

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.03.04

大质量恒星形成区中的 H₂O 脉泽运动学

张 濂^{1,2}, 张 波¹, 闫庆增^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大质量恒星形成区内分布着很多类型的脉泽, 包括 OH, H₂O, CH₃OH 和 SiO 等。利用甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术多历元观测脉泽, 可以在 10 ~ 100 AU 的线尺度上反映年轻星附近的气体运动学特征。在各类脉泽中, H₂O 脉泽是亮度最强的脉泽之一, 因此是研究大质量恒星形成区外流的极佳示踪天体。H₂O 脉泽在不同大质量恒星形成区内主要显示有准直喷流和宽张角外流等运动特征。选取了具有代表性的大质量恒星形成区, 如 Orion-KL, Cepheus A, W75N(B), G24.78+0.08 A1 和 AFGL 5142, 介绍了 H₂O 脉泽在这些形成区所反映的气体运动学特征, 及其与大质量恒星演化之间的关系。

关键词: 恒星形成区; 脉泽; H₂O 脉泽; 运动学; VLBI; 外流; 大质量恒星

中图分类号: P155.2⁺² **文献标识码:** A

1 引 言

目前, 小质量恒星形成的理论模型已被诸多观测事实验证, 且已被广泛接受。在小质量恒星形成过程中, 分子云由于自身的引力不稳定性会坍缩, 形成分子云核, 并通过吸积进一步聚集物质。由于角动量守恒, 小质量恒星在吸积过程中会形成吸积盘, 并通过外流驱散多余的角动量^[1]。然而, 解释大质量恒星 (大于 8 M_⊙) 形成的过程从理论和观测来说都是一种挑战, 主要有以下原因: (1) 相比于小质量恒星, 大质量恒星的数目偏少, 再加上演化速度快 (10⁶~10⁷ a), 导致大质量恒星的观测样本比较少; (2) 大部分大质量恒星距离太阳比较远, 通常达几千秒差距, 需要高空间分辨率的仪器进行观测; (3) 大质量恒星主序前阶段深藏在诞生时的分子云中, 到达主序时仍然吸积物质, 具有高隐藏性, 难以用光学和近红外望远镜观测^[2]; (4) 与中小质量恒星的形成过程不同, 在大质量恒星形成过程中, 由高光度产生的高辐射压可能会反转吸积流, 因此很难从理论上进行解释。因此, 仅有少量的大质量原恒星候选体被证实^[3]。目前, 关于大质量恒星形成过程有三种观点^[2, 4]: (1) 类似于小质量恒星形

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2017-12-26

资助项目: 国家自然科学基金 (11673051); 中国科学院百人计划项目

通讯作者: 张濂, zhanglian@shao.ac.cn

成, 由巨分子云核坍缩而成; (2) 大质量年轻星 (high massive young stellar object, HMYSO) 通过吸积吞并其周围的小质量星, 从而形成大质量恒星; (3) 由小质量的恒星碰撞并合而成, 主要发生在密度极大的星团中。目前大质量恒星形成的研究已经取得一些进展, 但仍然缺乏足够的观测证据来验证上述三种理论。

数值模拟表明, HMYSO 可通过吸积盘和外流来有效增加质量, 并预测吸积盘的尺度仅为 100 AU 量级^[5]。为了深入了解 HMYSO 周围吸积以及喷发过程, 则要求 10 ~ 100 AU 线尺度分辨率才能获取单个 HMYSO 附近气体运动学信息。由于 HMYSO 到太阳的距离一般大于 1 kpc, 这就要求角分辨率好于 0.1"。要获得 HMYSO 附近气体的运动学信息, 必须选取合适的示踪天体, 通过多历元的观测来获取。

人们在 HMYSO 附近 (100 AU 以内) 通常可以观测到分子脉泽, 主要为 OH, CH₃OH, H₂O 和 SiO 等^[6]。这些分子脉泽大多具有成团特性, 由许多视向速度以及位置不同的脉泽斑组成。脉泽斑具有极高的亮温度 (10⁹ K 以上), 典型的尺度为 1 AU^[7]。不同种类的脉泽诞生和消失于恒星形成的不同时期 (如图 1 所示), 也分布在恒星形成区的不同区域, 示踪不同的物理和化学环境, 比如 OH, H₂O 和 II 型 CH₃OH 脉泽在新形成的大质量恒星附近被发现, 示踪 H II 区和亮红外源, 而 I 型 CH₃OH 脉泽通常偏离大质量原恒星和其他种类脉泽^[8]。VLBI 观测技术的角分辨率好于 0.001", 通过多历元观测脉泽可以获得脉泽斑之间的相对自行; 若知道多历元脉泽相对于河外源的位置变化, 还可以获得脉泽所在的大质量恒星形成区的视差和绝对自行; 再结合脉泽的视向速度, 可获得脉泽的三维运动参数。在这些常见的脉泽中, 22 GHz 波段的 H₂O 脉泽由于分布广且亮度高, 成为恒星形成区物理状况和气体动力学的理想探针。通过研究该脉泽, 人们能够在毫角秒分辨率下揭示其在恒星形成区里的运动学和物理状态信息^[9]。因而, 利用 VLBI 观测 HMYSO 附近的 H₂O 脉泽是研究大质量恒星形成区气体运动学的重要方法, 这对人们了解大质量恒星形成的动力学演化以及形成机制具有重要意义。

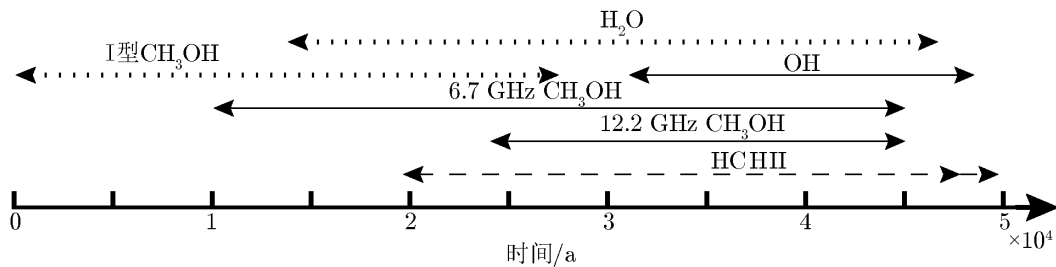


图 1 大质量恒星形成区脉泽的演化序列^[10]

2 大质量恒星形成区 H₂O 脉泽的特征

H₂O 脉泽主要出现在恒星演化的两个阶段: (1) 恒星形成阶段; (2) 恒星晚期阶段, 主要在长周期规则变星 (如 Mira 变星) 或不规则变星 (超巨星) 里。自从转动跃迁 6₁₆ → 5₂₃ 的 22

GHz 天文 H₂O脉泽被发现^[11], 目前已经在高质量恒星形成区以及拱星包层发现了 1000 多颗 H₂O脉泽源, 其中恒星形成区的 H₂O脉泽数量为 400 多颗^[12, 13]。由于明亮的 H₂O脉泽需要强大的激发源, 所以 H₂O脉泽一般激发于外流产生的激波气体中^[14-17], 小部分跟吸积盘有关系^[3, 18], 很少产生于吸积流。与小质量恒星形成区相比, 高质量恒星形成区中外流的能量和动量流都比较大, 所以在后者中, 人们更容易探测到 H₂O脉泽。

H₂O脉泽比其他脉泽更亮, 很容易被探测到。但作为天体测量目标时, H₂O脉泽有如下缺点: (1) H₂O脉泽分布有时比较复杂, 多历元观测证认同一脉泽斑比较困难; (2) H₂O脉泽变化较快, 寿命较短^[7]。尽管由于 H₂O脉泽的强度有较强的时变性^[19], 人们难以测量其相对自行, 但是通过较短时间间隔 (比如几周) 的 VLBI 观测, 可使时变的影响最小化^[20]。

早期对高质量恒星形成区 (massive star forming region, MSFR) H₂O脉泽的 VLBI 观测主要集中在少数几个比较著名的高质量恒星形成区, 如 Orion-KL^[21], W51^[22, 23], Sagittarius B2^[24], W49^[25] 和 W3(OH)^[26]; 最近 H₂O脉泽自行的观测和研究主要指向 Orion-KL, Cepheus A, W75N(B), G24.78+0.08 A1 和 AFGL 5142 这几个天区。本文只综述最近研究比较活跃的天区。通过这些多历元的观测, 人们除了可以获取脉泽所示踪区域的气体运动学信息, 还可以通过比较脉泽的相对自行和视向速度来估计脉泽源的距离。之后, 这种多历元的 H₂O脉泽观测技术被运用在其他高质量恒星形成区的气体运动学研究。人们利用 VLBI 测量所得到的 H₂O脉泽相对自行通常为 0.001 ~ 0.01 (″)·a⁻¹, 对应 1 kpc 距离处的速度为 5 ~ 50 km·s⁻¹。若 VLBI 在 22 GHz 上角分辨率达到约 5 × 10⁻⁴″, 则仅需要几周到几月的时间即可测量出 H₂O脉泽的相对自行^[27]。

高质量恒星形成区 H₂O脉泽的运动学性质 (大小、速度和形态) 因源而异。结合多个不同高质量恒星形成区 H₂O脉泽的 VLBI 观测以及射电连续谱辐射的联线干涉仪观测, 人们发现 H₂O脉泽示踪的气体运动学主要分为以下两种形式^[28]: (1) 在 O 型 YSO (young stellar object) 里面, HC HII 区 (hyper-compact HII region) 扩张 (可能由星风驱动), 激发并加速了在宽角度外流的 H₂O脉泽^[29, 30]; (2) 在 B 型 YSO 里面, 热辐射 (可能由激波激发) 射电喷发激发了准直两极外流中的 H₂O脉泽^[31, 32]。

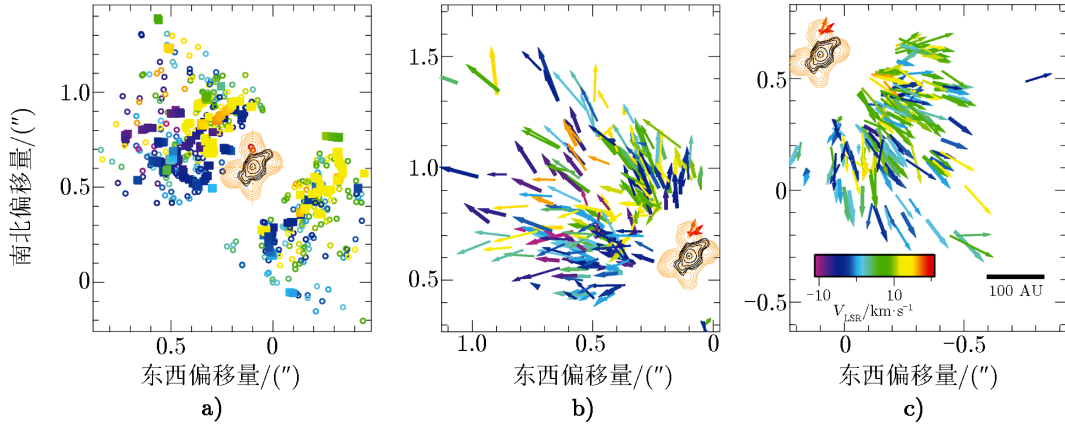
这两种主要的 H₂O脉泽外流形成的机制可以解释在以往联线干涉仪巡天观测中得到的大尺度分子外流的不同张角^[33], 也暗含外流的准直性可能与原恒星的质量或年龄有关。然而, 观测到的复杂分子脉泽外流难以用上述两种机制之一来解释。总之宽张角外流 (或球壳状扩张外流) 以及准直喷流的运动形态对应着 YSO 不同演化阶段, 在演化早期, 外流会表现为宽角度星风; 而在后期, 外流会变得更准直^[17]。因此, 研究 22 GHz H₂O脉泽的运动学有助于研究 HMYSO 的演化状态。

3 高质量恒星形成区 H₂O脉泽运动学的典型例子

3.1 Orion-KL

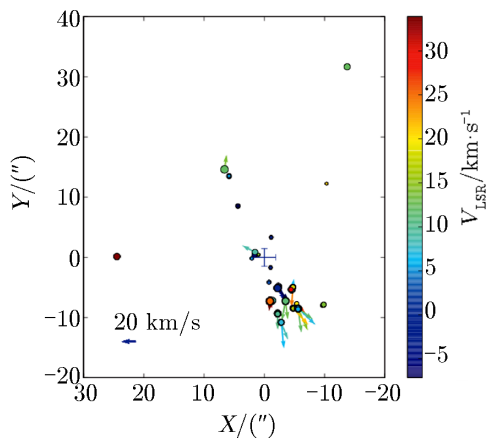
Orion-KL 是已知的距离太阳最近的高质量恒星形成区, 距离约 (414 ± 7) pc^[34, 35]。由于距离太阳很近, Orion-KL 是河内已知最亮的 H₂O脉泽源之一^[36], 对高质量恒星形成的研究

有重要价值^[37]。VLA (very large array) 观测到的 Source I 的 7 mm 连续谱辐射与约 $10M_{\odot}$ 的 YSO 电离的吸积盘符合得很好, 如图 2 所示。利用 VLBA (very long baseline array) 近 3 年每月的多历元 SiO 脉泽观测数据, 人们发现 SiO 脉泽相对盘对称分布, SiO 脉泽的自行数据显一个致密的旋转的盘以及一个宽角度的外流。



注: a) VLBA 观测到的 SiO 振动量子数为 0 (圆圈) 和 H_2O 脉泽 (正方形) 的分布, 以及 VLA 观测到的 SiO 振动量子数为 1 脉泽的视向速度、强度积分 (红色) 7 mm 连续谱 (黑色) 等值线图。b) Source I 东北部振动 SiO 0 脉泽自行图, 箭头的颜色代表不同的本地静止标准 (local standard of rest, LSR) 速度。c) Source I 西南部 SiO 振动量子数为 0 脉泽自行图, 箭头的不同颜色代表不同的 LSR 速度。

图 2 Orion-KL 中 Source I 的 SiO 脉泽运动学^[38]



注: 十字代表拟合的动力学中心。

图 3 Orion-KL 中 Source I 的 H_2O 脉泽运动学^[39]

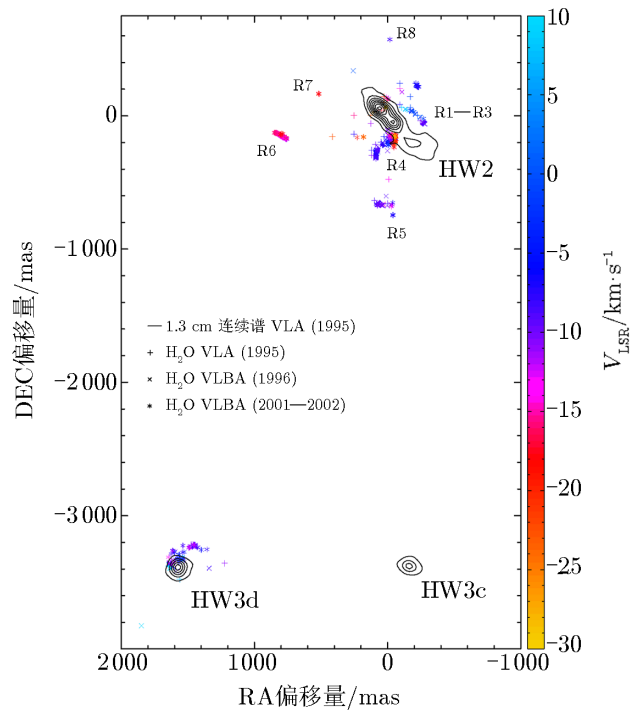
如图 3 所示, VERA (VLBI exploration for radio astrometry) 的多历元 H_2O 脉泽观测则显示 H_2O 脉泽示踪了一个比较准直的外流。这些观测为研究大质量恒星的形成提供了直接观测证据。

3.2 Cepheus A

Cepheus A 是一个活跃的大质量恒星形成区, 距离为 (700 ± 40) pc^[40], 该区域的恒星形成活动由射电源 HW2 主导。HW2 的射电连续谱辐射来自于了一颗质量为 $15M_{\odot} \sim 20M_{\odot}$ 的原恒星电离的喷流区域。HW2 是首个被证认的原恒星盘喷流系统^[41, 42], 这也表明大质量恒星形成有类似小质量恒星形成的吸积机制。

HW2 与 H_2O 脉泽成协, 图 4 给出 VLA 观测到的 HW2 射电喷流以及邻近 HW3c 和 HW3d 的 1.3 cm 连续谱图像, 还给出 VLBA 观测到的 H_2O 脉泽

的分布图。由图 4 可以看出, H_2O 脉泽集中分布在几个尺度为几到几十毫角秒的区域, 形成线性的结构, 标记为 R1—R8。



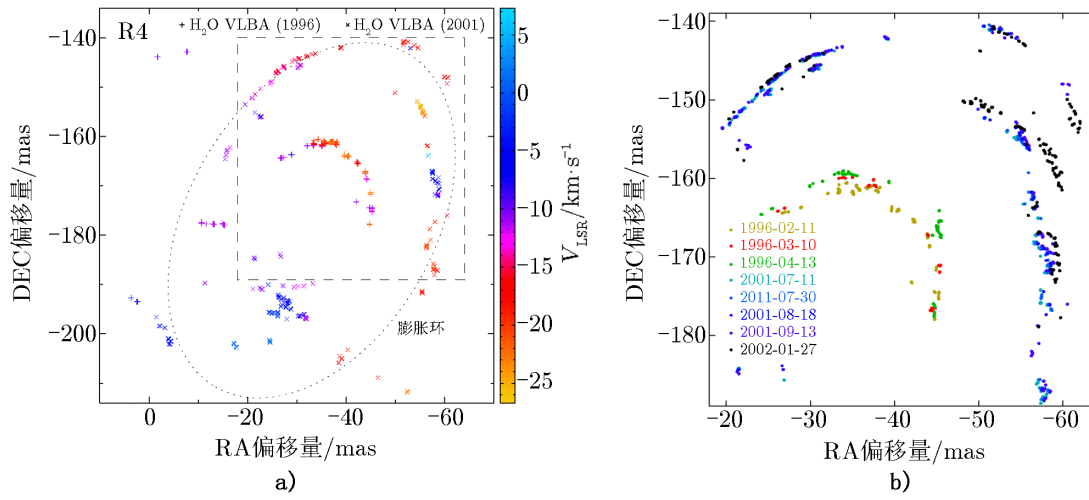
注: DEC 表示赤纬, RA 表示赤经。

图 4 Cepheus A 中 H₂O 脉泽的位置和视向速度分布, 以及 HW2, HW3c, HW3d 的 1.3 cm 射电连续谱^[43]

图 5 显示 R4 中不同历元的 H₂O 脉泽分布, 其中有约 0.07'' 的脉泽有近椭圆环的形状, 以 15~30 km·s⁻¹ 的速度膨胀, 由此可推导出极短的动力学年龄为 4~8 a。由于 H₂O 脉泽有极高的亮度, 因而膨胀很可能是由某个应位于环的中心但目前尚未探测到的 HMYSO 所驱动。高灵敏度的厘米或毫米 (亚毫米) 波的观测有望证认该 HMYSO。人们在 1996 年通过观测发现, R5 中的脉泽有近圆环的分布结构, 膨胀速度为 9 km·s⁻¹, 由在其分布中心的 HMYSO 球状星风驱动。5 年之后, 该脉泽分布结构变得不规则, 很可能是由于其与周边的星际介质相互作用所致。

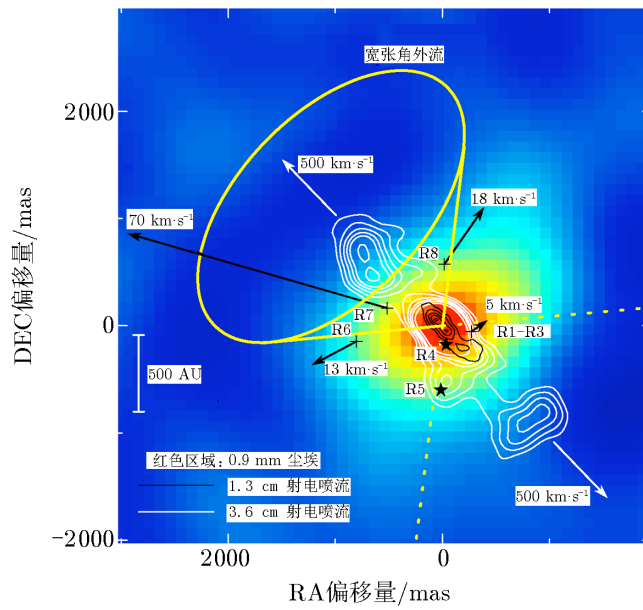
这种近球壳状的喷发难以用目前的恒星形成理论来解释, 因为理论认为 YSO 的质量流失是通过磁流体动力学机制将吸积盘的旋转能量转移到准直的外流中来实现。类似的现象也在其他大质量恒星形成区中出现, 这表明这种片段式的喷发可能发生在 HMYSO 的最早阶段, 然而这种喷发背后的机制目前仍不清楚^[20]。

尽管 R4 和 R5 被认为是与不同源成协, 然而 R1—R3 以及 R6—R8 是由 HW2 来驱动。如图 6 所示, 这些区域脉泽运动的方向和大小均不相同, 这表明准直的喷流以及宽张角的外流可以同时存在。R6 和 R8 可能由 HW2 宽张角外流造成的腔壁上的激波波前生成; R7 的运动方向位于 R6 和 R8 方向的中间, 与射电喷流的相近, 显示为准直的喷流; R1—R3 位于中央射电源的反方向, 可能源自射电喷流造成的西南方向的腔壁。



注: a) H₂O脉泽的位置和视向速度分布。不同颜色代表不同的 LSR 速度。b) 是 a) 的局部放大, 以显示由多历元 VLBA 观测到脉泽的膨胀运动。不同颜色代表不同的历元。

图 5 Cepheus A 的 R4 区域不同历元的 H₂O脉泽分布^[43]



注: 射电喷流 (张角约 18°) 显示反向速度约为 500 km·s⁻¹, 源来自尘埃/分子盘围绕的中央源。R1—R3 和 R6, R8 的脉泽源自由 HW2 的宽张角 (约 100°) 外流生成的膨胀腔壁上激波波前。R7 的脉泽在膨胀腔中被激发, 因此具有更大的扩张速度。R4 和 R5 则分别由星号所示的两个大质量 YSO 所激发^[20]。

图 6 Cepheus A 中源 HW2 的宽张角外流和喷流^[42]

这种准直喷流以及宽张角外流同时存在的现象在小质量 YSO 中已经被发现^[44]。目前主要有两种模型用以解释小质量 YSO 中的这种现象, 即“X 形”或“盘状”风模型^[45], 这种现象在大质量 YSO 中也被观测到, 进一步证明小质量与大质量的恒星形成过程相似。

3.3 W75N(B)

W75N(B) 包括 3 个处于不同演化阶段 YSO (VLA 1-3) 的大质量恒星形成区^[46, 47], 距离为 (1.30 ± 0.07) kpc^[48], 如图 7 所示。在 VLA 1 中, 射电连续谱辐射以及 H₂O 脉泽位置分布都说明存在一个比较准直的喷流; 在 VLA 2 中, 射电连续谱辐射结构致密, H₂O 脉泽的运动则显示为膨胀, 反映了球壳状的外流。由于 VLA 1 和 VLA 2 的投影距离仅约为 1 000 AU (取距离为 1.30 kpc), 它们所处的分子气体环境应该是相同的, 因而外流的准直程度不同可能是其所处的不同演化阶段所致^[17]。

3.4 G24.78+0.08 A1

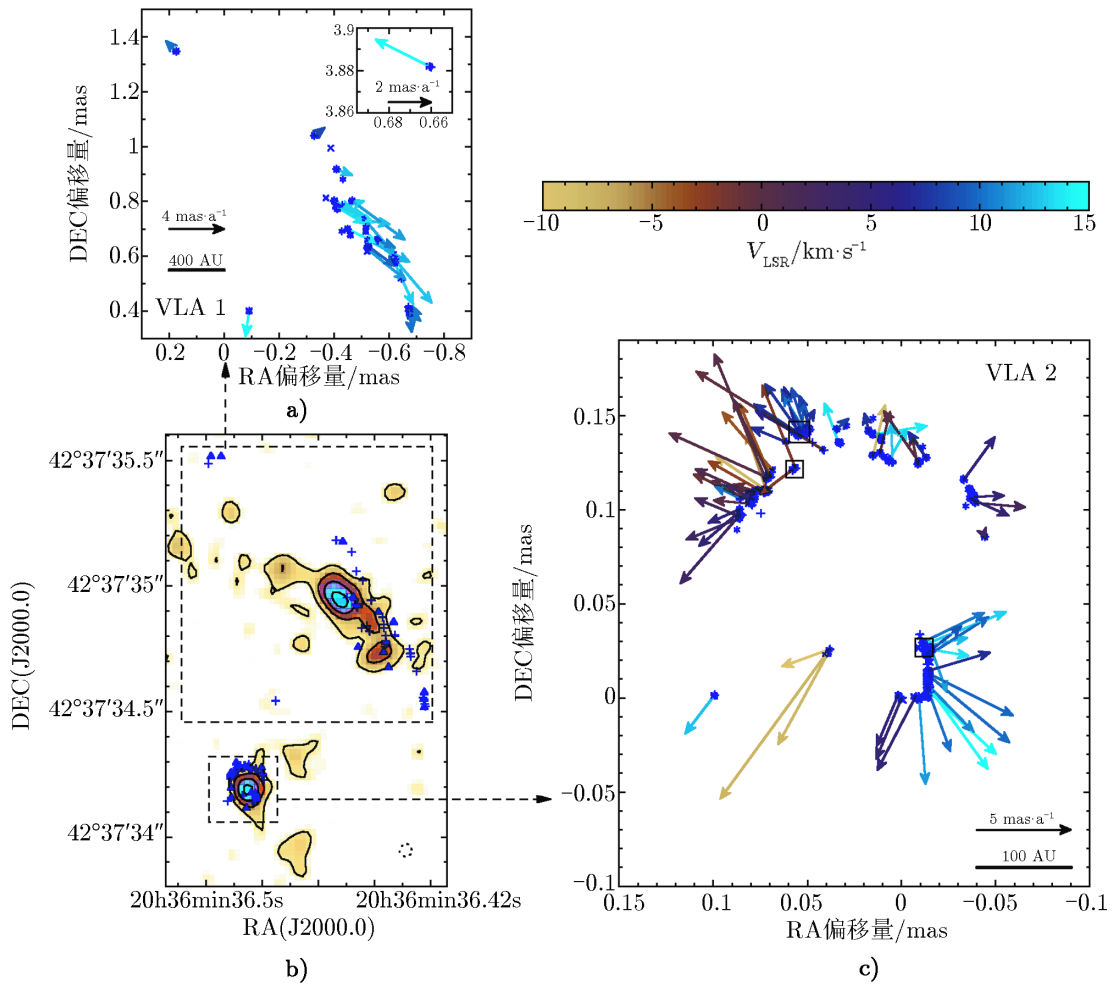
近些年, 人们在大质量恒星形成领域取得重要观测进展, 在新生的 B 型星附近探测到开普勒星周盘, 还在年轻的 O 型星附近发现有大质量的星周环。这些观测表明大质量恒星形成与小质量恒星形成有相似的星周盘吸积过程。其中 G24.78+0.08 是发现有旋转星周环的代表性大质量恒星形成区, A1 是在 G24.78+0.08 中发现的 3 个大质量旋转星周盘中的一个^[49]。如图 8 所示, 从 6 cm 到 1 mm 的连续谱射电干涉仪观测得到的光谱能量分布 (spectral energy distribution, SED) 表明, A1 的中心大质量热核 (约为 $130M_{\odot}$) 中有一颗质量为 $20M_{\odot}$ 的 HMYSO, 其周围环绕着 HC III 区。利用多历元 VLBA 观测得到的 H₂O 脉泽位于 HC III 区的边界上, 呈弧状分布, 且由中心向外做膨胀运动^[29], 如图 9 所示。

Moscadelli 等人^[50] 提出一个理论模型并合理地解释 A1 球壳状的 HII 区和脉泽的膨胀运动。由 O9.5 型的 YSO 激发的 HII 区喷出强大的星风, 该星风吹走了周围的电离气体并将其限制在很薄的壳层内, 从而产生由 H₂O 脉泽示踪的高密度分子气体。

3.5 AFGL 5142

AFGL 5142 是一个包含多个毫米波连续谱射电源的大质量恒星形成区, 距离约 (2.14 ± 0.05) kpc, 在多种尺度上均有外流^[51]。其中, 射电源 MM1 显示出热核的化学性质, 并由电离气体发射的连续谱辐射为 H₂O 和 CH₃OH 脉泽提供能量^[52]。利用 MM1 的脉泽和射电连续辐射人们证实 MM1 形成于盘-喷流系统, CH₃OH 脉泽的 VLBI 观测首次发现了中等-大质量原恒星分子包层的内落, 而 H₂O 脉泽的 VLBI 观测则显示有准直的双极外流。这种同时存在的小空间尺度的吸积和外流证据, 使得 AFGL 5142 成为高分辨率研究大质量恒星形成的一个极其引人注目的源^[32]。如图 10 所示, H₂O 脉泽反映出外流, 但是甲醇脉泽说明气体是下落的而不是外流, 因此, 尽管两者与同一 YSO 有联系, 但反映不同的运动学形态。

结合以往的 VLBI 观测, 以及最近的 VERA 对 AFGL 5142 中 H₂O 脉泽的观测现象, 人们发现 H₂O 脉泽反映的喷流具有片段性, 研究结果表明 MM1 正处于盘-喷流系统阶段, 类似于放大版的小质量恒星形成过程^[51]。



注: b) 射电源 VLA 1(北) 和 VLA 2(南) 的 1.3 cm 连续谱辐射等值线图。VLA 和 VLBA 探测到的 H₂O 脉泽位置分别用三角形和加号表示。a) 和 c) 分别为 VLA 1 和 VLA 2 中 H₂O 脉泽的自行(箭头)。

图 7 W75N(B) 中的射电源与 H₂O 脉泽^[17]

3.6 H₂O 脉泽观测总结

从上述几个大质量恒星形成区中的 H₂O 脉泽的观测现象可知, H₂O 脉泽的自行方向基本上都远离原恒星, 说明 H₂O 脉泽的驱动源一般为外向分子流。因此, 外流的性质, 例如张角、年龄、动量和能量流的大小等, 会直接影响 H₂O 脉泽的分布和动力学特征。从另一方面说, H₂O 脉泽可以直接反映外流的性质, 所以是研究恒星形成的有力工具。

利用 H₂O 脉泽研究大质量恒星也存在一些困难。如 H₂O 脉泽的亮度变化比较快, 大约在两三个月内就会有比较明显的变化, 所以想要获取比较准确的自行信息, 需要较高的空间分辨率和短时间内的多次观测。另一方面, 我们也要注意, 很多研究者给出的自行都是相对于某个比较强的脉泽斑的相对自行, 而该脉泽斑本身也可能会有自行, 所以自行结果会有系统

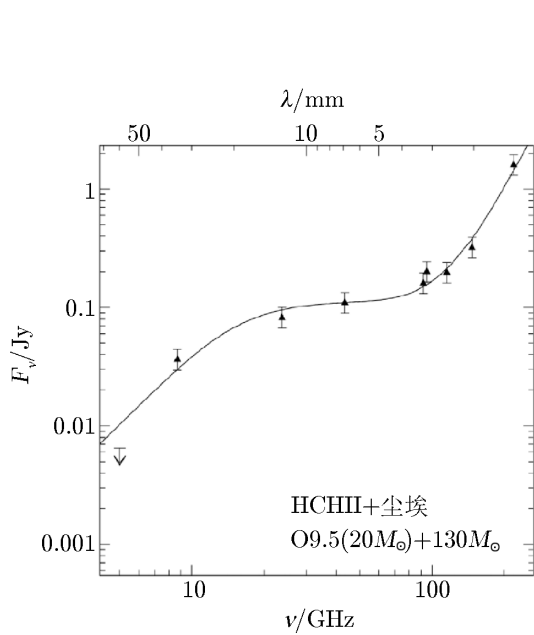
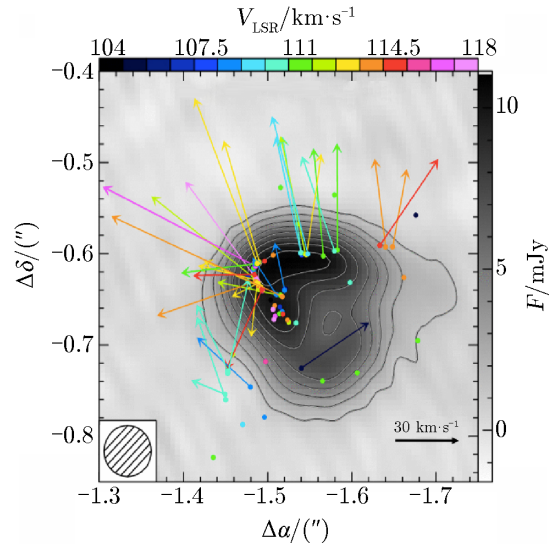
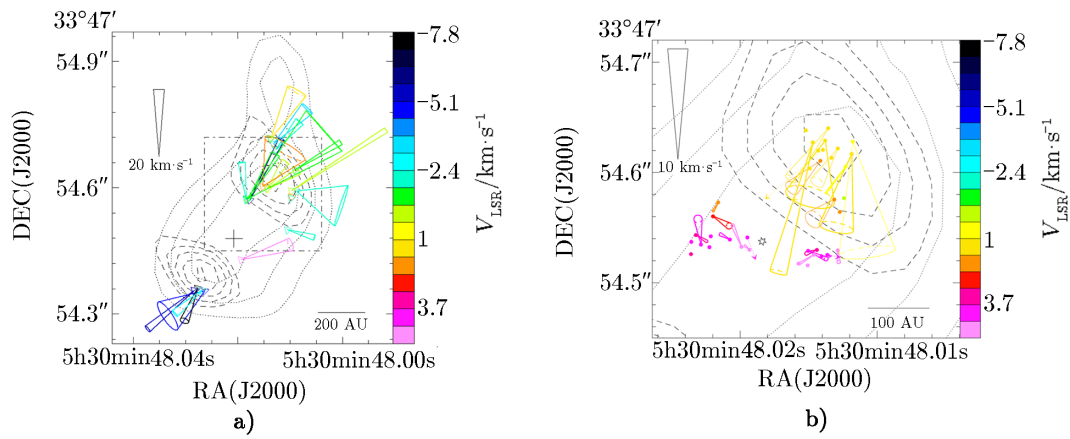


图 8 G24.78+0.08 A1 的光谱能量分布^[50]



注: 圆点表示脉泽的位置, 箭头表示内部自行^[29]; 等值线以及灰度图为 VLA 观测得到的 A1 的 7 mm 连续谱辐射^[30]。

图 9 VLBA 多历元观测到的 G24.78+0.08 A1 中 H₂O 脉泽



注: b) 的范围为 a) 中的矩形部分。圆锥表示自行的方向和不确定度, 颜色表示视向速度。虚线和短划线等值线图分别表示 VLA 观测到的 22 GHz 和 8.4 GHz 连续谱辐射亮度分布图^[32]。

图 10 a) AFGL 5142 MM-1 的 H₂O 脉泽相对于其中心 (十字) 自行; b) 甲醇脉泽相对于其中心 (星) 自行

性的偏离。有些研究者会对这个系统性偏离做矫正,但是矫正结果仍然会有误差。由于不同天区的分子环境以及外流驱动源的年龄和质量皆不尽相同,所以 H_2O 脉泽的分布和性质也有差异。我们在用 H_2O 脉泽研究大质量恒星形成时,需要考虑中心天体的性质。

总之, H_2O 脉泽的自行方向直接证明了大质量恒星形成区中外流的存在,结合其他方式的观测研究也证明了大质量恒星可以通过吸积盘-外流的形式形成。这为大质量恒星形成理论模型的建立指明了方向。

4 WISH 巡天

因为 H_2O 分子对恒星形成研究具有重要意义, Herschel 望远镜正在对一大批原恒星进行 H_2O 分子巡天 (water in star-forming regions with Herschel, WISH)。由于 H_2O 分子在原恒星附近的丰度比较大,所以除了 H_2O 脉泽,我们还可以观测 H_2O 分子的热谱线。利用 Herschel 望远镜,我们可以观测 H_2O 分子在 $55\sim 671\ \mu\text{m}$ ($0.45\sim 5.4\ \text{THz}$)^[53] 的跃迁。通过比较 H_2O 脉泽的性质与 H_2O 分子其他谱线的性质,我们可以了解 H_2O 分子在恒星形成区中扮演的角色。

本文只关注大质量恒星形成,对于小质量恒星形成区的观测,感兴趣的读者可参考文献 [54—56]。与 CO 的丰度相比, H_2O 分子的丰度对气体温度更敏感,所以可以更好地反映恒星形成的各个阶段。但是由于 H_2O 分子谱线难以观测到,长期以来人们在这个领域取得的进展不大。最近利用 Herschel 对 H_2O 分子的巡天观测,使我们得以窥见恒星形成区中 H_2O 分子的冰山一角。

从 WISH 对 19 个大质量恒星形成区的观测结果来看^[57],致密分子核通常在 1113 GHz 和 1669 GHz 两个波段辐射窄的 H_2O 分子基态谱线,以及 987 GHz 波段的激发态谱线,在 1102 GHz 波段也可见同位素分子 (H_2^8O) 的基态谱线。由于外流作用,激发的 H_2O 分子谱线比较宽,通常呈现吸收线的形式,说明这部分 H_2O 分子的激发温度高于前景包层中的 H_2O 分子温度。 H_2O 分子在 987 GHz 波段的激发态跃迁的流量跟原恒星在 $60\ \mu\text{m}$ 波段的光度成正比,说明这条谱线可以更好地反映原恒星的尘埃温度。

H_2O 分子甚至可以在一些中红外辐射比较弱的大质量原恒星中探测到^[58],说明 H_2O 分子确实是研究恒星形成的有力工具。

5 结束语

22 GHz H_2O 脉泽是年轻大质量恒星形成区气体外流的理想示踪天体。VLBI 观测大质量恒星形成区的 H_2O 脉泽揭示了一些不同的运动学特征。这些运动学特征与大质量恒星形成过程之间的关系,比如宽张角外流和准直外流出现的先后顺序,仍需要更多的 VLBI 观测来进行解释。此外,大质量恒星形成区分布着多种脉泽,不同脉泽分布在恒星形成区的不同位置,也产生和消失于大质量恒星形成的不同时期。因此,研究不同的脉泽有助于研究大质量恒星形成的不同状态和位置等信息。研究大质量恒星形成的早期阶段,需要提高观测的灵敏度和

分辨率, 以及结合多波段的谱线和连续谱的观测信息, 来获取更多的观测数据。对大质量恒星形成区域进行多方位的研究, 有助于深入理解大质量恒星形成的过程。

参考文献:

- [1] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23
- [2] Zinnecker H, Yorke H W. *ARA&A*, 2007, 45: 481
- [3] Goddi C, Moscadelli L, Alef W, et al. *A&A*, 2004, 420: 929
- [4] Tan J C, Beltrán M T, Caselli P, et al. *Protostars and Planets VI*, Tucson: University of Arizona Press 2014: 149
- [5] Kuiper R, Klahr H, Beuther H, et al. *ApJ*, 2010, 722: 1556
- [6] Chandler C J. *Future Directions in High Resolution Astronomy: The 10th Anniversary of the VLBA*. Romney J, Reid M, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005: 317
- [7] Reid M J, Moran J M. *ARA&A*, 1981, 19: 231
- [8] Ellingsen S P, Voronkov M A, Cragg D M, et al. *IAU Symposium*, 2007, 242: 213
- [9] Ellingsen S P. *IAU Symposium*, 2004, 221: 133
- [10] Breen S L, Ellingsen S P, Caswell J L, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 2219
- [11] Cheung A C, Rank D M, Townes C H, et al. *Nature*, 1969, 221: 626
- [12] Valdetarro R, Palla F, Brand J, et al. *A&A*, 2001, 368: 845
- [13] Walsh A J, Breen S L, Britton T, et al. *MNRAS*, 2011, 416: 1764
- [14] Claussen M J, Marvel K B, Wootten A, et al. *ApJ*, 1998, 507: L79
- [15] Moscadelli L, Cesaroni R, Rioja M J. *A&A*, 2000, 360: 663
- [16] Imai H, Kameya O, Sasao T, et al. *ApJ*, 2000, 538: 751
- [17] Torrelles J M, Patel N A, Anglada G, et al. *ApJ*, 2003, 598: L115
- [18] Seth A C, Greenhill L J, Holder B P. *ApJ*, 2002, 581: 325
- [19] Brand J, Cesaroni R, Comoretto G, et al. *A&A*, 2003, 407: 573
- [20] Torrelles J M, Gómez J F, Patel N A, et al. *IAU Symposium*, 2012, 287: 377
- [21] Genzel R, Reid M J, Moran J M, et al. *ApJ*, 1981, 244: 884
- [22] Genzel R, Downes D, Schneps M H, et al. *ApJ*, 1981, 247: 1039
- [23] Schneps M H, Lane A P, Downes D, et al. *ApJ*, 1981, 249: 124
- [24] Reid M J, Schneps M H, Moran J M, et al. *ApJ*, 1988, 330: 809
- [25] Gwinn C R, Moran J M, Reid M J. *ApJ*, 1992, 393: 149
- [26] Alcolea J, Menten K M, Moran J M, et al. *Astrophysical Masers*. Clegg A W, Nedoluha G E, eds. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 225
- [27] Goddi C, Moscadelli L, Torrelles J M, et al. *A&A*, 2006, 447: L9
- [28] Moscadelli L, Sánchez-Monge Á, Goddi C, et al. *A&A*, 2016, 585: A71
- [29] Moscadelli L, Goddi C, Cesaroni R, et al. *A&A*, 2007, 472: 867
- [30] Beltrán M T, Cesaroni R, Moscadelli L, et al. *A&A*, 2007, 471: L13
- [31] Moscadelli L, Cesaroni R, Rioja M J, et al. *A&A*, 2011, 526: A66
- [32] Goddi C, Moscadelli L, Sanna A. *A&A*, 2011, 535: L8
- [33] Beuther H, Shepherd D. *Cores to Clusters: Star Formation with Next Generation Telescopes*. Kumar M S N, Tafalla M, Caselli P, eds. New York: Springer-Verlag, 2005: 105
- [34] Menten K M, Reid M J, Forbrich J, et al. *A&A*, 2007, 474: 515
- [35] Kim M K, Hirota T, Honma M, et al. *PASJ*, 2008, 60: 991
- [36] Hirota T, Bushimata T, Choi Y K, et al. *PASJ*, 2007, 59: 897
- [37] Genzel R, Stutzki J. *ARA&A*, 1989, 27: 41

- [38] Greenhill L J, Goddi C, Chandler C J, et al. ApJ, 2013, 770: L32
- [39] KIM M K, Hirota T, Hideyuki K. IAU Symposium, 2012, 287: 415
- [40] Moscadelli L, Reid M J, Menten K M, et al. ApJ, 2009, 693: 406
- [41] Rodríguez L F, Garay G, Curiel S, et al. ApJ, 1994, 430: L65
- [42] Patel N A, Curiel S, Sridharan T K, et al. Nature, 2005, 437: 109
- [43] Torrelles J M, Patel N A, Curiel S, et al. MNRAS, 2011, 410: 627
- [44] Velusamy T, Langer W D, Kumar M S N, et al. ApJ, 2011, 741: 60
- [45] Machida M N, Inutsuka S I, Matsumoto T. ApJ, 2008, 676: 1088
- [46] Torrelles J M, Gómez J F, Rodríguez L F, et al. ApJ, 1997, 489: 744
- [47] Carrasco-González C, Rodríguez L F, Torrelles J M, et al. AJ, 2010, 139: 2433
- [48] Rygl K L J, Brunthaler A, Sanna A, et al. A&A, 2012, 539: A79
- [49] Beltrán M T, Cesaroni R, Neri R, et al. ApJ, 2004, 601: L187
- [50] Moscadelli L, Goddi C, Sanna A, et al. <https://pos.sissa.it/230/037/pdf>, 2014
- [51] Burns R A, Handa T, Imai H, et al. MNRAS, 2017, 467: 2367
- [52] Goddi C, Moscadelli L, Sanna A, et al. A&A, 2007, 461: 1027
- [53] van Dishoeck E F, Kristensen L E, Benz A O, et al. PASP, 2011, 123: 138
- [54] Kristensen L E, van Dishoeck E F, Bergin E A, et al. A&A, 2012, 542: A8
- [55] Karska A, Herczeg G J, van Dishoeck E F, et al. A&A, 2013, 552: A141
- [56] Mottram J C, Kristensen L E, van Dishoeck E F, et al. A&A, 2014, 572: A21
- [57] van der Tak F F S, Chavarría L, Herpin F, et al. A&A, 2013, 554: A83
- [58] Herpin F, Chavarría L, Jacq T, et al. A&A, 2016, 587: A139

Kinematics of H₂O Masers in Massive Star Forming Regions

ZHANG Lian^{1,2}, ZHANG Bo¹, YAN Qing-zeng^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Many maser species, including OH, H₂O, CH₃OH, SiO masers, are distributed in many high-mass star-forming regions (HMSFRs). The positions of masers can be obtained with VLBI (very long baseline interferometry) techniques precisely, making them powerful tools of studying HMSFRs, down to 10~100 AU scales. Among those maser species, H₂O maser is one of the most luminous, and a superb tracer of molecular outflows, showing collimated jets or wide angle outflows in different HMSFRs. We review several typical HMSFRs, including Orion-KL, Cepheus A, W75N(B), G24.78+0.08 A1 and AFGL 5142. Finally, we discuss the relation between the H₂O maser kinematics and evolution stages of high-mass stars.

Key words: star forming region; maser; H₂O maser; kinematics; VLBI; outflow; massive star