

分子云物理性质的研究

G. Winnewisser

(I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln, F. R. G.)

邢 骏

(北京大学地球物理系天体物理教研室)

提 要

十余年来年轻的分子天文学带来一系列新发现。推动了银河系结构、星系化学史、恒星物质流失、分子云物理等课题研究的新进展。

本文在简介分子天文学之后，将集中对与恒星形成有关的分子云物理问题进行综述。

内 容 分 为

- 一、分子天文学的研究对象
- 二、分子云物理参数的导出
- 三、分子云的观测
- 四、涉及恒星形成的分子云理论研究

一、分子天文学的研究对象

分子天文学是在射电及红外波段观测星际分子的辐射从而进行理论分析的新兴学科。它勃起于六十年代末期。自1968年 NH_3 、 H_2O 、 H_2CO 、 CO 等分子的谱线陆续被探知后，围绕星际分子的射电观测，微波实验蓬勃开展，新资料层出。理论分析方兴未艾，日趋深入。

1. 简单的历史回顾

长时期来人们认为在紫外辐射作用下星际空间不可能存在大量的稳定分子。兼之，局于观测波段的限制，虽早在1937年Dumham和Aadm即已发现 CH 、 CH^+ 和 CN 的紫外吸收谱线，但此后工作却中辍。直到二十年后人们才以射电天文观测手段探测到微波波段的星际分子谱线。

1946年Shkolovsky预言在星际空间可能观测到微波波段的分子谱线。1957年Townes进一步阐明这一概念，并指出在星际介质中可能发现诸如 OH 、 H_2CO 等分子的谱线。1959年Ehrenstein和Townes在实验室精确地测定了 $\text{OH}\Delta$ 双线的跃迁频率。1963年Weinreb和Barrett根据上述频率值采用傅立叶变换等新技术在Cas A射电源处观测到 $\text{OH}\Delta$ 双线的吸收谱线。继而1964年Bolton、Robinson，1965年Weaver等人又在Orion A、W3、银心，发现 $\text{OH}\Delta$ 双线的发

1983年10月18日收到。

射谱线。

系统地对星际分子的搜索,对观测资料的分析则发端于1968年。Cheung和 Snyder等人在 SgrA、SgrB、OrionA和 W49等处探测到 NH_3 、 H_2O 、 H_2CO 的谱线。此后,星际分子的发现和证认与日俱增,至今已探知50多种分子的近千条谱线。其中既有最简单的双原子分子,又有结构复杂的多原子分子。有些分子是地球环境下常见的,有些则在地球天然条件下和实验室中从未出现过。这些形形色色的分子散布于 H II 区,星云、银心、拱星包层及弥散的星际介质中。河外星系也发现了它们的踪迹。

银河系内恒星之间弥散着气体与尘埃相混合的低温、稀薄介质。它们基本上不发光,且吸收并强烈地散射可见光。因之,长久以来难以直接观测。但由于介质中气体主要以分子状态存在,分子的谱线又广泛地分布于红外、亚毫米、毫米、厘米波段。在射电波长范围内尘埃散射作用陡降,介质对分子谱线透明,故利用分子谱线即可直接观测星际介质,甚至可穿透于致密分子云内部。因之,十余年来分子天文学或对老问题给出新答案(如银河系结构),或取得新发现;提出新问题(如天体微波激射)。它已成为研究星际介质及有关天体物理问题的强有力的崭新工具。

2. 分子云研究的一些主要课题

(1) 银河系的结构和演化

由于介质中尘埃的消光作用,可见光对银河系结构、物质分布的观测无能为力。五十年代起,射电天文学家以氢原子的 21 厘米谱线巡天才得到氢原子的分布、银河系结构的图象。特别是证实了旋臂结构的存在。但七十年代中当人们以 CO 谱线巡天观测时,除再次研究旋臂结构外,亦发现 CO 的空间分布与氢原子相比有明显差别。如:CO 分子云集中于银心,并相对集中地分布于银心距 4kpc 和 8kpc 之间,只有少数在 10kpc 外。而氢原子云则分布于 4kpc—14kpc 范围内。根据元素宇宙丰度及星际空间物理条件分析,CO 的分布等同于 H_2 的分布。故,必然的推论是:氢原子与氢分子具有完全不同的空间分布。这一差异的解释虽尚无定论,但很可能与银河系大尺度结构及其演化进程有关。由于介质中氢元素主要以分子状态存在,故分子谱线的巡天扫描能更加真实地反映银河系内物质分布和空间结构的图象。CO 的分布与大质量年轻星及超新星遗迹的空间分布相吻合,证实了恒星形成是与分子云(而不是原子云)相联系的演化概念。

最近,已在大麦哲伦云等河外星系中观测到一些分子的谱线。可期望,伴随着望远镜灵敏度、分辨本领的提高,分子谱线将提供更多的有关星系结构、演化的重要信息。

(2) 元素的演化——星系化学史

星际分子的研究可联接起宇宙中化学元素形成、转化的链条,从而勾画星系的化学史。

恒星核心的热核反应可迭次将轻元素转化为重元素,之后再以各种方式将上述物质馈送至宇宙空间。所以,同位素相对丰度的测定可给出银河系各天体演化的踪迹。例如,星际介质中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值高于太阳系,可说明太阳系形成于 4.6×10^9 年前。再如,银心与银河系边缘 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的比值差别很大,可解释银心附近低质量恒星较多,超新星遗迹较少的观测事实。

特别是 D/H 的比值(可由 DCN、HCN 观测导出)银心处偏低。这结果与恒星演化的概念

相符, 即银心附近的气体大都经历了恒星的阶段。由于热核反应时既可产生, 又可离解 D , 离解得更多些, 因而 D/H 值可视为热核反应历程的标记。

(3) 恒星的物质流失

恒星产生于分子云中, 介质是构成恒星的原料。而一旦恒星(或原恒星)形成, 它就以各种方式向其周围介质馈回物质。研究恒星生存期间不同阶段物质流失的方式、数量、机制, 是恒星演化中的重要问题。分子谱线能给出有关恒星物质流失的信息, 有利于揭示宇宙中这一重要的物质循环过程的本质。

(4) 恒星的诞生及演化后期

历史上恒星不是射电天文的研究对象(除太阳外)。现却发现星际分子与恒星的诞生及一些演化后期的恒星紧密地联系在一起。

观测表明, 巨大的分子云总是伴有与其成协的 OB 型星和 H II 区。现已确认, 恒星即产生并很可能只产生于分子云中。在分子云中探知的红外源已接近或形成了原恒星(protostar), 它们又往往与异常强的 OH、 H_2O 微波激射成协。目前, 人们虽已描述了恒星形成过程的粗略轮廓, 但其中一些重要问题尚待解决。如分子云中的能量交换; 各种动力学过程; 构成已知恒星质量谱的初始条件等。

与此相对照, 恒星演化晚期的问题研究则较成熟。因处于此阶段的天体为红巨星、行星

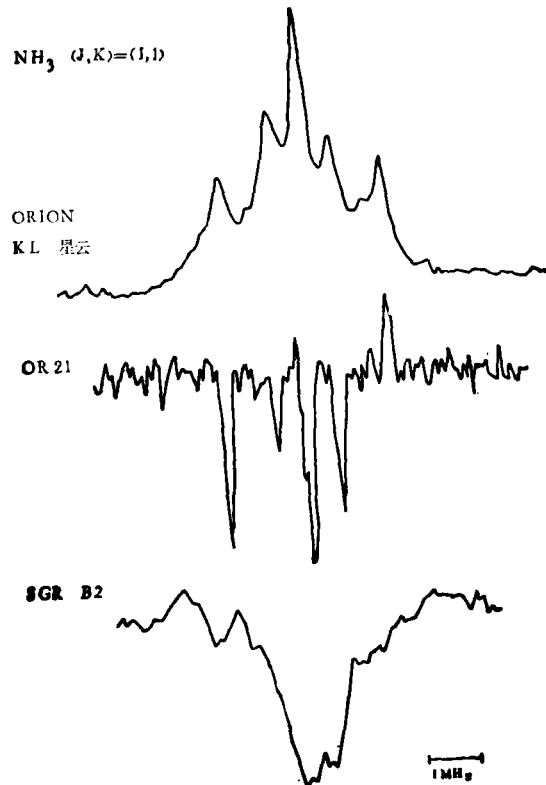


图1 不同源内 $NH_3(1,1)$ 谱线示意图

状星云、白矮星等已在可见光波段观测了几十年。某些红巨星外部经常围有冷的气体壳层。十年前,首先在富氧的红巨星中发现了OH微波激射,之后陆续探测到H₂O、SiO微波激射。OH、H₂O微波激射的流量与红巨星红外辐射流量相关,这可能意味着微波激射的出现是红巨星红外辐射“抽运”的结果。

分子天文学除涉及上述重要天体物理问题外,亦与其它学科彼此渗透,相互交叉。

在与地球大相径异的宇宙环境中(如低温10~20K,稀薄粒子数密度1—10³/cm³),研究分子的化学反应将揭示特异条件下的化学规律。宇宙可视为天然特殊条件化学实验室。

多原子分子,特别是能以构成酶的大分子的发现,为星外生命迹象的寻探觅提供了重要线索。

分子的微观结构、跃迁规律等,皆依赖于微波波谱学。而星际分子的研究又为微波波谱学提供了素材,并提出新问题(如现有已观测到的未知谱线尚待证认)。

综上所述,可预期今后分子天文学将与其它天体物理学分支并驾齐驱,推进人类对宇宙认识的广度和深度。

二、分子云物理参数的导出

犹如早年由原子谱线导出恒星大气物理参数,近十年人们观测各种分子不同能级之间跃迁产生的谱线,并进而导出温度、密度、磁场强度、质量、尺度等一系列分子云的物理参数。它们是解释观测事实、建立物理模型的基本依据。但由于分子天文学历史甚短,由谱线观测导出物理参数的原理和方法尚未成熟和规范化,故推求参数亦为当前的研究课题。下面仅就少数参数进行分析,以资说明。

1. 物理参数的导出^{[28], [84]}

(1) 运动温度 T_K

一般以¹²CO($J=1 \rightarrow 0$)谱线(频率为115GHz)为温度计。由观测量 $T_A^*(^{12}\text{CO})$ (改正后的天线温度)可简单地导出分子云的运动温度 T_K 。其条件是:假设LTE成立,谱线光厚并且“热化”。对于¹²CO($J=1 \rightarrow 0$)光厚易满足,热化则不一定。故循上法导出之 T_K ,在分子云中心较可靠,但在边缘区或暗云中则不确定性较大。

另一确定 T_K 的方法是利用NH₃分子的反转双重态跃迁产生的谱线NH₃(1, 1)(频率为23.70GHz)和NH₃(2, 2)(23.72GHz)的强度比定出一转动温度 T_R 。理论计算表明 $0.8T_K \leq T_R \leq T_K$ 。此方法虽可回避¹²CO谱线遇到的困难,但 T_R 只能给出 T_K 的近似值。

(2) 气体密度 n_{H}

由于分子云气体主要成份是H₂,故一般以 n_{H} 表气体密度。但H₂没有微波波段的谱线,通常是先求出其它分子的密度,再导出 n_{H} 。

推导的线索是:假设LET成立,由观测量 $T_A^*(^{12}\text{CO})$, $T_A^*(^{13}\text{CO})$; $\Delta\nu_{^{13}\text{CO}}$ (线宽)在¹²CO、¹³CO激发温度相等及¹³CO谱线光薄的假设下导出¹³CO的柱密度 $N_{^{13}\text{CO}}$ 。再由消光关系从 $N_{^{13}\text{CO}}$ 导出 N_{H} ,最后对分子云做几何假设得体积密度 n_{H} 。

此处,不确定性首先在于¹³CO谱线光薄的条件并非处处满足。其次由消光估算得到的

$N^{13}\text{CO}$ 与 N_{H_2} 的关系只在暗星云中得到了验证。

总之, 对比于运动温度, 由观测导出的气体密度不确定性更大。

近年来, 基于 H_2CO 分子微观结构的特点, 人们同时观测它的 2mm发射线和2cm吸收线, 直接导出 n_{H_2} 。此方法优于 ^{13}CO 确定法。特别是定性分析两线的观测强度可简捷地给出相应区域 n_{H_2} 的数量级估计。

(3) 磁场强度 B

在分子云演化、恒星形成过程中磁场起重要作用, 故分子云内磁场的测量为人们所关注。

利用河外射电源, 射电脉冲星辐射的法拉第旋转估计云际磁场强度为1—4 μG 。利用21cm氢谱线的塞曼效应估计 H I 云中为几~50 μG 。由18cm OH微波激射线的塞曼效应估计微波激射源附近为几 mG。

但由于大多数分子的朗德 g 因子太小, 分裂过窄, 无法以分子谱线直接测估分子云内的磁场强度。

Mouschousias考虑到磁场不完全冻结及磁离子滑移效应, 经理论计算给出磁场强度与气体密度的关系

$$\left(\frac{B}{B_0}\right) = \left(\frac{n}{n_0}\right)^k \quad \frac{1}{3} \leq k \leq \frac{1}{2}$$

(B_0 , n_0 为 B , n 初值)

人们认为这是目前分子云磁场强度 B 估算的较合理的关系式。

2. 分子云内各种过程的时间尺度^[34]

由导出的物理参数(T_K 、 n_{H_2} 、 B ……)可估计分子云内各种物理过程的时间尺度, 进而比较各种作用的消长与主次。综合分析即可逐渐阐明分子云的演化进程。例举如下:

(1) 自由下落时间 T_{ff}

若假设分子云只是在自引力作用下塌缩, 可以 T_{ff} 表明这一进程

$$T_{ff} \cong 3 \times 10^5 \left(\frac{n_{\text{H}_2}}{10^4}\right)^{-\frac{1}{2}} \text{年}$$

(2) ^{12}CO 辐射冷却时间 $T_{c.co}$

H_2 与 ^{12}CO 之间碰撞导致 ^{12}CO 激发, 继而 ^{12}CO 辐射将能量发送到星际空间。此为 $T_K < 100\text{K}$ 的分子云内能转化为辐射能的重要途径之一。

此进程可表为 $T_{c.co}$

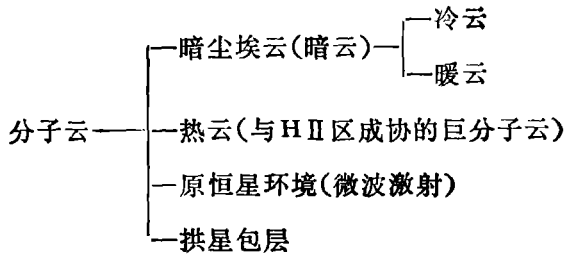
$$T_{c.co} \cong 2 \times 10^4 \left(\frac{10^5}{n_{\text{H}_2}}\right) \text{年}$$

概言之, 凡具有一定时间持续性的物理过程均可以相应的时间尺度标记, 以资比较、分析。

这些时间尺度的可靠性自然是基于相应的物理参数及对各过程所做的简化假设。其它过程的时间尺度表达式此处不赘。

三、分子云的观测

目前, 银河系内已探测到 4000 余分子云。按其物理性质及天文特征可分类如下^[23]



基本观测数据如下表。

名 称	典型线宽 kms ⁻¹	线尺度 pc	密 度 cm ⁻³	温 度 K	质 量 M _⊙
暗云	1	1-10	10 ³ -10 ⁴	10-20	10 ² -10 ⁴
与 H I 区相联 系的巨分子云	3-30	1-50	10 ⁴ -10 ⁶	20-80	10 ⁵ -10 ⁶
原恒星环境	0.1-2	10 ⁻⁵ -10 ⁻³	>10 ⁹	10 ² -10 ³	10
拱星包层	25	0.01-0.5	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ³	10 ⁻³

现仅综述并简略分析前两类云的主要观测结果。

1. 冷暗云 Taurus 复合体 L183

以 Taurus 复合体中 TMC1, TMC3 等小云及 L183 为例, 其基本观测数据如下表。

名 称	尺 度 size pc	转动温度 T _R (NH ₃) k	线宽 Δν kms ⁻¹	速度梯度 dv/dr kms ⁻¹ pc ⁻¹	NH ₃ 柱密度 lgN(NH ₃) cm ⁻²	H ₂ 体密度 lg n(H ₂) cm ⁻³
TMC1	0.06×0.60	10	0.30	<0.7	15.0	4.5
TMC3	0.06×0.12	9	0.30	6	15.0	4.5
L183	0.06×0.17	9	0.22	<2	15.5	4.5

这些云的共同特征是尺度小、温度低, 近傍和内部无热源, 似处于引力平衡暂稳态。

(1) 金牛座分子云 Taurus Molecular Cloud (TMC)

TMC 是含有许多小、密、冷云碎片(fragment)的复合体。(Churchwell 1978^[4], Myer 1979^[15], Little^[12] 1979, Ungerechts, Winnewisser et al. 1980, 1981^{[20][21]}; Arery 1979^[21])

考虑到判断自引力塌缩的 Jeans 判据质量 M_J ,

$$M_J \approx 3.7 \left(\frac{T_K}{10} \right)^{3/2} \left(\frac{n_{H_2}}{10^4} \right)^{-1} M_{\odot} \quad [35]$$

对于 TMC 诸小云 $M_J \approx 4M_{\odot}$ 。

由观测估算的 TMC 中小云块的质量均略大于 M_J , 加之谱线甚狭, 可设想这些小云似处于暂态引力平衡。目前 TMC 中虽无恒星形成活动迹象, 但经缓慢吸积物质也可能开始引力塌缩。

当前, 对此类云研究的焦点在于: 何种物理因素维持其暂态引力平衡?

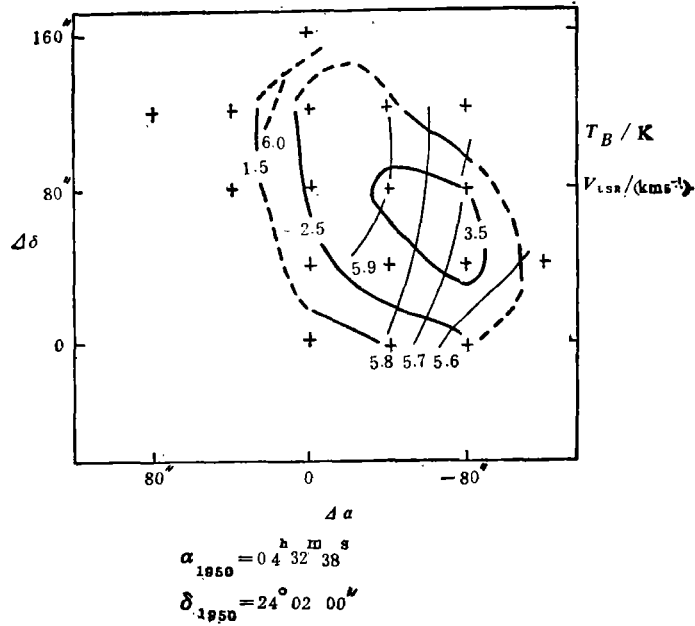


图2 NH₃(1,1)谱线对TMC3的图描,粗线表等亮温度线,细线表等视向速度线(Ungerechts, 1980)。

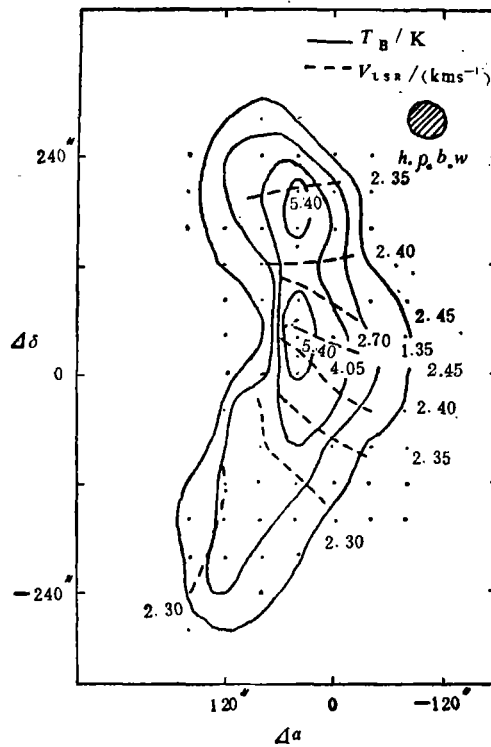


图3: NH₃(1,1)谱线对L83的图描,实线表等亮温度线,虚线表等视向速度线(Ungerechts 等, 1980)。

* TMC1 Field^{[27], [14], [18], [17]}等认为磁压为维持平衡的主要因素, 磁制动效应将角动量输送给周围介质。

* TMC2 Myers和 Ho^[15]于1979年以HC₃N和NH₃观测, 认为热运动及磁场联合维持平衡。

* TMC3由于等视向速度曲线近于平行, 且速度梯度已达 $6\text{kms}^{-1}\text{pc}^{-1}$ 。自转能似为主要因素^[19]。

(2) L183

Ungrechts, Walmsley, Winnewisser^{[20], [21]}于1980-81年以NH₃(1, 1)探测该云核心。Clark, Johnson 1981^[5]年以H₂CO探测云的扩展区。认为磁场和自转联合维持平衡。

2. 暖暗云 S140

(1) 基本特征: 此类云有热源, 或为内部嵌埋之红外源; 或近傍有年轻星。该云是恒星正在形成的活动区。它们常伴有如下的观测特征:

(i) 经常出现红外源。其光谱中有 $9.7\mu\text{m}$ 处的硅酸盐吸收线。

(ii) 与红外源相联系的OH, H₂O微波激射发射区。

(iii) 出现 $2.2\mu\text{m}$ H₂振动能级($\nu=1\rightarrow 0$)的发射线。

(iv) 高激发态的分子谱线出现。谱线精细结构的强度比偏离局部热动平衡。

(v) 常带有致密H II区。

(vi) 高速气体(如CO)的发射线与恒星活动区成协。

上述诸特征均反映了恒星形成区域内温度高、各种动力学效应激烈等活动迹象。当前研究的重点在于揭示各特征之间的物理联系。

(2) S140^[2]

典型的暖暗云。由于结构不甚复杂, 且尺度较小易于整体图描(mapping)故吸引了观测者(Beichman等, 1979^[11]; Dinerstein等, 1979^[7]; de Muizon等, 1980^[6]; Ungerechts等, 1981)^[21]。

(i) 观测首先集中于确定分子谱线峰值强度的空间位置与红外源的关系, 发现三个著名的红外源均与¹²CO重合得很好^{[11], [18], [6]}。

(ii) 近期高空间分辨本领观测发现NH₃可密集在 $\leq 20''$ 的范围内。这些小密集区似处于引力暂态平衡。

3. 热云 Orion分子云复合体 S106

(1) Orion分子云复合体

OMC为银河系内尺度最大, 结构最复杂, 最亮的分子云。它是被集中研究的客体(Downes^[8]; Wilson, Pauls^[16]; Winnewisser^[32]等)。综合分子谱线的观测结果, 并结合红外观测的分析, 确认OMC中存在着几个恒星正在形成的活动区。其主要结果为:

(i) OMC中大多数分子谱线轮廓呈三种运动成份

* 尖峰(Spike): 强($T_b\sim 6-10\text{K}$); 狭($\Delta\nu\sim 3-4\text{kms}^{-1}$) $\nu_{LSR}\sim 9\text{kms}^{-1}$ 。

* 热核(Hot Core): 较弱($T_b\sim 0.5-2\text{K}$); 狭($\Delta\nu\sim 3-6\text{kms}^{-1}$); $\nu_{LSR}\sim 3\text{kms}^{-1}$ 。

* 平台(Plateau)宽($\Delta\nu\sim 50\text{kms}^{-1}$)。 $\nu_{LSR}\sim 9\text{kms}^{-1}$ 。

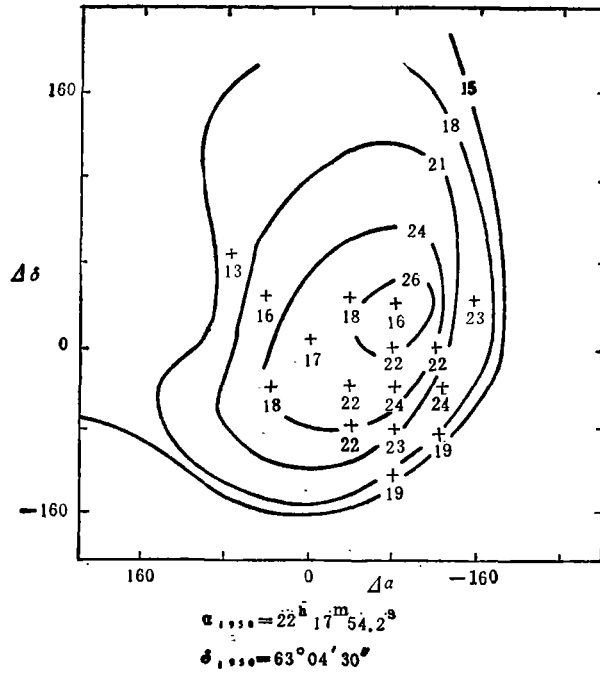


图 4: S140的CO及NH₃(1,1)谱线的图描。

实线表CO的等亮温度线, 其上的数字为亮温度值(Blair 等,1978)^[22]; + 旁的数字表该点由NH₃(1,1)及NH₃(2,2)导出的 T_R 值(Ungrechts 等, 1981)。

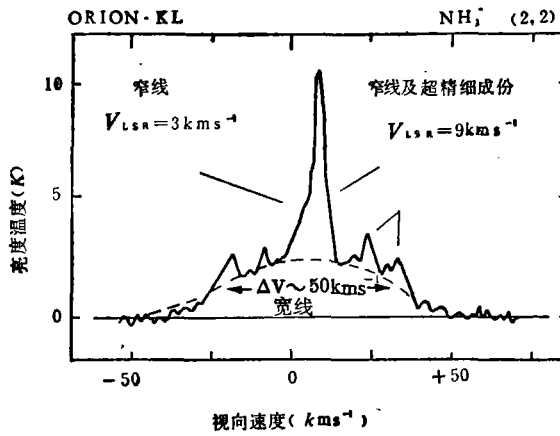


图 5 Orion云中KL云的NH₃(2,2)谱线(Wilson 等, 1979)^[22]

三种速度成份的分析有助于理解KL红外云等活动区的动力学过程。

(ii) 1981年Pauls^[16]等以 V. L. A 对 OMC 中 KL 红外云进行 NH₃(3.3) 图描, 发现 NH₃ 可能密集于 < 5'' 范围内。

(iii) 1981年Pauls^[16]利用 VLBI 观测 OMC 的 NH₃(3.3)。

同年Downes^[8]在红外连续谱 20μm 处观测 OMC。前两者空间分辨本领均达 2''。发现

* 探测到一些与 H_2O 微波激射成协的新的红外辐射峰值。

* $NH_3(3,3)$ 峰值与致密红外源 IRC 重合得较好。

* 再次验证 IRC2 有明显质量外流^[10], 估计为 $10^{-4} \sim 10^{-3} M_{\odot}/\text{年}$, 该源可能是形成中后期的大质量星。

(2) S106 其结构较 OMC 简单, 特征为有两云相联系云^[85]

(i) H_2O 微波激射及 H II 区在两云之间, 是两云的能量激发源^[9]。 H_2O 微波激射有明显时变。1978 年 Cesersky^[8] 发现的已消失, 代之为图示者。

(ii) $NH_3(1,1)$ 超精细结构的强度比有明显的时间和空间变化。

上述各类云的主要观测结果为深入分析云的演化, 恒星形成启迪了概念, 提供了依据。

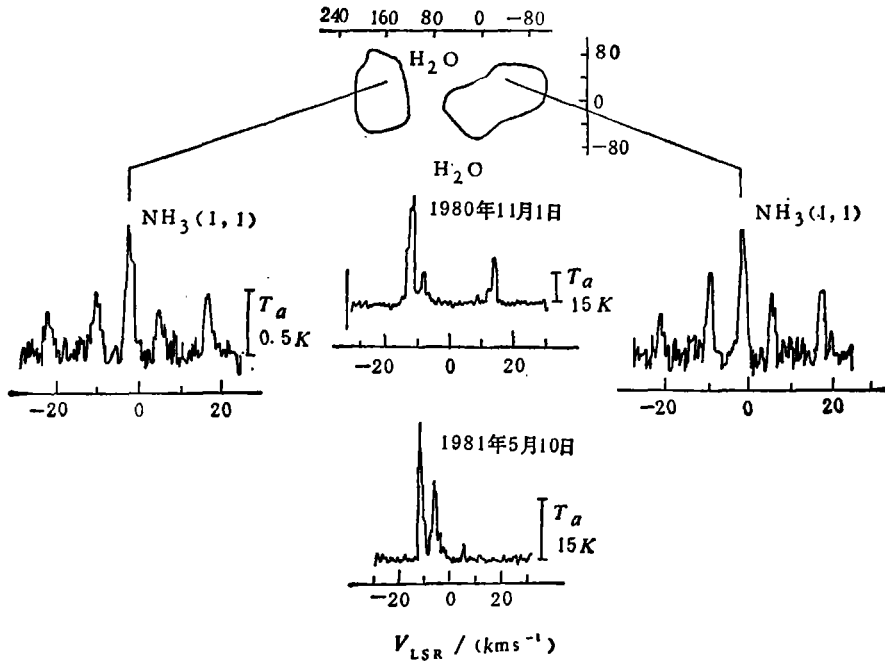


图 6: S106 的 $NH_3(1,1)$ 和 H_2O 光谱及其对应的分子云和微波激射座标为
 $\alpha_{1950} = 20^{\text{h}}25^{\text{m}}25^{\text{s}}$; $\delta_{1950} = 37^{\circ}12'30''$ (Little 等, 1980)^[25]。

四、涉及恒星形成的分子云理论研究

恒星形成是一极其复杂的过程。分子云内自引力、气体压力、磁场、自转、辐射传能、湍流、对流及分子和尘埃的化学反应等在不同阶段分别起权重不等的作用, 诸因素之间又有复杂的交叉。多年来理论研究进展迟缓。由于无法直接观测星云。五十年代及六十年代初, 理论研究自然地集中于恒星(或原恒星)平衡结构建立, 通过准流体力学平衡收缩到主星序这一阶段。这一时期的工作, 以 C. Hayashi (林忠四郎) 的研究成果为标志。

但自七十年代以来, 人们已能借助分子谱线直接观测星云, 且红外探测亦有所突破, 故

恒星(或原恒星)平衡结构建立前的理论研究有了新的进展^[33]。

1. 恒星形成过程的简单图象^{[33], [28], [34]}

一般认为可分为三个阶段

(1) 第一阶段(冷而密): 云开始收缩, 密度提高, 因分子辐射致冷运动温度保持不变。密度进一步提高, 加剧气体与尘埃的碰撞, 运动温度与尘埃温度耦合。即使在更高的密度下, 尘埃的亚毫米及远红外辐射也可使气体依然保持低温。进一步, 裂化可能发生, 与恒星质量数量级相近的碎片各自分离。碎片继续塌缩。

(2) 第二阶段(热而密): 如果大质量原恒星已趋形成, 其辐射将灼热周围的尘埃。此时运动温度仍与尘埃温度耦合。运动温度的提高将产生 CO 热点或 C II 球。

(3) 第三阶段(热而稀薄, 可能电离): 一个低密度、高温的区域已形成。周围可能出现 H II 区并继续扩展。

研究恒星诞生的物理条件及恒星形成过程必须回答如下问题:

- (i) 在恒星形成的每一阶段起主导作用的物理过程?
- (ii) 如何解释和预测银河系内恒星生成率? 生成率的时空变化? 制约生成率的因素?
- (iii) 制约恒星质量谱分布的因素?
- (iv) 双星及多重结构的恒星是如何形成的?

分子云内能量的产生、转化、传输及各种动力学过程的分析是透视恒星形成过程的关键, 下面将分述这两个问题。

2. 分子云的热源及能量问题^{[33], [28], [34], [35]}

(1) 对于热云及暖云其主要热源为近傍的亮星或内部的红外源。热源首先灼热尘埃, 之后热尘埃将通过两种途径灼热气体。

* 灼热的尘埃与气体分子非弹性碰撞, 直接灼热气体(Goldrich, Kwan, Evans)

* 灼热尘埃的远红外辐射激发 H₂O 的转动能级跃迁, 之后 H₂O 与 H₂ 碰撞退激发将能量转化为气体分子的动能(Takahashi)。

人们认为, 对于多数分子云后者为主。

(2) 对于冷暗云无上述热源。积分星光可加热尘埃, 尘埃温度与气体运动温度耦合达到已知的观测温度 $T_K \approx 10\text{K}$ 。其它如宇宙线加热, 双极扩散加热, 化学反应加热均起一定作用。探讨各种加热机制是当前较集中的研究课题。

3. 分子云内动力学问题^{[33], [28], [34], [35]}

(1) 自引力塌缩

观测表明 CO 谱线的线宽 $\Delta\nu \sim$ 几—几十 kms^{-1} , 而无规热运动的多普勒线宽 $\Delta\nu_{th} \approx 0.19(T_K/20\text{K})\text{kms}^{-1}$ 。分子云中 $\Delta\nu \gg \nu_{th}$, 这意味可能有其它运动加宽谱线。又从星云质量 M 的估算得知, 对大多分子云其质量 $M > M_J$, M_J 为 Jeans 质量。这又表明大多数分子云导致自引力塌缩的必要条件成立。

对上述观测事实, 1974 年 Goldrich 和 Kwan 解释为分子云在自引力作用下塌缩, 并建立了相应的模型。之后, 如 1977 年 Smell 和 Loren 修正此模型, 力图拟合理论与观测的谱线宽度, 他们并导出自由下落速度 v_{ff} 与星云半径 R 的关系。

与此同时,其他学者对此观点提出异议。他们指出除理论与观测谱线拟合时带有任意性外,更尖锐的矛盾来自于恒量生成率的估计。目前为大家公认的由恒星计数求得的恒星生成率为 $1M_{\odot}/\text{年}$ 。1975年 Solomon 估计银河系 CO 云总质量为 $M \sim 2.5 \times 10^9 M_{\odot}$ 。Zuckerman 据此指出,若上述 CO 云皆塌缩为恒星,则此过程必在自由下落时间 T_{ff} 内完成,对于 CO 云 $T_{ff} < 1.4 \times 10^6$ 年。故而由 G 和 K 的解释必导出恒星生成率为 $10^9 M_{\odot}/\text{年}$ 。

目前,多数人认为即使 $M > M_J$,但分子云中的某些动力学因素将与自引力平衡,导致绝大多数分子云实际上处于引力平衡状态。

(2) 支持分子云引力平衡的因素

近来,人们集中分析可能与自引力平衡的因素。其重要性不仅在于寻觅维持分子云动力学平衡的答案,同时这些因素的变化也是启动自引力塌缩的诱因。

这些因素可划分为:热运动,非热运动(湍流、星云自转、各种波)和磁场。

* 热运动:经估算其能量不能与引力位能比拟。对于绝大多数分子云,此因素无显著作用。

* 湍流:若湍流肋强足以平衡引力,则要求湍流速度大于声速。而具此速度的湍流将在介质中产生激波,能量会很快地耗散。故此因素亦无显著作用。

* 星云自转:根据平衡自引力的估算要求自转速度梯度大于 $3(n/10^4) \text{kms}^{-1} \text{pc}^{-1}$ 。观测表明,一些小暗云满足上述条件,对于它们自转可能是平衡的主要因素。

* 磁场:对于球状、均匀分子云 Spitzer 根据 Virial 定理给出包括磁场在内的自引力塌缩判别质量 M_{crit} $M_{\text{crit}} \cong 700 B_{\mu\text{g}} (R/10 \text{pc})^2 M_{\odot}$

若分子云质量 $M < M_{\text{crit}}$,磁压可支持平衡。

经估算分子云外层磁压可能起作用,在核心其作用将因磁离子滑移效应而减弱。

磁场的另一重要作用是通过磁制动效应将角动量由分子云传输给外部介质。因此,分子云内磁场的研究引起了广泛的注意。

(3) 导致自引力塌缩启动的触发机制^{[29],[30],[31],[32]}

虽然大多数分子云处于引力暂态平衡,但由于自发(云内部)或受激(外部)触发,会启动某些云的自引力塌缩。

(i) 内部自发的启动在于内能的流失。热能通过辐射,磁能通过两极扩散,湍流能通过粘滞摩擦分别消耗各自的能量。这一过程达一定程度将启动自引力塌缩。观测表明,小质量星可出现在分子云内部,这正与理论分析符合。即对于小质量星,大多由云的自身不稳定性启动分子云塌缩。

(ii) 外部触发

观测得知,大质量年轻星往往出现在分子云边缘。理论及观测一致表明:对于大质量星,来自分子云外部的激波压缩分子云是启动自引力塌缩的主要触发机制。激波源包括膨胀的 H II 区;超新星遗迹的电离波阵面;星风;密度波;云云碰撞等。

目前的理论工作集中于确定激波源和探讨激波与分子云的作用。深入分析面临两个困难。其一是观测虽已发现激波与年青星紧邻,但无法确认此激波究竟是该星生成前的触发源,抑是恒星形成后的产物。其二是某些激波源经常紧邻并同时存在,难以区别其主次。

总之,由分子谱线的观测,可直接或间接给出原恒星形成及形成前分子云内能量转化、

动力学活动的线索, 并为恒星形成的理论探讨奠定了前所未有的前提。与此同时, 大量的难点与疑问尚有待于理论工作的深入研究。

结 语

1. 观测手段的革新与提高是分子天文学问世的前提, 也是今后进一步发展的关键。国际上观测设备的研制正朝扩展波段, 提高灵敏度, 提高空间分辨本领方向迈进。可预期新的观测资料必将大量涌现。

2. 在新的观测事实面前, 人们的概念也将或修正和完善, 或扬旧而创新。理论研究将有广阔的前景。大型计算机的应用已经并将继续给予理论计算以强有力的支持(如云引力塌缩的三维流体力学模型的计算已逐渐展开)。

3. 也不难预料, 分子天文学在解决一些现存问题的同时必将面临更多的新问题的挑战。这是该学科不断发展的动力, 也是本领域富有旺盛生命力的体现。

参 考 文 献

- [1] Beichman, C. A., et al., *Ap. J. Lett.*, 232 (1979), L47.
- [2] Blair, G. N., et al., *Ap. J.*, 219 (1978), 896.
- [3] Cesarsky, C. J., et al., *A & A.*, 68 (1978), 33.
- [4] Churchwell, E., et al., *A & A.* 67 (1978), 139.
- [5] Clark, F. O., et al., *Ap. J.*, 247 (1981), 104.
- [6] de Muizon, M., et al., *A & A.*, 83 (1980), 140.
- [7] Dinerstein, F. O., et al., *Ap. J. Lett.*, 227 (1979), L39.
- [8] Downes, D., et al., *Ap. J.*, 244 (1981), 869.
- [9] Eiroa, C., et al., *A & A.*, 74 (1979), 89.
- [10] Genzel, R., et al., *Ap. J.*, 244 (1981), 884.
- [11] Harvey, P. M., et al., *Ap. J.*, 219 (1978), 891.
- [12] Little, L. T., et al., *M. N.*, 189 (1979), 539.
- [13] Mestel, L., et al., *M. N.*, 187 (1979), 337.
- [14] Mouschovias, T. C., et al., *Ap. J.*, 230 (1979), 204.
- [15] Myers, P. C., et al., *Ap. J. Lett.*, 233 (1979), L141.
- [16] Pauls, T., et al., *A & A.*, 104 (1981), 288.
- [17] Toelle, F., et al., *A & A.*, 95 (1981), 143.
- [18] Tokunaga, A. T., et al., *Ap. J. Lett.*, 224 (1978), L19.
- [19] Ungerechts, H., (1980) Doctoral dissertation, University of Bonn.
- [20] Ungerechts, H., et al., *A & A.* 88 (1980), 259.
- [21] Ungerechts, H., et al., (In preparation) (1982).
- [22] Wilson, T. L., et al., *A & A.* 71 (1979), 275.
- [23] Winnewisser, G., et al., in *Modern aspects of microwave spectroscopy* (ed. Chantry), p.311, Academic Press (1979).
- [24] Arery, L. W., in *Interstellar Molecules* (IAU Symposium No.87) (ed. B. M. Andrew).
- [25] Little, L. T., in *Interstellar Molecules* (IAU Symposium No.87) (ed. B. M. Andrew).
- [26] Evans II, N. J., in *Interstellar Molecules* (IAU Symposium No.87) (ed. B. M. Andrew).
- [27] Field, G. B., in *Protostars and Planets* (ed. T. Gehrels), The University of Arizona Press.
- [28] Evans II, N. J., in *Protostars and Planets* (ed. T. Gehrels), The University of Arizona Press.
- [29] Lada, C. J., in *Giant molecular Clouds in the Galaxy* (ed. P. M. Solomon), Pergamon Press.

- [30] Elmegreen, B. G., in *Giant Molecular Clouds in the Galaxy* (ed. P. M. Solomon), Pergamon Press.
- [31] Tendorio-Tagle, G., in *Giant Molecular Clouds in the Galaxy* (ed. P. M. Solomon), Pergamon Press.
- [32] Assousa, G. E., et al., in *Giant Molecular Clouds in the Galaxy* (ed. P. M. Solomon), Pergamon Press.
- [33] Peter Bodenheimer, in *Fundamental Problems in the Theory of Stellar Evolution* (IAU Symposium No.93) (ed. Sugimoto et al.).
- [34] Silk, J., et al., in *Star Formation* (10th Advanced Course Swiss Society of Astronomy and Astrophysics).
- [35] Spitzer, L., in *Physical Processes in the Interstellar Medium*, (1968).
本文未特殊注明的评述文献
- [36] Penzian, A. A.; *Science*, **208** (1980), 663.
- [37] Wannier, P. G., *Ann. Rev. A & A.*, **18** (1980), 399.
- [38] Winnewisser, G., *Topics in Current Chemistry* **99** (1981), 39, Springer Verlag Heidelberg.
- [39] Zuckerman, B., et al., *Ann. Rev. A & A.* **12** (1974), 279.
- [40] Zuckerman, B., *Ann. Rev. A & A.*, **18** (1980).

The Physical Properties of Molecular Clouds

G. Winnewisser

(I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln, F. R. G.)

Xing Jun

(The Department of Geophysics, Beijing University)

Abstract

During the past decade, molecular astronomy has greatly contributed to our knowledge of the structure of the Galaxy, chemical history of galaxy, mass loss from stars and molecular clouds and thus has led to a better understanding of the above mentioned subjects.

Summarizing briefly the different objects, this review concentrates on physical properties of molecular clouds, which concerns the formation of stars.

The review consists of four sections which deal with

1. The research objects of molecular astronomy,
2. Derivation of the parameters of molecular clouds,
3. Observational results of molecular clouds,
4. Theoretical problems of molecular clouds.