}$
 - Sc: $M_{\text{HI}} \sim 10^{10} M_{\odot}$
- 少数具有壳或明显尘带等特征的椭圆星系含有大量的冷气体：外部俘获得到？
- No correlation between presence of cool gas and any other property of the galaxy.

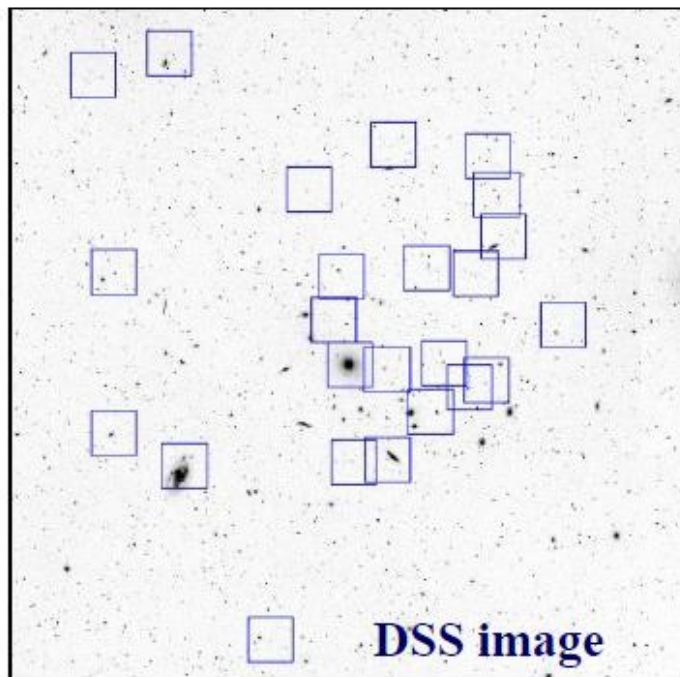




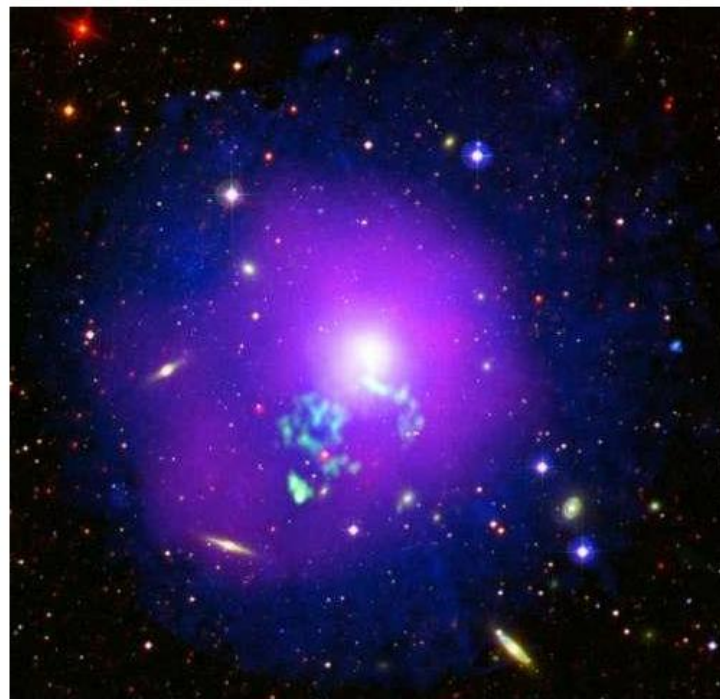
椭圆星系中热气体

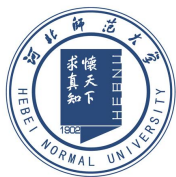
- 椭圆星系中，含有**大量**炽热（气体温度 $T \sim 1 - 3 \times 10^7 \text{K}$ ）、电离气体
- **X射线**波段辐射源：活动星系核；双星；以及**温度 $T \geq 10^6 \text{K}$ 的热气体**
- 热气体太弥漫（**密度低**）：在光学和射电波段发射或吸收少，不可见
- 热气体可延伸到离中心至少 $\sim 30 \text{kpc}$

NGC 5044 Group



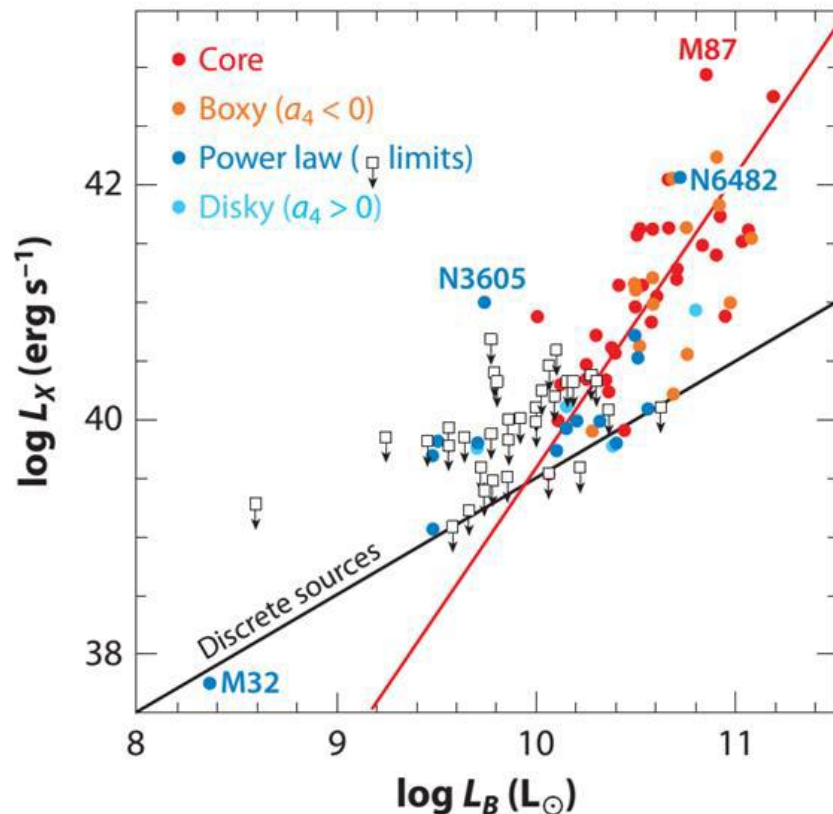
NGC 5044: **WISE** + **SDSS** + **GALEX** + **XMM**





椭圆星系中热气体

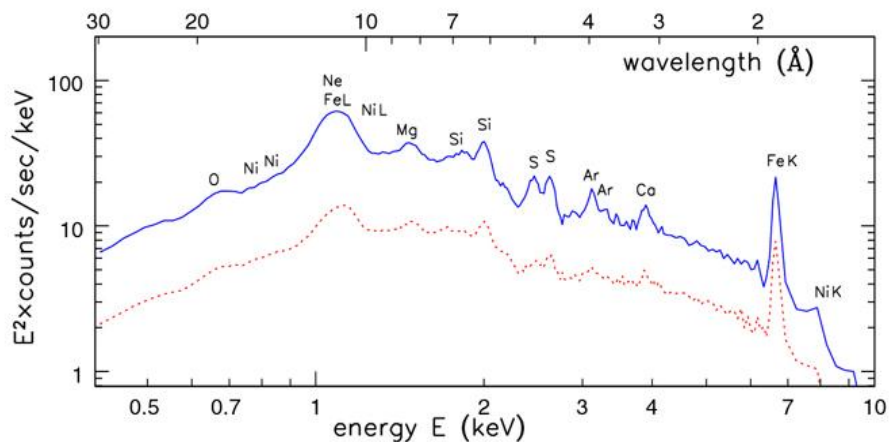
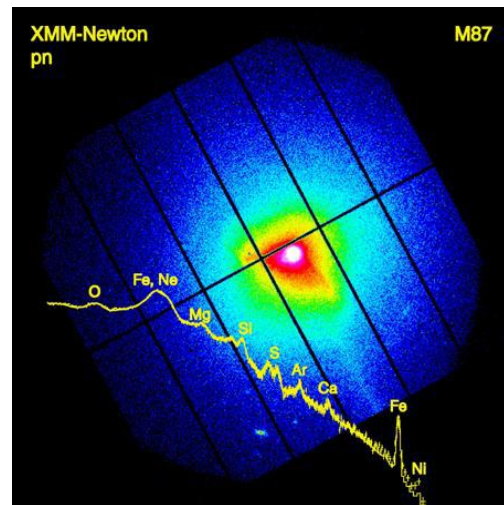
- 光度高/速度弥散大的Es: 热气体多
 - 亮椭圆星系有气体 $10^9 - 10^{11} M_{\odot}$, 占星系质量10-20%
 - 低质量椭圆星系气体少; 较弱的引力难以阻止气体逃入星系际空间
- 热气体来源 (Origin)
 - 椭圆星系热气体和盘星系冷气体质量相当: 星系并合时冷气体被加热
 - 红巨星和AGB星等年老恒星演化到晚期, 外壳膨胀: 星风抛出气体;
 - 位于星团和群中的椭圆星系吸积周围环境中的气体
 - Reservoir + External + Internal



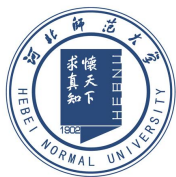
椭圆星系中热气体



- M87 (NGC 4486) : 位于室女座星系团中的椭圆星系，中央区有距离达数千光年的喷流。
- 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



- M87周围热气体的X射线谱：实线为 $r < 4'$ 内气体发射；虚线为 $4' < r < 8'$ 之间气体发射
- X射线谱 → 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
- $Z \sim 0.5 Z_{\odot}$ ：热气体主要是正在变老恒星的外包层物质流出



椭圆星系的球状星团

➤ 球状星团:

- 光度 $L \sim 10^4 - 10^6 L_{\odot}$, 星系晕中最亮的天体
- 存在于所有星系 ($M > 10^8 M_{\odot}$) 和所有环境
- 致密 ($r_h \sim 2 - 4 \text{ pc}$)、点状源 (地面: $d > 20 \text{ Mpc}$; HST: $d > 80 \text{ Mpc}$)
- 星族年老 ($T \sim 10.5 - 13 \text{ Gyr}$), 金属丰度低

➤ 椭圆星系球状星团

- 球状星团数目在不同E星系之间变化很大
 - cD星系NGC1399有7000个已知球状星团
 - M87和NGC3923光度相当, 但M87的亮球状星团是NGC3923的4倍
- 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 ~ 2 倍
- 大质量星系GCs可延伸到 $> 10-30 R_e$; $\sim 100 \text{ kpc}+$: 可研究暗物质晕和星系运动特性

