

HII区及射电复合线

HII区和大质量恒星形成

- HII区的组成：电离H气体
- 广义：所有电离的H气体云
- 狭义：位于大质量恒星周围的电离HI云
- 电离机制：光致电离(紫外光子)
- 辐射：复合线、禁线、尘埃、韧致辐射
- 大质量恒星周围HII区的分类：通过大小分

电离复合平衡以及Strömgren球

- 中心的大质量恒星发出紫外光子
- 紫外光子电离周围的气体，形成HII区
- 电离气体复合，产生级联跃迁
- 在很多情况下，电离和复合会达到平衡
- 紫外光子($>13.6\text{eV}$)通过电离—复合过程在慢慢减少，复合到基态产生的紫外光子很容易又产生光致电离，从而导致复合到基态这个过程不能有效的消耗紫外光子

电离复合平衡以及Strömgren球(续)

- 电离复合平衡: $(1-x)n_{\text{H}}b_1 = x^2n_{\text{H}}^2a \simeq n_{\text{H}}^2a$
- 其中 x 是电离度, 在HII区接近于1, n_{H} 是氢元素(原子+离子)的体密度, b_1 是每个中性H原子的电离几率, a 是复合几率
- 除去复合到基态的其它所有态的几率:

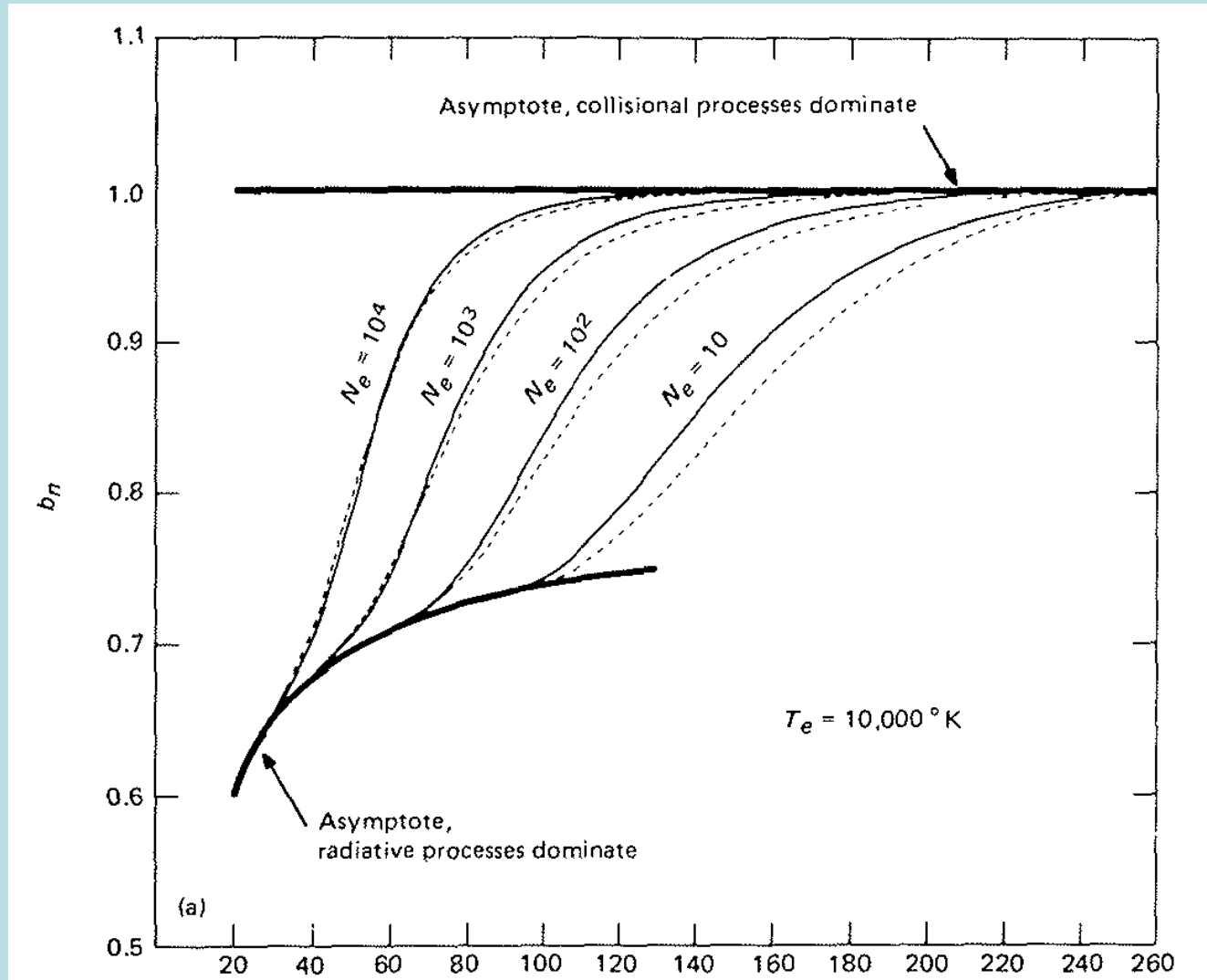
$$a^{(2)} = \sum_{j>1} a_{kj} = 1.627 \times 10^{-13} T_4^{-1/2} \left(1 - 1.657 \log T_4 + 0.584 T_4^{1/3} \right) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

- Strömgren球的半径大小: $r_S = \left[\frac{3S(0)}{4\pi n_{\text{H}}^2 a^{(2)}} \right]^{1/3}$

复合线

- 复合过程中，会产生级联跃迁
- 这些跃迁的几率很大，在小n的情况下，自发跃迁几率很大($\sim 10^4 \text{s}^{-1}$)，碰撞激发的几率比这个远小，可以忽略，这些能级之间的分布是远离热平衡(玻尔兹曼分布)状态的
- n大的时候， $A_{n+1,n} = 5.3 \times 10^9 \times n^{-5} \text{ s}^{-1}$
- 比如：n=100时(频率为6.48GHz)，几率为 0.53s^{-1}

分布对LTE的偏离



(Sejnowski, T. J., & Hjellming, R. M. 1969, ApJ, 156, 915)

复合线的应用

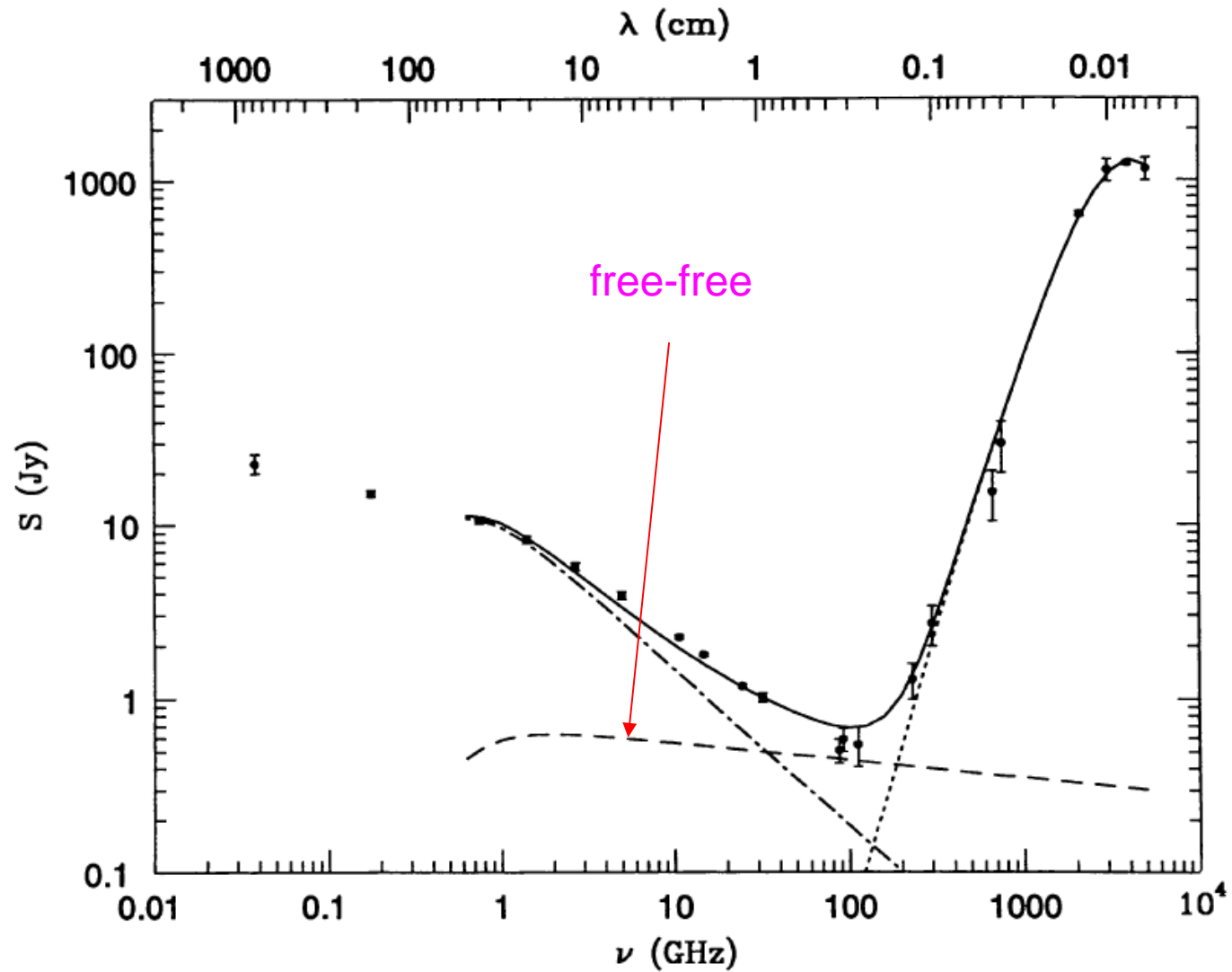
- 光学复合线， $H\alpha : H\beta$ 的测量强度测消光
- 消光改正后的 $H\alpha$ 流量作为星系中恒星形成率的示踪物
- 2维光谱，测量电离气体运动学信息，研究动力学过程
- 结合光学的禁线，可以研究电子温度密度等分布

电子的韧致辐射(free-free)

- HII区里有大量的自由电子
- 自由电子之间的碰撞会产生韧致辐射
- 韧致辐射光厚 $\tau_\nu \approx 3.28 \times 10^{-7} \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}} \right)^{-1.35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \left(\frac{EM}{\text{pc cm}^{-6}} \right)$
- 随着波长的减小，光厚增加
- 在1GHz附近，一般会发生光厚大于1的情况，在接近光薄后，基本上是一个平谱

$$S_\nu \propto \nu^{-0.1}$$

近邻星暴星系M82的射电谱分布



Condon 1992
ARA&A

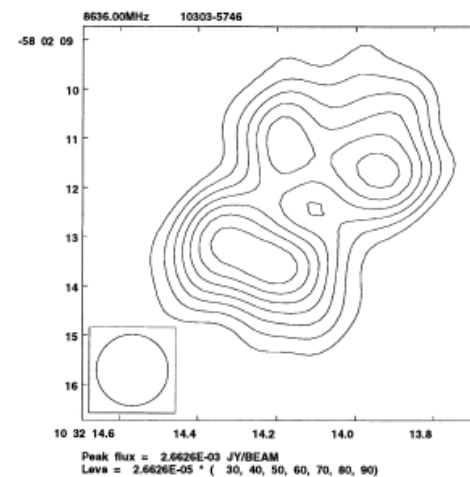
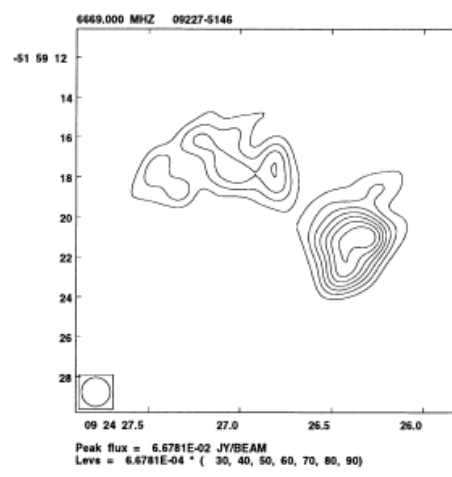
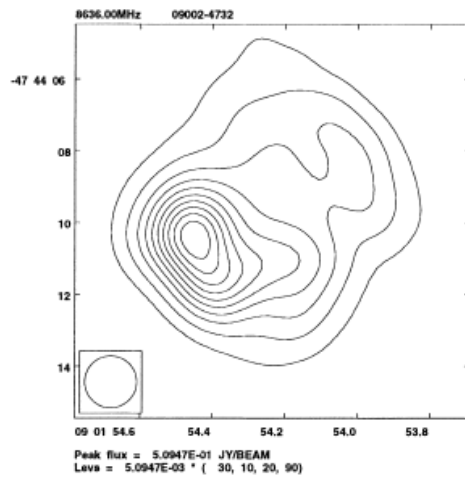
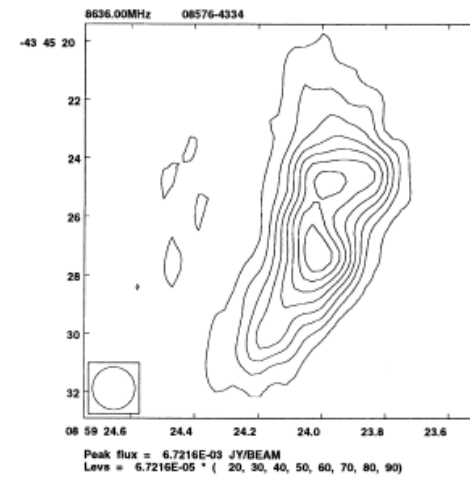
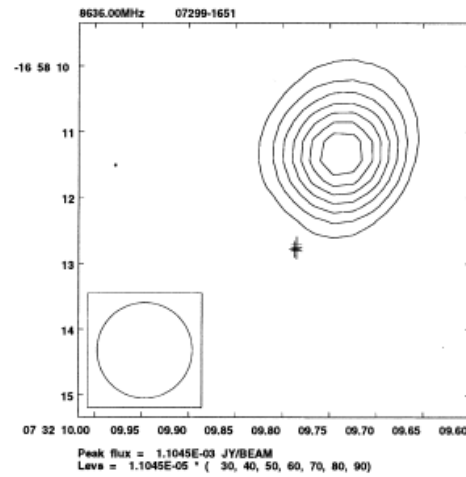
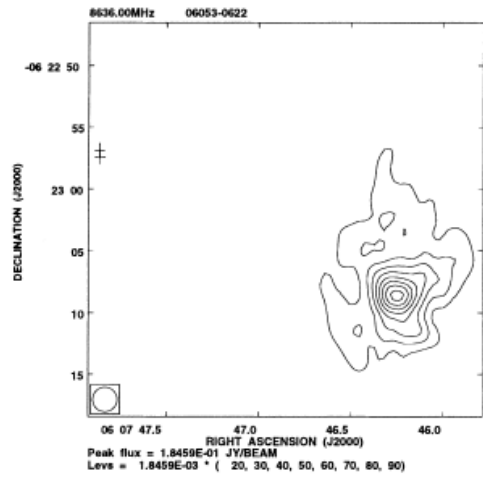
韧致辐射的用途

- 比较有效的探测韧致辐射的频率为几GHz到几十GHz
- 这个频率消光很小，通过这个波段的射电连续谱的高空间分辨率观测，能很好的判断HII区的大小以及形态，这对于极早期的年轻大质量恒星周围的HII区(UC or HC HII)会十分有效
- 结合射电复合线，可以计算HII区的电子温度

观测：射电干涉仪

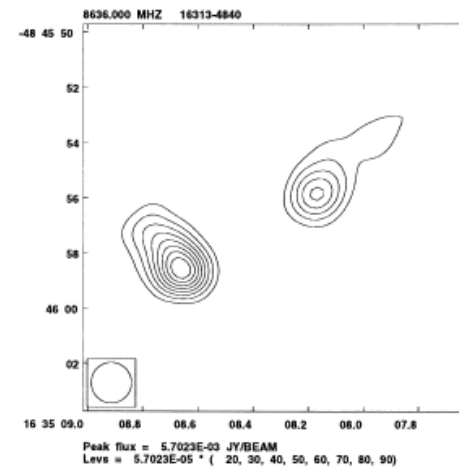
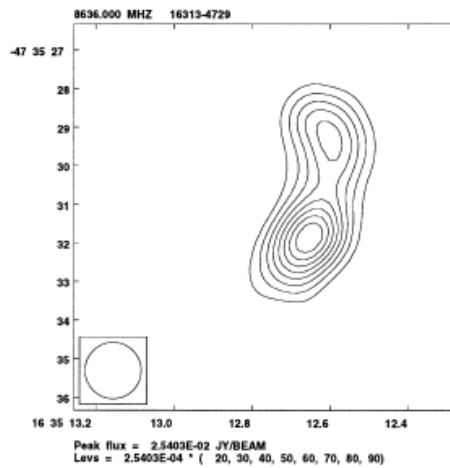
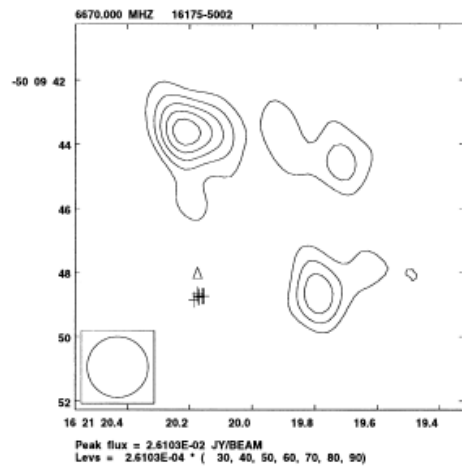
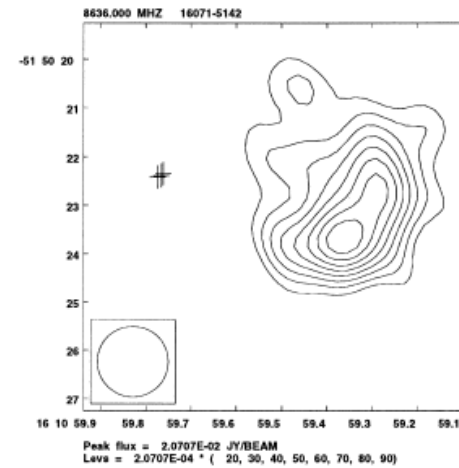
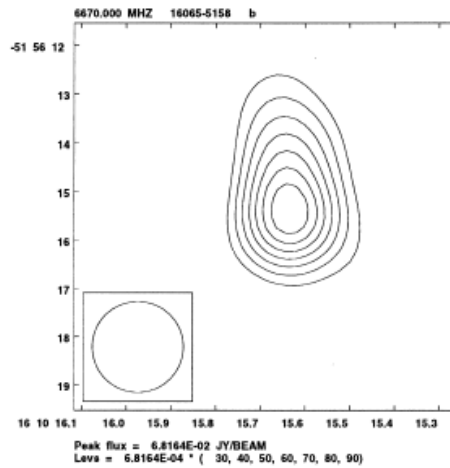
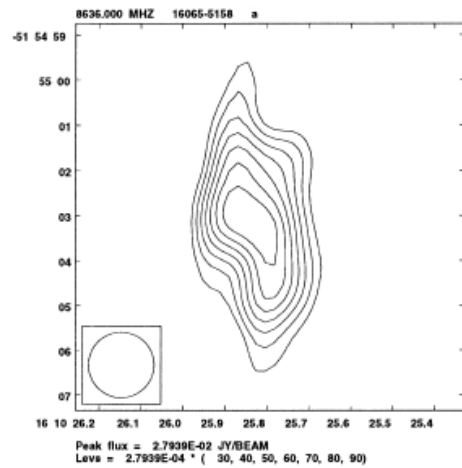
- 目前世界上几个大的射电干涉仪都能很好的观测C band和X band射电连续谱
- 根据空间分辨率的需要，可以选择不同的望远镜排布方式，得到合适的空间分辨率和灵敏度
- 目前有VLA、WSRT、ATCA可以进行这类观测
- 这几个望远镜的视场都差不多大(约10角分)

HII区的射电连续谱辐射



Walsh et al. 1998

HII区的射电连续谱辐射(续)



射电复合线

- 复合过程中，会有部分电子和质子复合到高的 n 能级，
- 在 n 大的时候，基本上满足热平衡的，在不同能级的分布，由 **saha** 方程决定，依赖于电子的温度
- 从 $n+1$ 到 n 的跃迁几率是最大的，也称为 α 线，比如 $H110\ \alpha$ 就是从 $n=111$ 到 $n=110$ 的跃迁

射电复合线的强度

- 吸收系数:
$$\kappa_\nu = \frac{c^2}{8\pi\nu_0^2} \frac{g_{n+1}}{g_n} N_n A_{n+1,n} \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu_0}{kT_e}\right) \right] \phi(\nu)$$

- 频率:
$$\nu_0 = \nu_{n,n+1} \approx \frac{2Rc}{n^3} = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3 n^3}$$

- 简并因子 $g_n = 2n^2$

- 而自发跃迁系数为
$$A_{n+1,n} \approx \frac{64\pi^6 m_e e^{10}}{3c^3 h^6 n^5}$$

- 由saha方程，处于n能级的粒子数为：

$$N_n = n^2 \left(\frac{h^2}{2\pi m_e kT_e} \right)^{3/2} N_p N_e \exp\left(\frac{\chi_n}{kT_e}\right)$$

- 这样简化后可以得到线心处的吸收系数：

- $$\kappa_{\nu_0} \approx \left(\frac{N_e^2}{T_e^{5/2} \Delta\nu} \right) \left(\frac{4\pi e^6 h}{3m_e^{3/2} k^{5/2} c} \right) \left(\frac{\ln 2}{2} \right)^{1/2} \text{ 和n无关!}$$

射电复合线的强度(续)

- 线心光学厚度:

$$\tau_L \approx 1.92 \times 10^3 \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-5/2} \left(\frac{\text{EM}}{\text{pc cm}^{-6}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\text{kHz}} \right)^{-1}$$

- 其中EM为:

$$\text{EM} \equiv \int \left(\frac{N_e^2}{\text{cm}^{-6}} \right) \left(\frac{ds}{\text{pc}} \right)$$

- 线心亮温度:

$$T_L \approx T_e \tau_L \approx 1.92 \times 10^3 \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-3/2} \left(\frac{\text{EM}}{\text{pc cm}^{-6}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\text{kHz}} \right)^{-1}$$

-

- 复合线和相同频率的**free-free**辐射的强度比为:

$$\frac{T_L}{T_C} \approx 7.0 \times 10^3 \left(\frac{\Delta\nu}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{1.1} \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1.15} \left[1 + \frac{N(\text{He}^+)}{N(\text{H}^+)} \right]^{-1}$$

射电复合线(RRLs)的优势

- 射电复合线有free-free辐射相同的优点，可以穿透尘埃，示踪十分年轻的大质量恒星周围以及银盘上的HII区
- 和free-free比，RRLs还能够示踪HII的运动学信息，得到HII区的膨胀等动力学性质，以及利用银盘上的HII区，来研究银河系悬臂结构
- 利用不同能级的RRLs，通过致宽机制的研究，获得电子密度的信息(压力致宽对低频RRLs的影响)

射电复合线致宽机制

- 致宽机制：自然致宽、热致宽、压力致宽

- 自然致宽： $\Delta\nu \sim A_{n+1,n}/\pi \sim 0.1 \text{ Hz}$ 测不准关系

- 热致宽由H原子的热运动导致，宽度为：

- $$\Delta\nu = \left(\frac{8 \ln 2 k}{c^2} \right)^{1/2} \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \nu_0$$

- 和温度的平方根成正比， $T=10000\text{K}$ 时，这个致宽(FWHM)大约为 21.6km/s

- 压力致宽： $\Delta\nu \sim \nu^{-4}$ 低频时重要

射电复合线致宽机制(续)

- 压力致宽和热致宽的比值： $\frac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu_t} = 1.2 \left(\frac{n_e}{10^5}\right) \left(\frac{N}{92}\right)^7$
- 在这儿 N 是主量子数 (keto et al. 2008)
- 高频射电复合线的致宽主要是由电子的热致宽导致的
- 通过多条RRL的观测，就可以测得HII区的电子密度这一十分重要的物理量

射电复合线(RRLs)的观测

- RRLs(H109 α)最早在1965年被P. Mezger 测到
- 由于RRLs很多，可以选择的余地很大，而且很多时候(低频)，一个带宽内可以覆盖多条RRLs
- VLA、WSRT、ATCA以及(亚)毫米波干涉仪都可以观测
- 单天线望远镜也可以观测，获得总的流量和线宽等信息

HII区多条RRL谱

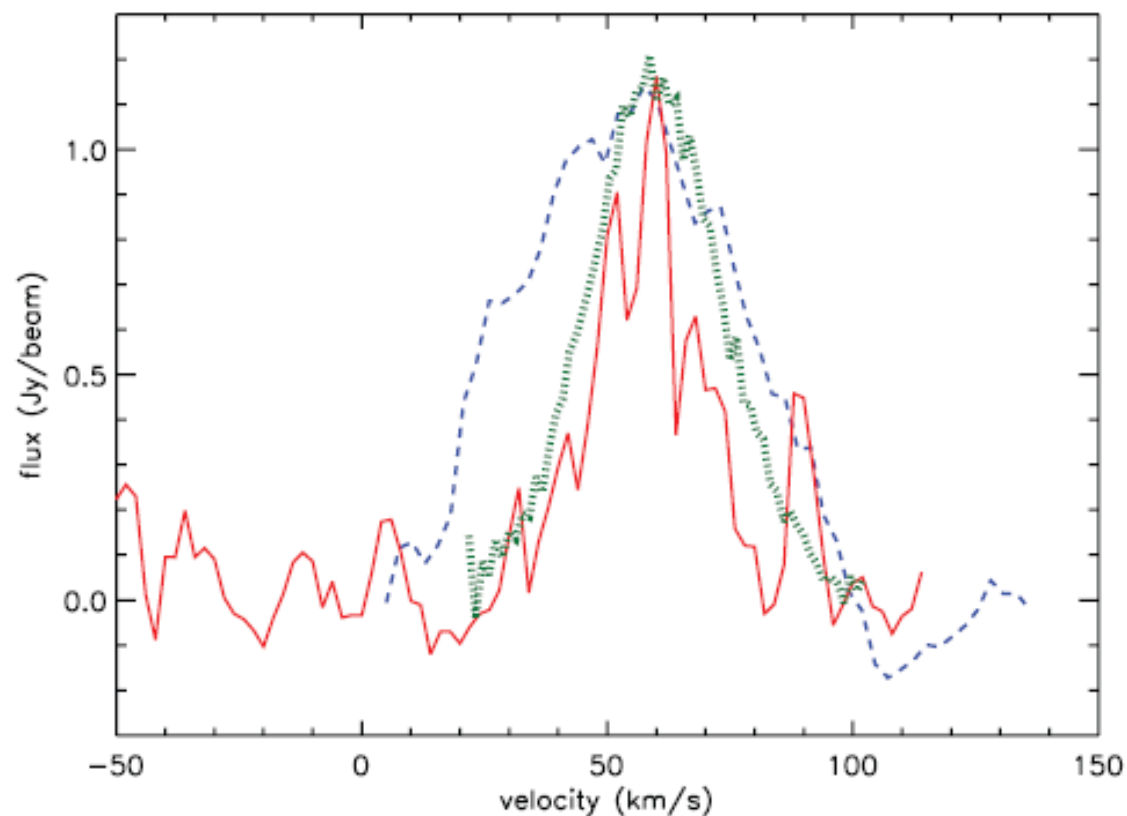
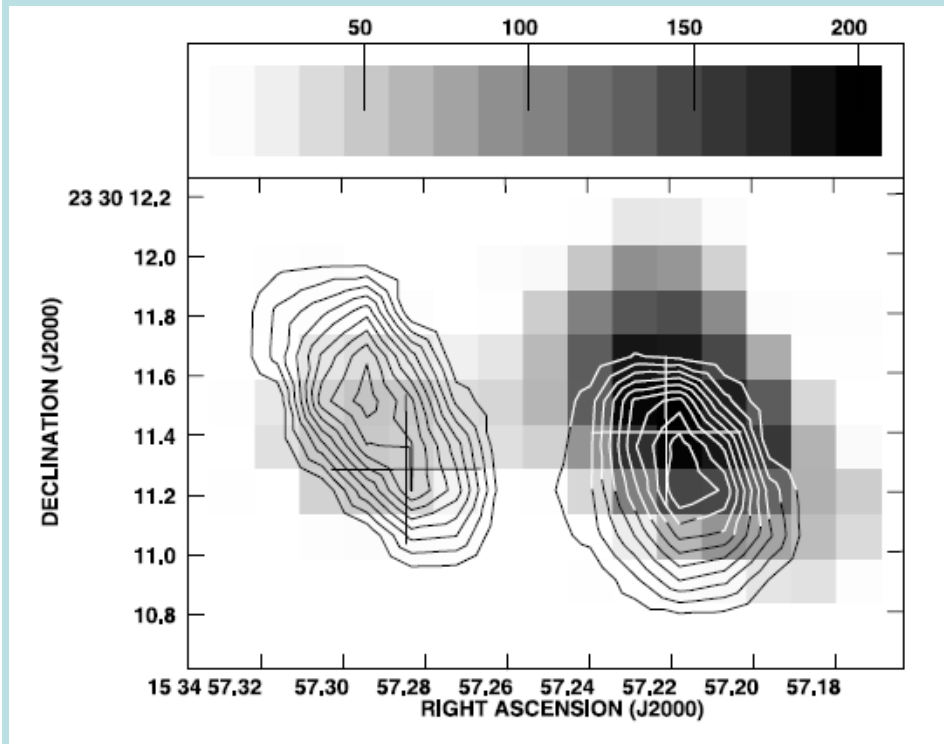


FIG. 1.—H66 α (dashed blue line), H53 α (dotted green line), and H30 α (solid red line) in W51e2. The flux densities of the H66 α line and the H53 α lines have been multiplied by 80 and 27, respectively.

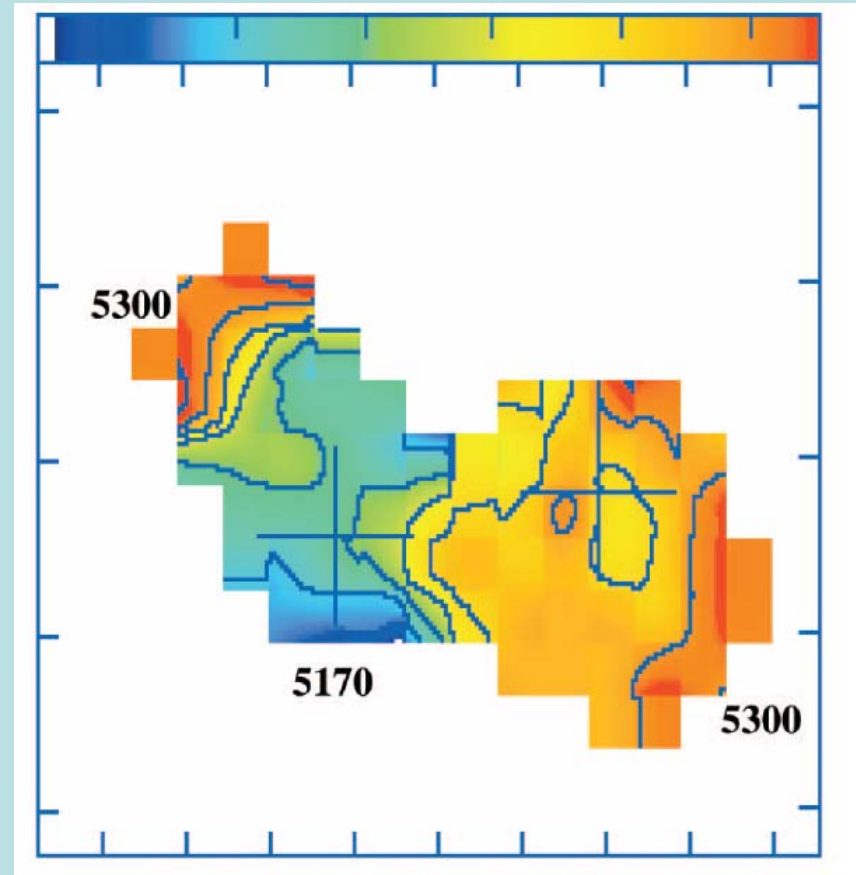
河外星系中的射电复合线的观测

- 多条射电复合线在河外星系中测量获得
- 由于射电复合线可以很好的示踪HII区，基本上不受尘埃消光的影响，可以用它来作为一个很好的恒星形成率的示踪物
- 通过高空间分辨率的RRL观测，还可以研究这些星系中的恒星形成区的运动学信息
- 缺点是RRL在星系中一般都比较弱，对望远镜的灵敏度要求很高，EVLA值得期待

Arp 220中的RRLs ($H53\alpha$)



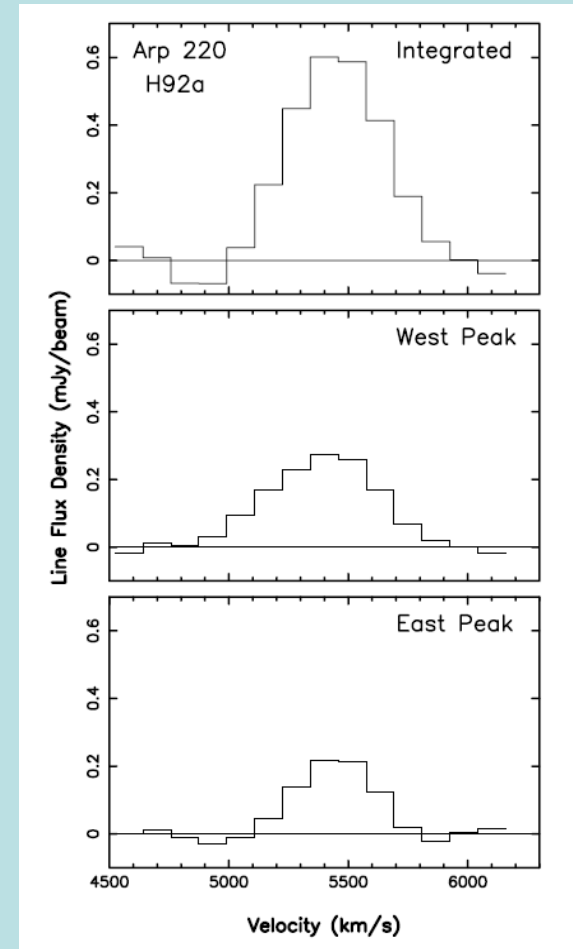
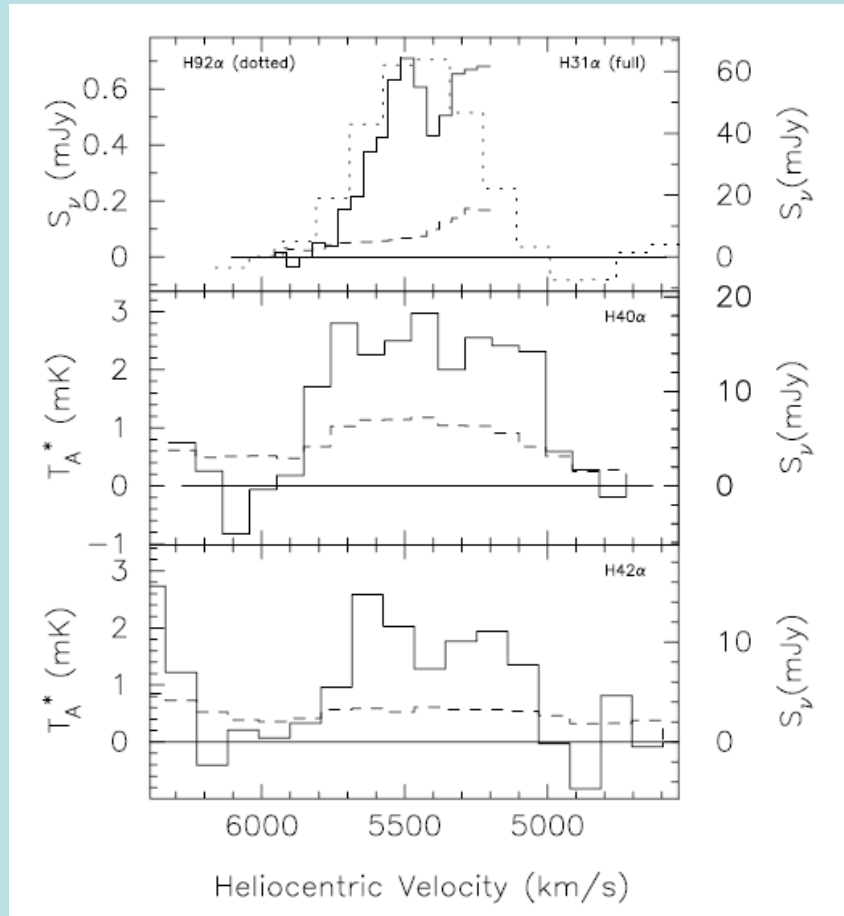
M0



M1

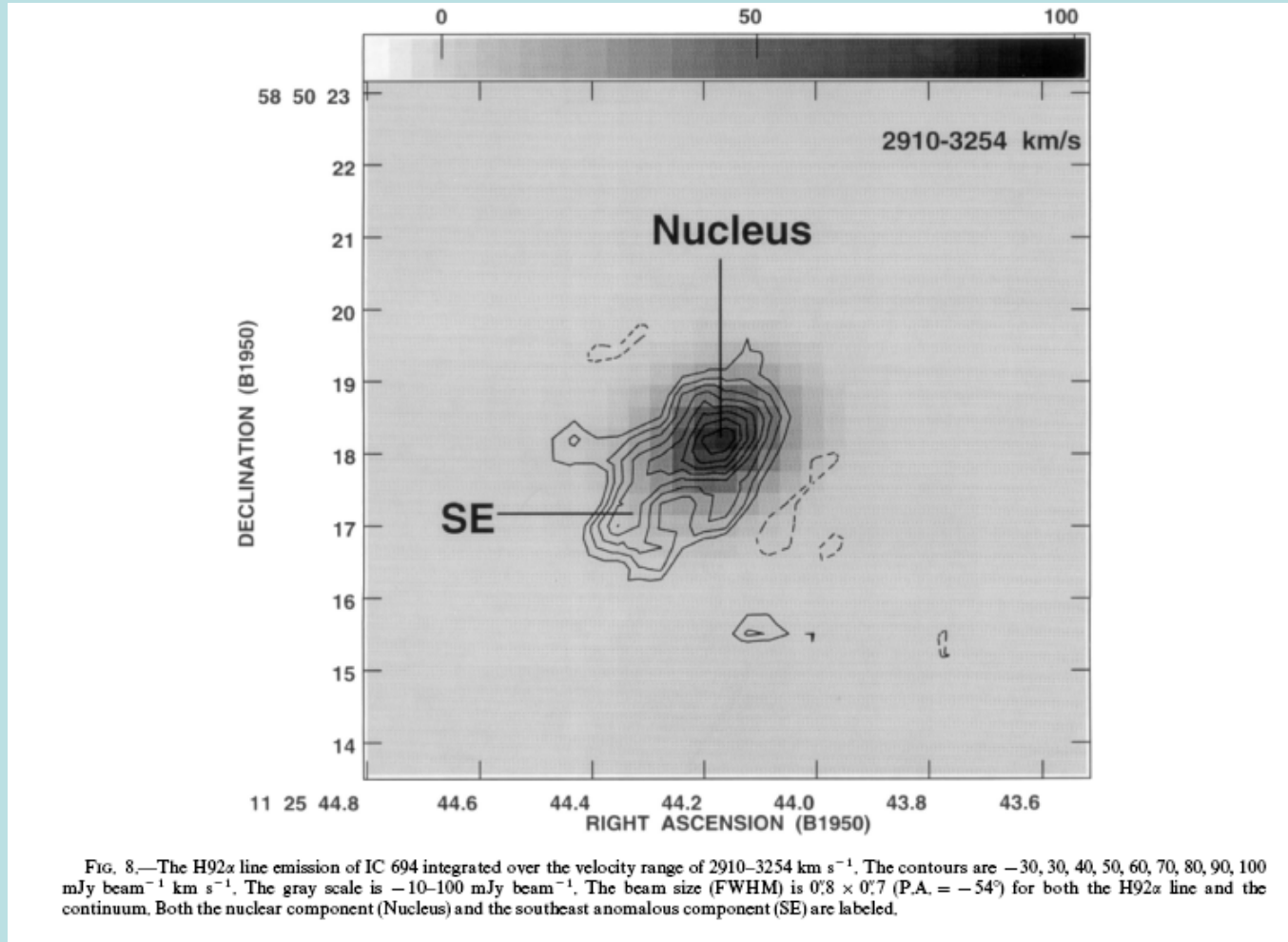
Rodríguez-Rico et al. 2005 ApJ

Arp 220中更多的RRLs



Anantharamaiah et al. 2000, ApJ

其它星系中RRL高空空间分辨率观测



H92 α in Arp 299 (Zhao et al. 1997)

我们利用国内望远镜可能进行的工作

- 乌站**25米**望远镜可以观测**H110 α**
- 紫台青海站**13.7米**望远镜可以观测多条**3mm**波段的**RRL**
- 选择合适的**HII区**，进行多条**RRL**的观测，同时结合分子谱线的观测，获得谱线线宽以及流量等信息，研究**HII区**及其周围分子云的性质

分子吸收线

- 有着强的连续背景的时候，分子云可以产生吸收线
- HII区是很好的射电连续谱背景源
- 对着HII区的时候，很多谱线可以产生吸收
- 这个时候，由于强的连续谱的放大效应，导致可以对很多丰度较低的分子进行观测研究
- 可以通过吸收线的研究，研究HII区周围的分子化学过程