

天体H₂O分子谱线的观测和研究

向德琳 俞志尧

(中国科学院紫金山天文台) (空军气象学院)

提 要

本文评述了1968年发现天体H₂O分子谱线以来其观测和研究的进展。内容包括(1)天体H₂O脉泽和正常H₂O分子的观测特征;(2)在恒星早期和晚期演化过程中H₂O分子所起的作用和它们可能的状态;(3)利用H₂O分子谱线的观测,研究晚型星拱星包层结构和速度流场、恒星质量损失率以及恒星早期演化过程中的分子云能量平衡等理论研究成果;(4)H₂O脉泽时变特征的观测和研究;(5)银河系天体H₂O(6₁₆-5₂₃)脉泽源巡视和H₂O脉泽源星表以及河外H₂O脉泽源的探测。

一、引 言

天体H₂O分子谱线的观测和研究包括对天体正常H₂O分子谱线和脉泽H₂O分子谱线的观测和研究。已观测到的天体正常H₂O分子谱线的发射有3₁₃-2₂₀^{[1],[2]}以及4₁₄-3₂₁^[3]转动能级间的跃迁。跃迁频率分别为183和380GHz。宇宙中最强、最重要的脉泽有OH^[4]、H₂O^[5]和SiO^[6]脉泽。恒星形成的位置似乎可以容易地由H₂O脉泽发射来探测到(如同OH脉泽一样),并且还可以通过恒星H₂O脉泽的观测来了解晚型星的较外层大气及其膨胀壳层。因此,对H₂O脉泽源的观测和研究确实显得很重要,天体H₂O脉泽分子是在1968年首次发现的^[5]。已观测到的天体H₂O分子的脉泽跃迁能级仅在6₁₆-5₂₃之间^{[7],[8]},跃迁频率为22.235080GHz。见图1。

天体H₂O脉泽具有其独特的观测特征^[8]:极高的亮温(10¹¹-10¹⁵K),极窄的线宽(0.5-2km·s⁻¹),诸多的脉泽特征峰(1-100),足够小的视尺度(10⁻⁴-1弧秒)和敏感的时变特性等,以致使天体H₂O脉泽源成为研究辐射源发射区的最好工具。大量的观测证实,天体H₂O脉泽通常具有成团或成块的特征。单个源斑的尺度最小只有一个天文单位(~10¹³cm),而最高的辐射功率在一个50kHz的谱特征峰上,甚至可超过10³³尔格/秒(1L_⊙)^[8]。因此,利用H₂O脉泽源的观测来

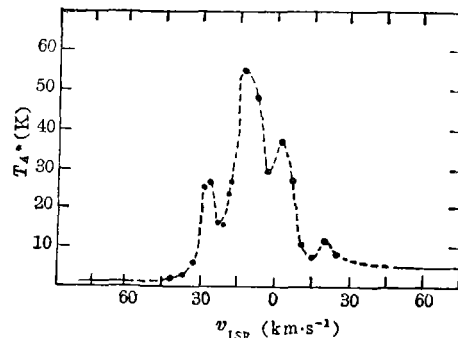


图1. 在W49方向观测到的H₂O 6₁₆-5₂₃跃迁的谱线强度
(A. C. Cheung et al. 1969)^[5].

调查一个小尺度范围内的能量来源及物理条件, 可能是非常有效的。同时, 利用H₂O脉泽源的小尺度特征可以研究星际的散射和测量源的距离。

现代的观测指出, 所有观测到的天体H₂O脉泽源不是处在恒星形成区附近, 就是与充分演化了的恒星(如Mira变星, 半规则变星, 超巨星等)成协^{[8], [9]}。因此, 天体H₂O脉泽源的观测和研究与天体演化中最有兴趣的两个阶段——恒星演化的早期与晚期密切相关。

表1给出了与年轻恒星成协以及与晚型星成协的H₂O脉泽的特征^[10]。

表1. 与年轻恒星及晚型星成协的H₂O脉泽特征

| | 与年轻恒星成协的H ₂ O脉泽 | 与晚型星成协的H ₂ O脉泽 |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 已知脉泽数 | 170 | 100 |
| 线宽(km·s ⁻¹) | 0.5—2 | 1—2 |
| T _K (K) | 100—1500 | 400—1500 |
| 特征峰数 | 1—200 | 1—10 |
| 速度范围(km·s ⁻¹) | 1—400 | 5—50 |
| 偏振度(%) | 线偏振(0—20) | 无 |
| 特征寿命(s) | 10 ⁵ —10 ³ | >10 ⁷ |
| 斑点大小(cm) | 10 ¹³ —10 ¹⁴ | 10 ¹⁴ |
| T _B (K) | 10 ¹⁵ —10 ¹⁸ | 10 ¹¹ —10 ¹³ |
| 成团大小 | 10 ¹⁶ —10 ¹⁷ | 10 ¹⁵ |
| 功率(erg/s) | 10 ²³ —10 ³³ | 10 ²⁴ —10 ²⁸ |

可见, 天体H₂O脉泽源可以根据其成协关系被分为两大类。

由于H₂O的强脉泽活动必须发生在气体密度相当高($\sim 10^5$ — 10^{11} cm⁻³)又有足够的抽运能量($\geq 10^4 L_{\odot}$)的地方^[8]。因此与H II区成协的H₂O脉泽源常常也是与新形成的或正在形成的恒星(O, B)成协, 正是这些明亮天体提供了脉泽活动的高的抽运能量。而H₂O脉泽分子也正适合于处在这些正在形成天体的高凝聚的星际物质中。因此把这类H₂O脉泽称为“星际H₂O脉泽”。

与红外星(即晚谱型的红巨星、超巨星)成协的脉泽源有的处在湍动的恒星光球附近, 有的处于包围这些恒星的、温度相对低、密度相对高的壳层中^[11]。显然这类脉泽源是来自重新回到星际环境的恒星物质中, 所以把这类H₂O脉泽称作“恒星H₂O脉泽”, 或称为“拱星H₂O脉泽”^[9]。

二、天体H₂O脉泽

1. 星际H₂O脉泽

星际H₂O脉泽蒸汽分子在射电频率上的辐射是最强的天体脉泽辐射。

星际H₂O脉泽的射电频谱表现出非常迅速的时变(一周到一月内)和小的线偏振^[10]。Burke et al.^[11]和Johnston et al.^[12]对W49源的观测证明, H₂O源的亮温度超过 10^{14} K。根据星际H₂O脉泽的频谱和空间位形可以分为两类: 一类频谱被限制在很窄的速度范围内(~ 15 km·s⁻¹)。这些低速分量可以具有单线、双线或者是更复杂的特征峰形式。谱的对称形状表明发射

区有规则的运动学结构。例如, VY CMa的 H_2O 频谱的三峰结构起源于径向膨胀。中央峰来自具有恒星速度的脉泽, 另外两个是来自膨胀云相反两边的部分。另一类谱给出的谱形在低速分量有大的离散($20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 而高速分量常常时变得更厉害, 而且比低速分量弱得多。高速脉泽云直径大约为 $10^{16.5}$ 到 $10^{17.5}\text{cm}$ 。

具有低速和高速分量 H_2O 脉泽的年轻恒星的例子是W51(M)。其多数低速分量($55\text{--}70\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)是由高速分量的壳($\sim 3\times 10^{16}\text{cm}$)所包围的核区。Genzel et al.假设W51(M)是大质量的年轻的O型星, 它被不同的旋转和膨胀的致密盘($5\times 10^{15}\text{--}3\times 10^{16}\text{cm}$)所包围^[13]。当高速分量由强的恒星风驱动而密度增加并进入邻近的分子云中去时, 低速分量在盘上发生。

从观测来看, 星际 H_2O 脉泽并不和H II区准确地重合。在电离区域很小甚至探查不到时就发现有 H_2O 脉泽源出现, 其寿命约为 10^5 年。而OH脉泽往往要到电离区域扩大到 $3\times 10^{17}\text{cm}$ 才开始出现。因此很多演化模型认为星际 H_2O 脉泽是出现在恒星生命的最早阶段。由于它的异常演变, 必须要有高的能源, 所以它可能比其他任何脉泽源与恒星演化的早期阶段更密切。因此它也最能引起人们的兴趣。

星际 H_2O 脉泽频谱有从最简单的只包含一个特征峰的谱到可以包含上百个特征峰的非复杂的谱, 例如SGRB2。

在与致密的H II区成协的某些 H_2O 脉泽源中, H_2O 脉泽特征峰中速度相对低的速度分量一直延展到 $\pm 200\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[14]。而强的低速分量, 其范围约为 $\pm 10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (相对于成协分子云的速度)。 H_2O 脉泽这一频谱特征可以用运动学来解释。也就是说所观测到的径向速度是脉泽小云准确运动的反映; 这个大的速度离散和通过VLBI观测得到的脉泽特征区的空间分布结合在一起, 则支持了对 H_2O 脉泽是和大质量恒星形成的最后阶段中的质量损失现象有关的看法。许多文献对 H_2O 源的这种高速特征峰作非运动学解释。例如, 他们认为Raman散射或者非弹性的等离子体散射, 可以把强的低速谱线的功率转移到其他频率上去。如果观测到的径向速度是运动学的, 那么这些脉泽在天空中应当是彼此相对运动的, 具有与径向速度离散相应的自行。因此, 脉泽特征峰的相对自行的测量可以决定观测速度是来源于运动学或非运动学的。再则, 如果运动学是简单的, 则许多脉泽的自行可以给出三维的速度场和源的三维结构。最后, 径向与横向运动比较(“统计视差”或“膨胀团视差”)将提供一个脉泽源距离的直接估计^[15]。

和OH脉泽不同, 星际 H_2O 有快速的时变^{[16], [17]}。详见第四节。

如果来自天空的单一斑点, 有好几条谱线, 速度范围分布在 $2\text{--}30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 那么这种速度的离散很可能是由于精细结构几何投影效应和湍动混合所引起的。这个湍动是由一个强的恒星风与致密分子云物质碰撞而产生的。

基于上述对星际 H_2O 脉泽谱的各种表现特征的分析, 文献[18]探索了一个详细的演化模型。

2. 恒星 H_2O 脉泽

晚型(大于M5)的恒星是处在恒星演化的后期阶段, 它们具有 10^{13}cm (巨星), 甚至更大($>10^{14}\text{cm}$, 超巨星)的半径, 输出能量分别在 $10^4\text{--}10^5L_{\odot}$ 量级。与 H_2O 脉泽源成协的晚型星大多为LPV星, 也有半规则变星, 这类星的较外层是非常冷的, 温度为 $2000\text{--}2500\text{K}$ 。恒星 H_2O 脉泽是处在 $\leq 10^{15}\text{cm}$ 的膨胀包层内。这一图像的最有力的证据是由于干涉仪观测取得的。他们得

到H₂O脉泽是在 2×10^{15} cm之间成团的, 而且处在 4.7×10^{16} cm内^[9]。因此对于恒星H₂O脉泽的观测和研究是了解晚型星的较外层大气以及膨胀壳层的有力工具。

中央恒星一般有 $M \approx 5 \times 10^{-7}$ 到 $5 \times 10^{-4}M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的质量损失率。在它们的拱星包层里一般存在着尘埃颗粒和气体分子两种成分。由观测知前者(很可能是硅酸盐)会在外流的气体中形成, 它的发射线在离恒星中心大约不到5倍恒星半径 r 的地方就可观测到两者具有不同的外流速度^{[20], [21]}。在拱星包层中可以观测到H₂O、OH和SiO分子的脉泽辐射^{[22], [23]}。从微波和红外波段则可以观测到CO、NH₃、H₂O和SiO分子的吸收线和热的发射线^[24]。因此拱星包层中气体的成分是比较复杂的。

观测资料表明, 拱星包层在膨胀过程中由于脉泽分子的辐射和气体的膨胀是不断冷却的。由恒星表面附近($r \approx 6 \times 10^{13}$ cm)的 $T \approx 2000$ K可以下降到在 $r \approx 10^{16}$ cm处的100K左右^[25]。俞(1984)^[26]得到了恒星H₂O脉泽是处在拱星包层多方膨胀的过程中, 它的速度频谱是由拱星包层的速度流场所决定的。俞(1986)^[27]还研究了拱星包层速度流场的二流模型, 得到包层中气体速度流场在多方膨胀过程中严格的形式解, 尘埃颗粒与气体之间的牵连速度以及尘埃颗粒的速度流场。

VLBI观测给出恒星H₂O脉泽典型的是在 10^{13} — 10^{14} cm范围内。在同一包层里这区域要比OH脉泽发射区更致密得多。在这一范围内, 除了因尘埃颗粒的存在而把H₂O脉泽的运动弄得复杂以外, Hill和Willson^[28]设想中央恒星的脉动可以使包层的这部分振动, 并且形成激波向外传播和使物质向里下落。没有下落的物质对H₂O脉泽有影响, 使其运动变得更复杂。孙等^[29]也研究了恒星脉动对拱星包层速度流场的扰动, 得到速度的扰动解。它是一个随着半径的增加而不断振荡的函数, 对恒星H₂O脉泽的速度频谱有影响。

从长基线干涉仪观测可以得到一些M型超巨星脉泽源的特征速度区的分布图。从M型超巨星H₂O脉泽源特征速度区的分布图, 可以分析出H₂O脉泽源在拱星包层中分布的情况。H₂O脉泽源处在拱星包层的膨胀壳层中。俞^{[30], [31]}在解释用长基线干涉仪得到的特征速度区分布图时, 提出了一个膨胀的多壳模型, 即H₂O脉泽源处在拱星包层膨胀的多壳层中。这是一种新的观点和方法。

红巨星的质量损失是回到星际介质的物质的主要来源, 对恒星H₂O脉泽的观测可用于估计质量损失率。它由密度 ρ , 膨胀速度 ν , 脉泽所在处半径 r 决定。通常 ρ 由红外观测得到, 或者由脉泽抽运所需要的理论来考虑。 r 从个别的脉泽成分的离散得到或者从光通过包层的时间直接测量得到。 ν 可由观测得到, 而文^[27]给出了理论计算的结果。

三、天体正常的H₂O分子谱线的 观测研究及其在分子云中的能量平衡

天体正常H₂O分子谱线的观测研究虽然很少, 但发现和观测^{[51], [7]}到强跃迁 $6_{16}-5_{23}$ 之后, Phillips et al. ^[32]对Orion和DR21(OH)探测到星际H₂¹⁸O的 $3_{13}-2_{20}$ (203.4075GHz)跃迁, 从而估计了H₂O对H₂的相对丰度为 10^{-5} 。对如此高的值所作的解释由Elitzur^[33]用激波化学给出。 $3_{13}-2_{20}$ 的观测是对Orion BNKL进行的。有文献指出得到的平顶(plateau)谱线以及H₂的振动-

转动谱线是由于激波引起的^[34-36]。

Waters et al.^[2]对Orion分子云的H₂O蒸汽分子的3₁₃-2₂₀转动跃迁谱线进行了成功的观测,见图2。谱线的频率为183GHz。得到了峰值天线温度为15K, LSR速度8km·s⁻¹, 宽度15km·s⁻¹。他们发现正常H₂O分子谱线与CO分子谱线的轮廓特征相似。其窄尖峰中心在9.5km·s⁻¹, 平坦的两翼中心距前者约8km·s⁻¹。计算得到H₂O的柱密度为 $N_{H_2O} \geq 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$ 。这表明H₂O分子是在Orion分子云中最丰富的成分之一。

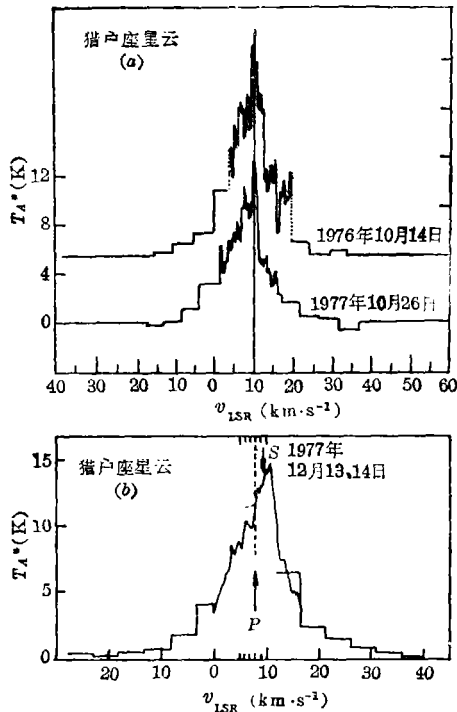


图2. 在Orion Nebula方向观测到的H₂O 3₁₃-2₂₀跃迁(J. W. Water et al. 1980)^[2]。

图3是对着BNKL方向观测得到的H₂O的4₁₄-3₂₁谱线^[3], 其静止频率380.1974 GHz由Delucia et al.给出。H₂O(4₁₄-3₂₁)的亮温度按CO及SiO^[3]测得的源的尺度50''-30''推出, 在160-430K之间。假定源的密度是10⁷Hz/cm³, 速度梯度是5.0km·s⁻¹/3 × 10¹⁷cm, 气体温度100K, 丰度[H₂O]/[H₂]在10⁻⁶-2 × 10⁻⁵范围内, 由激发计算可得亮温度>160K, 峰值在500K。对于来

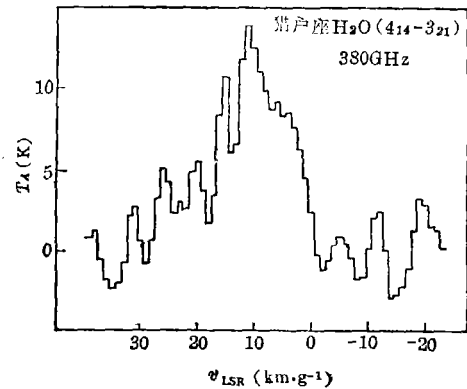


图3. 在BNKL方向的H₂O 4₁₄-3₂₁谱线(T. G. Phillips, J. Kwan, P. J. Huggins, 1980)^[3]。

自平顶源的4₁₄-3₂₁和3₁₃-2₂₀两条线的观测和计算结果, 都是和峰值脉泽活动相一致的。H₂O的这两条正常分子谱线都是用NASA KAO的机载91.5cm望远镜测得的。

另一个与H₂O分子观测和研究有着密切关系的问题是如何理解与恒星形成以及恒星早期演化紧密联系在一起的能量平衡问题。对于暗云和Bok球状体, 已知的加热机制有尘埃颗粒表面的光电子发射、低能宇宙线和软X射线电离、放热化学反应以及湍流耗散等。在内部含有红外源的分子云中, 尘埃颗粒与气体分子之间的碰撞可能是重要的加热机制^[38]。但这种加热还不足以解释这类云中气体温度的分布。Scoville和Kwan^[39]以及Evans II^[40]的研究指出, H₂O分子可能会改善尘埃与气体的耦合, 从而对分子云的加热可能起重要作用。Goldsmith和Langer在研究各种分子的冷却作用时发现, 当没有红外源时, 水分子的冷却率在某些条件($n(H_2) > 10^5 \text{cm}^{-3}$, $T_K = 40 \text{K}$)之下甚至会超过CO分子的冷却率^[41]。水分子在分子云中的相对丰度至少为 $X[H_2O] = 3 \times 10^{-6}$, 而后来的计算表明, 在密度为 10^5cm^{-3} , 温度 $T_K \sim 50 \text{K}$ 的

云中, $X(\text{H}_2\text{O})$ 甚至可达 $\sim(0.5-1)\times 10^{-5}$, 与丰度相当高的CO相比也是相当高的^{[42], [43]}。

张等^{[44], [45]}详细考虑了H₂O分子对于分子云能量平衡的影响。他们在LVG模型下计算了H₂O分子对气体净能量增加率的影响。他们的研究表明: 在不考虑红外连续辐射场时, H₂O分子是纯粹的冷却剂, 而当存在尘埃的红外连续辐射场时, H₂O分子的布居受到很大影响, 从而可能成为重要的加热剂。

四、天体H₂O脉泽分子谱线的时变

天体H₂O脉泽分子谱线有着非常明显的时变。

从1969年1月至1970年6月Sullivan对W49、W3(OH)、Orion等几个强星际H₂O脉泽源进行了持续的单天线观测, 发现星际H₂O脉泽线的谱征有强度和线心视向速度随时间的变化^[46]。强度变化的时标从几天到几个月。一些谱征的线心视向速度有较明显的、不超过 $\pm 0.5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的变化, 但也有一些谱征的线心视向速度基本不变。1974年4月到1975年5月Gammon对W49N的星际H₂O脉泽进行了高时间分辨率的单天线观测^[47], 发现了一些谱征强度上的相关变化。Little、White等人也于1974年9月到1976年10月间对W3(OH)、W49N、Orion、W51等源进行观测^[16]。与Sullivan的资料比较, 他们发现一些源的星际H₂O脉泽谱平均强度有系统的变化。

对恒星H₂O脉泽时变的观测有如^[48-50]所述。Gómez Balboa and Lépine对10个晚型变星的拱星包层中的H₂O脉泽进行了6年的跟踪观测^[51], 与恒星光变曲线相比较后, 得到了大量恒星H₂O脉泽谱征时变的观测资料。

1. 星际H₂O脉泽的时变

根据Sullivan、Gammon和Little等人的观测结果^{[16], [46], [47]}可将星际H₂O脉泽的时变分为典型的三类: 独立型、相关型和互补型^[52]。它们分别描述了不同的流量变化特征。

关于时变机制, 对未饱和H₂O脉泽的短时标变化(10分钟到2个月)Montes提出了受激(非线性)康普顿散射模型^[53]。对饱和H₂O脉泽的短时标变化, Deguchi提出一种不稳定机制^[54](这种不稳定性增长的时标不超过30分钟)。Bettwieser用Deguchi提出的机制对不同饱和度的脉泽辐射稳定性进行了研究^[55]: 深度饱和的脉泽系统是辐射稳定的, 中度饱和系统中临界扰动的发展会导致辐射不稳定, 扰动的增长使辐射流量发生变化, 直至脉泽分子云中相当一部分体积达到深度饱和后又趋于稳定。这种振荡的弛豫时间处在短的时标范围内。目前一般认为H₂O/H II脉泽至少是部分饱和的。由此看来, 这种机制是H₂O/H II脉泽短时标时变的一种可能机制。

长时标的流量变化除了可能的周期、准周期和非周期变化外, 还观测到一些源的脉泽平均流量的系统变化。Little等人认为这可能是由各脉泽子云所接收的来自一公共辐射的流量变化(时标 ~ 10 年)所引起的^[16]。

对可能存在的长时标的周期或准周期变化, Strel'nitskii提出一种慢激波机制^[56]: 中心星的恒星风在脉泽子云周围的弥漫气体中形成一个弓形激波。被压缩的恒星风又在脉泽子云内部形成一内激波。这种机制将提供时标 ≥ 1 年的方波形流量变化。

2. 恒星H₂O脉泽的时变

处在恒星包层中的H₂O脉泽谱征时变特点是多种多样的, 根据Schwartz, Cox, Berulis和Gómez Balboa^[48-51]等人的观测结果, 可以将恒星H₂O脉泽的时变分为以下典型的两类:

一类是恒星H₂O脉泽谱征流量有明显的周期性, 其中又可分为两种情况: (1) 恒星是一颗规则变星, 它的恒星H₂O脉泽谱征流量变化曲线与恒星的光度曲线表现出高度的相关性和一致性, 例如U Her的恒星H₂O脉泽^{[57], [58]}。而R Dor的恒星H₂O脉泽谱征流量也表现出明显的周期性, 并且SiO脉泽谱征流量与H₂O脉泽谱征流量是相关的^[51]。(2) 恒星是一颗众所周知的脉动周期不稳定缩短的变星(在150年内周期从346天缩短到282天), 它的恒星H₂O脉泽谱征流量变化与恒星的红外辐射相关^[48]。

另一类, 其恒星是一颗半规则变星, 它的恒星H₂O脉泽谱征流量通常有两个峰: 高速成分和低速成分。L₂ Pup的恒星H₂O脉泽谱征的两个峰的相对强度会发生变化, 并且在通常情况下不是独立变化的。这种情况可能表示这两个峰是来自包层的不同高度^[51]。在VY CMa包层中的H₂O脉泽通常有9到25km·s⁻¹的主要成分, 在-5km·s⁻¹和37km·s⁻¹也发现两个弱的成分^[51], 有趣的是-5km·s⁻¹的弱成分的线性视向速度会发生变化, 在1974年观测值是-2.9km·s⁻¹^[59], 在1976年观测值是-1km·s⁻¹^[60], 在1978年观测值是-4km·s⁻¹^[61]。为了解释这种速度变化现象, Van Blerkom and Auer提出恒星H₂O脉泽是处在包层的旋转盘上^[62]。R Crt是一颗周期大约为160天的半规则变星, 它的恒星H₂O脉泽谱征也存在两个主要的峰, 分别在+5km·s⁻¹和12km·s⁻¹处^[51]。对AH Sco的恒星H₂O脉泽跟踪观测表明, 它的恒星H₂O脉泽谱征表现出在大约-2km·s⁻¹和12km·s⁻¹处的两个宽的成分, 这两个成分是不相关的^[51]。

恒星H₂O脉泽时变机制可能与它的抽运机制有关。目前关于恒星H₂O脉泽时变机制的理论主要有两种。第一种是由于恒星的近红外抽运机制所引起的。这种近红外抽运机制可以解释第一种恒星H₂O脉泽时变^[48]。因为处在恒星包层中的恒星H₂O脉泽受到恒星近红外辐射抽运。由于这种辐射抽运机制使得恒星H₂O脉泽谱征表现出明显的周期性, 并与恒星光度曲线有高度的相关性。第二种是包层中气体分子的碰撞抽运机制^{[63], [64]}。包层中气体的加热一般由两种原因引起: (1) 与尘埃颗粒碰撞加热, 而尘埃颗粒的加速是与它所包围的恒星的连续辐射有关; (2) 由恒星脉动所引起的激波加热^{[65], [28]}。无论是激波加热还是碰撞加热都会引起恒星H₂O脉泽谱征流量的变化^[64]。A.M.Gómez Balboa的工作也支持了第二类恒星H₂O脉泽谱征时变用分子间碰撞抽运机制来解释^[51]。

五、H₂O脉泽源巡视

1. 银河系的H₂O脉泽源巡视和H₂O脉泽星表

截至1984年, 已发现星际分子58种, 跃迁1841条, 但已观测到的H₂O的跃迁只有3条^[66]。它们是6₁₆-5₂₃^{[51], [7]}, 3₁₃-2₂₀^{[32], [1]}和4₁₄-3₂₁^[3]。绝大部分对H₂O谱线的观测是集中在对6₁₆-5₂₃这条脉泽线进行的。

除前述的理论研究外, 有一、二百篇文献报道了H₂O脉泽源(22GHz)的巡视。这包括探测新的H₂O源, 改进已观测源的位置, 扩大速度覆盖以及测量源的强度, 监视源的强度变化

等。最后编成脉泽源星表, 这将是研究这类天体本身及其与恒星的诞生和演化、与银河系(和河外星系)旋臂结构的的基础资料。

北天的巡视如Genzel和Downes^{[18], [13]}用联邦德国100米射电镜在 $l=0.5^\circ-232^\circ$, $|b| \lesssim 1^\circ$ 范围对连续源位置的观测。发现几乎所有的H₂O源位于环绕新形成的大质量恒星(OB星)的膨胀壳层内, 邻近致密H II区(并不与之重合)和分子云。1979年Engels发表了带OH、H₂O和/或SiO脉泽的351颗恒星的补充星表^[67], 1980年Dinger和Dickinson综合出195个银河系非恒星H₂O脉泽发射源表^[68]。

早期的南天H₂O脉泽巡视工作如Kaufmann et al.^[69]和Batchelor et al.^[70]在 $l=250^\circ-360^\circ$ 得到的68个H₂O脉泽源, 大部与OH脉泽重合。Caswell et al.^[71-74]在南银道面 $l=340^\circ-2^\circ$ 和 $l=3^\circ-60^\circ$ (包括银心)对所有I型OH脉泽源作了巡视。发现大多数主线OH脉泽准确位于致密H II区和当前的恒星形成地。Scalise Jr和Braz^[75]以及Braz和Scalise^[76]发表了用巴西13.7米射电镜对银道面 $l=240^\circ-350^\circ$ 的2.7GHz连续源及I型OH源的巡视。发现最强的连续峰($T_b > 50K$)都和H₂O脉泽成协, $T_b < 1K$ 的则不然, 而且H₂O脉泽的强度并不和与之成协的H II区的强度相关。不过H₂O发射和I型OH源的发射成协, 反之也成立。

近期Mathew et al.完成了一项在银道面预选区域($l=19-23^\circ$; $l=29-33^\circ$, $|b| \leq 0.125^\circ$)的栅格式取样的系统H₂O脉泽巡视^[77]。大部源与中心为晚型O到早型B的恒星形成区成协。但与连续源成协不明显, 而且只有1/3与OH主线源成协。

最近林等编纂了260颗银河系H₂O 6₁₆-5₁₃脉泽源星表, 是当前最新、最全的一个H₂O脉泽源表^[78]。

银河系H₂O脉泽源巡视已取得大量结果, 但大多数巡视是在H II区(连续源)或OH脉泽主线方向进行的, 也有些是在红外源方向进行的。如[79]Downes和Genzel^[80]对早期发现的168个H₂O脉泽源所作的银经分布直方图, 虽显示出H₂O脉泽似乎位于恒星形成区, 并主要集中在 $l \sim 32^\circ$ 和 $l \sim 327^\circ$ 的旋臂方向, 但我们应当注意到, 这种结果是根据现成星表作出的。脉泽分布和银河系结构在这类资料基础上的分析不是完全客观的, 是受到观测的选择效应影响的。利用H₂O脉泽巡视结果进行银河系大尺度和局域结构的研究, 还有待于细致天区扫描式(大样本、高分辨率、等间距取样)巡视作补充。其现实性和价值需作先导性探索研究^[81]。

2. 河外星系的H₂O脉泽源探测

表2给出了已探测到H₂O脉泽发射的河外星系表。*表示不够确定。银河系的H₂O脉泽和

表2 探测到H₂O脉泽的河外星系表

| 星 系 | 参考文献 | 星 系 | 参考文献 |
|---------------|---------------|-----------|----------------|
| NGC 253 | [82], [83] | IC 133 | [84-85] |
| NGC 598=M33 | [84], [85] | NGC 3079 | [93-95] |
| NGC 3034=M82* | [86] | NGC 6240* | [93] |
| NGC 4945 | [83], [87-88] | IC 10 | [96] |
| IC 342 | [85] | NGC 4258 | [95], [97-98] |
| LMC | [83], [89-92] | Circinus | [97], [99-100] |
| SMC | [91] | NGC1068 | [93] |

OH类似,典型的尺度类似太阳系或较小些,要用VLBI来分解。河外H₂O脉泽尚无法分解,但它们的位置可作为分子云物质综合分布中目前活动的恒星形成区的指示器。因为信号本身微弱,目前只探测到少量的^[15]。观测到的H₂O脉泽是在旋臂附近的H II区中^{[84],[85],[101]}。这些河外H₂O脉泽的光度接近银河系脉泽光度分布的高端,而小于最强的银河系H₂O脉泽W49的值。而我们知道最强的OH脉泽1667MHz和NGC253的发射比银河系最强源的高两个量级^{[102],[103]}。

河外H₂O脉泽的进一步观测,得到NGC4945与星系核成协,且其光度(165L_⊙)至少比银河系任何脉泽高一个量级以上^[83]。最近探测到一个独特的河外星系NGC3079^[93-94],发现在距其核5°的范围内,它的各向同性H₂O脉泽发射的总光度约达~500L_⊙。这是迄今探测到的最强大的脉泽源,峰值流密度达11Jy。H₂O特征峰至少覆盖140km·s⁻¹。同时也察觉到一个距其甚远、可能与前者相互作用的H₂O脉泽源的辐射,来自星系NGC 6240,发出的光度约200L_⊙。

对于河外分子谱线的更新的研究,有待于观测能力的提高。如单天线毫米波射电望远镜,毫米波干涉仪和低噪音接收机的发展,远红外波段的扩展,机载望远镜的建设等。VLBI技术的改进(如Quasat的应用)将提供河外脉泽以优于毫角秒分辨率的描图以及对复杂脉泽源内的斑点作自行研究^{[104],[105]}。通过足够长时间的研究,可望得到独立的星系距离以及它们的横向速度^{[15],[105]}。确立对河外星系中分子云分布的研究的动机是:这些资料(结合HI以及恒星资料,恒星形成率等资料)可提供星系演化的基本约束模型。而过去的恒星形成率信息,存在于作为星系中心距离函数的同位素与所揭示的信息之比当中^[106]。对高能星系如NGC 253的中心部分的分子云的研究,有助于我们澄清“星爆”现象,这种现象似乎是星系某种变化的根源^[107]。用VLA观测活动星系NGC4258和NGC1068中的拱核H₂O脉泽,发现它们分别限制在1.3和3.5pc空间范围内^[98]。这两个星系以及对NGC253^{[102],[103]},NGC 4945^[83]和NGC 3079^{[84],[98]}等所观测到的现象,还揭示出星系核活动。所以观测和研究H₂O脉泽的意义还在于它们可以作为河外星系中的星爆现象的示踪器^[108],它们是研究活动星系核的有力工具。

本项目得到国家自然科学基金的资助。

参 考 文 献

- [1] Water, J. W., Gustincic, J. J., Kakar, R. K., Kuiper, T. B. H., Swanson, P. N., Kerr, A. R., Thaddeus, D., *Bull. AAS.*, 9 (1977), 564.
- [2] Water, J. W., Gustincic, J. J., Kuiper, T. B. H., Roscoe, H. K., Swanson, P. N., Kerr, A. F. Thaddeus, P., *Ap. J.*, 235 (1980), 57.
- [3] Phillips, T. G., Kwan, J., Huggins, P. J., in IAU Symposium No. 87, p. 21, (1980).
- [4] Weaver, H., Dieter, N. H., Williams, D. R. W., Lum, W. T., *Nature*, 208 (1965), 29.
- [5] Cheung, A. C., Rank, D. M., Townes, C. H., Thornton, D. D., Welch, W. J., *Nature*, 221 (1969), 626.
- [6] Snyder, L. E., Buhl, D., *Ap. J. Lett.*, 189 (1974), L31.
- [7] Moran, J. M., Papadopoulos, G. D., Burke, B. F., Lo, K. Y., Schwarth, P. R., Thacker, D. L., Johnson, K. J., Knowles, S. H., Reisz, A. C., Shapiro, I. I., *Ap. J. Lett.*, 185 (1973), 535.
- [8] Reid, M. J., Moran, J. M., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 19 (1981), 231.
- [9] Booth, R. S., *ESA Spec. Publ.*, 213 (1984), 171.
- [11] Beuson, J. M., NRAO Summer Student Lecture Series, (1980).
- [11] Burke, B. F., Papa, D. C., Papadopoulos, G. D., Schwartz, P. R., Knowles, S. H., Sullivan, W. T., Meeks, M. L., Moran, J. M., *Ap. J.*, 160 (1970), L63.
- [12] Johnston, K. J., Knowles, S. H., Sullivan, I., W. T., Moran, J. M., Burke, B. F., Lo, K. Y., Papa, D. C., Papadopoulos, G. D., Schwartz, P. R., Knight, C. A., Shapiro, I. I., Welch, W. J., *Ap. J. Lett.*,

- 166 (1971), L21.
- [13] Genzel, R., Downes, D., *A. Ap.*, 72 (1979), 234.
- [14] Genzel, R., Downes, D., Schneps, M. H., Reid, M. J., Moran, J. M., Kogan L. R., Kostenko, V. I., Matveyenko, L. I., Rönnäng, B., *Ap. J.*, 247 (1981), 1039.
- [15] Morris, M., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 20 (1982), 517.
- [16] Little, L. T., White, G. J., Riley, P. W., *MNRAS*, 180 (1977), 639.
- [17] Haschick, A. D., Burke B. F., Spencer, J. H., *Science*, 198 (1977), 1153
- [18] Genzel, R., Downes, D., *A. Ap. Suppl.*, 30 (1977), 145.
- [19] Moran, J. M., *Bull. Ann. Astron. Soc.*, 13 (1981), 508.
- [20] Toombs, R. I., Becklin, E. E., Frogel, J. A., Law, S. K., Porter, F. C., Wastphal, J. A., *Ap. J. Lett.*, 173 (1972), L71.
- [21] Sutton, E. C., Storey, J. W., Townes, D. H., *Ap. J. Lett.*, 224 (1978), L123.
- [22] Jewell, P. R., Webber, J. C., Snyder, L. E., *Ap. J. Lett.*, 242 (1980), L29.
- [23] Spencer, J. H., Johnston, K. J., Moran, J. M., Reid, M. J., Walker, R. C., *Ap. J.*, 230 (1979), 449.
- [24] Hinkle, K. H., Barnes, T. G., *Ap. J.*, 227 (1979), 923.
- [25] Goldreich, P., Scoville, N., *Ap. J.*, 205 (1976), 144.
- [26] 俞志尧, 天体物理学报, 4 (1984), 243。
- [27] 俞志尧, 天体物理学报, 6 (1986), 283。
- [28] Hill, S. J., Willson, L. A., *Ap. J.*, 229 (1979), 1029.
- [29] 孙锦, 吴时敏, 谢书定, 葛卫国, 天体物理学报, 4 (1984), 97。
- [30] 俞志尧, 科学通报, (1983), No. 12, 740.
- [31] Yu Zhiyao (俞志尧), *Science Bulletin*, 30 (1985), No. 2, 280.
- [32] Phillips, T. G., Scoville, N., Kwan, J., Huggins, P. J., Wannier, P. G., *Ap. J.*, 222 (1978), L59.
- [33] Elitzur, M., *Ap. J.*, 229 (1979), 560.
- [34] Kwan, J., *Ap. J.*, 216 (1977), 713.
- [35] Hollenbach, D. J., Shull, J. M., *Ap. J.*, 216 (1977), 419.
- [36] Kwan, J., Scoville, N., *Ap. J. Lett.*, 210 (1976), L39.
- [37] Delucia, F. C., Helminger, P., Cook, R. L., Gordy, W., *Phys. Rev.*, A5 (1972), 487.
- [38] Goldreich, P., Kwan, J., *Ap. J.*, 189 (1974), 441.
- [39] Scoville, N. Z., Kwan, J., *Ap. J.*, 206 (1976), 718.
- [40] Evans II, N. J., Blair, G. N., Scholtes, M., Harvey, P., Israel, F., Peters, W. L., De Graauw, T., Bout, P. V., *Ap. J.*, 250 (1981), 200.
- [41] Goldsmith, P. F., Langer, W. D., *Ap. J.*, 222 (1978), 881.
- [42] Mitchell, G. F., Ginsburg, J. L., Kuntz, P. L., *Ap. J. Suppl.*, 38 (1978), 39.
- [43] Prasad, S. S., Jr. Huntress, W. T., *ibid*, 43 (1980), 1.
- [44] 张承岳, 唐沅, 向德琳, 紫金山天文台台刊, 4 (1985a), 1,1.
- [45] 张承岳, 唐沅, 向德琳, 天文学报, 26 (1985b), 213.
- [46] Sullivan, W. T., *Ap. J. Suppl.*, 25 (1973), 393.
- [47] Gammon, R. H., *A. Ap.*, 5 (1976), 71.
- [48] Schwartz, P. R., Harvey, P. M., Barrett, A. H., *Ap. J.*, 187 (1974), 491.
- [49] Cox, G. G., Parkev, E. A., *MNRAS*, 186 (1979), 197.
- [50] Berulis, I. I., Lckht, E. E., Pashchenko, M. I., Rudniskii, G. M., *Sov. Astron.*, 27 (1983), 179.
- [51] Balboa, A. M. G., Lepin, J. R. D., *A. Ap.*, 159 (1980), 166.
- [52] 彭瑞生, 硕士学位论文, 云南天文台, (1986)。
- [53] Montes, C., *Ap. J.*, 216 (1977), 329.
- [54] Deguchi, S., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 26 (1974), 437.
- [55] Bettwieser, E., *A. Ap.*, 72 (1978), 97.
- [56] Strel'nitskii, V. S., *MNRAS*, 207 (1984), 339.
- [57] Dickinson, D. F., *Ap. J. Suppl.*, 30 (1976), 259.
- [58] Olmon, F. M., Winnberg, A., Matthews, H. E., Schultz, G. V., *A. Ap. Suppl.*, 42 (1980), 119.

- [59] Cato, B. T., Ronnang, B. O., Rydbeck, O. E. H., Lewim, P. T., Ingveesson, K. S., Cardiasmenos, A. G., Shanley, J. F., *Ap. J.*, **208** (1976), 87.
- [60] Knowles, S. H., Bachelor, R. A., *MNRAS*, **174** (1976), 69p.
- [61] Lepine, J. R. D., Le Squeren, A. M., *Scalise, Ap. J.*, **225** (1978), 869.
- [62] Blerkon, D. V., *Auer, L. Ap. J.*, **204** (1976), 775.
- [63] Strel'niskii, U. S., *Sov. Astron.*, **17** (6), 717.
- [64] Deguchi, S., *Publ. Astron. Soc. Japan*, **29** (1977), 669.
- [65] Wood, P. R., *Ap. J.*, **227** (1979), 200.
- [66] Lovas, F. J., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **15** (1986), 251.
- [67] Engel, D., *A. Ap. Suppl.*, **36** (1979), 337.
- [68] Dinger, A. S. C., Dicknson, D. F., *A. J.*, **85** (1980), 1247.
- [69] Kaufmann, P., Zisk, S., Scalise, E., Schaal, R. E., Gammon, R. H., *A. J.*, **82** (1977), 577.
- [70] Batchelor, R. A., Caswell, J. L., Goss, W. M., Haynes, R. F., Knowles, S. H., Wellington, K. J., *Aust. J. Phys.*, **33** (1980), 139.
- [71] Caswell, J. L., Batchelor, R. A., Forster, J. R., Wellington, K. J., *Aust. J. Phys.*, **36** (1983), 313,401.
- [72] Caswell, J. L., Batchlor, R. A., Forster, J. R., Wellington, K. J., *Aust. J. Phys.*, **36** (1983),313, 443a.
- [73] Caswell, J. L., Haynes, R. F., *Astrophysics and Space Science Library*, **105** (1983), 25.
- [74] Caswell, J. L., Haynes, R. F., *Aust. J. Phys.*, **36** (1983), 313, 417.
- [75] Scalise, E. Jr., Braz, M. A., *A. Ap.*, **85** (1980), 149.
- [76] Braz, M. A., Scalise, E. Jr., *A. Ap.*, **107** (1982), 272.
- [77] Matthews, H. E., Olon, F. M., Winnberg, A., Baud, B., *A. Ap.*, **149** (1985), 2, 227.
- [78] 林兆芬, 夏一飞, 毛昌鉴, Moran, J. M., 待发表。
- [79] Crocker, D. A., Hagen, W., *A. Ap. Suppl.*, **54** (1983), 3, 405.
- [80] Downes, D., Genzel, R., in IAU Symp., No. 87, p.565, (1980).
- [81] Matthews, H. E., Olon, F. M., Winnberg, A., in «Masers, Molecules and Mass Outflows in Star Forming Regions» P. 265(1986), ed. B. Baud.
- [82] Lepine, J. R. D., Santon, P. M. D., *Nature*, **270** (1977), 501.
- [83] Batchelor, R. A., Tauncey, L. D., Whiteoak, J. B., *MNRAS*, **200** (1982), 19p.
- [84] Churchwell, E. B., Witzel, A., Huchtmeier, W., Pauling, I. I. T., Roland, J., SIEBER, W., *A. Ap.* **54** (1977), 969.
- [85] Huchtmeier, W. K., Witzel, A., Kuhr, H., Pauling, I. I. T., Rolaud, J., *A. Ap.*, **64** (1978), L21.
- [86] Andrew, B. H., Bell, M. B., Brotten, N. W., Macleod, J. M., *A. Ap.*, **39** (1975), 421.
- [87] Santos, P. M. D., Lepine, L. R. D., *Nature*, **278** (1979), 34.
- [88] Lepine, J. R. D., Santos, P. M. D., in IAU Symp., No. 87, p.599, (1980).
- [89] Scalise, E., Braz, M. A., *Nature*, **290** (1981), 36
- [90] Gardner, F. F., Whiteoak, J. B., *MNRAS*, **215** (1985), 103.
- [91] Scalise, E., Braz, M. A., *A. J.*, **87** (1982), 523.
- [92] Whiteoak, J. B., Wellington, K. J., Janncey, D. L., Gardner, F. F., Forster, J. R. F., Caswell, J. L., Batchelor, R. A., *MNRAS*, **205** (1983), 275.
- [93] Henkel, C., Gusten, R., Downes, D., Thum, C., Wilson, T. L., Biermann, P., *A. Ap.*, **141** (1984), 1, L1.
- [94] Haschick, A. D., Boan, W. A., *Nature*, **314** (1985), 144.
- [95] Haschick, A. D., Baan, W. A., in Maser, Molecules and Mass outflows in Star Forming Region, p. 249, (1986).
- [96] Henkel, C., Wouterloot, J. G. A., Bally, J. A. *Ap.*, **155** (1986), 1, 193.
- [97] Whiteoak, J. B., Gardher, F. F., *MNRAS*, **222** (1986), 513.
- [98] Claussen, M. J., Lo, K. Y., *Ap. J.*, **308** (1986), 592.
- [99] Gardner, F. F., Whiteoak, J. B., *MNRAS*, **201** (1982), 13.
- [100] Moorwood, A. F. M., Glass, I. S., *ESO Sci. Prepr.* (1983), No. 291. 419.
- [101] Huchtmeier, W. K., Richter, O. G., Witzel, A., Dauliny I. T., *A. Ap.*, **91** (1980), 259.

- [102] Whiteoak, J. B., Gardner, F. F., *Ap. J. Lett.*, **15** (1973), 211.
[103] Gardner, F. F., Whiteoak, J. B., *MNRAS*, **173** (1975), 77.
[104] Genzel, R., Reid, M. J., Moran, J. M., Downes, D., *Ap.J.*, **244** (1981), 884.
[105] Reid, M. J., *ESA Spec. Publ.*, **213** (1984), 181.
[106] Wannier, P. G., *Ann. Rev. A. Ap.*, **18** (1980), 399.
[107] Rieke, G. H., Lebofsky, M. J., Thompson, R. I., Low, F. J., Tokunaga, A. T., *Ap. J.*, **238** (1980), 24.
[108] Claussen, M. J., Lo, K. Y., Heiligman, G. M., *BAAS*, **16** (1984), 4, 955.

(责任编辑 林一梅)

The Observations and Studies about the Spectra of Celestial H₂O Molecule

Xiang Delin

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

Yu Zhiyao

(Air Meteorological College)

Abstract

The progress and current situation of observations and studies about the spectra of celestial H₂O molecule since it was discovered in 1968 are reviewed in this paper. The content includes (1) the observational characters of celestial H₂O maser and normal H₂O molecule, (2) the roles which H₂O molecules play in early and late periods of star evolution process, and their possible state, (3) the results of theoretical studies about the shell structure and velocity field of the circumstellar envelop, and the mass loss rate of late type star, and the energy balance of molecular clouds in the early period of the star evolution with the observations of H₂O molecular spectra, (4) the observations and studies of time variation of the H₂O maser, (5) the surveys and cataloges of H₂O maser (6₁₆-5₂₃) sources in our Galaxy and the detections of H₂O maser sources in extragalaxies.