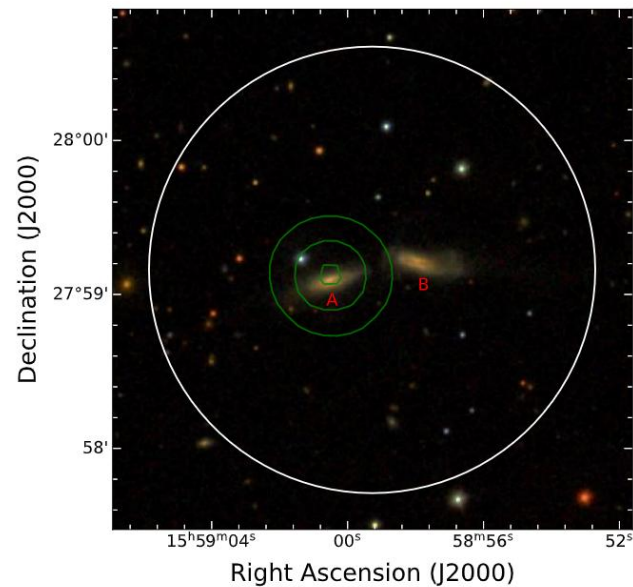
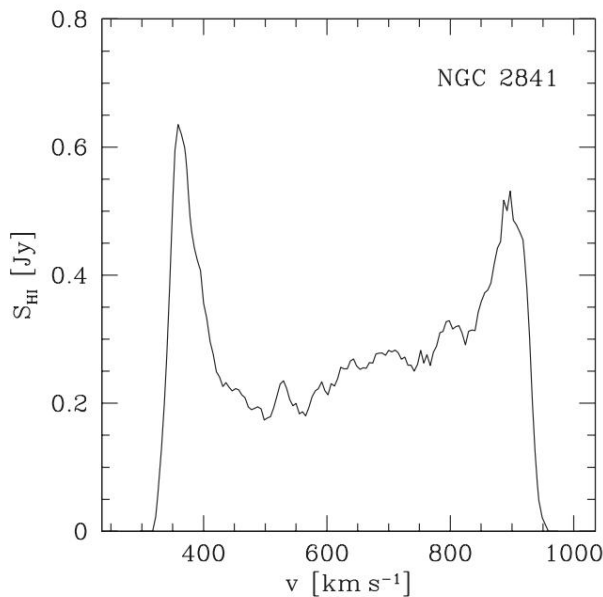


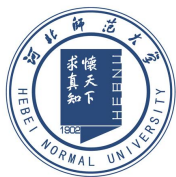
5.2.2 盘中的冷气体

- 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

$$\mathcal{M}(\text{HI}) = 2.36 \times 10^5 \mathcal{M}_{\odot} \times d^2 \int F_{\nu} \left[1421 \text{ MHz} \times \left(1 - \frac{V_r}{c} \right) \right] dV_r.$$



Yu et al. (2022)

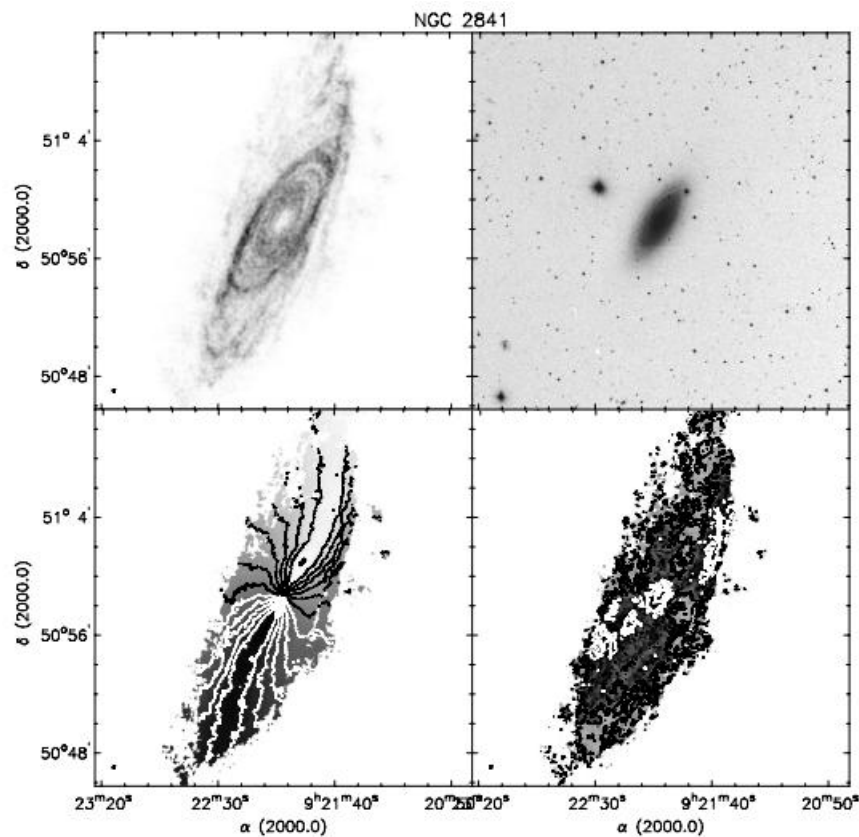


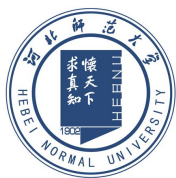
HI的空间分布观测

- 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** → **气体分布**



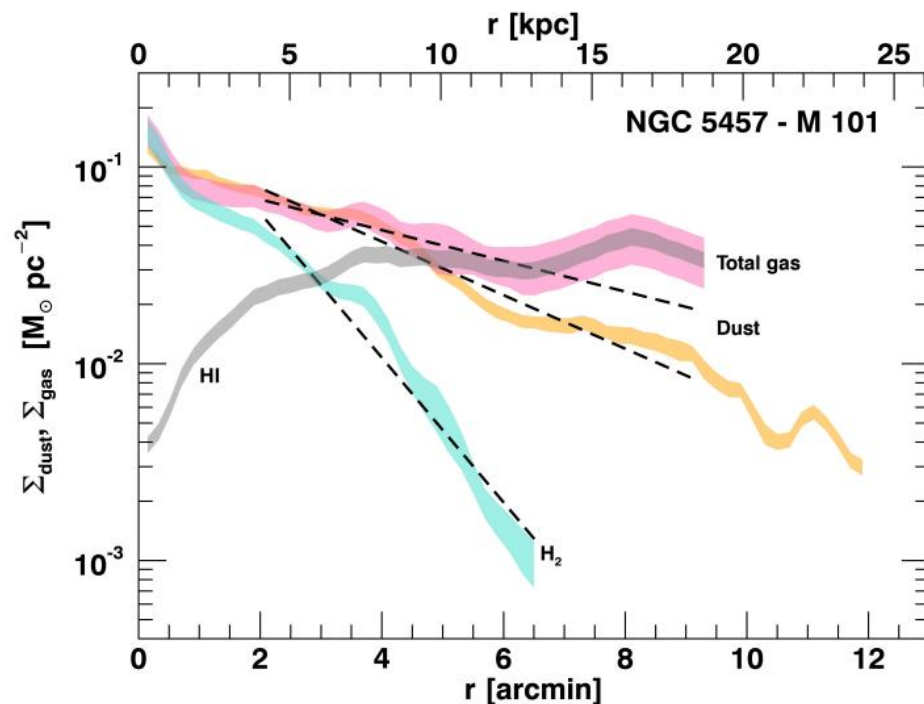
NRAO Very Large Array (VLA)



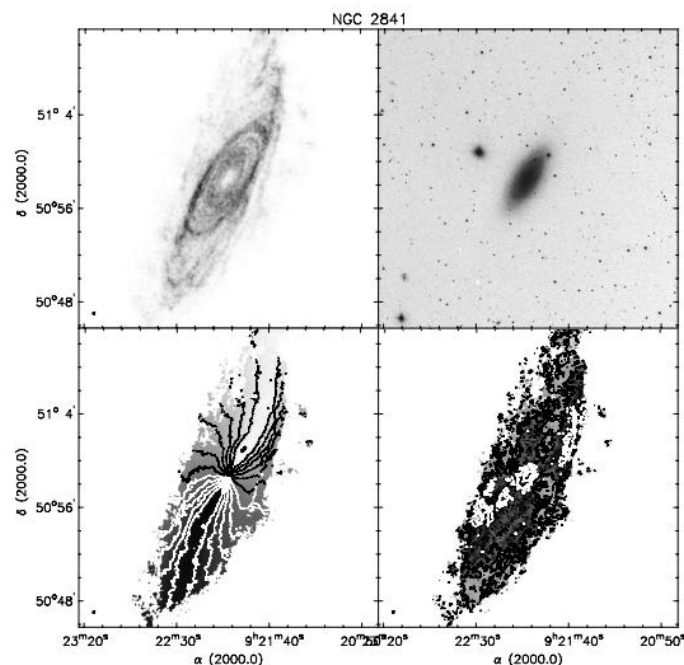


HI气体的径向分布

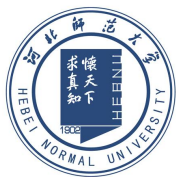
- 盘星系**中心气体贫**，HI主要聚集在直径~ kpc的环内
- HI盘> 恒星盘：S/S0星系HI盘一般延伸到光学尺度 R_{25} 的**两倍**
- 星系光学波段图像不同区域面亮度可能会差数万倍，HI的峰值密度只比平均值大几倍：**气体散布得比星光均匀**



Casasola et al. (2017)

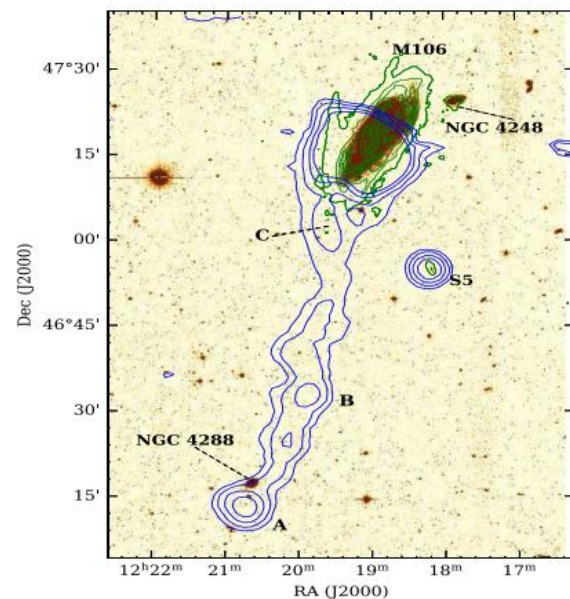
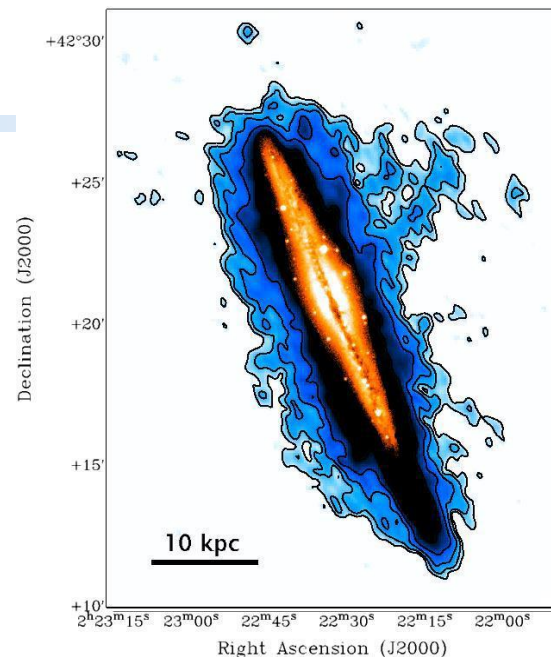


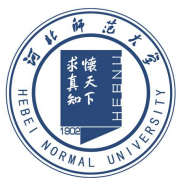
Walter et al. (2008)



HI 气体垂向分布

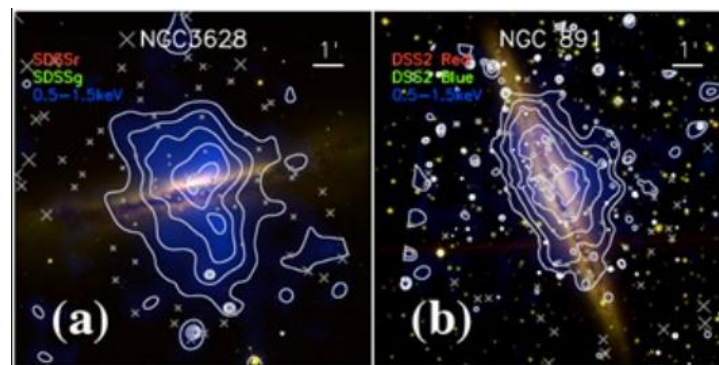
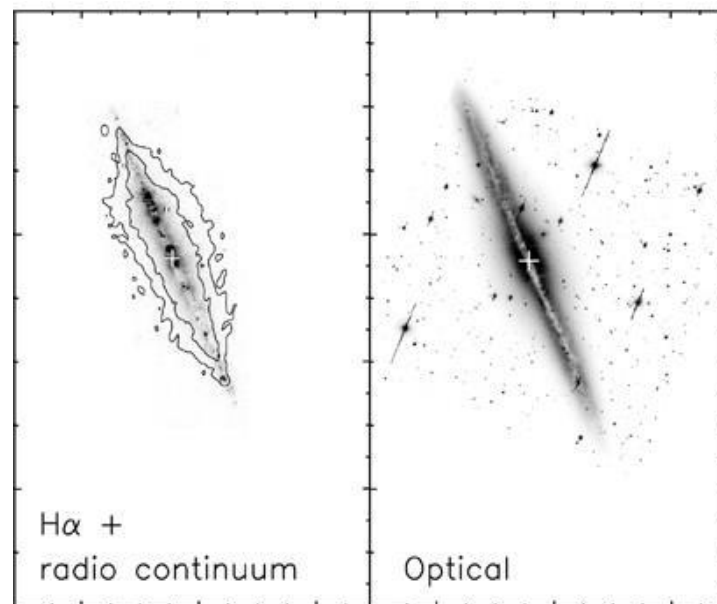
- 星系外面区域($R > R_{25}$)有气体, 但恒星少, 外区恒星形成**效率低**的原因?
 - 大多数气体太弥漫以至不能靠引力束缚自己?
 - 较差自转将塌缩气体云扯碎而不能形成恒星?
 - HI 的边缘是星系**气体盘**的终结, 还是外面还有被星系际辐射**电离**了的气体?
- 盘星系的气体一般分布于星系盘**中平面附近、很薄的层中**
- 但也有**例外**, 如NGC891:
 - 盘内致密的气体层被较弥漫的HI包围着, 在中平面上方和下方方向外延伸到~5kpc
 - 延展的气体可能是被活跃的恒星形成**推出**盘外:**气体喷泉**?
 - 星系南侧 (图中下方) 的HI气体比北侧多得多; 盘的外部HI分布不对称: **吸积**?



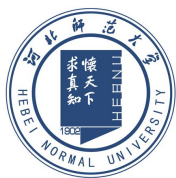


电离 H (HII) 分布

- 光学波段：一条薄的吸收尘埃带，将星系平分（右图）
- H α 发射（左图）
- 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 α 分布**相似**
- 射电连续发射和H α 分布延展：紫外光子和快电子都能**逃离**星系盘 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**

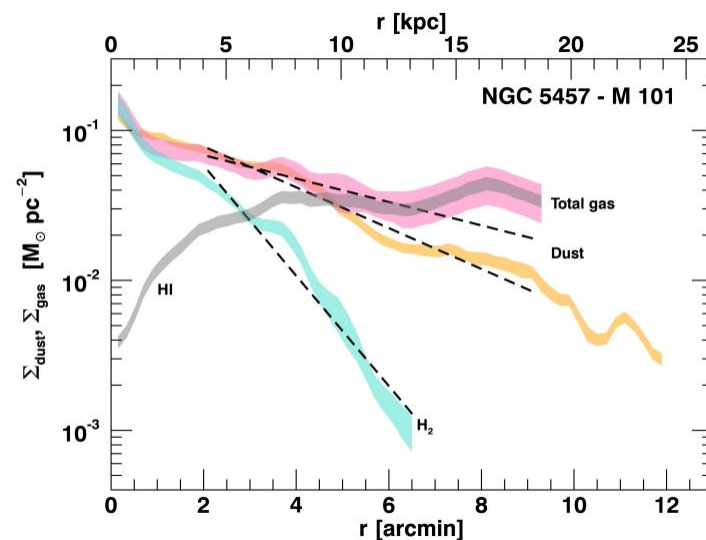
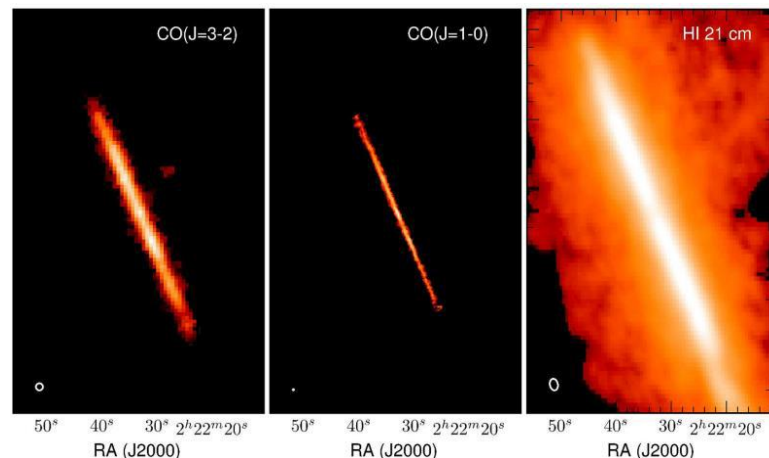


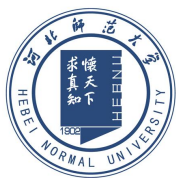
Li et al. (2013)



冷分子氢 H_2

- 中性氢辐射在cm波段，分子氢辐射在mm波段：H₂没有电偶极辐射，常利用CO谱线，间接探测分子氢的分布
- 劣势：分子气体的观测没有HI观测灵敏
 - 现有的cm波段接收机比mm波段更灵敏
 - CO分子与H₂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





富气体程度

➤ $M(\text{HI})/L_B$ 与星系形态关系

■ S0、Sa星系：

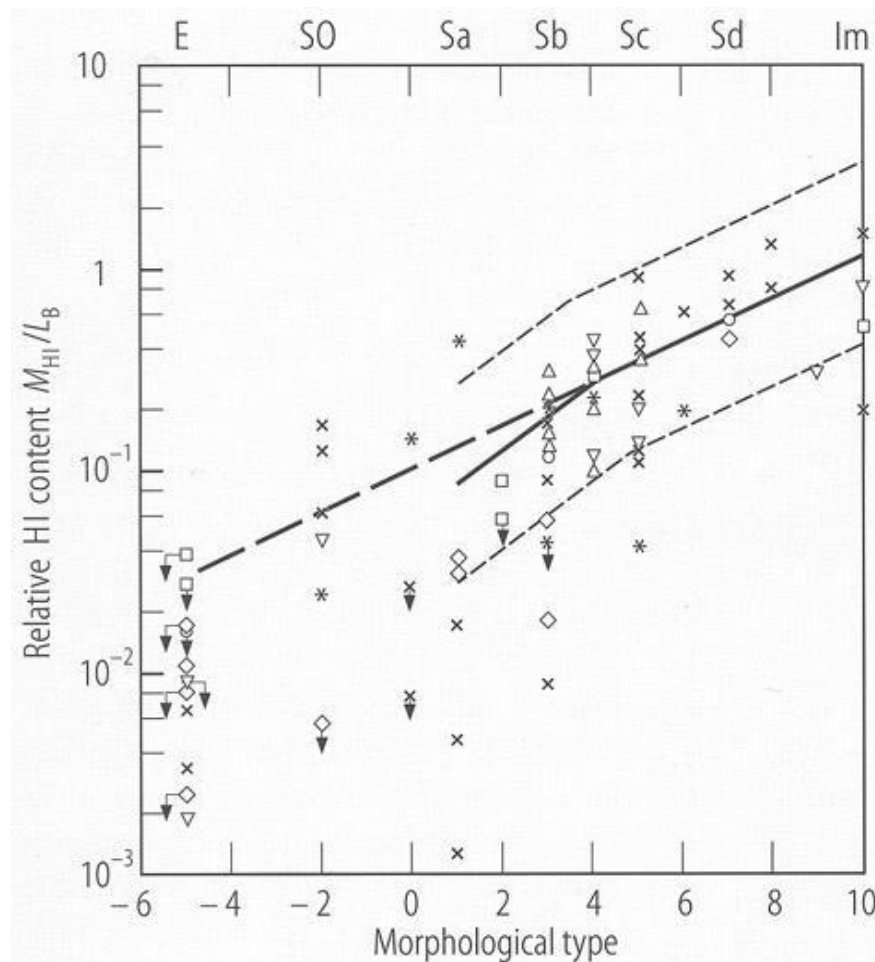
$$M(\text{HI})/L_B \sim (0.05 - 0.1) M_{\odot} / L_{B,\odot}$$

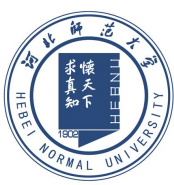
■ Sc、Sd星系：

$$M(\text{HI})/L_B \sim (0.5 - 1.0) M_{\odot} / L_{B,\odot}, \text{ 约大10倍}$$

➤ 晚型盘星系消耗其气体速度慢，内部仍然有**丰富**的HI气体

➤ 晚型盘星系的星光较小部分来自较老、较红的恒星；主要辐射来自炽热的**年轻恒星**





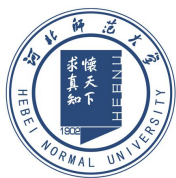
S0 星系中的气体

- arms absent ← defining characteristic
- red color
- few young stars
- minimal star formation
- little gas
- massive ($0.5-3 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$)
- dense environments
- high central surface brightness/ large bulge



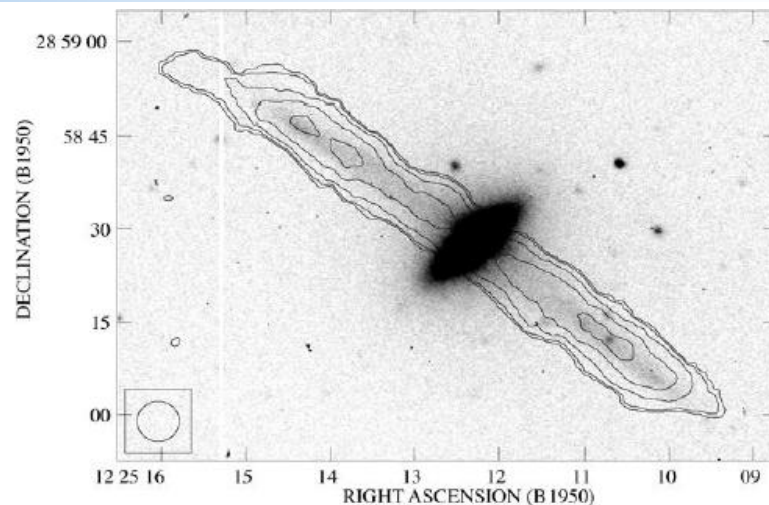
- ◆ 大多数透镜星系的星系盘中气体少得几乎不可测量
- ◆ 恒星形成或某些其他过程已经耗尽气体：恒星化石

Lenticular galaxies are disc galaxies which have **used up** or **lost** most of their interstellar matter and therefore have very little ongoing star formation.

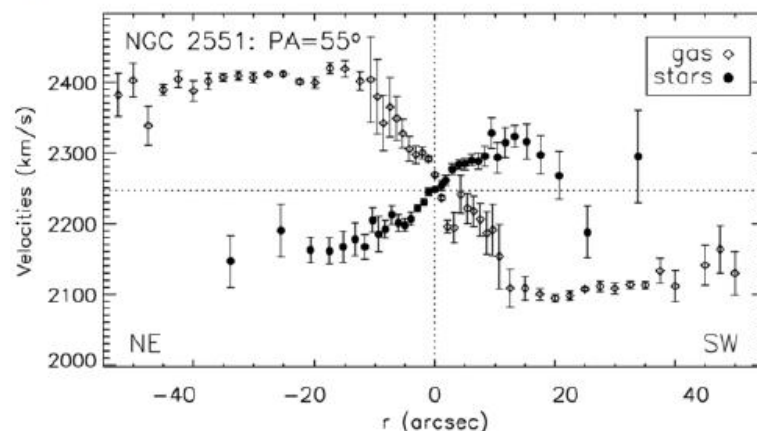


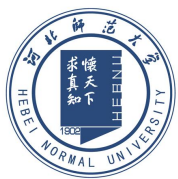
S0星系中的气体——特殊S0星系

- ◆ 少数S0星系具有 $M_{\text{HI}} \geq 10^{10} M_{\odot}$ 原子氢气体，与富气旋涡星系中HI一样多
- ◆ 气体富S0星系特点
 - ◆ 气体往往不在星系盘内，气体的轨道运动也与盘星不同，而是形成一个围着星系的倾斜环
 - ◆ 气体轨道是一个垂直于星系盘的极环，如NGC7576，由尘埃、气体和恒星组成的细环围绕星系的极运动，而星系的盘上几乎没有冷气体
 - ◆ 气体的转动偶尔是逆行的，即同盘星的转动反向，如NGC2551。
- ◆ 因为这些气体的角动量与中央星系非常不同。一般认为，它们是在星系的中心天体形成后，星系晚期俘获的。

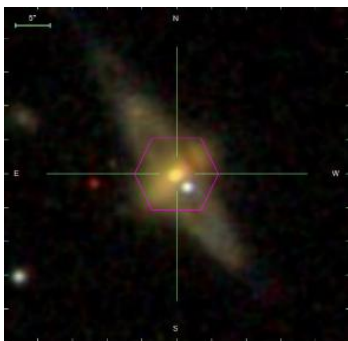


星系NGC 7576 (S0) 的V波段像；
轮廓线显示极环内HI气体质量。

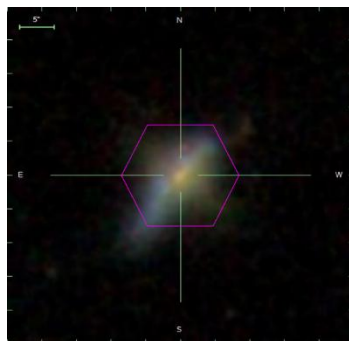




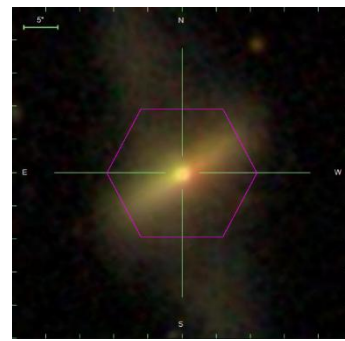
Polar Rings



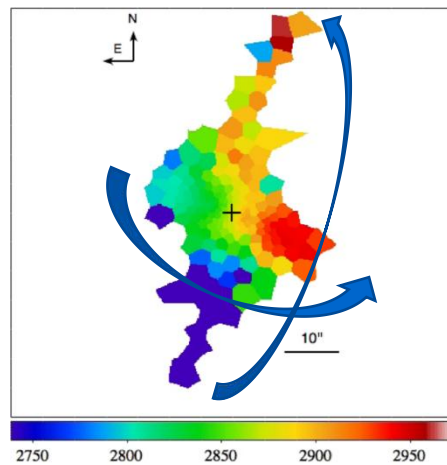
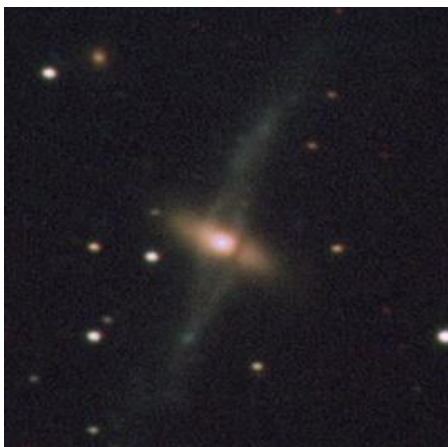
8623-1902



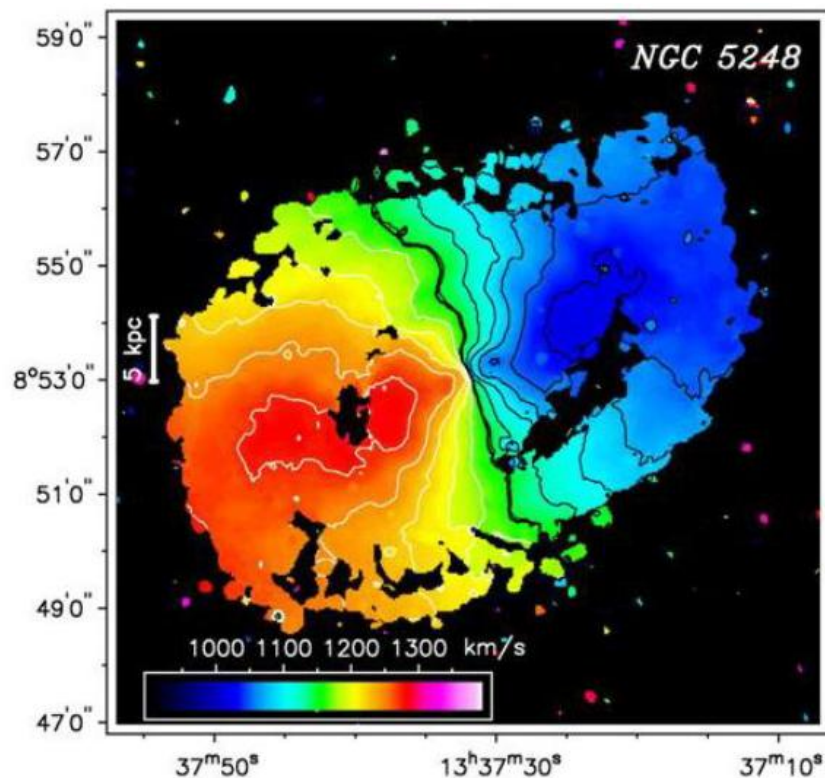
9876-3702



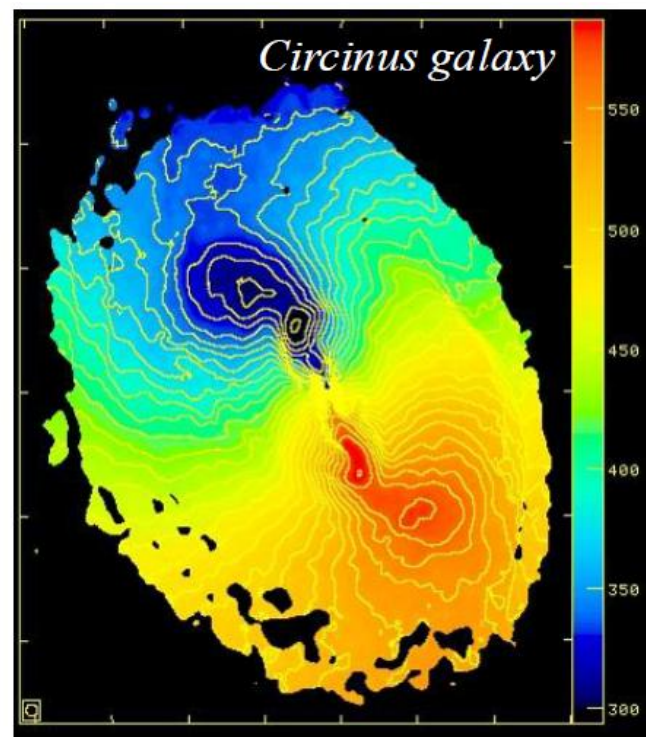
9871-6104



5.3 盘星系气体运动和质量

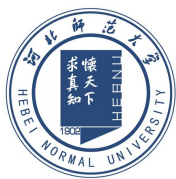


NGC5248, $d = 17.7 \text{ Mpc}$, $V_{\text{sys}} = 1151 \text{ km/s}$



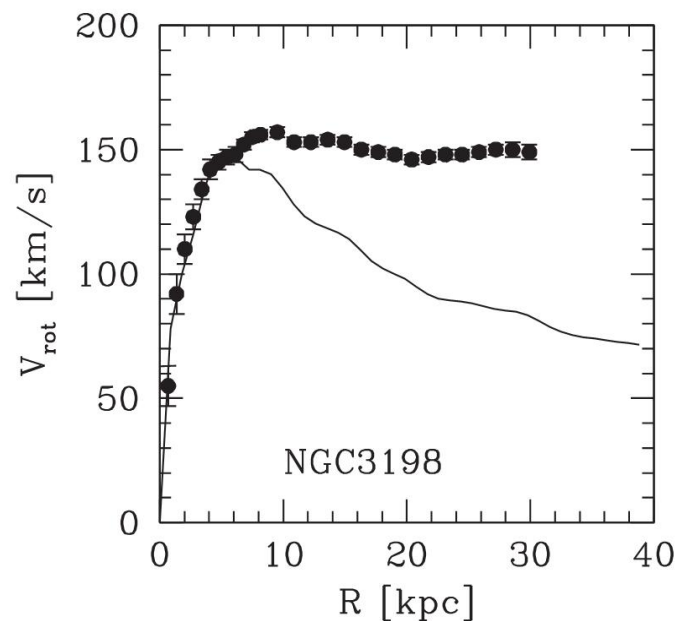
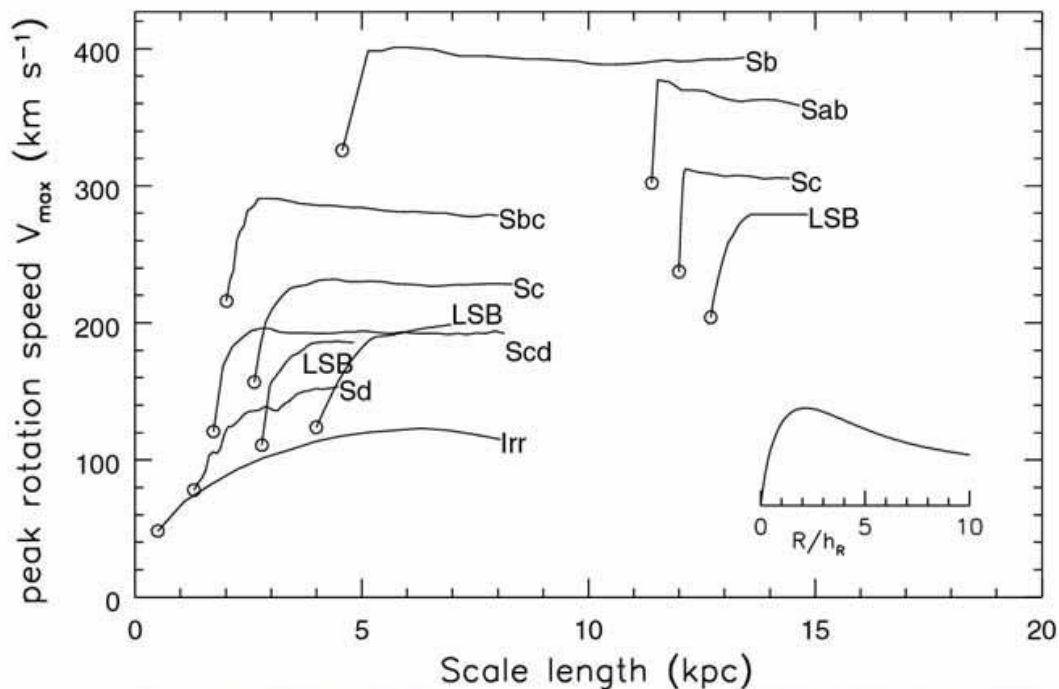
ESO 97-G13, $d = 13 \text{ Mly}$, $V_{\text{sys}} = 426 \text{ km/s}$

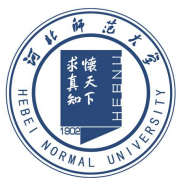
- 利用射电观测，不仅可以测量**气体分布**、**密度**和**质量**，也可以测量星系中气体的**运动**：星系退行速度 (V_{sys}) + 转动速度 (蓝移、红移) → **星系质量**



5.3.1 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_{\max} 处 $V = V_{\max}$ ； $R > R_{\max}$ 后， V 基本保持不变

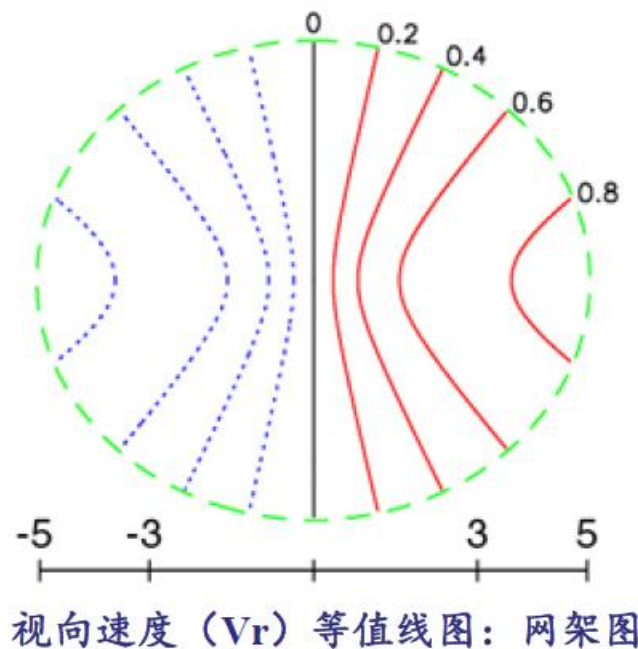
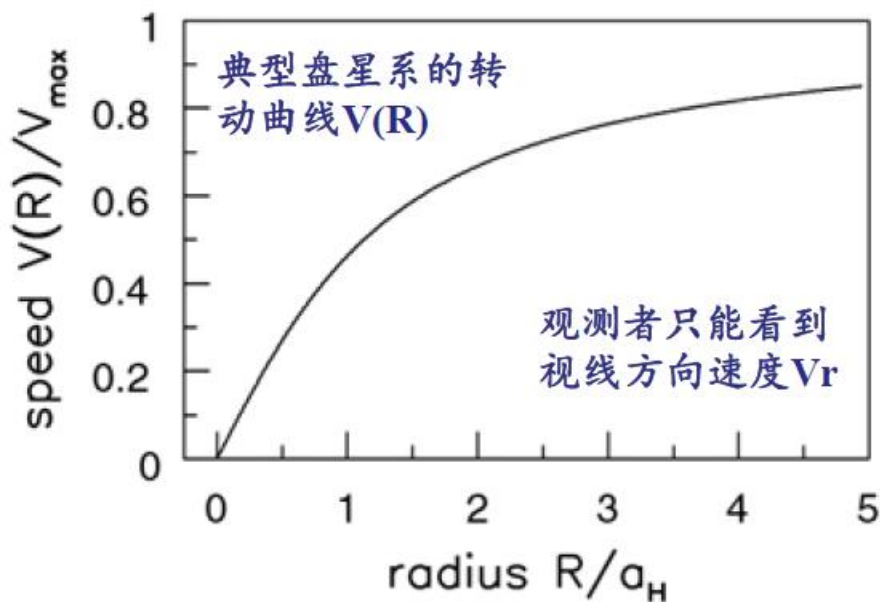




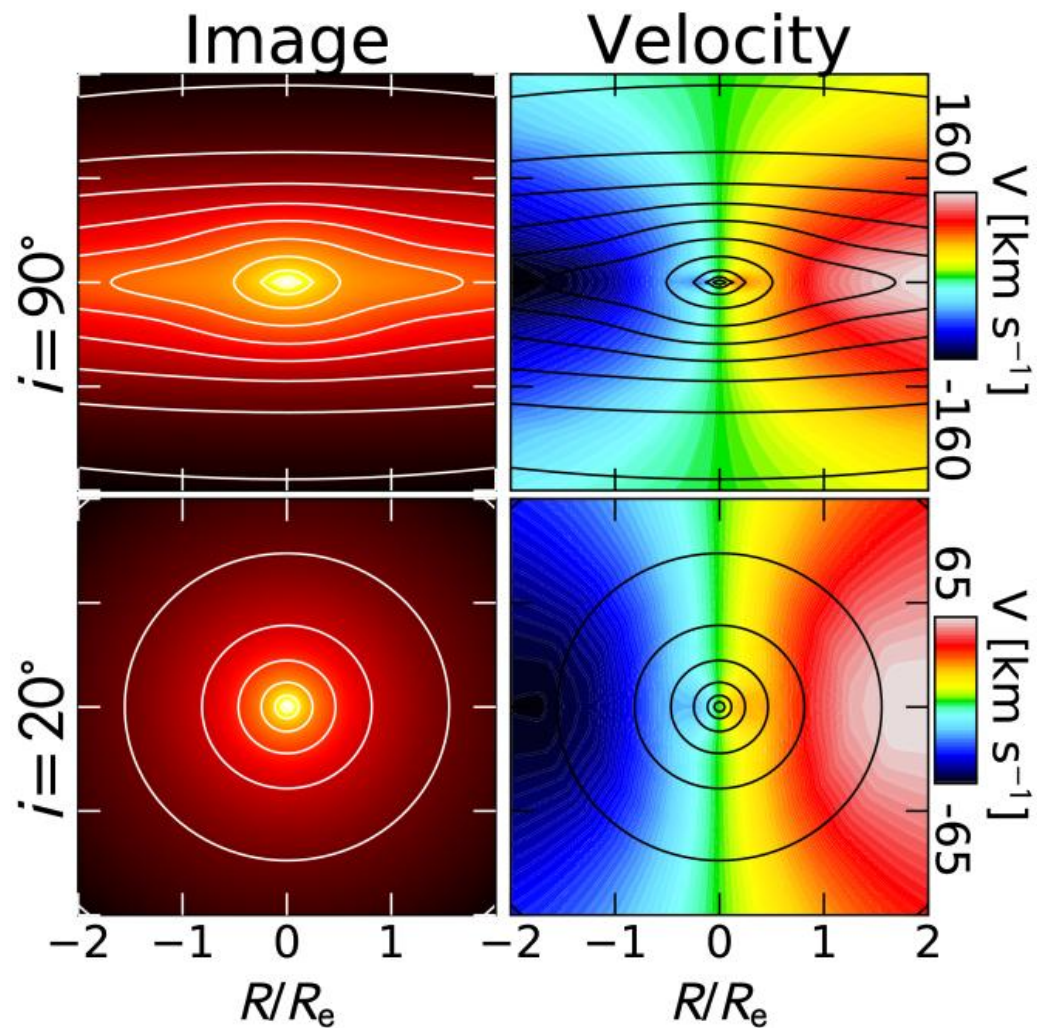
网架图

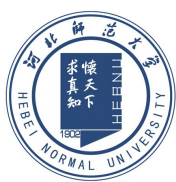
- **网架图** (spider diagram): V_r 的恒值线, 即具有相同 $V_{\text{sys}} + V(R)\cos\phi\sin i$ 值的连线图 (速度图二维分布)

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



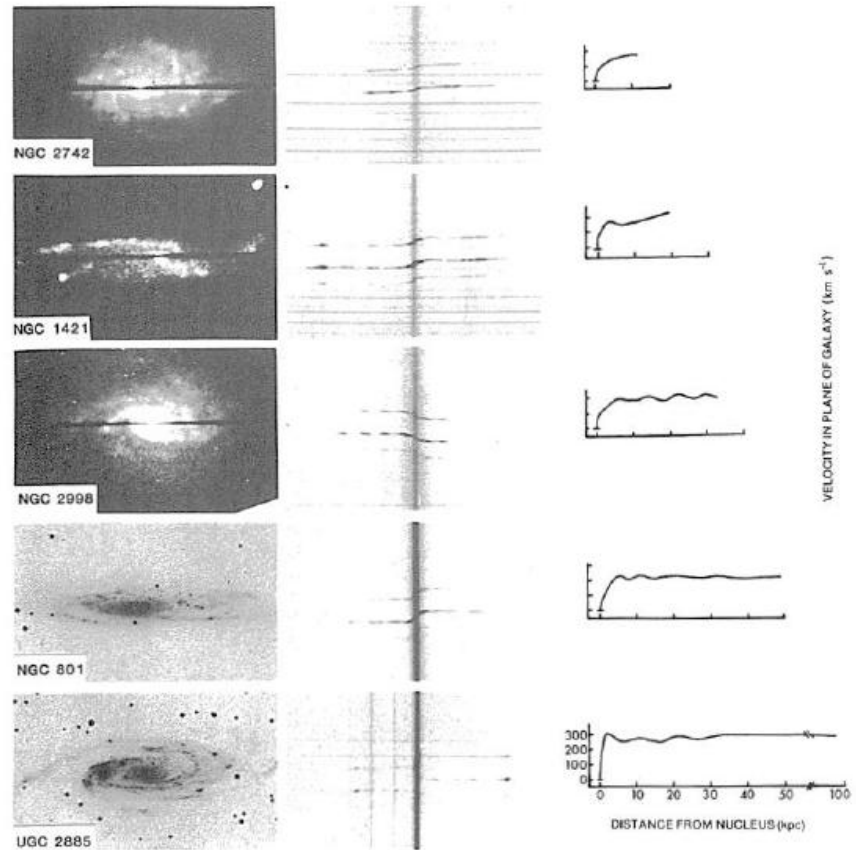
网架图



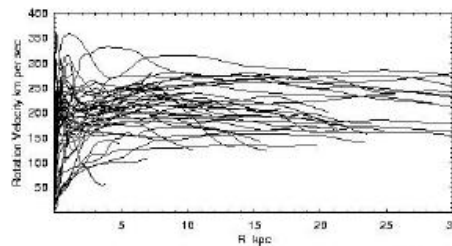


5.3.2 盘星系中暗物质

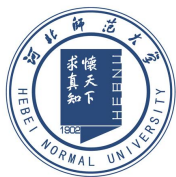
- ◆ Rotation curves of spiral galaxies can be determined from Doppler shifts in **spectral lines** (e.g. $H\alpha$)
- ◆ V_r stays roughly **constant** with **r** as far as luminous matter can be detected
- ◆ Masses range from 10^{11} to $2 \times 10^{12} M_{\odot}$
- ◆ Matter is likely not confined to the disk
- galaxy structure is **unstable** to this amount of mass
- ◆ Most likely distributed **spherically**



Rubin et al.(1978)

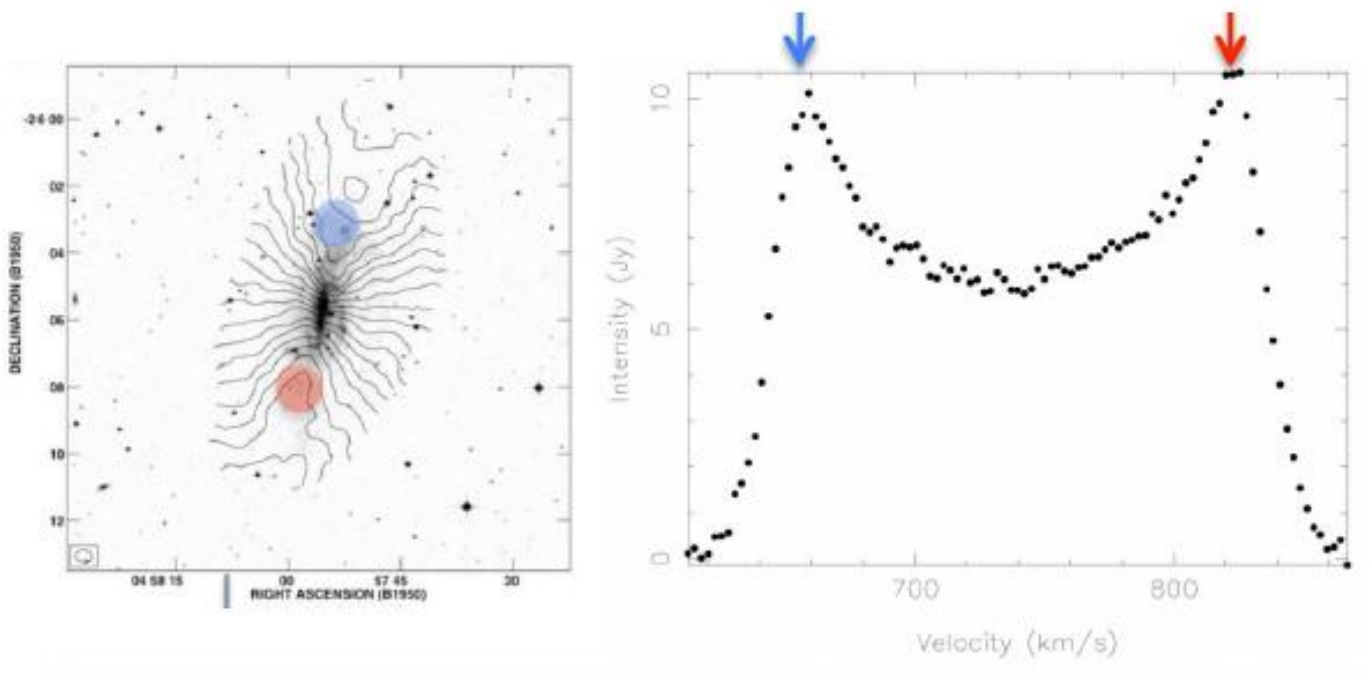


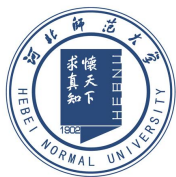
Dark Matter in Galaxies



5.3.3 Tully-Fisher 关系

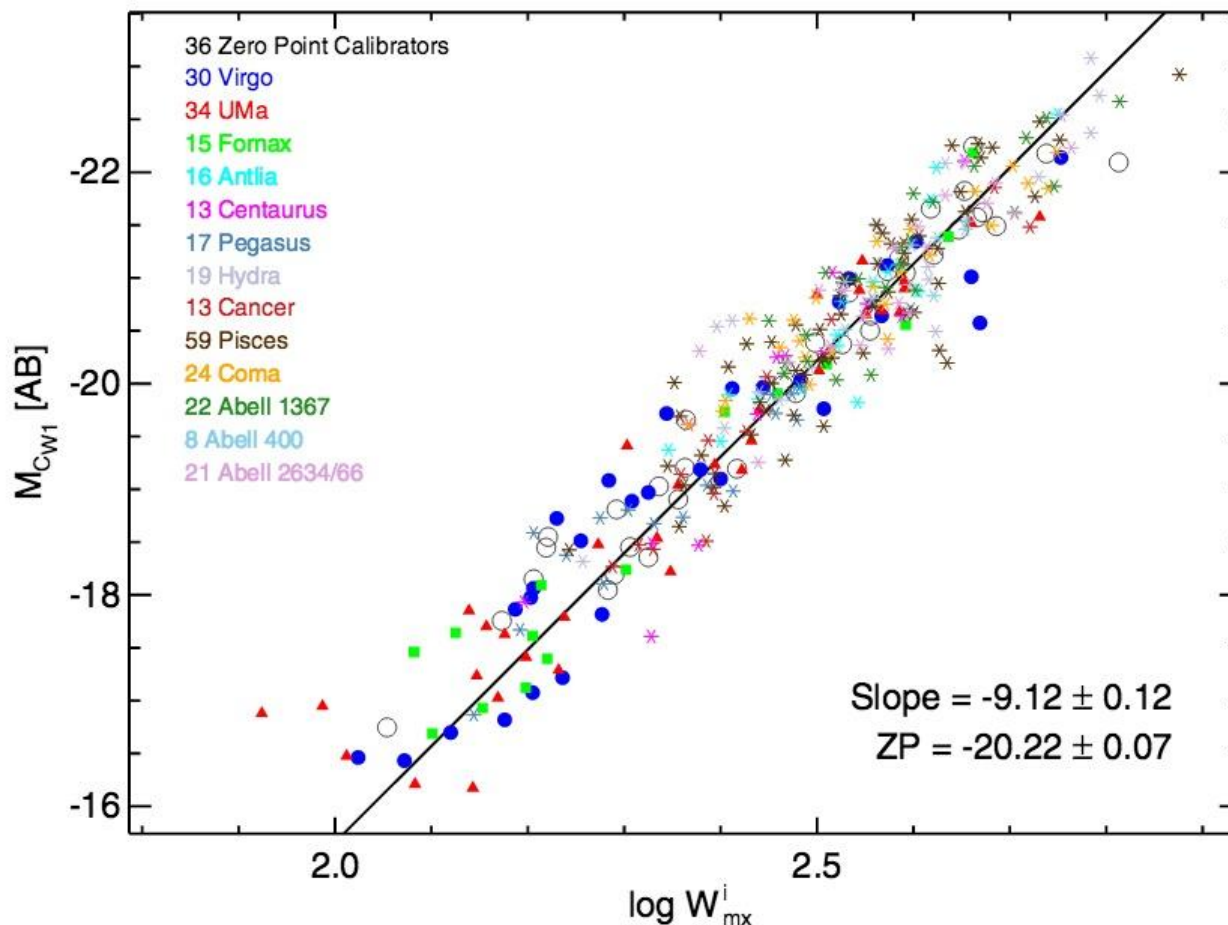
- 盘星系的外部气体 $V(R)$ 几乎恒定，星系大部分气体具有相同的速度 V_{\max}
- 利用射电望远镜，测量每个速度处的气体有多少，可得到速度--流量整体轮廓
- 气体在较大的半径范围，有几乎恒定速度 V_{\max} ：大多数发射在极大速度处拥挤成两个峰，形成双角形轮廓
- 双角形轮廓两峰间隔是： $W \approx 2 V_{\max} \sin i$



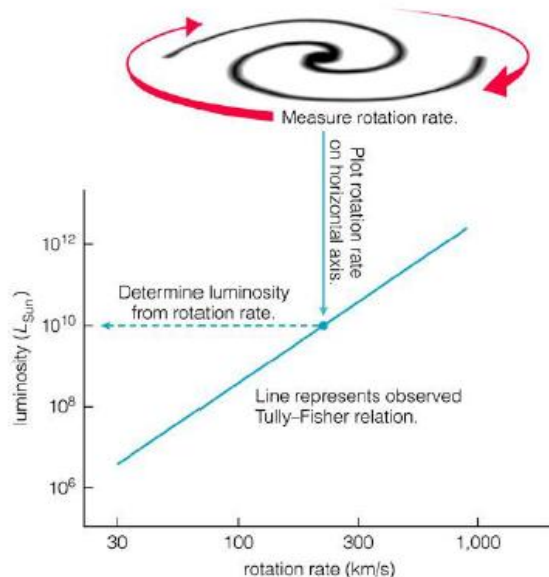


Tully-Fisher 关系

- 塔利-费舍尔关系(TFR): 是布伦特·塔利和理查德·费舍尔在1977年发现的关于旋涡星系**速度宽度 W** (也可表示为 V_{\max}) 和**光度**之间的经验关系。



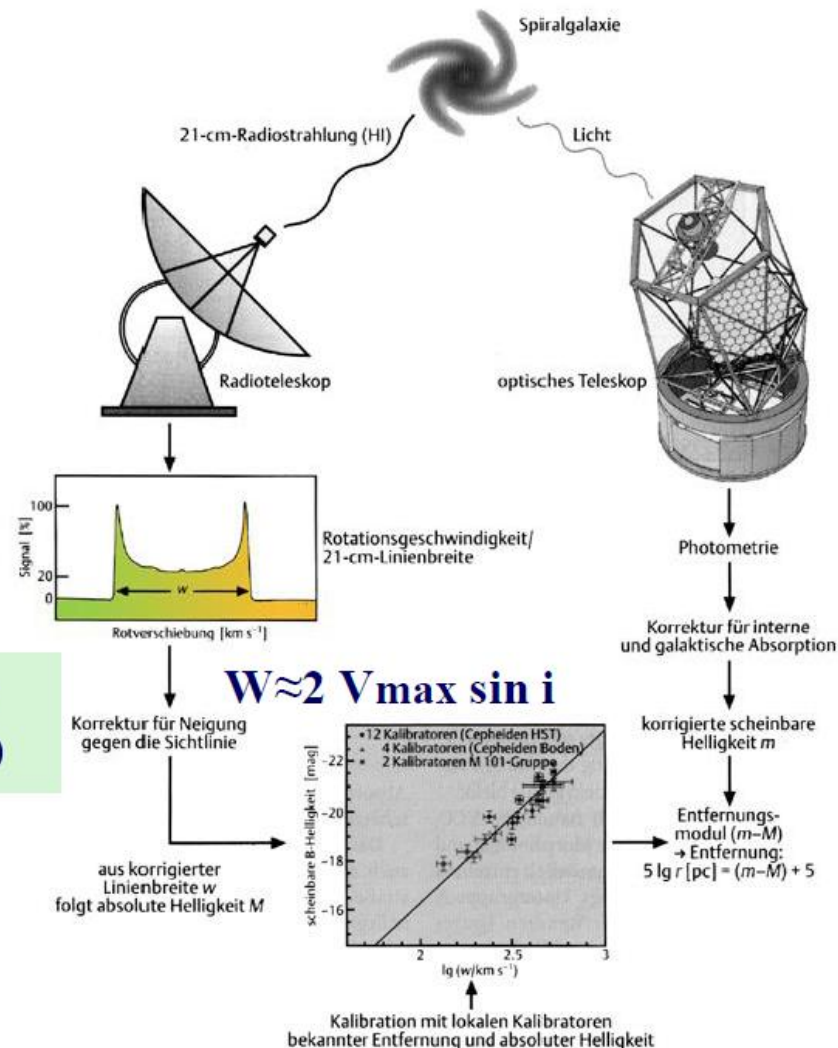
Tully-Fisher 关系

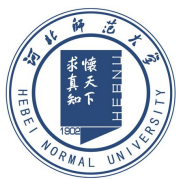


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

星系的转动速度随其光度增加，大致遵循 $L \propto V_{\max}^\alpha$ ， $\alpha \sim 3-4$ (α 与观测波长有关)

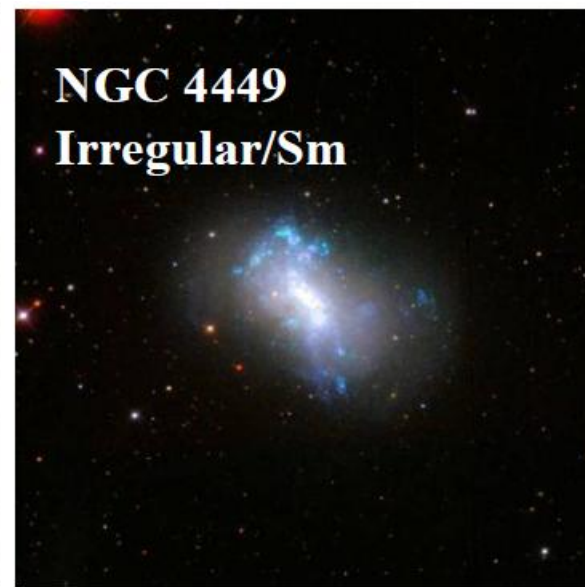
$$\frac{L_I}{4 \times 10^{10} L_{I,\odot}} \approx \left(\frac{V_{\max}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4$$

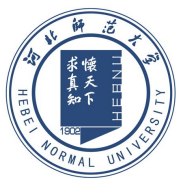




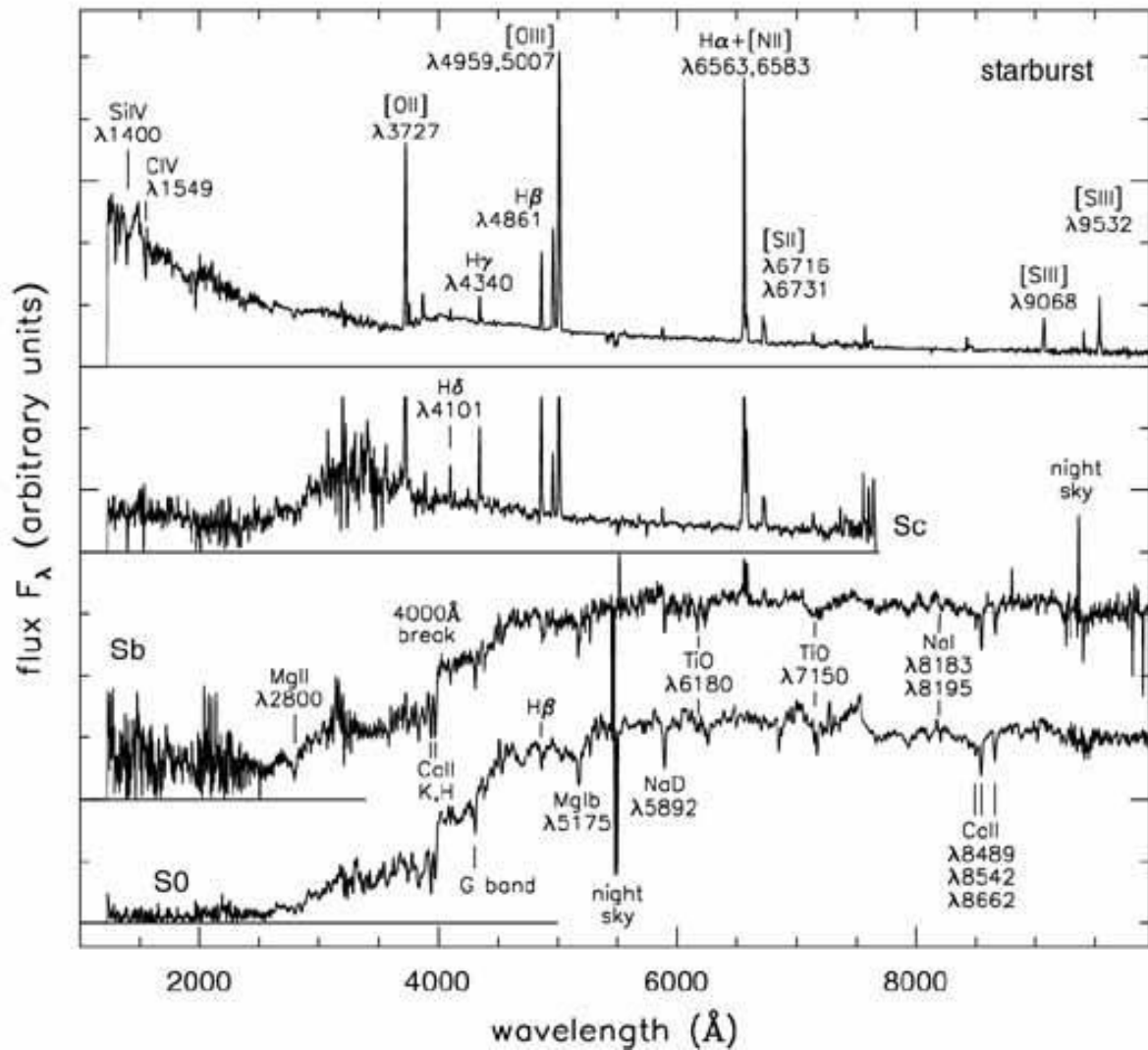
5.4 盘星系序列

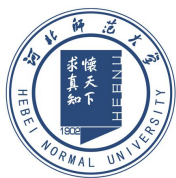
- 形态分类：有无**旋臂**、**核球**的大小、旋臂的**缠绕程度**
- 物理特性：颜色、面亮度、气体、星族、恒星形成等



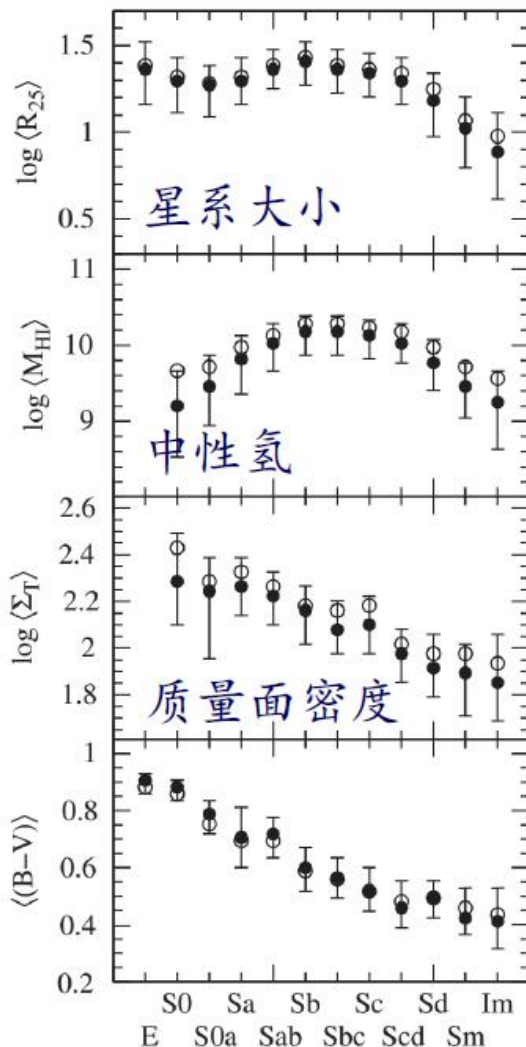
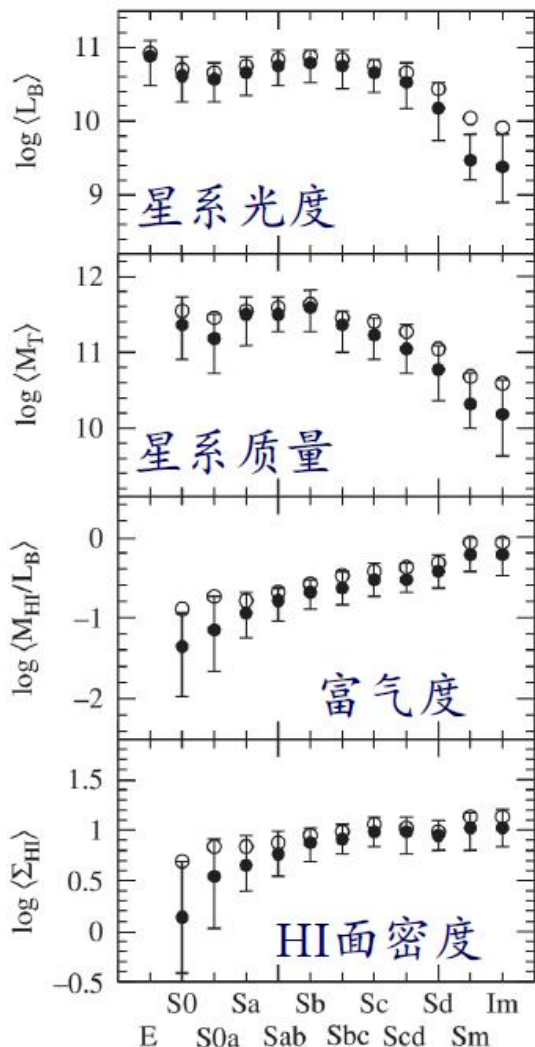


星系光谱





星系特性



- ◆ E→Sc: 星系光度 (L_B)、大小 (R_{25})、和质量 (M_T) **基本保持不变**
- ◆ Scd→Im: 星系光度、大小和质量快速的**减小**
- ◆ Sb附近的星系中性氢最丰富
- ◆ E→Im: 中性氢面密度 ($M_{HI}/L_B; M_{HI}/M_{tot}$) **增加**, 晚型星系HI气体**丰富**
- ◆ E→Im: 星系质量面密度 (Σ_T) **下降**: 核球质量面密度比星系盘高; 从E到Im, 核球的贡献变弱, 面密度下降
- ◆ E→Sd: 星系颜色变**蓝**, 气体更**丰富**; SFR更**高**

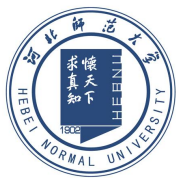
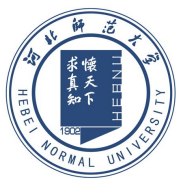
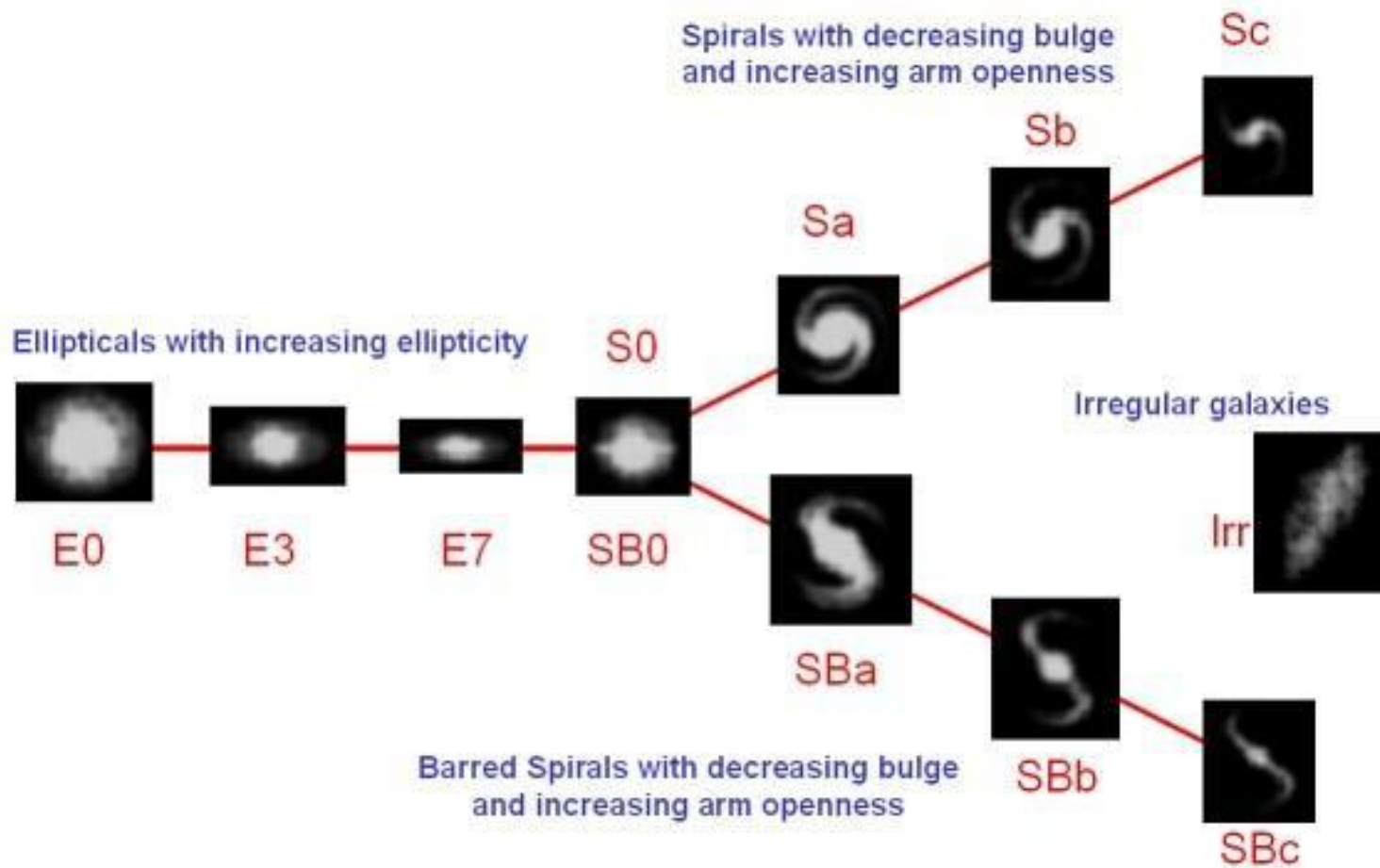


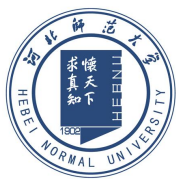
Table 5.1 The sequence of luminous disk galaxies

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



5.5 旋臂和棒

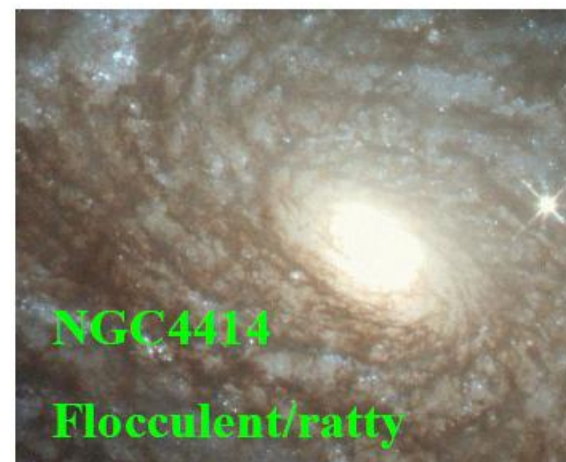
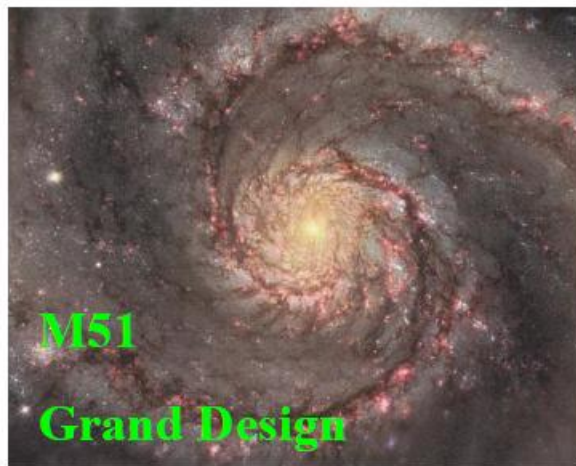


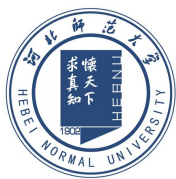


5.5.1 旋臂分类

➤ 旋臂分类 - 结构

- **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%

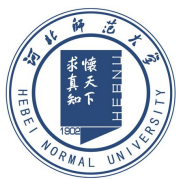




旋臂图样

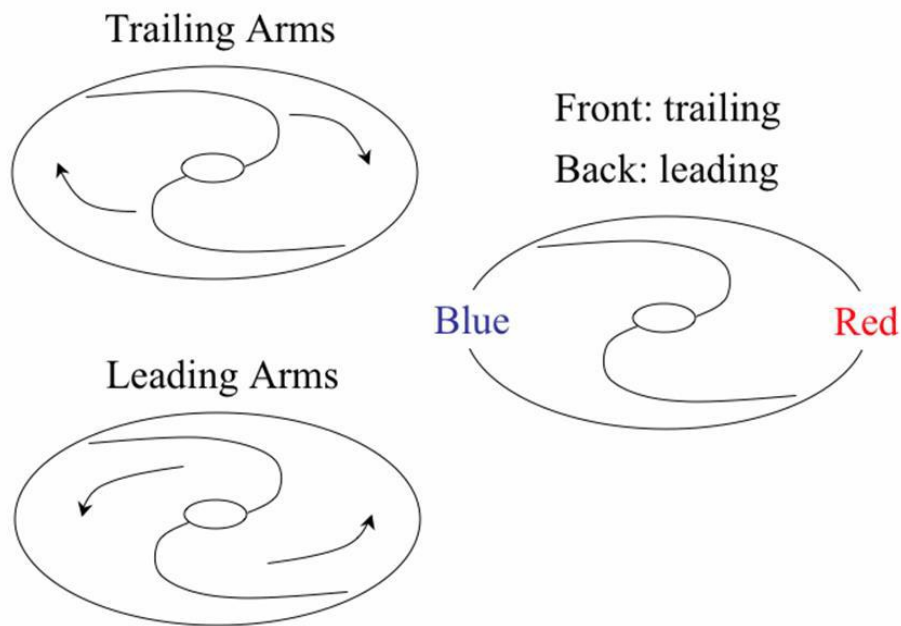
- M100: **宏象旋臂** (多旋臂)
 - H α 发射 (HII区) 和冷HI体都集中在旋臂: 有产生紫外光子的大质量恒星, 最近有恒星形成
 - 大质量、年轻恒星: 旋臂在B波段 (0.4 μ m) 比I波段 (0.7 μ m) 图像中更清晰
- NGC3949/NGC5055: **絮状旋臂**, 恒星形成发生在**不连续**的旋臂区域
- 旋臂形成理论:
 - 利用**密度波理论**, 可以解释**宏象旋臂**形成
 - 利用**自传播恒星形成理论**解释**絮状旋臂**形成

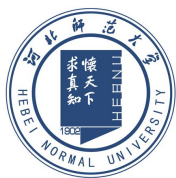




旋臂分类——指向

- 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)：臂端的**前端指向**与**星系转动方向**相反
- 旋臂几乎总是**后随型**的

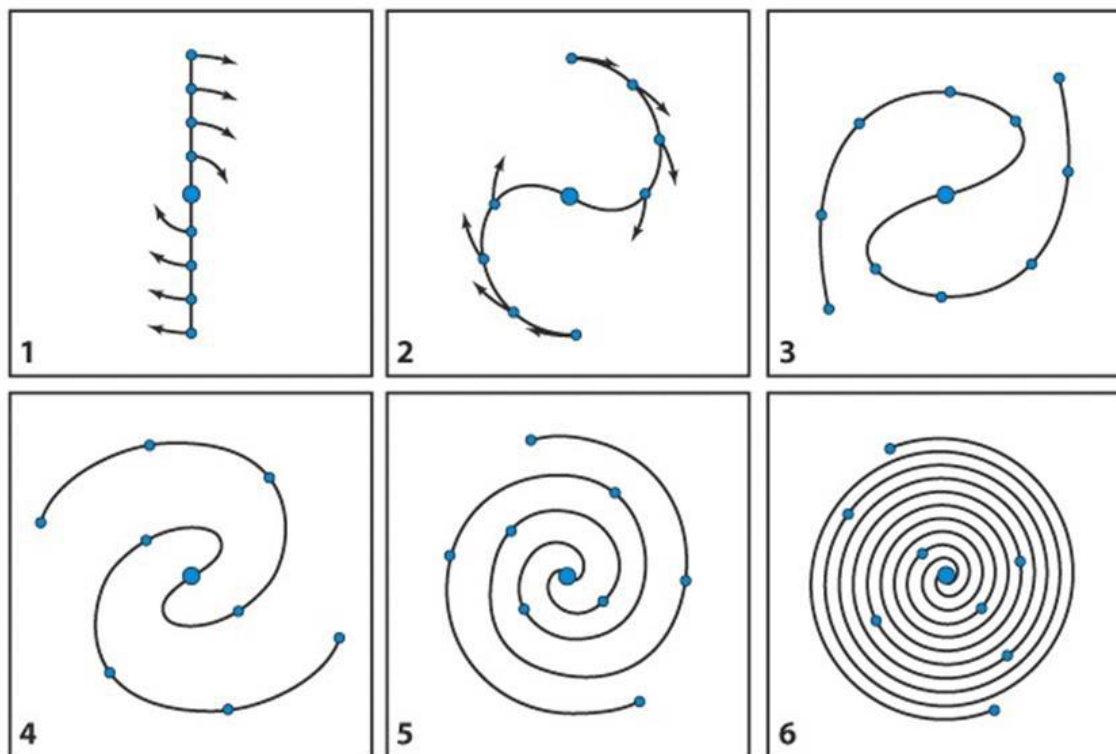




5.5.2 旋涡结构理论

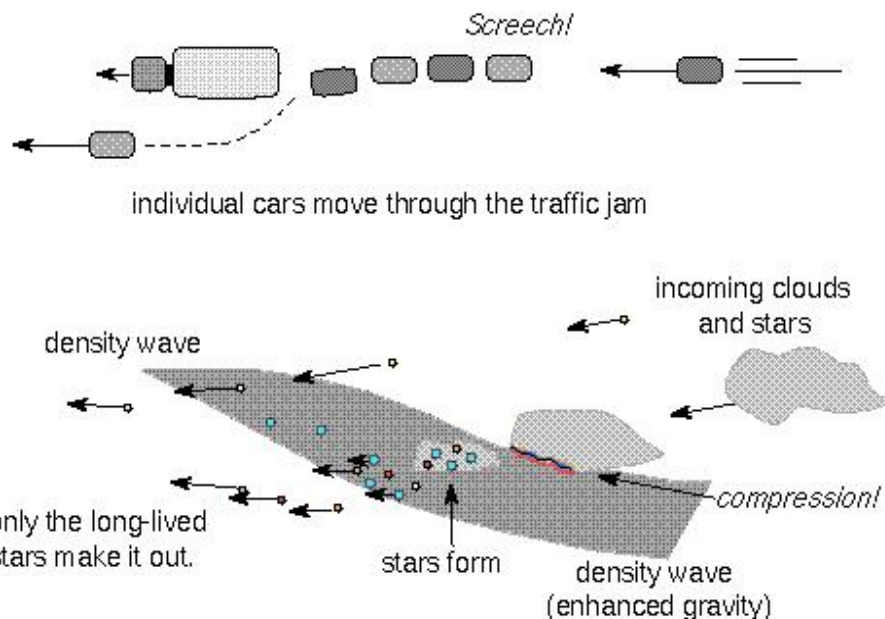
➤ 较差转动

- 角速度 $\Omega(R)$ 随半径增加而下降：沿旋臂向外， Φ 必须减小
- 随着时间推移，旋涡会越卷越紧（ i 越来越小）。任何初始的旋涡图案都会遭到类似的结局。**与观测不符合！**



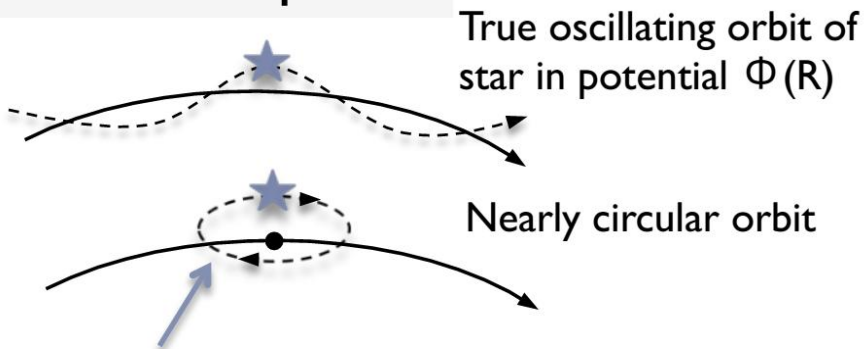
密度波理论

- 旋臂**不是**稳态的，**不同时刻**旋臂是由**不同的恒星**组成
- 1942年，瑞典天文学家林德·布拉德提出了**密度波概念**
- 1964年以来，美籍科学家**林家翘、徐遐生**建立系统的**密度波理论**
- 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**
- **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。



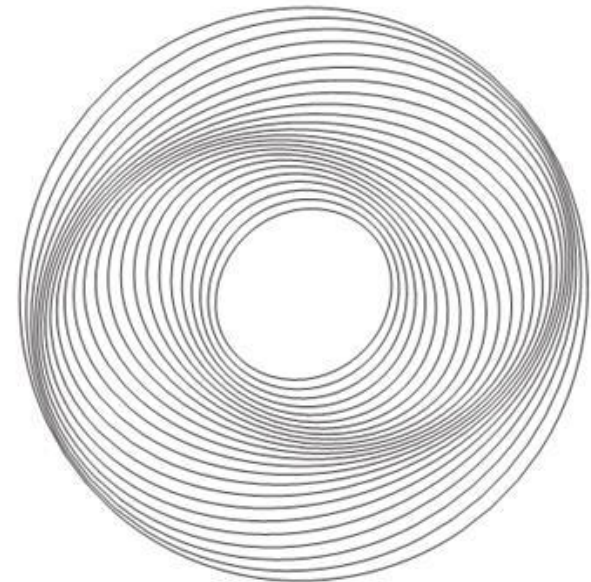
Spiral density waves are like traffic jams. Clouds and stars speed up to the density wave (are accelerated toward it) and are tugged backward as they leave, so they accumulate in the density wave (like cars bunching up behind a slower-moving vehicle). Clouds compress and form stars in the density wave, but only the fainter stars live long enough to make it out of the wave.

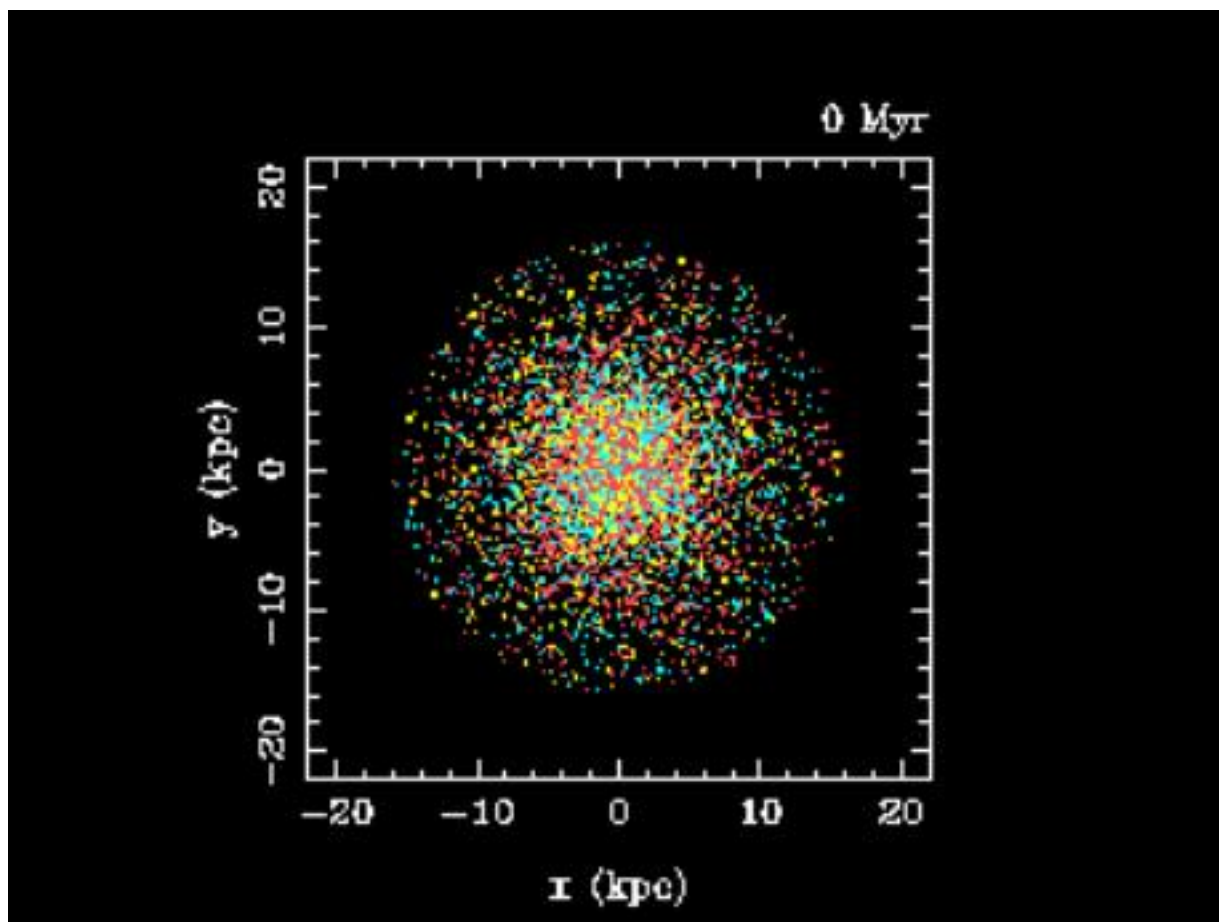
In the disk plane:

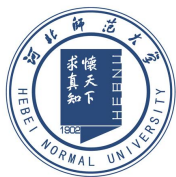


Epicycle describing apparent stellar motion from the frame of the LSR – circular orbit with angular speed $\omega(R)$.

There's also a component out of the disk plane (z) -- not relevant here.

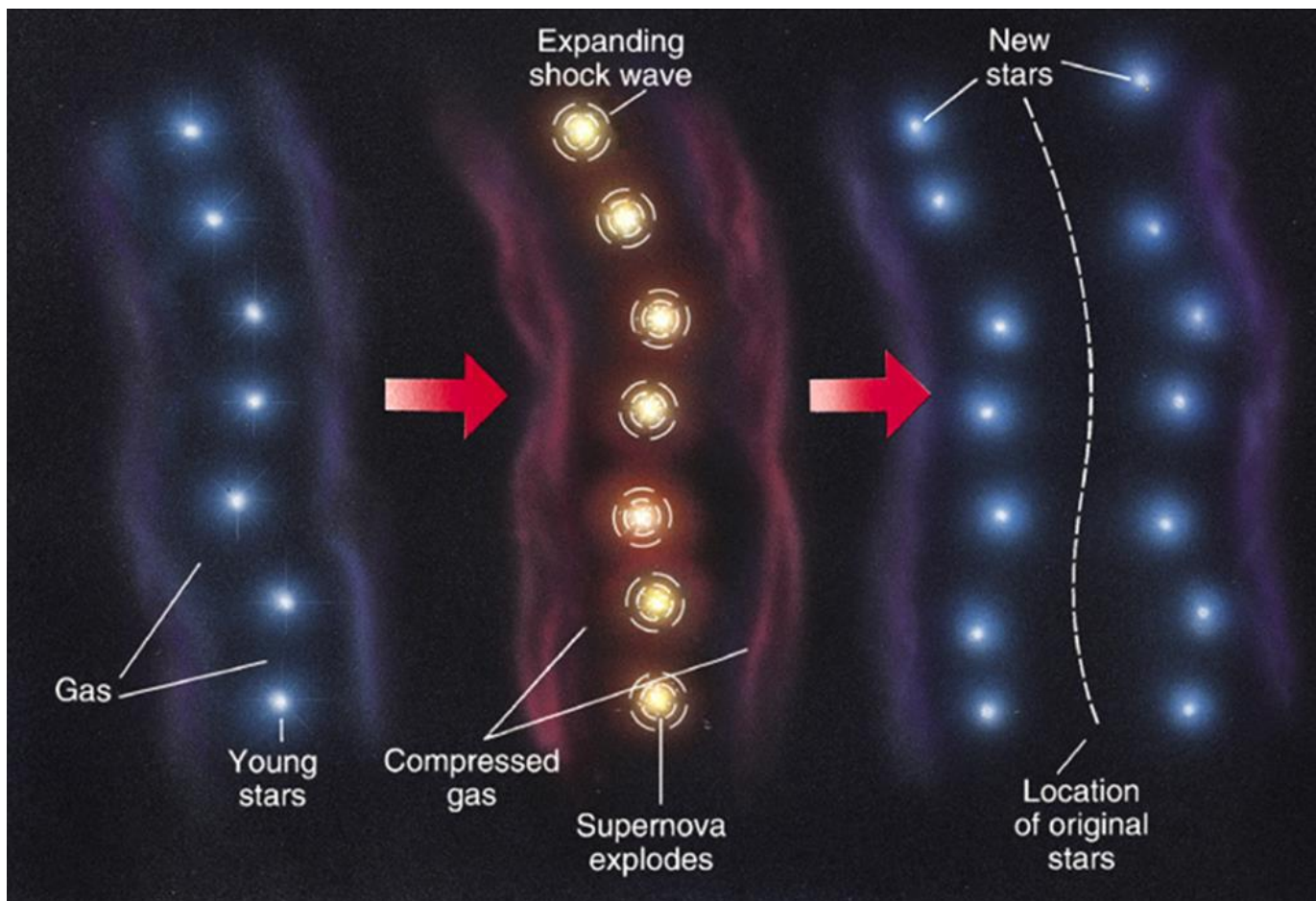


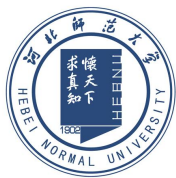




自传播恒星形成

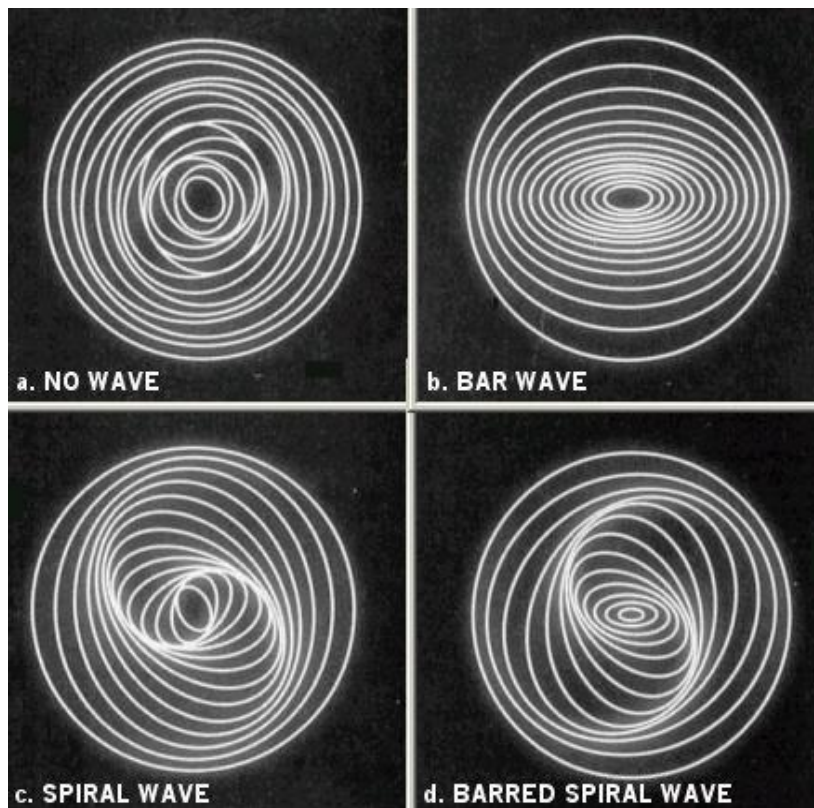
- 旋涡结构是一种**复杂**的现象，全部观测到的结构可能**并非**来自单一的过程
- 密度波理论可解释**宏象**旋臂的形成和长期维持，但是不能解释具有絮状旋臂的星系
- Mueller & Arnett (1976) 提出了**随机自传播恒星形成模型**，可以很好解释**絮状**旋臂形成
- 随机自传播恒星形成模型
 - 星系中的气体云因**密度涨落**形成了首批恒星，大质量恒星寿命短
 - 短寿命大质量恒星发生**超新星**爆发（或星风），所产生的**冲击波**将压缩周围的气体
 - 气体被压缩，触发**更多**的恒星诞生，导致恒星形成过程从气体的一边**传播**到另一边
 - 较差自转将云拖出一段**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

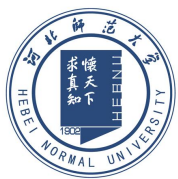




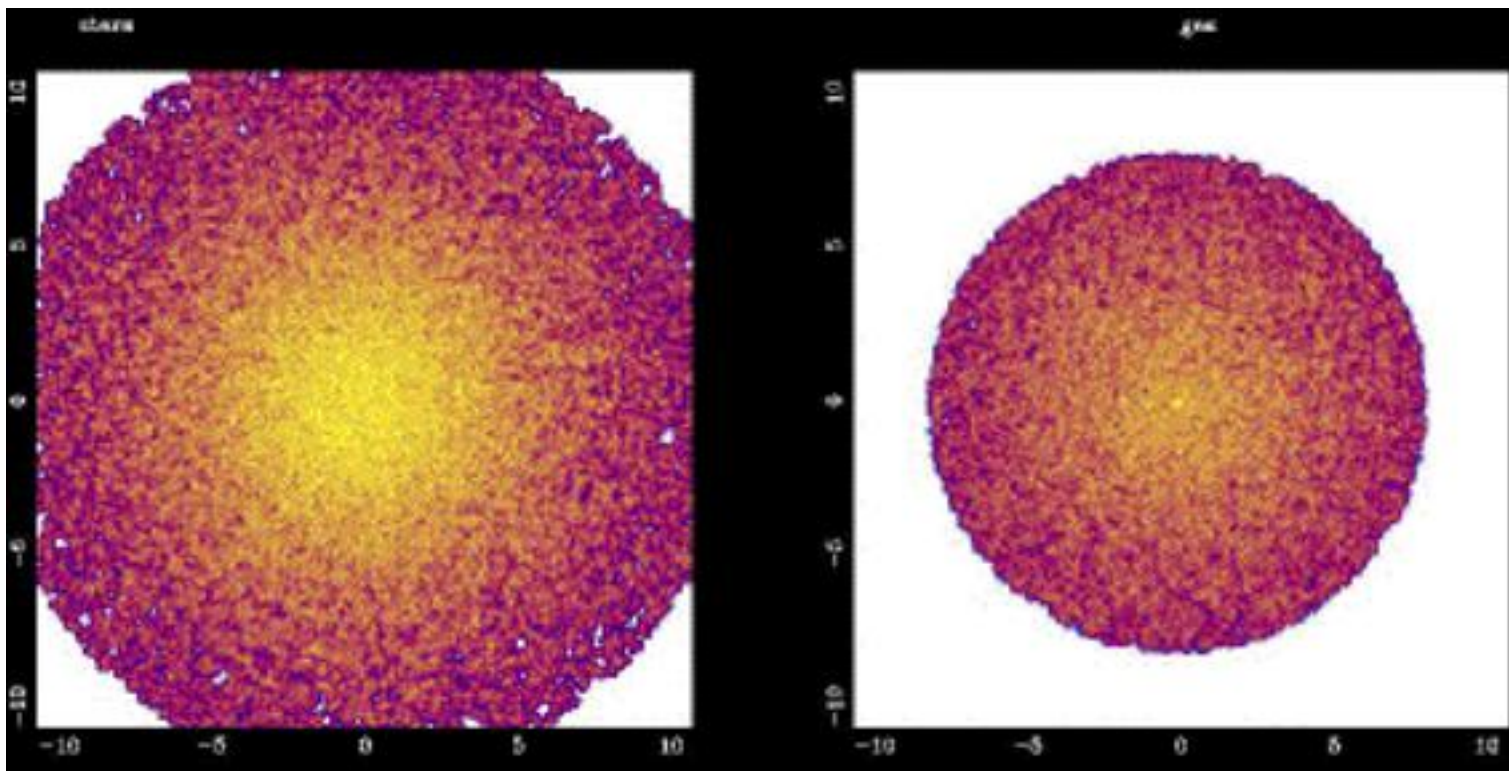
5.5.3 星系棒

- 50% of disk galaxies have **bar**
 - stars and gas in largely **radial orbits**
 - more easily seen in red light (old stars), but often gas
- 棒的图形不是静态的
 - 棒以**图案速度** Ω_p 转动；
 - 棒**不是**密度波，其大部分恒星总是留在棒内部





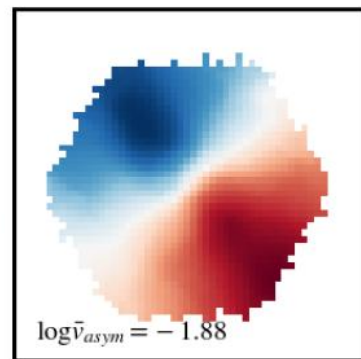
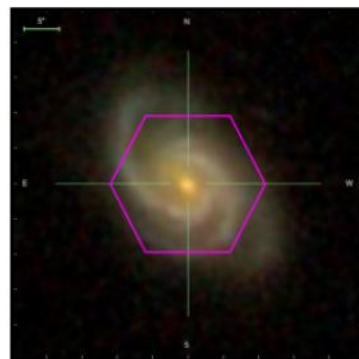
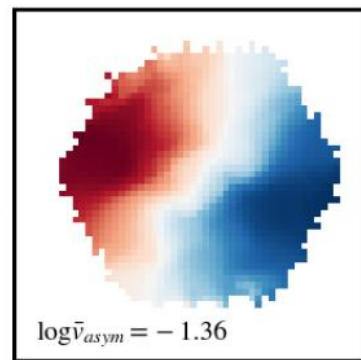
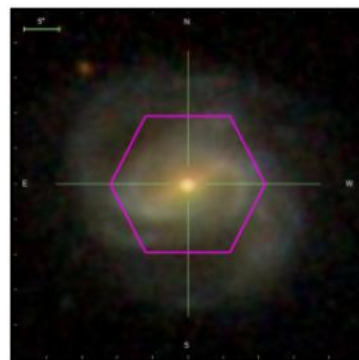
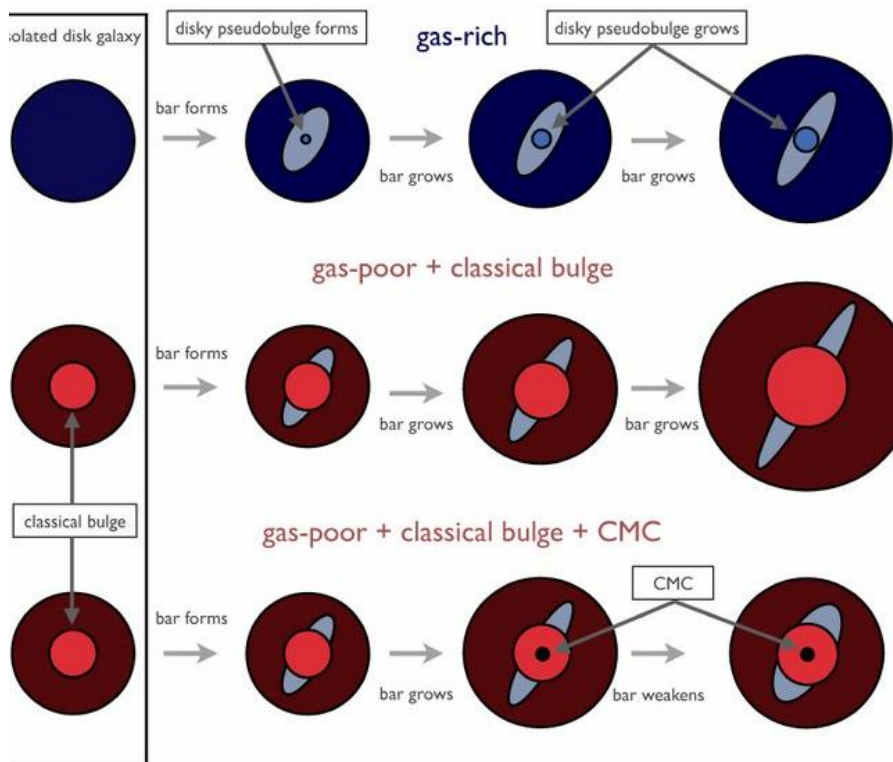
棒的形成

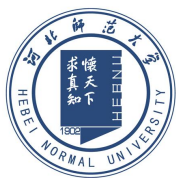


棒的形成与演化

- 棒中恒星不再是圆轨道，恒星轨道为沿着棒方向的**拉长**轨道，恒星被**束缚**在棒中
- 棒的强烈不对称引力，有助于**气体**角动量向外转移，产生**内流**，进入星系中心
- 内流使得星系中心质量增加，中心质量增加影响盘星轨道变化，盘被瓦解 – 形成**盘状（伪）核球**？

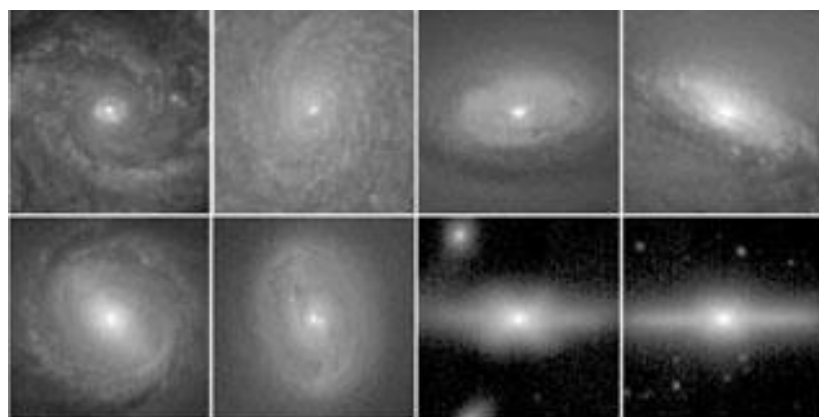
Feng et al. (2022a)



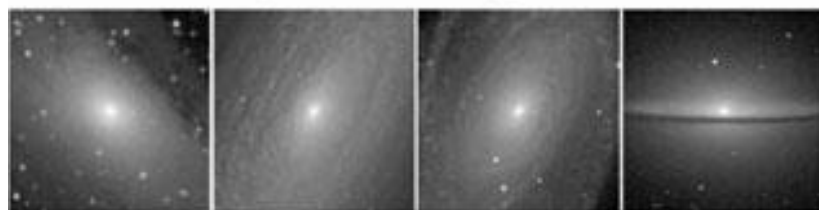


5.6 盘星系核球和中心

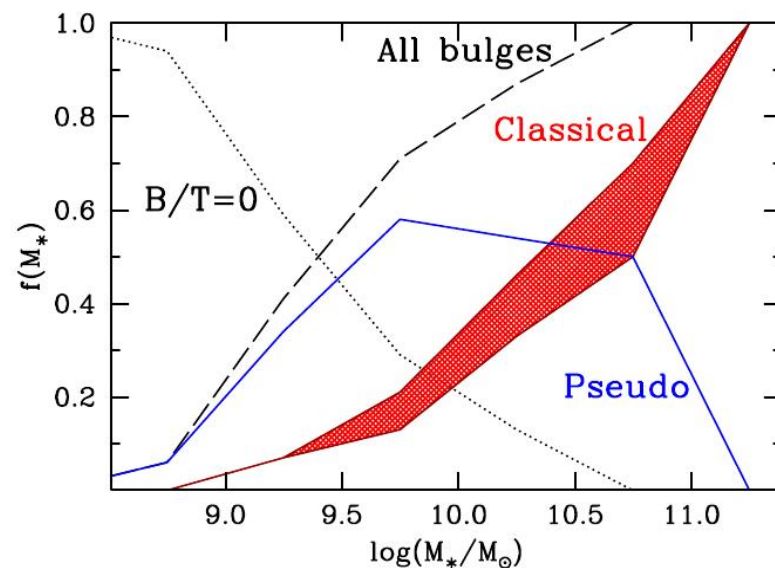
- 观测显示，星系核球分为两类：**经典核球** (classical bulge) 和**盘状核球** (disk-like bulge, **pseudobulges**)
 - **经典核球**：可能形成于盘星系之间的**并合**；星系并合时标短
 - **伪核球**：星系核球形成于盘气体**长期**向星系中心移动（下落），长期演化

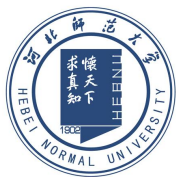


"pseudobulges"



"classical bulges"





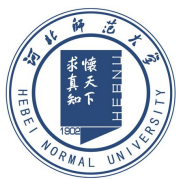
经典核球 VS 伪核球

➤ 经典核球

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

➤ 伪核球（盘状核球）

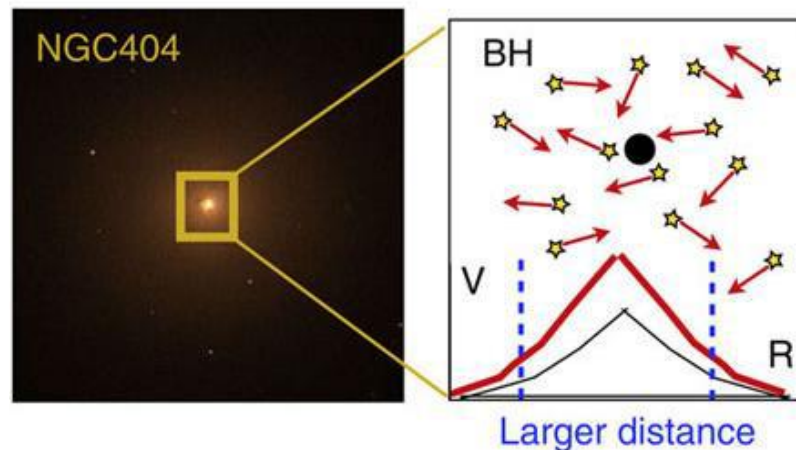
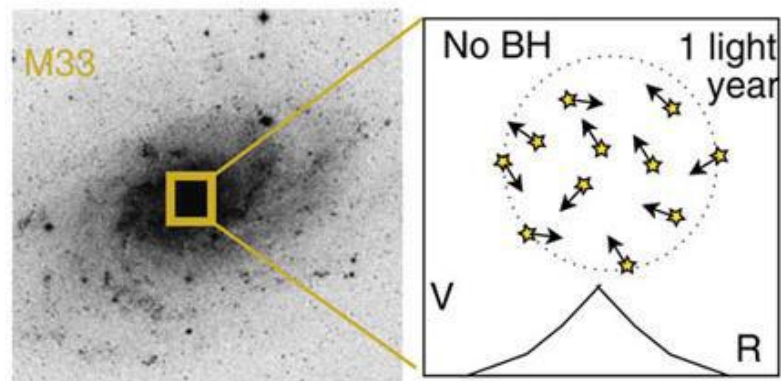
- 存在如核棒、旋臂、环等子结构
- 常有尘埃、年轻星族和恒星形成等特征
- 运动学**冷**，恒星的 σ 小， V_{rot} 大
- 形成主要是因为**恒星盘的不稳定性**；为相对连续、平缓的过程

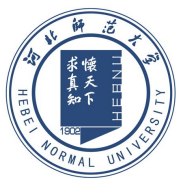


黑洞搜寻 BH Detection

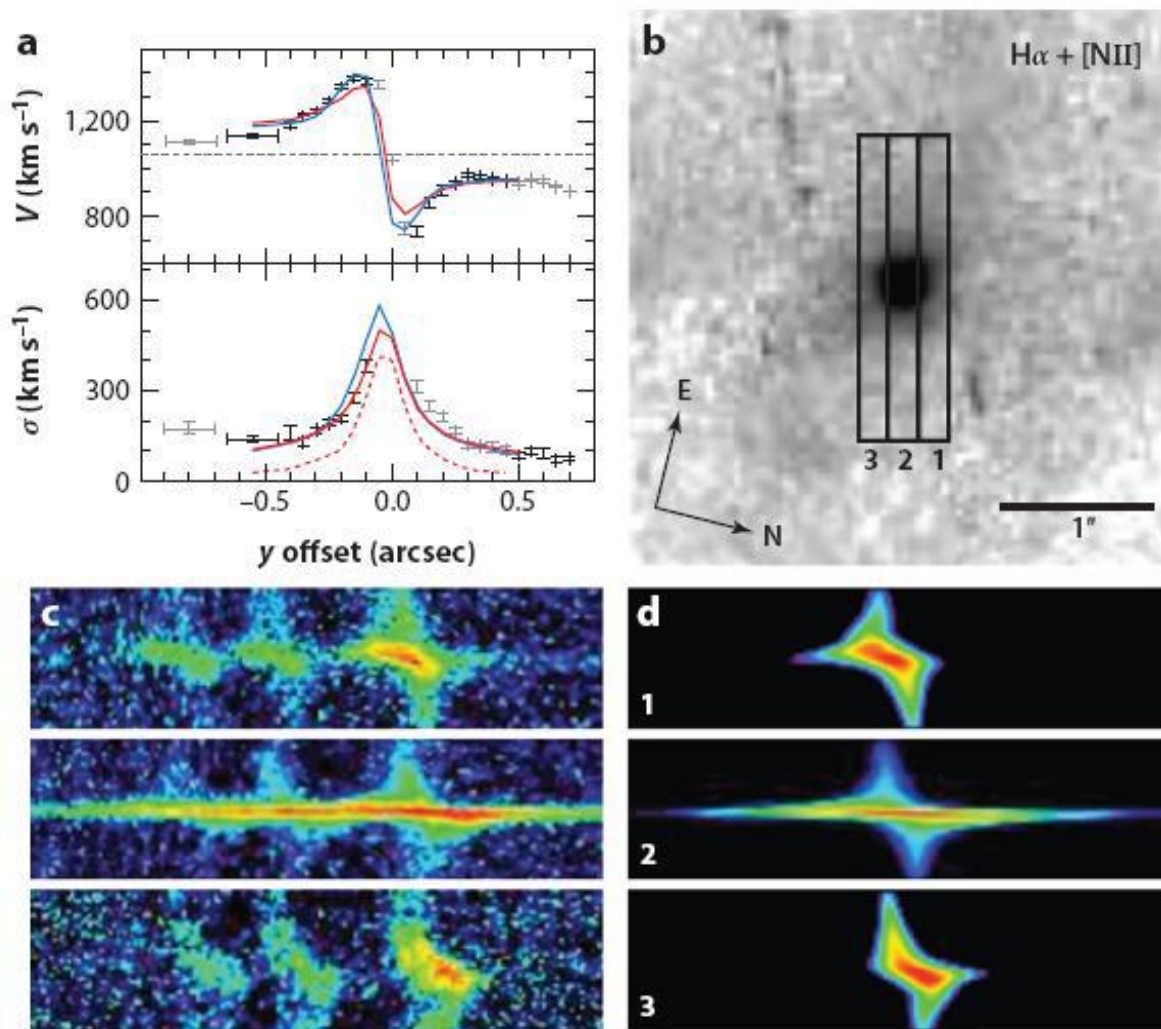
- **运动学方法**：通过测量星系核区**气体**（电离气体、CO分子、maser）和**恒星**运动，搜寻星系中心是否存在黑洞
- **近邻星系中心黑洞搜寻-恒星运动**
 - 不能直接观测星系中心单个恒星运动轨道，但是可以通过观测星系中心区域恒星的**平均运动**
 - 星系中心有越大质量黑洞，**恒星平均运动会越快**：黑洞引力使其周围恒星速度加速
 - 局限性：只能用于**近邻**星系，只能用于大质量黑洞(小质量黑洞，恒星加速不明显)
 - 因为黑洞只能对其附近的恒星作用，需要观测星系中心较小区域：**哈勃空间望远镜/自适应观测**扣除大气seeing影响

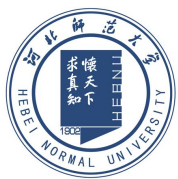
Black holes revealed through stellar kinematics





黑洞搜寻 BH Detection





黑洞搜寻 BH Detection

- The nucleus of the nearby spiral galaxy NGC4258 shows several spots of H₂O maser emission (Myashi et al. 1995)
- NGC4259中心的几秒差距以内，有一个转动的致密气体盘
- 星系核的辐射激发了盘中的水分子，致使它们在22.2GHz的谱线中发出脉泽 (maser) 辐射。
- 脉泽斑很亮，可以用甚长基线干涉仪 (VLBI) 非常精确地定位，同时可以用多普勒效应测量其视向速度 V_r

