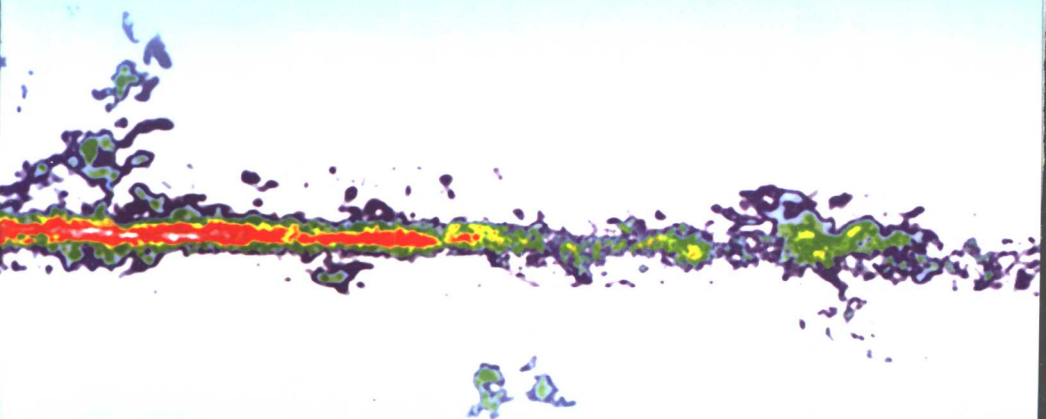


高等学校教学用书

# 分子天体物理学基础

(下册)

孙 锦 李守中 编著



北京师范大学出版社

高等学校教学用书

# 分子天体物理学基础

(下册)

孙 锦 李守中 编著

北京师范大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

分子天体物理学基础/孙锦,李守中编著. —北京:北京师范大学出版社,2003.5  
高等学校教学用书  
ISBN 7-303-06410-9

I. 分… II. ①孙…②李… III. 分子物理学:天体物理学-高等学校-教材 IV. P14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 019243 号

北京师范大学出版社出版发行  
(北京新街口外大街 19 号 邮政编码:100875)

<http://www.bnup.com.cn>

出版人:赖德胜

北京师范大学印刷厂印刷 全国新华书店经销

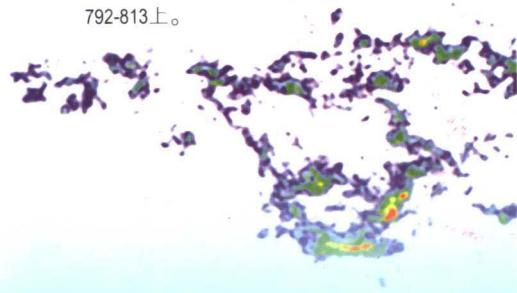
开本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:15.75 字数:414 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

印数:1~1 000 定价:25.00 元

## 封面图说明

银河系的一个新的、大尺度的CO分子辐射空间分布图。由美国Cambridge天体物理中心 (CfA) 和托洛洛山美洲天文台 (CTIO) 的两台1.2米毫米波望远镜共同观测完成。是至今最完整的银河系CO巡视图。图中不同颜色代表不同的CO ( $J=1-0$ ) 谱线发射积分强度。其中白色最强, 依次是红、黄、绿、蓝……等色。该图引自: Dame, T.M.等的文章: The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey, 刊登在2001年的ApJ, 547: 792-813上。





# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第五章 分子云                        | (1)  |
| § 5.1 引言                       | (1)  |
| 5.1.1 什么是“分子云” 分子云研究的重要意义      | (1)  |
| 5.1.2 CO——银河系和星系 $H_2$ 的一个示踪器  | (3)  |
| 5.1.3 示踪分子云物理条件的其它探针           | (9)  |
| 5.1.4 分子云中 $H_2$ 的直接测量         | (16) |
| § 5.2 分子云的分类及其主要特性             | (21) |
| 5.2.1 Goldsmith 的分子云分类         | (22) |
| 5.2.2 Winnewisser 的分子云分类       | (26) |
| 5.2.3 Turner 和 Myers 的分子云分类    | (27) |
| 5.2.4 高银纬分子云                   | (30) |
| § 5.3 分子云的大尺度分布                | (32) |
| 5.3.1 银河系分子云的巡天观测及其特点          | (33) |
| 5.3.2 银河系分子云的 $R$ 分布和 $Z$ 分布   | (43) |
| 5.3.3 分子云的旋臂结构和银心分布            | (47) |
| 5.3.4 分子云特性的统计学                | (54) |
| 5.3.5 星系中分子云的大尺度分布、旋臂结构和核区分布   | (60) |
| § 5.4 分子云的形成与寿命                | (68) |
| 5.4.1 分子云结构的形成、演化与瓦解           | (68) |
| 5.4.2 分子云形成与寿命 云形成的短寿命模型和长寿命模型 | (72) |
| 5.4.3 分子云的理论质量谱                | (75) |

|            |                                  |       |
|------------|----------------------------------|-------|
| § 5. 5     | 分子云物理参数的确定 .....                 | (81)  |
| 5. 5. 1    | 分子云物理参数确定概述 .....                | (81)  |
| 5. 5. 2    | 分子云物理参数确定的 LTE 方法 .....          | (85)  |
| 5. 5. 3    | 分子云物理参数确定的模型方法 .....             | (93)  |
| 5. 5. 4    | 分子云其它物理参数的确定 .....               | (115) |
| § 5. 6     | 分子云的加热和冷却 .....                  | (121) |
| 5. 6. 1    | 分子云中能量转移的各种过程 .....              | (122) |
| 5. 6. 2    | 分子云的加热与冷却机制 .....                | (125) |
| 5. 6. 3    | 其它有关问题 .....                     | (138) |
| § 5. 7     | 河外星系中的分子和分子云 .....               | (143) |
| 5. 7. 1    | 河外星系中的分子及其研究意义 .....             | (143) |
| 5. 7. 2    | 星系中 CO 与红外的对比研究和恒星形成效率<br>.....  | (145) |
| 5. 7. 3    | 星暴星系和活动星系核 (AGN) 中的分子气体<br>..... | (147) |
| 5. 7. 4    | 用分子手段搜寻高红移的星系和原星系<br>.....       | (152) |
| 参考资料       | .....                            | (156) |
| <b>第六章</b> | <b>天体脉泽源</b> .....               | (171) |
| § 6. 1     | 引言 .....                         | (171) |
| § 6. 2     | 各类天体脉泽源的观测和研究进展 .....            | (175) |
| 6. 2. 1    | 星际脉泽 .....                       | (175) |
| 6. 2. 2    | 恒星脉泽 .....                       | (184) |
| 6. 2. 3    | 河外超脉泽 .....                      | (185) |
| § 6. 3     | 天体脉泽抽运机制的研究进展 .....              | (197) |
| 6. 3. 1    | OH 脉泽 .....                      | (198) |
| 6. 3. 2    | H <sub>2</sub> O 脉泽 .....        | (202) |
| 6. 3. 3    | SiO 脉泽 .....                     | (207) |

---

|                           |                                      |       |
|---------------------------|--------------------------------------|-------|
| 6.3.4                     | $\text{CH}_3\text{OH}$ 脉泽 .....      | (209) |
| 6.3.5                     | $\text{NH}_3$ 脉泽 .....               | (213) |
| 6.3.6                     | 河外超脉泽 .....                          | (214) |
| § 6.4                     | 天体脉泽源的应用 (略) .....                   | (217) |
| 参考资料 .....                |                                      | (219) |
| <b>第七章 分子云和恒星形成</b> ..... |                                      | (229) |
| § 7.1                     | 恒星形成中的一些基本问题 .....                   | (230) |
| 7.1.1                     | 恒星形成速率、效率和初始质量函数 .....               | (230) |
| 7.1.2                     | 分子云与恒星形成的一般关系 .....                  | (237) |
| 7.1.3                     | 自发与受激的恒星形成 恒星形成的触发机制<br>.....        | (250) |
| 7.1.4                     | 恒星形成的双模式理论 .....                     | (252) |
| § 7.2                     | 分子云中的力学平衡 .....                      | (257) |
| 7.2.1                     | 分子云自引力塌缩的金斯判据 .....                  | (257) |
| 7.2.2                     | 位力定理 .....                           | (257) |
| 7.2.3                     | 支撑分子云的主要因素 .....                     | (264) |
| 7.2.4                     | 磁场在恒星形成中的作用 .....                    | (269) |
| § 7.3                     | 分子云塌缩与原恒星 .....                      | (274) |
| 7.3.1                     | 分子云核的引力塌缩过程和原恒星的形成<br>.....          | (274) |
| 7.3.2                     | 年轻恒星天体 (YSOs) 的能谱分布和性质<br>.....      | (282) |
| 7.3.3                     | 分子云核塌缩的直接证据 .....                    | (292) |
| § 7.4                     | 年轻天体附近的分子外向流与盘系统 .....               | (297) |
| 7.4.1                     | 高速分子外向流的发现与证认 .....                  | (299) |
| 7.4.2                     | 分子外向流的基本特性 .....                     | (304) |
| 7.4.3                     | 分子外向流与恒星形成过程的关系 分子<br>外向流的驱动机制 ..... | (318) |

|            |                                        |              |
|------------|----------------------------------------|--------------|
| 7.4.4      | YSOs 附近的盘系统及其在恒星形成和<br>外向流形成中的作用 ..... | (322)        |
| § 7.5      | 恒星形成过程的主要阶段——低质量星形成的<br>一个基本图景 .....   | (327)        |
| § 7.6      | 大质量星形成的基本特征 .....                      | (330)        |
|            | 参考资料 .....                             | (340)        |
| <b>第八章</b> | <b>晚期演化星拱星包层的分子发射 .....</b>            | <b>(350)</b> |
| § 8.1      | 恒星从红巨星到行星状星云的演化 拱星<br>分子谱线研究的重要性 ..... | (351)        |
| § 8.2      | 迄今已发现的拱星分子品种、谱线类型以及<br>成协天体性质 .....    | (356)        |
| § 8.3      | 晚期演化星拱星包层的物理结构和运动学 .....               | (365)        |
| 8.3.1      | AGB 星拱星包层结构概貌和主要参数<br>.....            | (365)        |
| 8.3.2      | 晚期演化星拱星包层物理结构和运动学的<br>研究进展 .....       | (370)        |
| 8.3.3      | 小结 .....                               | (382)        |
| § 8.4      | 晚型星质量流失的估算、机制和演化状态 .....               | (384)        |
| 8.4.1      | 由 CO 谱线估算质量流失率 .....                   | (384)        |
| 8.4.2      | 由 OH 脉泽估算质量流失率 .....                   | (385)        |
| 8.4.3      | AGB 星质量损失率的演化 .....                    | (387)        |
| 8.4.4      | 晚型星质量损失的可能机制 .....                     | (388)        |
| 8.4.5      | 晚期演化星的演化状态 .....                       | (389)        |
|            | 参考资料 .....                             | (392)        |
| <b>第九章</b> | <b>星际物质化学 .....</b>                    | <b>(398)</b> |
| § 9.1      | 引言 .....                               | (398)        |
| 9.1.1      | 天体化学的发展 .....                          | (398)        |
| 9.1.2      | 星际物质化学的研究对象、研究方法和意义                    |              |

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| .....                                    | (400) |
| 9.1.3 星际物质化学的特点 星际气体的物理化学条件<br>.....     | (401) |
| § 9.2 星际分子形成和破坏的机制—— I. 气相反应<br>.....    | (405) |
| 9.2.1 速率系数 .....                         | (405) |
| 9.2.2 星际气体中基元的化学、物理过程 .....              | (406) |
| § 9.3 星际分子形成和破坏的机制—— II. 固体表面反应<br>..... | (419) |
| 9.3.1 尘粒及其表面 .....                       | (420) |
| 9.3.2 尘粒的温度 .....                        | (422) |
| 9.3.3 尘粒表面吸附的性质 粘结系数 .....               | (423) |
| 9.3.4 粒子在尘粒表面上的迁移 .....                  | (425) |
| 9.3.5 分子形成与去吸附对尘粒温度的要求 .....             | (426) |
| 9.3.6 星际尘粒表面的化学过程 .....                  | (429) |
| § 9.4 早期宇宙的化学 .....                      | (434) |
| § 9.5 分子云和星周包层中的化学 .....                 | (438) |
| 9.5.1 概述 .....                           | (438) |
| 9.5.2 致密云中的化学 .....                      | (441) |
| 9.5.3 弥散和半透明星云中的化学 .....                 | (448) |
| 9.5.4 星周包层化学 .....                       | (453) |
| 9.5.5 激波化学 1987A 超新星喷发物中的化学<br>.....     | (456) |
| 参考资料 .....                               | (462) |
| <b>附录 天文分子的观测和证认</b> .....               | (465) |
| § 1 天文分子谱线观测 .....                       | (465) |
| 1.1 大气的吸收和辐射 大气窗口 .....                  | (465) |
| 1.2 谱线观测对射电望远镜设备的特殊要求 .....              | (468) |

---

|            |                  |       |
|------------|------------------|-------|
| 1.3        | 谱线强度的测量和校准 ..... | (469) |
| § 2        | 天文分子谱线的证认 .....  | (470) |
| 2.1        | 电磁波的多普勒效应 .....  | (470) |
| 2.2        | 已知谱线的证认 .....    | (475) |
| 2.3        | 未知谱线的证认 .....    | (482) |
| 2.4        | 大批 U-谱线的证认 ..... | (488) |
| 2.5        | 检测复杂大分子的困难 ..... | (492) |
| 参考资料 ..... |                  | (492) |

# 第五章 分子云

## § 5.1 引言

### 5.1.1 什么是“分子云” 分子云研究的重要意义

星际介质是银河系和星系中除恒星以外物质的基本形式. 在星际分子被大批地发现、证认和搜寻之前, 人们对星际介质、银河系结构和银盘图像的认识主要是通过中性氢的 21 cm 谱线、原子的复合线以及恒星吸收线的光学研究来进行的. 近 30 年来毫米波、亚毫米波技术的发展, 使分子谱线的观测成为可能, 这就大大改观了人们对星际介质、银河系(乃至星系)结构以及恒星形成和演化的理解. 如: 过去人们认为银河系星际介质的大部分质量是以原子氢形式存在的, 并占据了大部分的银盘. 现在则认为星际物质的大部分质量是以分子云形式存在的. Winnewisser 估计, 银河系星际物质的总质量约  $5 \times 10^9 m_{\odot}$ , 其中尘埃质量占 1%, 气体质量占 99%, 而在这 99% 的星际气体中 97% 又是中性的, 电离成分仅占 3%<sup>[1]</sup>. 表 5.1 列出了银河系星际气体主要组成成分的平均物理参数. 由表 5.1 可见, 分子气体大约占据了银河系一半的星际物质质量. 在内银河分子更是占支配的地位. 在太阳圈内分子气体的总量是原子气体总量的 1~3 倍<sup>[2]</sup>. 然而, 由于分子云的平均密度远大于星际气体的其它组成成分, 因此分子云所占体积只有银河系总体积的 2%, 大部分体积仍为稀薄的电离介质所占据.

表 5.1 星际气体的平均参数

| 组成成分         | 密度/cm <sup>-3</sup>        | 温度/K                     | 总质量/ $m_{\odot}$ |
|--------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>电离气体:</b> |                            |                          | $2 \times 10^8$  |
| 云际冕气体        | $10^{-2} \sim 10^{-3}$     | $6 \times 10^5$          |                  |
| 低密 H II 区    | $3 \sim 10^2$              | 8 000                    |                  |
| 致密 H II 区    | $10^3 \sim 10^6$           | 8 000                    |                  |
| <b>原子气体:</b> |                            |                          | $1 \times 10^9$  |
| 云际 H I       | 0.1~1                      | 6 000                    |                  |
| 弥散云 H I      | 20                         | 80                       |                  |
| 稠密云 H I      | $10^3 \sim 10^6$           | 100~1 500                |                  |
| <b>分子气体:</b> |                            |                          | $2 \times 10^9$  |
| 巨分子云(GMCs)   | 100~300                    | 15                       |                  |
| 巨分子云核        | $5 \times 10^5$            | 35                       |                  |
| 暗云           | $10^3$                     | 10                       |                  |
| 暗云核          | $2 \times 10^4$            | 10                       |                  |
| Cirrus 云     | $10 \sim 10^3$             | 10~100                   |                  |
| 分子云中的        | $n_{H_2} \geq 10^6$        | $750 \leq T \leq 2\,500$ |                  |
| 激波区          | $n_H \approx 10^{5 \pm 1}$ | $300 \leq T \leq 1\,500$ |                  |
| 分子云中的        | $10^5 \sim 10^{11}$        | $10^2 \sim 10^3$         |                  |
| 脉泽源          |                            |                          |                  |

(原子气体参数取自 Orion-KL 的观测)

分子云是星际介质的主要组成部分,是星际介质中相对致密的区域.通常所谓分子云指的是气体密度大于  $100 \text{ cm}^{-3}$ , (注:也有作者定义此参数为  $20 \text{ cm}^{-3}$ ,见参考资料[3]) 主要成分是分子,从观测看具有较清楚边界的星际物质区域.对于晚型星周围的拱星分子包层虽然除尘埃外,主要组成成分也是分子,但由于它们与星际分子云有很不相同的物理、化学特性,一般不归到分子云中.有的作者从广义地看也有把拱星分子包层称作拱星分子云的.在研究方法上如分子发射区物理参数的确定,加热与冷却的分析等,分子云和分子包层有很多类同.

分子云最明显的特征就是它主要由分子组成. 但有些分子云也可能具有一些相对高丰度的原子种类<sup>[4]</sup>, 即“分子”云并不一定是纯“分子”的. 近 10 年来的观测表明不仅在 Orion-KL 以及一些 HH 天体附近具有激波传播的分子云中有原子气体存在, 就是在某些一般分子云的内部也观测到了原子的发射线, 如 [C I] 的 609  $\mu\text{m}$  和 370  $\mu\text{m}$  谱线. 分子云边界中气体的结构是很不清楚的.

分子云概念的提出及其观测和研究对近代天文的发展有重要的意义. 除了前面提到的分子云的研究大大改观了人们对银河系、星系结构 (特别是温度低于几十 K 的银河系物质分布) 的认识外, 分子云研究的最基本的任务还在于要弄清恒星究竟是怎样从分子云中形成的. 20 多年来分子天文学发展的重要的成就之一就是确立了恒星形成于分子云的观点. 分子云的观测将提供恒星形成的初始条件和恒星形成过程中的各种伴随的活动现象. 其中尺度约 100 pc 质量约  $10^5 \sim 10^7 m_\odot$  的巨分子云是银河系和星系中的最大天体, 它能产生大多数银河系和星系中的恒星, 因此对它的研究意义更为重大.

在银河系的星际介质中, 最主要的成分是氢, 它的含量占全部介质的 75%. 其次是氦, 它大约占 23%, 大约 2% 才是较重元素的原子. 在分子云中最主要的成分是分子  $\text{H}_2$ . 除  $\text{H}_2$  外地位最重要、丰度最高的分子是 CO. 即使这样, CO 分子相对  $\text{H}_2$  分子的丰度也只有  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  量级. 因此表 5.1 中分子云的气体密度都是指分子氢的密度, 即  $n_{\text{H}_2}$ . 分子云的所有宏观特性几乎都是以分子氢的特性为表征的. 然而, 由于大多数分子云情况下, 分子氢并不容易直接地被观测到, 因此我们主要是通过对 CO 分子的观测来了解分子云的物理状态、分子云的分布和分子云的运动等特性的.

### 5.1.2 CO——银河系和星系 $\text{H}_2$ 的一个示踪器

CO 分子的 2.6 mm ( $J=1-0$ ) 的转动跃迁谱线是最广泛使用

的星际分子气体的探针,它的主要原因如下<sup>[2,5]</sup>:

### 1. 氢分子没有微波跃迁

我们知道微波跃迁适于低温下的激发. 由于  $H_2$  的转动惯量小, 转动常数  $B_e$  大, 因此  $H_2$  的转动能级间隔很大. 表 5.2 列出了  $H_2$  电子基态  $X^1\Sigma_g^+$ , 振动基态  $v=0$  上的最低几个转动能级的能量  $E(J)$  和统计权重  $g_J$ . 已知  $g_J = (2J+1)(2I+1)$ .  $J$ : 转动量子数,  $I$ : 核自旋量子数(对于  $H_2$ ,  $I=0$  或  $1$ ).

表 5.2 氢分子  $X^1\Sigma_g^+, v=0$  能态的转动能级

| $J$ | $E(J)/\text{cm}^{-1}^*$ | $g_J$ |
|-----|-------------------------|-------|
| 0   | 0                       | 1     |
| 1   | 118.49                  | 9     |
| 2   | 354.39                  | 5     |
| 3   | 705.54                  | 21    |
| 4   | 1 168.80                | 9     |
| 5   | 1 740.19                | 33    |
| 6   | 2 414.98                | 13    |

\*  $1 \text{ eV} = 8\,066 \text{ cm}^{-1}$

由表 5.2 得氢分子最低转动跃迁频率或最大转动跃迁波长  $\lambda$  为  $28 \mu\text{m}$ (对应  $H_2$  的  $J=2-0$  的电四极转动跃迁). 与该跃迁的能量间隔相应的温度为  $510 \text{ K}$ , 在一般的冷分子云中,  $T$  只有  $6\sim 15 \text{ K}$ , 是很难将分子激发到  $H_2$  的转动激发态的. 另外即使对于温度较高的分子云, 由于大气在  $\lambda > 25 \mu\text{m}$  后基本上是不透明的, 因此也很难在地面上探测到已经很弱的  $H_2$  的最低转动跃迁. 氢分子在  $\lambda = 12 \mu\text{m}$  上的  $J=4-2$  的跃迁和更高转动能级间的电四极跃迁以及  $\lambda = 2 \mu\text{m}$  上的振动转动跃迁已经在  $1\,000\sim 2\,000 \text{ K}$  的激波加热区的气体中探测到了. 这类区域位于活跃的, 正在形成恒星的云核的最外部或者双极外向流的顶冠部, 尺度约  $0.1 \text{ l.y.}$ , 因此也不适于研究大部分的尺度约为  $\text{pc}$  量级的低激发温度的分子云区.

## 2. 氢分子不具有永久性的电偶极矩

我们在第二章中已经分析过,  $\text{H}_2$  分子是同核双原子分子. 在电子基态中它的质量中心和电荷分布中心重合, 因此不具有永久性的电偶极矩和磁偶极矩. 这样, 氢分子电子基态的电、磁偶极矩的振转跃迁是禁戒的. 只可发生上述的电四极矩跃迁, 选择定则是  $\Delta J = 0, \pm 2, J = 0 \leftarrow / \rightarrow J' = 0$ . 利用哥白尼 (Copernicus) 卫星, 人们已经在紫外亮星的附近探测到了氢分子的 Lyman 和 Werner 带的电子吸收谱. 但这种观测只限于研究满足特殊条件的云, 而不适于消光比较大的稠密分子云. 再加上星际消光的关系, 观测被限制在太阳附近 2 kpc 内. 因此无论是  $\text{H}_2$  的红外还是紫外的辐射通常都不适于作为银河系大尺度范围内冷分子气体的探针.

由于 CO 分子是靠与  $\text{H}_2$  碰撞来激发的, 因此 CO (特别是它的  $J = 1-0$  的跃迁) 便成为研究  $\text{H}_2$  分子的最主要手段. 它的长处可以从理论和实测两方面来论证.

从理论上考虑, CO  $J = 1-0$  的跃迁频率  $\nu = 115.2712 \text{ GHz}$ , 相应的  $h\nu/k$  或者  $E/k$  仅 5.5 K, CO  $J = 2-1$  的  $E/k$  也只有 16.6 K, 因此 CO 的低转动能级是很容易通过与  $\text{H}_2$  碰撞来激发的. 甚至在分子云温度很低时, 也可实现这种激发 (参见第二章图 2.9 中 CO 分子在电子基态, 振动基态时的几个最低转动能级). 为了比较, 图 5.1 还在同一个尺标下给出了 CO 和  $\text{H}_2$  分子的基电子和基振动态的转动能级图. 从该图明显可见, 激发  $\text{H}_2$  的转动能级要比 CO 困难得多.

此外, 我们在第三章中曾提到, CO 分子基电子、基振动态的  $J = 1-0$  跃迁的永久电偶极矩相对较小 ( $\mu \approx 0.1 \text{ Debye}$ ), 以致相应的自发跃迁概率也较小 ( $A_{10} = 6 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ). 这样, 该分子在第一转动激发态保持碰撞热布居所要求的临界密度也相对较小, 在只考虑自发衰变与碰撞激发间的平衡时, 气体密度  $n_{\text{H}_2} \geq A_{10} / \langle \sigma v \rangle \approx$

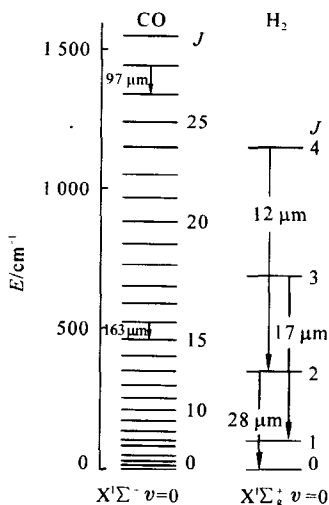


图 5.1 CO 分子的  $X^1\Sigma^+, v=0$  态和  $H_2$  分子  $X^1\Sigma_g^+, v=0$  态的转动能级图

$3\,000\text{ cm}^{-3}$  即可。若同时还存在受激吸收(即光厚效应)时,则要求的临界密度更低。

根据 $^{13}\text{CO}$  同位素分子的测量,可以证明 $^{12}\text{CO}$  分子在通常情况下确实是光厚的。大家知道,在地球上 $^{13}\text{C}$  和 $^{12}\text{C}$  的丰度比约为 $1/89 \approx 0.011$ ,而在分子云中,典型的谱线强度比  $I(^{13}\text{CO})/I(^{12}\text{CO})$  却高达  $0.1 \sim 0.5$ 。这说明在分子云中, $^{12}\text{CO}$  相对 $^{13}\text{CO}$  的谱线强度变弱了,这是因为 $^{12}\text{CO}$  分子的自吸收的缘故,或者说 $^{12}\text{CO } J=1-0$  跃迁是光学厚的。考虑光厚效应后, $\text{CO}(J=1-0)$  的自发辐射光子将以小于 1 的概率  $\beta$  逃逸出分子云(详见第三章)。这样,分子云临界密度将以下式计算,即

$$n_{H_2} = \frac{A_{10} \cdot \beta_{10}}{\langle \sigma \cdot v \rangle} \approx \frac{A_{10}}{\tau \langle \sigma \cdot v \rangle} \quad (5.1.1)$$

对于大多数巨分子云(GMCs),  $\tau_{co} \geq 10$ , 因此对  $\text{CO-H}_2$  碰撞激发所