

分子云和恒星形成

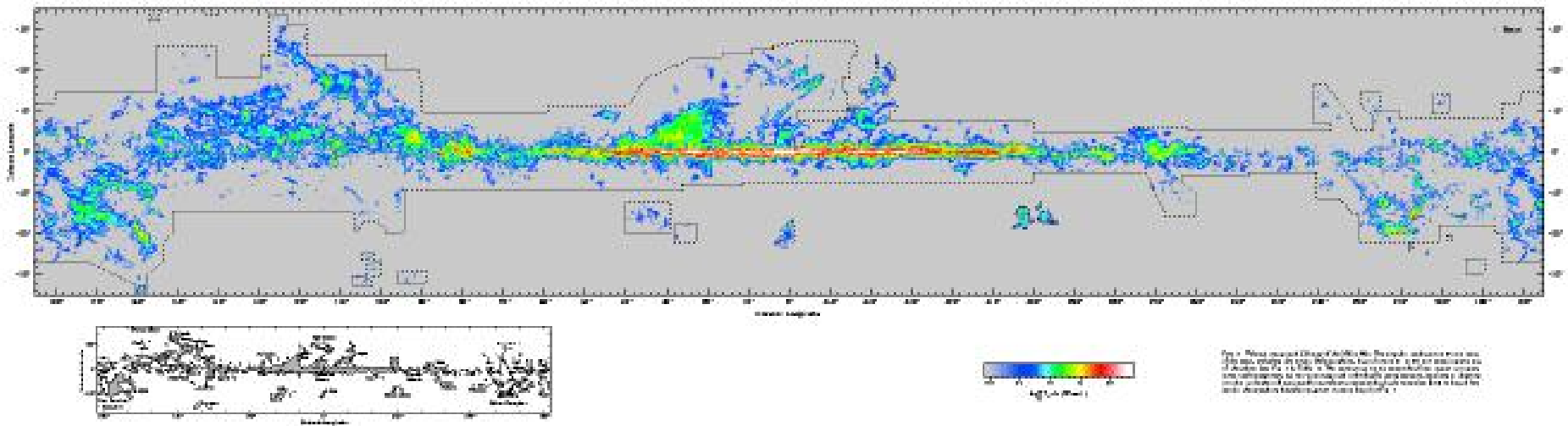
基本理论及基础知识

分子气体的组成及基本物理特征

- 组成: H_2 、 He 、各种其他分子以及尘埃
- 温度: 10K-几百K
- 密度: 10^2 - 10^7 cm^{-3}
- 广泛的分布于银道面上

银河系内分子气体的分布

- 主要分布在银盘上



Dame, Hartmann, & Thaddeus (2001), ApJ

分子气体的观测研究

- 恒星形成于分子云中
- H_2 分子没有永久偶极距，转动跃迁为电四极辐射，跃迁几率小
- H_2 分子的转动惯量小，跃迁落在中远红外，在地面上无法观测，而且由于需要的激发温度很高，一般很难被激发到激发态
- 所以， H_2 分子的辐射很难直接测量
- 落在毫米波的CO分子的转动跃迁成为研究分子气体的最有力的工具

光学厚度和辐射转移过程

- A系数为自发跃迁系数，考虑简单的双能级系统

- 爱因斯坦A系数和B系数的关系

$$A_{ul} = \frac{2h\nu_0^3}{c^2} B_{ul}$$

$$g_l B_{lu} = g_u B_{ul}$$

- 吸收系数:

$$\kappa_\nu \equiv \frac{h\nu}{4\pi} [n_l(\nu) B_{lu} - n_u(\nu) B_{ul}]$$

- 将A B系数关系代入:

$$\kappa_\nu \equiv \frac{c^2 n_l(\nu) g_u}{8\pi \nu_0^2 g_l} A_{ul} \left[1 - \frac{g_l n_u(\nu)}{g_u n_l(\nu)} \right]$$

- 光学厚度的定义:

$$\tau_\nu \equiv \int \kappa_\nu ds$$

- 由辐射转移方程, $\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = S_\nu - I_\nu$, 光学厚度是没有量纲的

碰撞激发

- 分子谱线一般都是通过和H₂分子碰撞，激发到高能级，然后通过自发跃迁辐射到低能级

- 还是考虑简单的双能级系统 $n_l(R_{lu} + C_{lu}) = n_u(R_{ul} + C_{ul})$

- LTE时满足: $n_l C_{lu} = n_u C_{ul}$

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_K}\right)$$

$$C_{lu} = C_{ul} \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_K}\right)$$

- 而 $R_{lu} = I_\nu B_{lu}$, $R_{ul} = A_{ul} + I_\nu B_{ul}$

- 所以在non-LTE下: $\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \frac{A_{ul} I_\nu c^2 / 2h\nu^3 + C_{ul} \exp(-h\nu/kT_K)}{(1 + I_\nu c^2 / 2h\nu^3) A_{ul} + C_{ul}}$

- 其中 T_K 为碰撞粒子的热运动温度

碰撞激发和临界密度

- $$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \frac{A_{ul} I_\nu c^2 / 2h\nu^3 + C_{ul} \exp(-h\nu/kT_K)}{(1 + I_\nu c^2 / 2h\nu^3) A_{ul} + C_{ul}}$$
- 考虑没有入射光，而且光薄情形，这时的辐射强度
$$\int I_\nu d\nu = \int \frac{h\nu}{4\pi} n_u A_{ul} ds$$
- 而此时
$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \frac{\exp(-h\nu/kT_K)}{1 + A_{ul}/C_{ul}}$$
- 所以
$$\frac{n_u}{n_l + n_u} = \frac{(g_u/g_l) \exp(-h\nu/kT_K)}{1 + (g_u/g_l) \exp(-h\nu/kT_K) + A_{ul}/C_{ul}}$$
- $$\int I_\nu d\nu = \frac{(g_u/g_l) \exp(-h\nu/kT_K)}{1 + (g_u/g_l) \exp(-h\nu/kT_K) + A_{ul}/C_{ul}} \frac{h\nu}{4\pi} N A_{ul}$$
- 其中N为这种发射粒子的柱密度

碰撞激发和临界密度(续)

- 在一定的温度下，碰撞系数 C_{ul} 正比于主要的碰撞粒子的体密度 n (对于分子气体而言，就是 H_2 的体密度)， $A_{ul}=C_{ul}$ 时的体密度，定义为临界密度 n_{crit} ，它依赖于温度

- 现在回头来看
$$\int I_\nu d\nu = \frac{(g_u/g_l)\exp(-h\nu/kT_K)}{1+(g_u/g_l)\exp(-h\nu/kT_K)+A_{ul}/C_{ul}} \frac{h\nu}{4\pi} N A_{ul}$$

- 可以写成
$$\int I_\nu d\nu = \frac{(g_u/g_l)\exp(-h\nu/kT_K)}{1+(g_u/g_l)\exp(-h\nu/kT_K)+n_{crit}/n} \frac{h\nu}{4\pi} N A_{ul}$$

- 随着 n 的增加，流量在增加
- 柱密度一定时，对于 $n \ll n_{crit}$ ，流量正比于 n
- $n \gg n_{crit}$ ，变成常数

射电分子谱线

- 实际上的分子谱线能级远远比双能级系统复杂，但是前面提到的一些基本概念还是一致的，部分关系式也是适用的
- 线性分子的转动谱跃迁很多落在从厘米波到毫米波及更短的波长范围内
- 主要包括CO及其同位素、HCN、CS、CN、HCO⁺、HC_nN(n=3,5,7,9....)、HNC等
- 还有一些分子的非转动跃迁的辐射，比如NH₃、H₂CO、H₂O、CH₃OH

双原子分子的转动跃迁

- 转动能: $H_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2 = \mathbf{J}^2/2I$

I 是转动惯量, \mathbf{J} 是角动量

- 转动惯量: $I = m_r R_e^2$ $m_r = m_A m_B / (m_A + m_B)$

R_e 是2个原子之间的距离, m_r 是约化质量

- 薛定谔方程的解: $E_r/h = B_0 J(J + 1)$

其中 J 为转动量子数, $B_0 = h/(8\pi^2 I)$

- 非刚性原子 $E_r/h = B_0 J(J + 1) - D[J(J + 1)]^2$

实际原子都是这种, 但第二项一般要小很多

双原子分子的转动能级和跃迁几率

- 选择定则: $\Delta J = \pm 1$ (因为光子的角动量为1)
- 频率: $\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{h}{4\pi^2 I}(J+1)$ ($J+1 \rightarrow J$)
- 偶极跃迁, 跃迁几率: $A_{ul} = \frac{64\pi^4}{3hc^3} \nu^3 |\mu_{ul}|^2$
- 对于 $J+1 \rightarrow J$ 的跃迁, 其中 $|\mu_{ul}|^2 = \mu^2 \frac{J+1}{2J+3}$
- 所以: $A_{J+1 \rightarrow J} = 1.165 \times 10^{-11} \mu^2 \nu^3 \frac{J+1}{2J+3}$
- 对同一个分子, 高能级的跃迁几率大大高于低能级的跃迁几率

CO分子

- CO是除了H₂和He分子外丰度最高的分子
- 能级间隔小、临界密度小，容易激发
- CO J=1-0跃迁频率115.271GHz，能级差对应的温度 $E/k=5.5K$ ，所以在很低温度的时候，就能碰撞到高能级(没有中心天体加热的时候，分子气体的温度一般在10-20K)
- CO分子的辐射，是分子云的重要冷却机制

CO分子的发现

- Wilson, R. W.; Jefferts, K. B.; Penzias, A. A., 1970, ApJ, 161, L43: “Carbon Monoxide in the Orion Nebula”
- 标志着分子天文学的诞生
- CO: Twenty-Five Years of Millimeter-Wave Spectroscopy, Proceedings of the 170th Symposium of the International Astronomical Union held in Tucson, Arizona, May 29-June 5, 1995.

利用CO的观测获得分子云的物理参数

- $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 1-0在绝大部分情况下是光厚的
- 其同位素 ^{13}CO 一般是光薄的
- 而 C^{18}O 在绝大部分情况下是光薄的
- 由辐射转移方程知道，光厚谱线可以得到激发温度 $T_{\text{B}}=T_{\text{ex}}$
- 由于 ^{13}CO 及 C^{18}O 的化学性质和CO基本上一样，而且由于其要求的激发密度很低，可以假定J=1-0是热化的， T_{ex} 一样，同时也等于运动学温度 T_{K}

CO及其同位素 ^{13}CO 、 C^{18}O 的性质

- 频率：可以通过 $I = m_r R_e^2$ $B_0 = h/(8\pi^2 I)$

$$m_r = m_A m_B / (m_A + m_B)$$

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{h}{4\pi^2 I} (J+1)$$

- 以及同跃迁的CO频率来计算
- 化学性质一样，所以 R_e 是一样的
- 而偶极距也是一样的，所以爱因斯坦A系数也是类似的(差一个频率的3次方项)

$$A_{J+1 \rightarrow J} = 1.165 \times 10^{-11} \mu^2 \nu^3 \frac{J+1}{2J+3}$$

CO及其同位素 ^{13}CO 、 C^{18}O (续)

- 因为A系数和C系数差异很小，所以，即使是在非热化条件下，CO及其同位素的激发条件也是类似的， T_{ex} 可以近似相等
- 所以，对于光薄谱线 ^{13}CO 和 C^{18}O 可以利用CO得到的 T_{ex} 来进行计算其柱密度
- 简单的考虑，由光薄谱线的测量可以得到的是上能级粒子柱密度，而上能级粒子数知道后，热化假设下由 T_{ex} 可以计算得到各个能级的布居数，得到总的柱密度，然后再假定一个 ^{13}CO 和 C^{18}O 的丰度比，就可以得到 H_2 的柱密度

这种计算方法带来的不确定性

- 由 ^{12}CO 的亮温度(天线温度)得到的 T_{ex} , 会有填充因子(filling factor)的影响, 偏小
- 不同的分子云, CO 及其同位素的相对丰度会有比较大的差异, 而这个差异会直接带来 H_2 分子云的质量估算的不确定性
- 在比较冷的时候, CO 及其同位素分子会附着(depletion)在尘埃上, 导致气体中丰度降低
- ^{13}CO 1-0跃迁在很多情况下, 也不是光薄的, 这时会使得由流量估算得到的柱密度偏低

致密分子气体探针

- 偶极距大的分子
- CS、HCN、HNC、HCO⁺
- 丰度比CO小几个量级，但是还是属于丰度偏高的分子，否则无法测到辐射
- 在分子气体的密度高于临界密度时，自发跃迁几率(偶极距)越大，谱线越强

TABLE 3
MOLECULAR FRACTIONAL ABUNDANCES
IN THE OMC-1 SUBSOURCES

Species	$f(X)$ [$N(X)/N(H_2)$]
Extended Ridge:	
NO	$\lesssim 5.0 \times 10^{-8}$
CO	5.0×10^{-5}
CS	2.5×10^{-9}
CN	3.3×10^{-9}
HNC	5.3×10^{-10}
HCN	5.0×10^{-9}
C ₂ H	$\sim 5.3 \times 10^{-9}$
C ₃ H ₂	8.7×10^{-11}
HDCO	1.9×10^{-10}
HCO ⁺	2.3×10^{-9}
HCS ⁺	5.3×10^{-11}
HC ₃ N	1.3×10^{-10}
DNC	7.7×10^{-12}
DCN	1.7×10^{-11}
CH ₃ CCH	3.3×10^{-9}
HC ₅ N	$\lesssim 2.3 \times 10^{-11}$
SiO	$< 3.3 \times 10^{-10}$
HCO	$< 3.3 \times 10^{-11}$
SO	$\lesssim 9.3 \times 10^{-10}$
SO ₂	$\lesssim 3.3 \times 10^{-9}$
HNCO	$\lesssim 2.2 \times 10^{-9}$
C ₃ N	$< 1.7 \times 10^{-11}$
C ₄ H	$< 0.8 \times 10^{-11}$
CO ⁺	$< 1.0 \times 10^{-12}$

Blake 1987

几种常用线性分子的参数

- 下面4个是常用的致密分子气体探针

Molecule	μ debye	Transition	Frequency GHz	E_u/k K	A_{ul} s^{-1}	n_{crit} cm^{-3}
CO	0.112	1-0	115.271 203	5.5	7.4×10^{-8}	3×10^3
		2-1	230.538 001	16.6	7.1×10^{-7}	1×10^4
		3-2	345.795 975	33.2	2.6×10^{-6}	5×10^4
CS	1.95	1-0	48.990 964	2.4	1.8×10^{-6}	1×10^5
		2-1	97.980 968	7.1	2.2×10^{-5}	7×10^5
		3-2	146.969 049	14.1	6.1×10^{-5}	2×10^6
		5-4	243.935 606	35.2	2.9×10^{-4}	8×10^6
HCO ⁺	4.07	1-0	89.188 518	4.3	3.0×10^{-5}	1.5×10^5
		3-2	267.557 625	25.7	1.0×10^{-3}	3×10^6
HCN	2.98	1-0 F(2-1)	88.631 847	4.3	2.4×10^{-5}	4×10^6
		3-2	265.886 432	25.5	8.5×10^{-4}	1×10^7
HNC	3.05	1-0 F(2-1)	90.663 574	4.3	2.7×10^{-5}	4×10^6
		3-2	271.981 067	26.1	9.2×10^{-4}	1×10^7

H₂分子转动跃迁

ortho-H ₂			para-H ₂		
Transition	λ μm	A_{ul} s^{-1}	Transition	λ μm	A_{ul} s^{-1}
$v=0-0, S(0)$	28.21883	2.95×10^{-11}	$v=0-0, S(1)$	17.03483	4.77×10^{-10}
$v=0-0, S(2)$	12.27861	2.76×10^{-9}	$v=0-0, S(3)$	9.66491	9.86×10^{-9}
$v=0-0, S(4)$	8.02505	2.65×10^{-8}	$v=0-0, S(5)$	6.90952	5.89×10^{-8}
$v=0-0, S(6)$	6.10856	1.14×10^{-7}	$v=0-0, S(7)$	5.51116	2.01×10^{-7}

v 是振动量子数，跃迁只可以在反平行或者平行的分子内部之间产生，波长很短，需要的激发温度高，所以在一般的分子气体中，是无法激发的