

HI和弥漫星际介质

HI气体的组成

- 中性H原子 (这是为什么称之为HI气体的原因)
- He原子
- 中性C、N、O等原子
- 一次电离C (C的一次电离需要的能量比H原子要略低)
- 其它(尘埃、宇宙线)

HI气体的分类

- Warm neutral medium (WNM):
高温($\sim 5000\text{K}$)、低密($\sim 0.4\text{cm}^{-3}$)
- Cold neutral medium (CNM):
低温($\sim 80\text{K}$)、高密 (几十 cm^{-3})

压力平衡

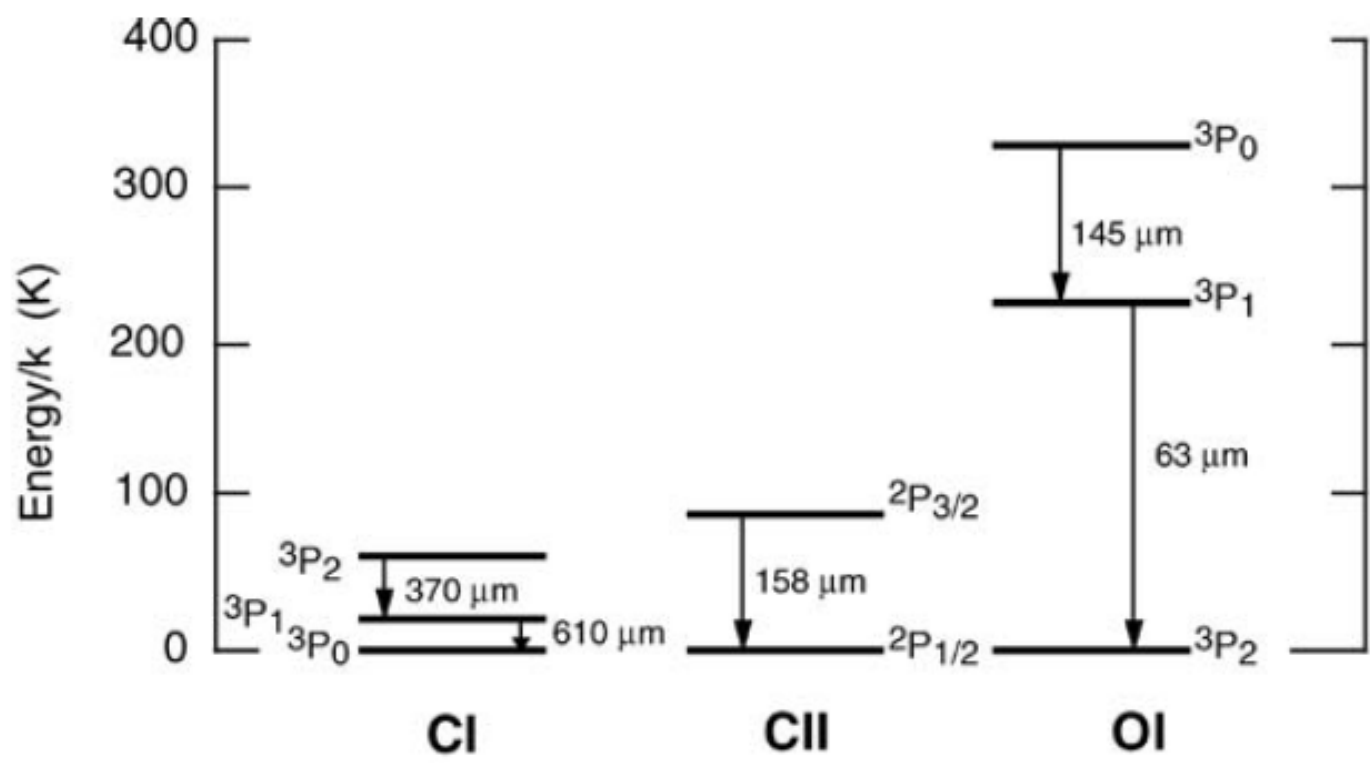
- 最简单的情况下，压力 $P \sim nkT$
- 实际情况会更复杂，磁场和湍动也会对压力有贡献，而且可以和热运动导致的压力比拟
- 在星际空间，一般是处于压力平衡的，也就是说这些星际气体自身的压力和束缚它们的力之间是相等的，这个力和星系的大尺度的物质和引力分布等有关，银河系内 $nT \sim 3000 \text{ cm}^{-3}\text{K}$ ，对WNM和CNM的测量结果都是这个值
- HI气体一般不是靠自引力束缚的，压力平衡的结果导致了WNM和CNM之间密度的差异

HI气体的辐射

- 21 cm谱线：第一个测到的射电谱线
- [C I]、[C II]以及[O I]远红外精细结构线发射
- 尘埃的发射

HI气体的heating以及cooling机制

- **Heating:** 紫外光子照射尘埃导致尘埃的电离、宇宙线或者软X射线光子电离中性原子(C、O等)
- **Cooling:** [C II]158微米精细结构线，OI，CI精细结构线，以及 L_{α} 发射被尘埃吸收后的再发射等，(见下图)
- HI 21 cm的发射对cooling不重要

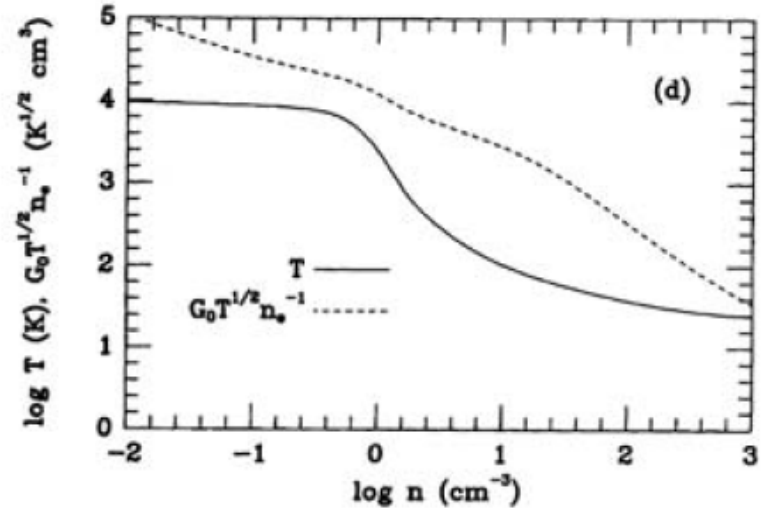
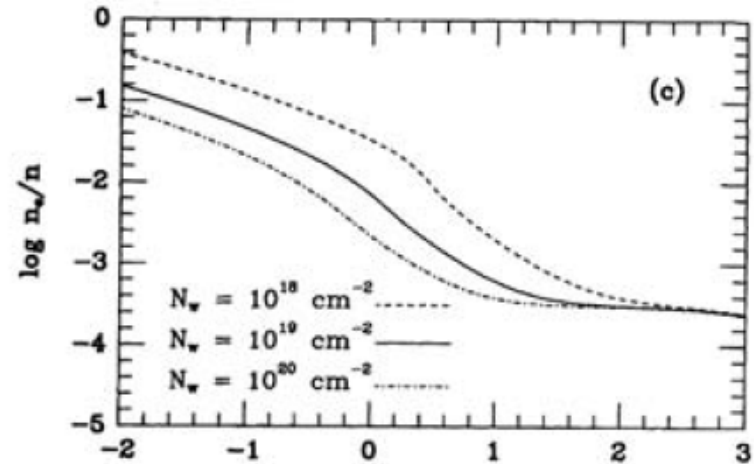
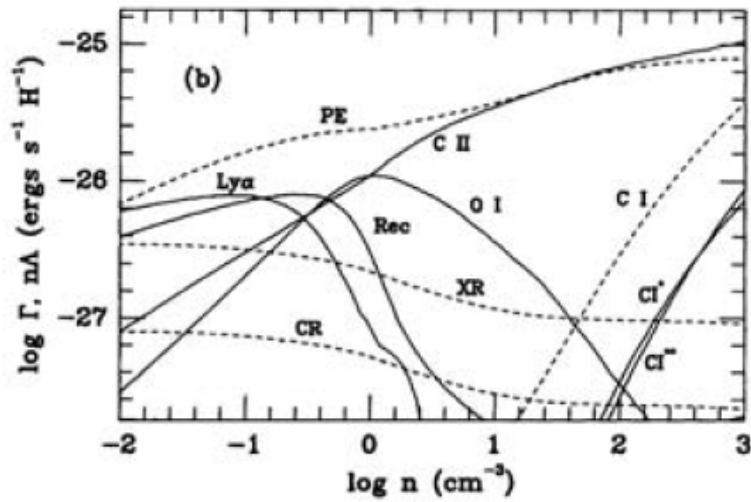
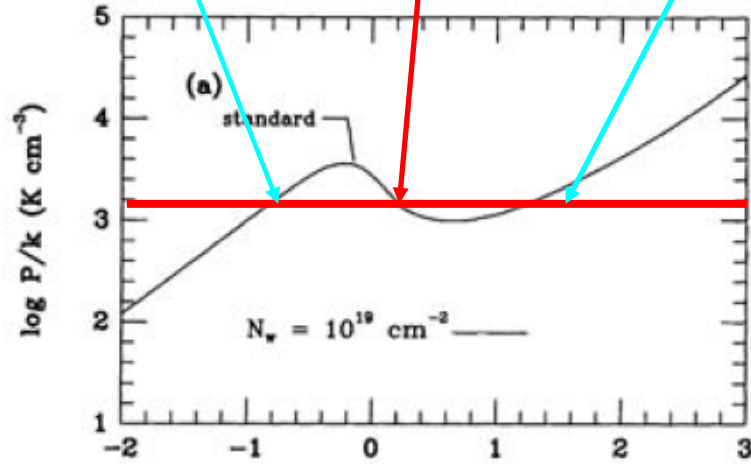


Ion	Transition l-u	λ μm	A_{ul} s^{-1}	Ω_{ul}	n_{crit} cm^{-3}
C I	$^3\text{P}_0 - ^3\text{P}_1$	609.1354	7.93×10^{-8}	–	(500)
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_2$	370.4151	2.65×10^{-7}	–	(3000)
C II	$^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$	157.741	2.4×10^{-6}	1.80	47 (3000)
N II	$^3\text{P}_0 - ^3\text{P}_1$	205.3	2.07×10^{-6}	0.41	41
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_2$	121.889	7.46×10^{-6}	1.38	256
	$^3\text{P}_2 - ^1\text{D}_2$	0.65834	2.73×10^{-3}	2.99	7700
	$^3\text{P}_1 - ^1\text{D}_2$	0.65481	9.20×10^{-4}	2.99	7700
N III	$^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$	57.317	4.8×10^{-5}	1.2	1880
O I	$^3\text{P}_2 - ^3\text{P}_1$	63.184	8.95×10^{-5}	–	2.3×10^4 (5×10^5)
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_0$	145.525	1.7×10^{-5}	–	3400 (1×10^5)
	$^3\text{P}_2 - ^1\text{D}_2$	0.63003	6.3×10^{-3}	–	1.8×10^6
O II	$^4\text{S}_{3/2} - ^2\text{D}_{5/2}$	0.37288	3.6×10^{-5}	0.88	1160
	$^4\text{S}_{3/2} - ^2\text{D}_{3/2}$	0.37260	1.8×10^{-4}	0.59	3890
O III	$^3\text{P}_0 - ^3\text{P}_1$	88.356	2.62×10^{-5}	0.39	461
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_2$	51.815	9.76×10^{-5}	0.95	3250
	$^3\text{P}_2 - ^1\text{D}_2$	0.50069	1.81×10^{-2}	2.50	6.4×10^5
	$^3\text{P}_1 - ^1\text{D}_2$	0.49589	6.21×10^{-3}	2.50	6.4×10^5
	$^1\text{D}_2 - ^1\text{S}_0$	0.43632	1.70	0.40	2.4×10^7
Ne II	$^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$	12.8136	8.6×10^{-3}	0.37	5.9×10^5
Ne III	$^3\text{P}_2 - ^3\text{P}_1$	15.5551	3.1×10^{-2}	0.60	1.27×10^5
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_0$	36.0135	5.2×10^{-3}	0.21	1.82×10^4
Si II	$^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$	34.8152	2.17×10^{-4}	7.7	(3.4×10^5)
S II	$^4\text{S}_{3/2} - ^2\text{D}_{5/2}$	0.67164	2.60×10^{-4}	4.7	1240
	$^4\text{S}_{3/2} - ^2\text{D}_{3/2}$	0.67308	8.82×10^{-4}	3.1	3270
S III	$^3\text{P}_0 - ^3\text{P}_1$	33.4810	4.72×10^{-4}	4.0	1780
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_2$	18.7130	2.07×10^{-3}	7.9	1.4×10^4
S IV	$^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$	10.5105	7.1×10^{-3}	8.5	5.0×10^4
Ar II	$^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$	6.9853	5.3×10^{-2}	2.9	1.72×10^6
Ar III	$^3\text{P}_2 - ^3\text{P}_1$	8.9914	3.08×10^{-2}	3.1	2.75×10^5
	$^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_0$	21.8293	5.17×10^{-3}	1.3	3.0×10^4
Fe II	$^6\text{D}_{7/2} - ^6\text{D}_{5/2}$	35.3491	1.57×10^{-3}	–	(3.3×10^6)
	$^6\text{D}_{9/2} - ^6\text{D}_{7/2}$	25.9882	2.13×10^{-3}	–	(2.2×10^6)

WNM

不稳定平衡状态

CNM



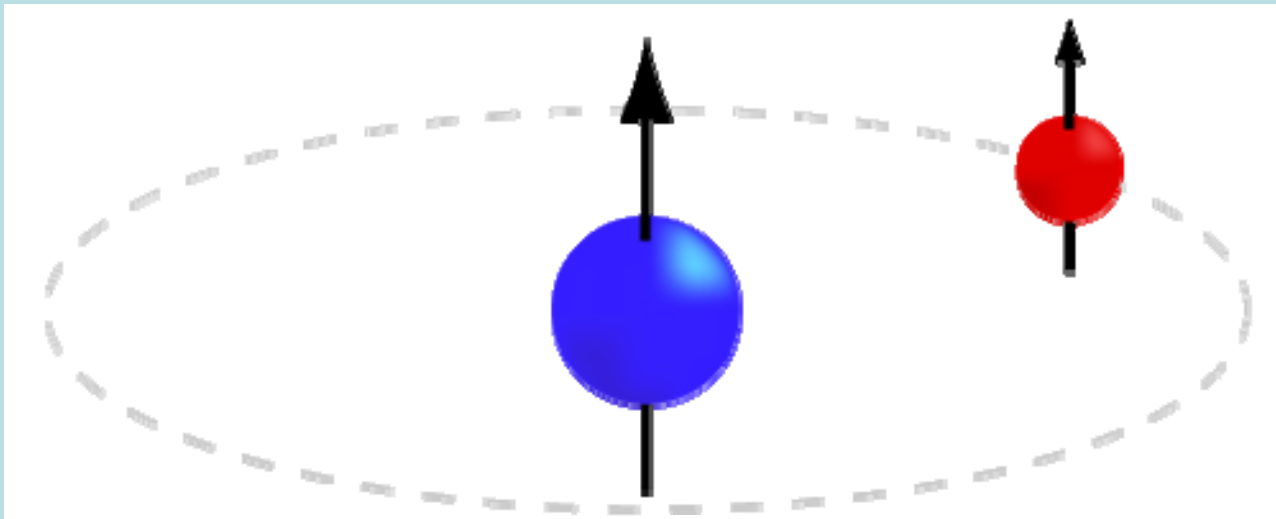
太阳系周围的HI气体的能量平衡状态

平衡温度

- 这类气体一般是处于能量平衡和压力平衡状态的
- 同时满足能量平衡和压力平衡的HI只有2种稳定状态：CNM和WNM
- CNM的最低温度由 [C II] 的有效 cooling 温度决定，低温时，[C I] 的 cooling 还会起作用，但是跃迁几率要比 [C II] 小一个量级，效率远低
- 平衡温度和重元素丰度有很大关系

21 cm谱线的辐射机制

- 21 cm谱线是研究HI气体最有力的工具
- 其产生机制是电子和原子核自旋平行跃迁到反平行状态时放出的能量



21 cm 谱线的一些主要参数

- 频率：1.420405751786(30) GHz
($\lambda = 21.106114$ cm)
- 简并度= $2F+1$ ：上能级为3，下能级为1
- 跃迁几率： $A_{ul} = 2.87 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ ，而[C II]158微米线的几率为 $2.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
- 对应的寿命为： 1.1×10^7 年，而典型的H原子之间碰撞的时间为几个小时
- 所以，HI气体一般都是充分碰撞的，也就是说处于LTE状态下， $T_{\text{ex}} = T_{\text{k}}$ ，对于HI，经常用 T_{spin} 表示 T_{ex}
- 同时由于 $h\nu \ll kT$ ，上下能级粒子数的比 $n_u:n_l$ 约为3:1

HI 21cm谱线的有关物理条件和关系

- 玻尔兹曼分布: $\frac{g_l n_u}{g_u n_l} = \exp\left(\frac{-h\nu_0}{kT_{ex}}\right)$
- $h\nu/k = 6.63 \times 10^{-27} \text{erg s} \cdot 1.4 \times 10^9 \text{Hz} / (1.38 \times 10^{-16} \text{erg K}^{-1}) = 6.73 \times 10^{-2} \text{K}$
- 所以对于 CNM (~100K) 和 WNM (~5000K), 都满足 $h\nu \ll kT$
- 吸收系数是受激发射和受激吸收的总效果:

$$\kappa_\nu = \frac{c^2 n_l g_u}{8\pi\nu^2 g_l} A_{ul} \left[1 - \exp\left(\frac{-h\nu_0}{kT_{ex}}\right) \right] \phi_{ul}(\nu)$$

- 瑞利-金斯近似下: $\kappa_\nu = \frac{c^2 n_l g_u}{8\pi\nu^2 g_l} A_{ul} \frac{h\nu_0}{kT_{ex}} \phi_{ul}(\nu).$

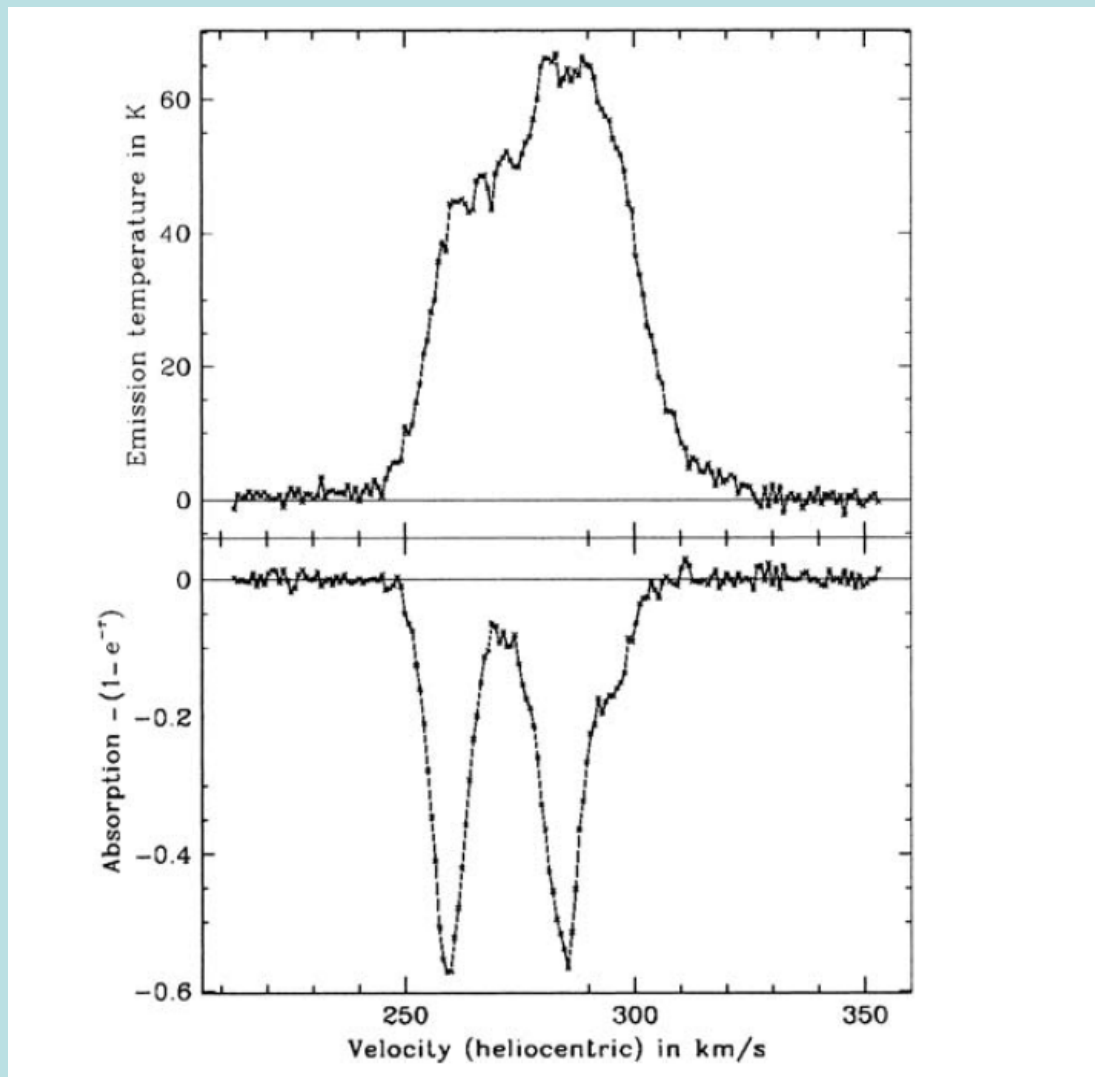
21cm谱线 (续)

- 光学厚度: $\tau_\nu \equiv \int \kappa_\nu ds$

τ 和柱密度以及激发温度的关系: $\tau_\nu \propto \frac{N}{T_{ex}}$

- 亮温度 $T_B = T_{ex} \times (1 - e^{-\tau}) \approx T_{ex} \times \tau$ (当 $\tau \ll 1$ 时)
- T_B 是可以和观测量 T_A 联系起来的物理量
- 所以光薄时, 亮温度正比于HI的柱密度
- 而对于相同的柱密度, 温度高的气体光学厚度小, 也就是说CNM更容易是光厚的

观测上证明有2种成分的HI 气体



假定HI气体的空间分布是比较连续的，上图是在没有背景强的连续谱发射时，测到的HI的谱，这个发射谱其实是包含了CNM和WNM的成分

下图是在上图的空间位置附近，找到一个有强的河外连续发射源，对着强的连续辐射源得到的吸收谱，这个吸收是来自CNM，光学厚度比较大

利用21cm谱线测量HI气体质量

- 光薄时，测到的积分流量 $\int F_\nu dv \propto \int \frac{M_{HI}}{D^2} dD$
- 和气体温度无关
- 对于已知距离的一块云， D 是常数，流量就正比于质量，比如对于河外星系来讲，我们测到的HI的云的发射，其中的各个部分到我们的距离可以近似认为是一样的

$$\left(\frac{M_H}{M_\odot}\right) \approx 2.36 \times 10^5 \left(\frac{D}{\text{Mpc}}\right)^2 \int \left[\frac{S(\nu)}{\text{Jy}}\right] \left(\frac{dv}{\text{km s}^{-1}}\right)$$

- 而对于河内，流量和质量之间的关系则要复杂一些，因为我们测到的流量是视线方向上的所有气体，距离差异很大
- 光厚时(部分冷的HI气体CNM)，由流量可以得到HI气体的质量下限

HI 21 cm谱线的应用

- 银河系结构
- 分子云中的HI 21cm谱线，吸收
- 河外星系的动力学研究
- 并合星系的tidal tail以及动力学
- Dark galaxies?
- 早期宇宙

HI 21cm的空间分辨率

- 单镜空间分辨率很差：最大的单镜 Arecibo 空间分辨率为3.5角分
- 所以要得到HI的高空间分辨率的数据，需要用干涉仪
- 目前能够在这个波段工作的射电干涉仪有 VLA、WSRT、GMRT、ATCA、ATA(这个空间分辨率也不好)等

HI观测灵敏度的估算

- 单镜: $\sigma_T = 2T_{sys}/\sqrt{\beta\tau}$ (p-s mode)

- 干涉仪: $\Delta I_m = \frac{K}{\sqrt{N(N-1)(N_{IF}T_{int}\Delta\nu_M)}} \text{ mJy}$

HI观测的单镜灵敏度估算

- ps mode

$$\sigma_T = 2T_{sys}/\sqrt{\beta\tau}$$

- From Arecibo website, T_{sys} 是系统温度(接收机和天空的贡献), β 是频率分辨率(单位为Hz), τ 是总的观测时间, 这个公式对所有的望远镜都一样, 得到的是天线温度的噪音水平

HI观测的单镜灵敏度估算(续)

- 需要将要求的速度分辨率和频率分辨率联系起来： $dv = c \times d\nu / \nu$ $\nu = 1.42\text{GHz}$

$$\sigma T = \frac{3.7 \times 10^{-3} \times T_{sys}}{\sqrt{dv \times \tau}}$$

- 速度分辨率的单位为km/s，观测时间的单位为分钟
- 对于大部分的望远镜，在这个波段的 T_{sys} 在30K左右，那么在一分钟的观测时间里，1 km/s的速度分辨率下，噪音水平就是0.11K
- 注意：这样得到的是天线温度，还需考虑天线效率

干涉仪的灵敏度估算

$$\Delta I_m = \frac{K}{\sqrt{N(N-1)(N_{IF}T_{int}\Delta\nu_M)}} \text{ mJy}$$

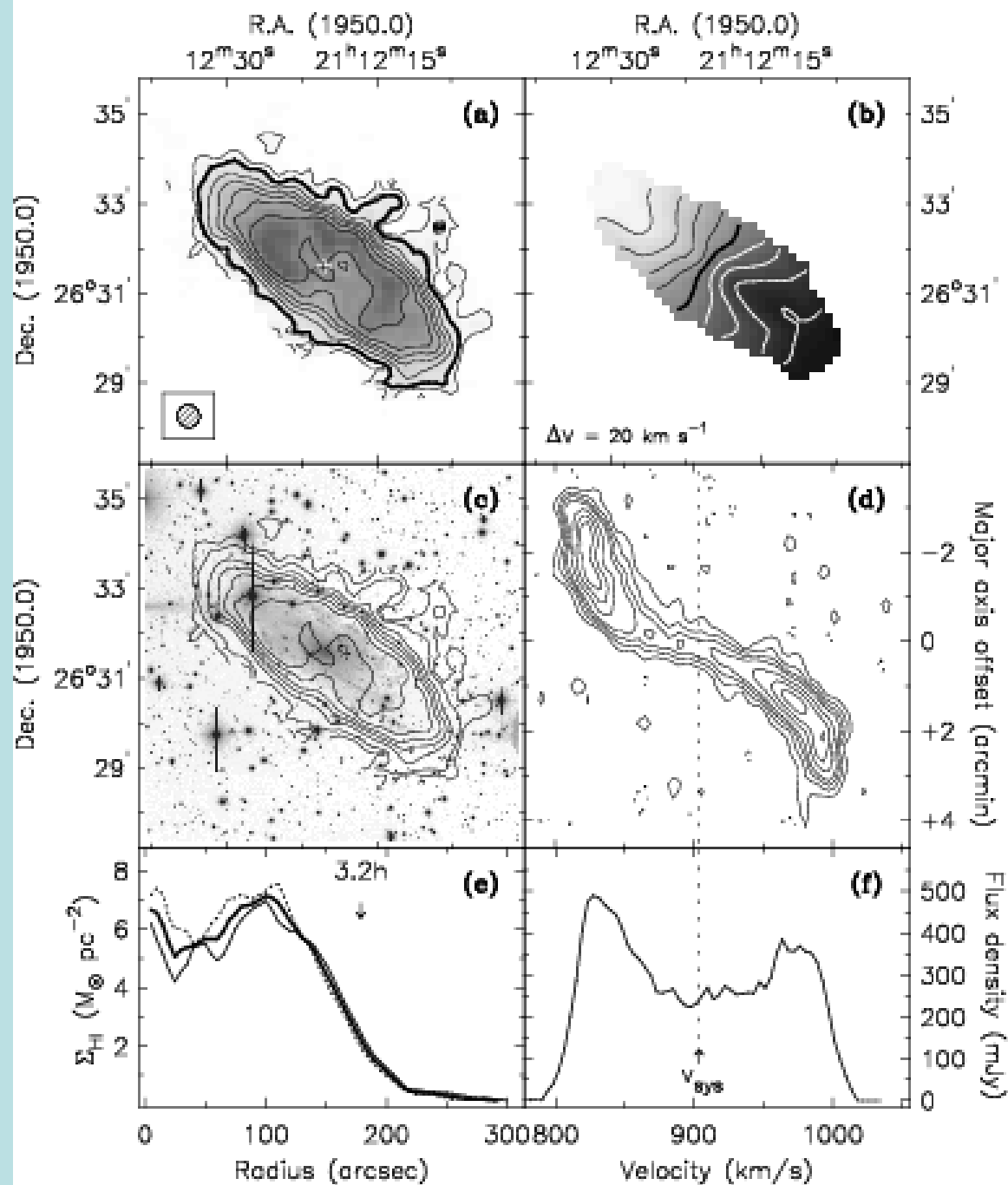
- 其中， N 是天线数目， T_{int} 是on-source的时间， N_{IF} 是最终平均在输出图像中的channel数， $\Delta\nu_M$ 是频率分辨率

- K 是一个和 T_{sys} 以及天线效率有关的参数

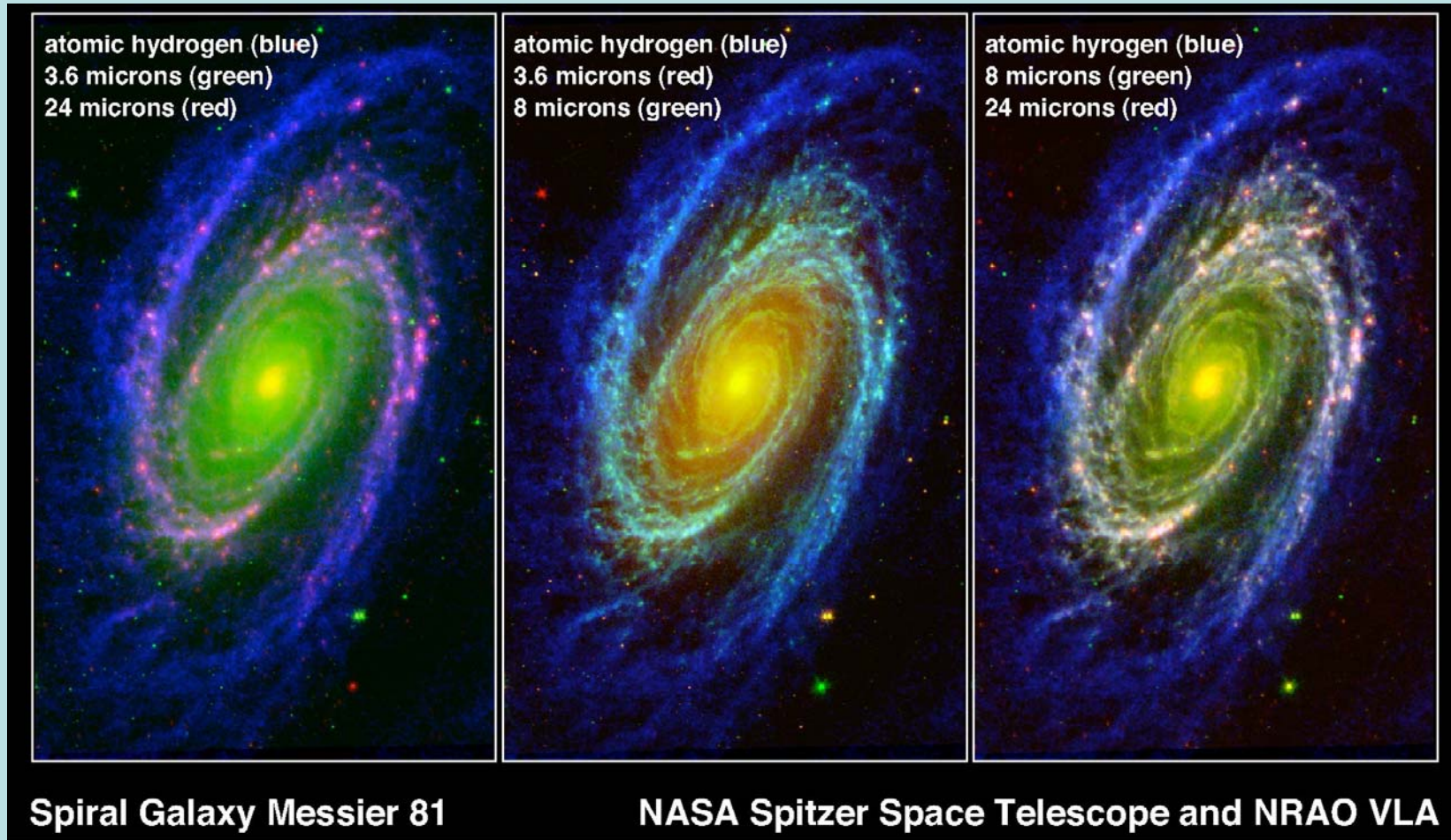
$$K = \frac{0.12T_{sys}}{\eta_a}$$

- T_{sys} 以及天线效率与频率有关，故 K 也和频率有关
- 可以参照 <http://www.vla.nrao.edu/astro/guides/exposure/>

UGC 11707



M81 (de Blok et al. 2007)

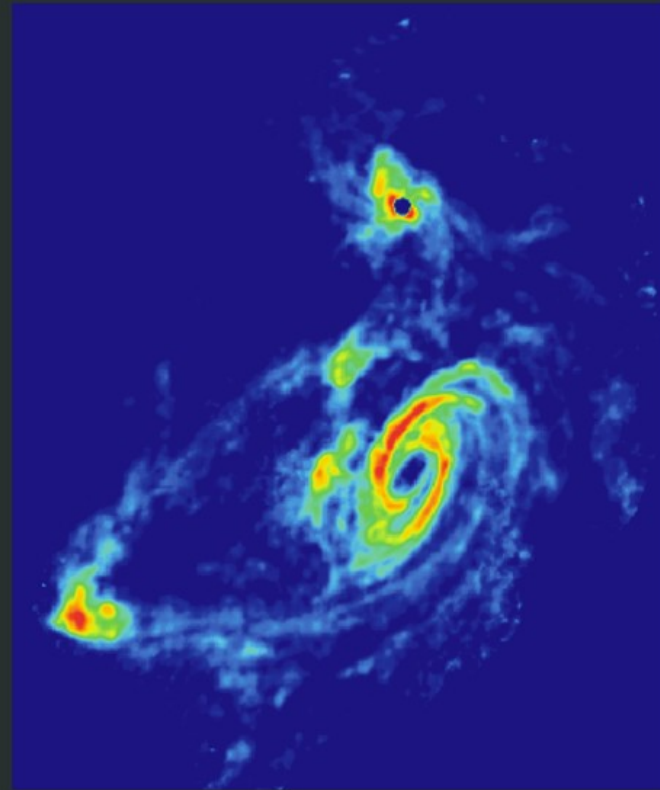


TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

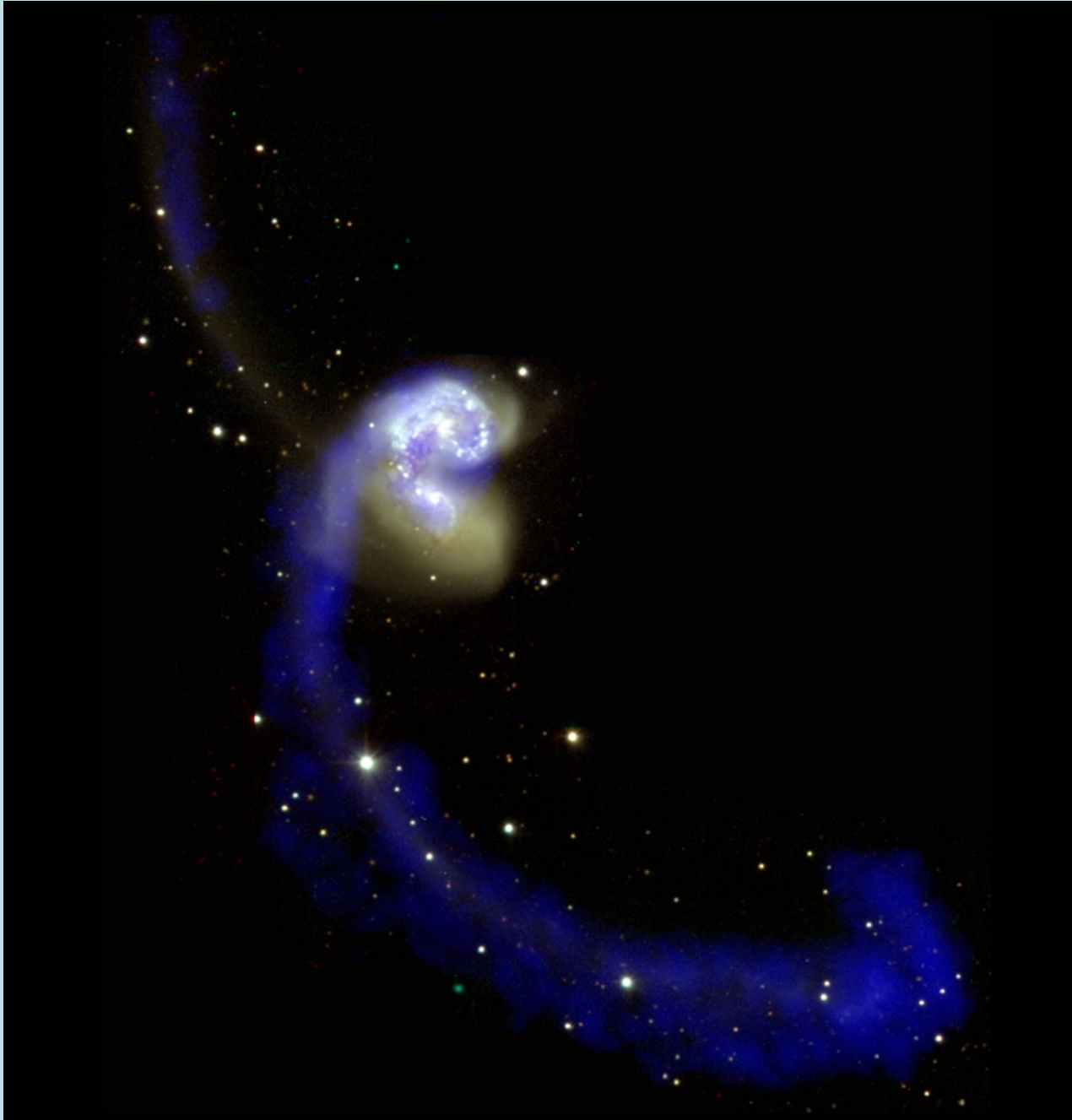
Stellar Light Distribution



21 cm HI Distribution



Min S. Yun, Paul T.P. Ho, K.Y. Lo



The Antenne galaxy

J.E.Hibbard et al

Dark galaxies

- 有HI气体，但是没有对应的恒星成分(光学)的星系
- 这类星系的存在与否对于大尺度结构的研究很重要
- 目前Arecibo已经在进行搜寻
- FAST还有机会？