

CO 分子转动谱线的天体物理 研究方法和近期进展

陈亚峰 曾 琴 毛瑞青 裴春传

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘 要

CO 的射电转动谱线揭示了光学不可见的冷宇宙、银河系最大天体——巨分子云和恒星形成过程中的一个普遍存在的重要的相——双极外流。CO 在 $67\sim 186\mu\text{m}$ 波段的转动谱线是探测动能温度数百度以上的热天体(诸如富碳、富氧演化星包层, 行星状星云、年轻星和恒星形成区复合体)物理条件的重要探针。对 CO 分子转动谱线的天体物理研究方法和在该领域的近期进展作了简单的评述。

关键词 谱线: 形成—红外辐射—星际介质

分类号: P155

1 引 言

1970年 Wilson, Jefferts 和 Penzias 使用 NRAO 口径 11m 的射电望远镜在 2.6mm 波段首次探测到星际空间的 CO^[1]。此后近 30 年里, CO 分子成为在星际空间和拱星包层中射电天文观测研究最多的物质。CO 相对 H₂ 的丰度大约为 10^{-4} , 它的振动基态偶极矩为 0.112 Debye, 在射电和红外波段有丰富的转动谱线可供观测。丰度居首的 H₂ 在振动基态偶极矩为零, 在射电波段无可供观测的纯转动谱线, 有关 H₂ 的信息只能通过对其它痕迹分子的观测间接取得。CO 是丰度仅次于 H₂ 的最重要的痕迹分子, 自然在射电波段扮演十分重要的角色。

为了纵观 CO 的转动谱线, 我们使用文献 [2] 的方法计算并画出 5000cm^{-1} 以下 CO 的能级图(图 1)。该图包括振动基态 $v=0$ 的 $J=0\sim 50$ 的转动态, 第一振动激发态 $v=1$ 的 $J=0\sim 37$ 的转动态和第二振动激发态 $v=2$ 的 $J=0\sim 17$ 的转动态。¹²C¹⁶O 的稀有同位素取代物包括 ¹²C¹⁷O, ¹²C¹⁸O, ¹³C¹⁶O, ¹³C¹⁸O, ¹⁴C¹⁶O 均有可供观测的转动谱线, 隐含重要的天体演化信息。¹²C¹⁶O 及其同位素取代物的 $J=1-0, 2-1$ 线处于毫米波段, 而 $J=3-2$ 以后的谱线则进入了亚毫米波、远红外和红外波段(表 1), 因此只有使天文观测波段从厘米波段向短波方向不断作艰苦的技术拓宽, 才能实现对 CO 转动谱线较全面的研究。

国家自然科学基金资助项目(19973017)

1999-01-14 收到

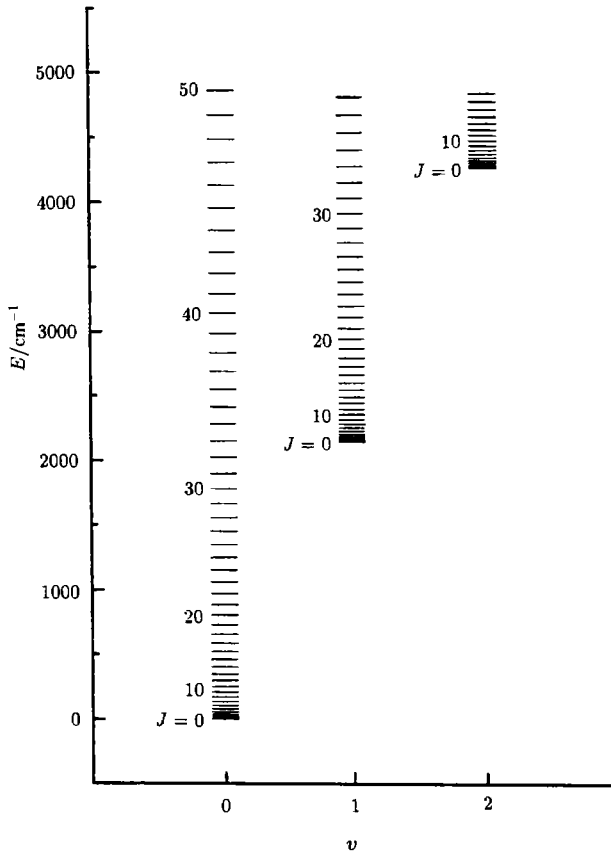


图 1 CO 能级图 (5000cm^{-1} 以下)^[2]

v, J 分别为振动态和转动态的量子数

表 1 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 及其同位素的 $J = 1-0, 2-1$ 和 $3-2$ 线频率 MHz

J	1-0	2-1	3-2
$^{13}\text{C}^{18}\text{O}$	104711.416	209419.198	314119.713
$^{14}\text{C}^{16}\text{O}$	105871.110	211738.505	317598.471
$^{12}\text{C}^{18}\text{O}$	109782.182	219560.369	329330.566
$^{13}\text{C}^{16}\text{O}$	110201.370	220398.714	330588.006
$^{12}\text{C}^{17}\text{O}^*$	112359.268	224714.351	337061.063
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	115271.203	230538.001	345795.987

* 含精细结构线, 此处未列出.

图 2 表明频率低于 1000GHz 的 CO $J_u - (J_u - 1)$ 转动线的大气透明度和光深, 其中 J_u 是谱线上能级的转动量子数. 由此可见在海拔 4200m 处观测不同 CO 转动谱线的不同困难程度.

30 年来, 毫米、亚毫米波段上 CO 及其同位素取代物的低 J_u 转动谱线, 特别是 2mm 波段的 $J_u = 1$ (即 $J = 1-0$) 转动线, 在研究冷宇宙中发挥了极大的作用. 1995 年在题为《CO:

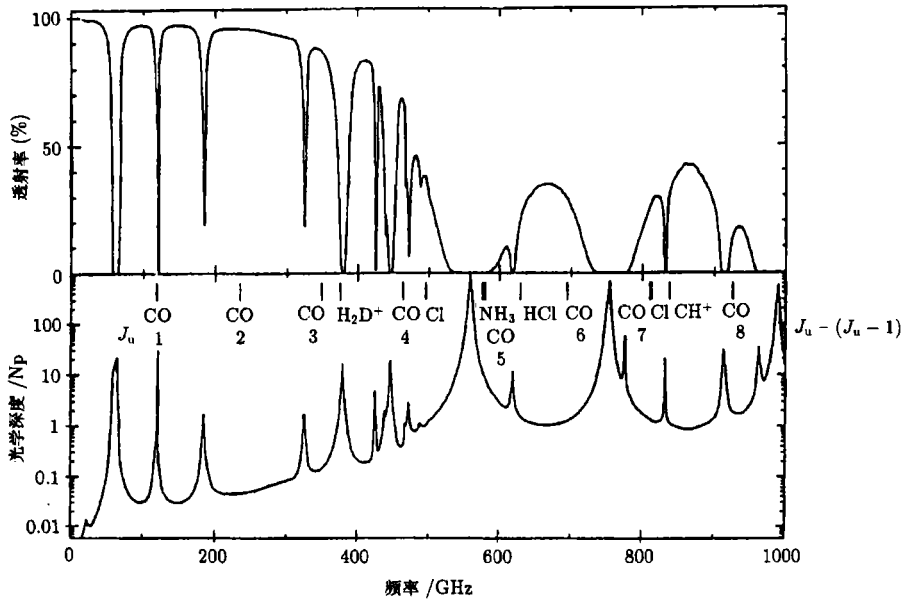


图 2 Mauna Kea 海拔 4200m、水沉淀量 1mm 处的大气透明度和光深^[3]

毫米波频谱学的 25 年》的 IAU 第 170 次会议上集中对此作了很好的总结, 有关内容也已成为分子天文界所熟知。因而本文对毫米、亚毫米波段 CO 转动谱线只作研究方法上的总结, 包括如何从 CO 多谱线观测来推算出主体分子 H_2 的柱密度, 如何从 CO 多谱线观测到的强度比中取得天文信息等。

1995 年发射的红外空间望远镜 ISO, 观测到 $67 \sim 186 \mu m$ 波段上 CO 的 26 条高 J_u 转动线 (从 $J = 14-13$, $J = 15-14 \dots$ 直到 $J = 39-38$), 从而可以通过这些谱线研究动能温度数百度以上的 (诸如富碳、富氧演化星包层, 行星状星云, 年轻星和恒星形成区复合体等) 热天体。我们希望本文能引起同行对这一新进展的充分重视。

此外, 本文还对 $[CO/H_2]$, $[CO \text{ 稀有同位素取代物 } /^{12}C^{16}O]$, $[C I/CO]$ 和 $[C^+ /CO]$ 等丰度比的研究意义和方法作简单评述。

2 毫米和亚毫米波段的 CO 转动线

分子天文学发展至今, 人们已清楚地认识到, 要对问题有深入了解, 必然涉及包含该分子许多能级的辐射转移统计平衡方程, 其中每条谱线各自的激发温度 (T_{ex}) 和光深 (τ) 都是待定的。因此只有通过多谱线观测才能得到较多的已知数来解方程。对 CO 转动线的观测起始于 2.6mm 波段的 $J = 1-0$ 线, 而 $J = 2-1$ 和 $3-2$ 线已处于短毫米波 (1.3mm) 和亚毫米波 (0.87mm), 每多观测一条 CO 的转动谱线都意味着财力和技术上的巨大投入。但是从表 1 可以看到在 2.6mm 的 5.5GHz 范围内包含 CO 的四个同位素取代物的 $J = 1-0$ 线。经研究积累形成了对 2.6mm 波段多种同位素取代物 $J = 1-0$ 线观测取得天文信息的规范方法, 其研究工作流程如图 3 所示。这种方法包含了 $^{12}C^{16}O$ 光学厚, $^{13}C^{16}O$ 光学薄以及

$T_{\text{ex}}(^{13}\text{C}^{16}\text{O}) = T_{\text{ex}}(^{12}\text{C}^{16}\text{O})$ 的 LTE 假设, 并且需要输入已知的或假设的丰度比 $X(\text{CO}/\text{H}_2)$ 和 $X(^{13}\text{C}^{16}\text{O}/^{12}\text{C}^{16}\text{O})$ 。我们必须清楚地意识到该方法所隐含的许多不确定因素。

据文献 [2] 计算的 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 的转动线频率、波长和上能级相对基态之能量差 E_u 列于表 2。其中第 1、2 列和第 3、4 列分别为上下能级的振动和转动量子数。通过表 2 可以看到 CO 的 $J_u = 1, 2, 3$ 的转动线的上能级 E_u 为 5.5, 16.6, 33.2K, 即使在低温的星际空间也可能受

表 2 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 的转动线频率、波长和上能级相对基态之能量差

v_u	J_u	v_l	J_l	频率 /GHz	波长 /mm	E_u/K
0	1	0	0	115.270	2.6008	5.5
0	2	0	1	230.537	1.3004	16.6
0	3	0	2	345.796	0.8670	33.2
0	4	0	3	461.042	0.6503	55.3
0	5	0	4	576.267	0.5202	83.0
0	6	0	5	691.474	0.4336	116.2
0	7	0	6	806.561	0.3717	154.9
0	8	0	7	921.799	0.3252	199.1
0	9	0	8	1036.913	0.2891	248.9
0	10	0	9		0.2602	304.2
0	11	0	10		0.2366	365.3
0	12	0	11		0.2169	431.3
0	13	0	12		0.2003	503.1
0	14	0	13		0.1860	580.5
0	15	0	14		0.1736	663.3
0	16	0	15		0.1628	751.7
0	17	0	16		0.1533	845.6
0	18	0	17		0.1448	945.0
0	19	0	18		0.1372	1049
0	20	0	19		0.1304	1160
0	21	0	20		0.1242	1276
0	22	0	21		0.1186	1397
0	23	0	22		0.1135	1524
0	24	0	23		0.1088	1656
0	25	0	24		0.1044	1794
0	26	0	25		0.1005	1938
0	27	0	26		0.0968	2086
0	28	0	27		0.0933	2240
0	29	0	28		0.0902	2400
0	30	0	29		0.0872	2565
0	31	0	30		0.0844	2735
0	32	0	31		0.0818	2911
0	33	0	32		0.0794	3093
0	34	0	33		0.0771	3279
0	35	0	34		0.0749	3471
0	36	0	35		0.0728	3669
0	37	0	36		0.0709	3572
0	38	0	37		0.0691	4080
0	39	0	38		0.0673	4294
0	40	0	39		0.0657	4513

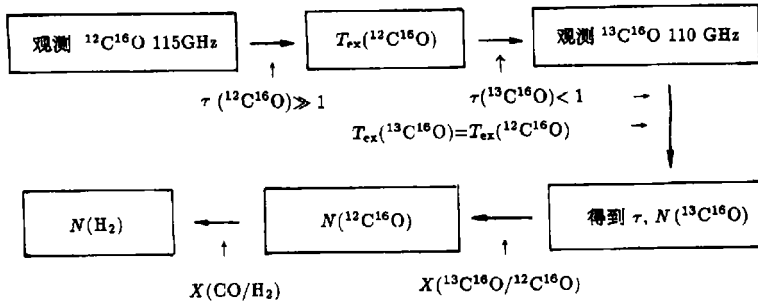


图 3 从在 2.6mm 波段对 CO 同位素取代物 $J = 1-0$ 线的观测得到 H_2 的柱密度

激发而被观测到。近 30 年中射电天文学家通过对 CO 的毫米、亚毫米波段转动线的巡天描绘出银河系和河外星系的冷的、光学不可见部分的 CO 分子的分布情况，并间接了解到主体分子 H_2 的分布，从而揭示了一个冷宇宙。范围在 $50 \sim 100pc$ ，质量为 $10^5 \sim 10^6 M_\odot$ 的银河系最大天体——巨分子云即是由此得到的天文学的重大发现。经过对宇宙中 CO 转动线的 10yr 观测研究，于 1980 年又经对有翼的 CO 谱线的蓝翼段和红翼段分别积分然后成图，首次发现双极外流，此后，双极外流被认为是恒星形成过程中的一个普遍存在的重要的相^[4]。

3 CO 转动谱线在红外

Cernicharo 等人^[5] 使用红外空间望远镜 (ISO) 工作在 $43 \sim 196.9\mu m$ 的长波频谱仪

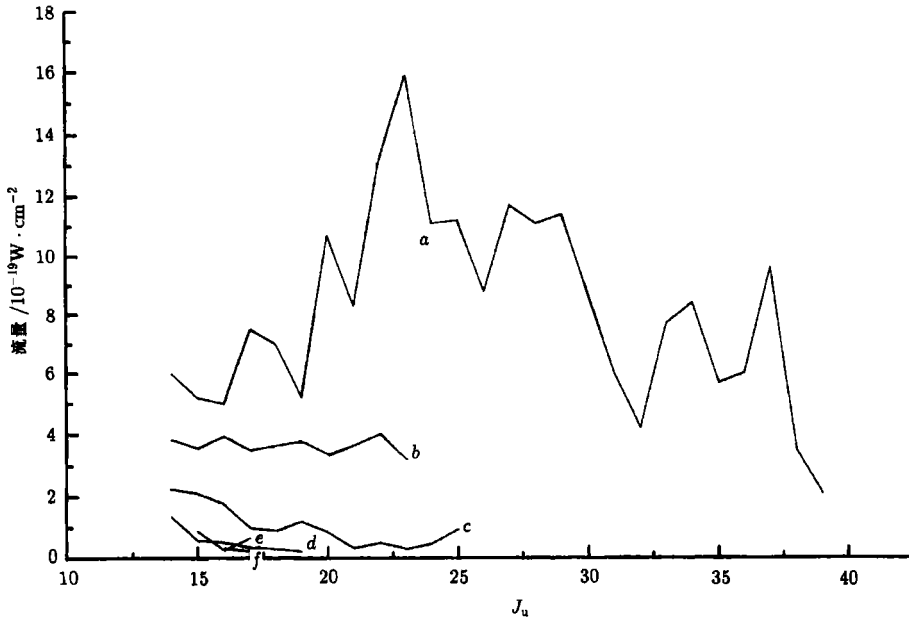


图 4 观测到的流量密度与谱线上能级的转动量子数 J_u 的对应关系

a: IRC+10216^[5], b: AFGL2688^[6], c: NGC7027^[7] d: HH54^[8], e: RAS12496^[9], f: WHya^[10]

(LWS) 在 IRC+10216 探测到 CO $J_u = 14 \sim 39$ 的 26 条转动谱线。图 4 将 1996 年首次发表在《Astronomy and Astrophysics》315 卷 2 期 ISO 专刊中有关 CO 转动谱线的 ISO 全部观测资料加以总结。

我们采用大速度梯度方法和简单的球形模型对 IRC+10216, NGC7027 和 AFGL2688 三个观测资料比较齐全的天体作理论计算, 将理论与观测结果作比对, 寻找最佳拟合参数, 从而确定谱线形成区的物理条件^[11]。由表 2 可见转动能级 $J = 14$ 和 39 的能量分别高于基态 580K 和 4294K, 这样高转动能级的发射线的形成需要来自高密度、高动能温度下的 CO-H₂ 碰撞或中央星的辐射激发。中央星的有效温度 T_{eff} 和中央星辐射在 CO 转动线形成处的稀释因子 f_{dil} 的乘积 $T_{\text{eff}} \cdot f_{\text{dil}}$ 是一个决定辐射激发作用大小的重要参数。计算表明这个参数在 IRC+10216, AFGL2688 和 NGC7027 的 CO 红外转动线发射区分别为 400, 0.11, 0.045K。CO 红外转动线的形成机制在富碳星 IRC+10216 主要是由于中央星的辐射, 在原行星状星云 AFGL2688 和行星状星云 NGC7027 则是由于冲击区的暖和、致密气体的分子间的碰撞而形成的。CO 的谱线是在 67 ~ 186 μm 波段探测动能温度数百度以上的热天体(诸如富碳、富氧演化星包层, 行星状星云、年轻星和恒星形成区复合体)物理条件的重要探针。

4 富有天体物理意义的、与 CO 谱线强度有关的一些比值

(1) $N(\text{H}_2)/I_{\text{CO}}$ 为了通过 CO 间接得到氢分子的信息, 必然要研究一个转换因子, 即氢分子柱密度 $N(\text{H}_2)$ 对 CO(1-0) 积分强度 I_{CO} 的比值 X , 其中 $I_{\text{CO}} = \int T_R^*(\text{CO})dV$ 。在银河系中 $X = N(\text{H}_2)/I_{\text{CO}} = (2.75 \sim 3.6) \times 10^{20} \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}$, 然而观测表明很难用一个常数作为各类星系的 $N(\text{H}_2)/I_{\text{CO}}$ 转换因子。例如 M31 东北旋臂的测量结果为 $(5.6 \pm 1.5) \times 10^{20} \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}$, 大小麦哲伦云的 X 值比银河系大一个数量级。有一些学者认为转换因子与星系的金属性有关, 从而与星系的亮度、绝对星等相关。

(2) 同位素丰度比^[12] 银河系的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 在时间与空间上的分布都是引人关注的课题。 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 应随时间的增加而减少。它在银河系不同区域取值不同, 银心约为 20, 4kpc 分子环为 53 ± 4 ; 本地星际介质为 77 ± 7 , 太阳系为 89, 而碳星则 > 30 。常用的毫米、亚毫米波观测 CO 同位素对为 $\text{C}^{18}\text{O}/^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}/^{13}\text{CO}$, 而 $^{12}\text{CO}(1-0)/^{13}\text{CO}(1-0)$ 线对则由于 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 跃迁的饱和性常被回避了。

(3) 分子云界面光分解区的 C II、C I 和 CO 柱密度比 对于碳离子 C II、碳原子 C I 和一氧化碳分子 CO 的光学及紫外吸收研究只限于疏散云, 分子云界面光分解区的 C II、C I 和 CO 的研究有赖于 C II (158 μm) 以及 C I (371 及 609 μm) 的精细结构线和 CO 在亚毫米波与远红外的高 J 转动跃。

(4) 不同转动量子数的谱线强度之比值 实现了多条转动谱线的观测, 可以得到不同转动量子数的谱线强度之比值的观测值。在适当的模型下解统计平衡辐射转移方程, 寻找能使理论与实测强度比最符合的物理参数组, 从而得知谱线生成处的物理状况。

可举例具体说明通过 CO 多转动谱线观测取得天体物理信息的方法。White 等人^[13] 使用 JCMT 的设备对 Serpens 星云的一套分子谱线作高分辨率的观测, 其中包括 $J = 2-1$ 的 CO(230.538GHz), ^{13}CO (220.398GHz), C^{18}O (219.56GHz), C^{17}O (224.714GHz) 线和 $J = 4-3$

的 CO 线 (461.0408GHz), 还有 $^3P_1-^3P_0$ 的原子碳 C I (492.160GHz) 线, 此外为了研究致密气体又观测了 $J = 4-3$ 的 HCO^+ (356.734GHz)。由此得到该区域的 $[C I]/[CO] = 0.12 \pm 0.06$, 同位素的柱密度比 $N(^{13}CO)/N(C^{18}O)$ 和 $N(C^{18}O)/N(C^{17}O)$ 与可见光消光星等的关系, 根据 $C^{18}O$ 质量约为 $1450M_{\odot}$, 推算出恒星形成效率约为 2.5%。利用 CO 多谱线观测数据以 LTE 和 LVG 模型作计算并分析、研究。星暴星系中的分子气体会被年轻的大质量星、宇宙射线或湍流加热, 致使毫米波段的 CO 低 J 转动谱线不能描述这部分气体的情况。毛瑞青与德国马普射电所的 Henkel 等人^[14] 合作使用 HHT 口径 10m 的亚毫米波和 IRAM 口径 30m 的毫米波望远镜对星暴星系 M82 的 $^{12}CO(J = 1-0, 2-1, 4-3, 7-6)$ 和 $^{13}CO(J = 1-0, 2-1, 3-2)$ 线作了成图观测。他们得到了第一张在地面上观测频率高达 807GHz 的 CO $J = 7-6$ 的河外星系分布图, 发现了不同于 CO 低 J 跃迁的第二层分子环。这一工作多波段、多谱线的优越观测条件使他们得以给出比毫米波单谱线观测详尽得多的 M82 结构图; 并能通过辐射转移统计平衡计算, 寻找适当的物理参数拟合多谱线观测结果, 从而对 M82 的物理状态作出分析。计算中所采用的模型包括较符合实际的 PDR 和简化的 LVG 两种, 并对它们的结果作了比较和讨论, 证明 PDR 模型在解释星暴区的分子激发、密度分布、空间形貌方面更合乎实际。

参 考 文 献

- 1 Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A. *Ap. J.*, 1970, 161: L43
- 2 Farreng R, Guelachvili G, Sauval A J *et al. J. Mol. Spectrosc.*, 1991, 149: 375
- 3 Phillips T G. In: Wolstencroft R D, Burton W B eds. *Millimetre and Submillimetre Astronomy*, Dordrecht: Kluwer, 1988: 1
- 4 Lada C J. In: Latter W B *et al. eds. CO: Twenty-Five Years of Millimeter-Wave Spectroscopy*, Dordrecht: Kluwer 1996: 387
- 5 Cernicharo J, Barlow M J, Gonzalez-Alfonso E G *et al. Astron. Astrophys.*, 1996, 315: L201
- 6 Cox P, Gonzalez-Alfonso E G, Barlow M J *et al. Astron. Astrophys.*, 1996, 315: L265
- 7 Liu X W, Barlow M J, Rieu N Q *et al. Astron. Astrophys.*, 1996, 315: L257
- 8 Nisini B, Lorenzetti D, Cohen M *et al. Astron. Astrophys.*, 1996, 315: L321
- 9 Saraceno P, Ceccarelli C, Clegg P *et al. Astron. Astrophys.*, 1996, 315: L293
- 10 Barlow M J, Rieu N Q, Bach T *et al. Astron. Astrophys.*, 1996, 315: L241
- 11 毛瑞青, 曾 琴, 陈亚峰等. *天文学报*, 1999, 40(4): 376
- 12 毛瑞青, 曾 琴. *天文学进展*, 1999, 17(1): 66
- 13 White, G J, Casali. M M, Eiroa C. *Astron. Astrophys.*, 1995, 298: 594
- 14 Mao R Q, Henkel C, Schulz *et al. submitted to Astron. Astrophys.*, 1999

Astrophysical methods and recent proceeding on the researches of CO rotation lines

Chen Yafeng Zeng Qin Mao Ruiqing Pei Chunchuan

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

CO rotation lines at radio wavelengths reveal the cold universe which is undetectable by optical instruments, the giant molecular clouds—the largest objects in the Galaxy and the important phase of the star forming processes—molecular outflow. CO spectra at the wavelength range of $67\sim 186\ \mu\text{m}$ are the important probes for detecting the objects of kinetic temperature of several hundred degree, i.e., the envelope of carbon or oxygen rich star, planetary nebular, young stellar object and star forming complex. The main goal of this paper is giving a review towards astrophysical methods and recent proceeding on the research works which base on observing CO rotational lines.

Key words line: formation—infrared radiation—interstellar medium