

文章编号: 1000-8349(2007)01-0036-09

# 河外水脉泽的研究进展

张江水<sup>1,2</sup>

(1. 广州大学 天体物理中心, 广州 510400; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008)

**摘要:** 人们对河外水脉泽的观测与研究已经 30 年了。目前已经在约 70 个河外星系中检测到水脉泽辐射 (已公开发表 64 个)。近年来, 河外水脉泽的观测及理论研究十分活跃。重点介绍了目前河外水脉泽的检测及研究进展, 包括水脉泽源的分类、水脉泽对研究活动星系核的重要科学价值、水脉泽源的 X 射线观测研究及其各物理量之间的统计分析结果等。

**关键词:** 天体物理学; 水脉泽; 综述; 活动星系核; 赛弗特星系; 低电离核发射线区

**中图分类号:** P155.2<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A

## 1 引 言

脉泽 (maser) 即受激发射在微波领域的放大, 通常易在非热动平衡的天文环境中产生, 是研究天体的物理环境和动力学结构极好的工具。水脉泽在天体物理研究中非常重要, 不仅因为其 22 GHz 的分子谱线 ( $J_{KaKc} = 6_{16} - 5_{23}$ ) 是整个电磁谱中最强、特征最显著的谱线之一, 而且它能示踪暖的 (动力学温度  $T_{\text{kin}} \geq 400$  K)、密的 ( $n(\text{H}_2) \geq 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) 气体环境<sup>[1]</sup>。

河外水脉泽辐射的检测是一项特别困难的工作。自从 20 世纪 70 年代末在近邻星系 M33 中检测到水脉泽辐射<sup>[7]</sup> 以来约 30 年中, 在麦哲伦云以外的 1 000 多个星系中只有大约 70 个被检测到, 目前发表了 64 个<sup>[19,1,21,6]</sup>。起初认定河外水脉泽源和银河系内的水脉泽源具有类似的起源, 因此具有强烈恒星形成活动的星系自然成为观测的目标。先是星暴星系和射电噪星系 (如 NGC 3079<sup>[8]</sup>), 然后是亮的红外星系 (如 IC 10<sup>[9]</sup>)。在最近的 10 年中, 具有活动星系核的近邻星系也成为候选观测对象。从 1993 年 10 月到 1996 年 1 月, Braatz 等人<sup>[10]</sup> 首先对 354 个近邻活动星系进行了巡测。在其中 10 个星系里检测到了水脉泽辐射, 并且发现它们全部来自于 Seyfert 2 星系和低电离核发射区 (LINER) 星系。尽管随后在 Seyfert 1 星系 NGC 5506<sup>[11]</sup>、NGC 2782<sup>[12]</sup>, Seyfert 1.5 星系 NGC 4051<sup>[13]</sup>、GC 4151<sup>[12]</sup> 以及 FR II 射电星系 3C 403<sup>[14]</sup> 中也检测到水脉泽辐射, 但确实大多数水脉泽来自于 Seyfert 2 星系和低电离核发射区星系, 并且这些活动星系大部分具有大的倾角和高的 X 射线吸收柱密度。河外水脉泽的检测率通常都很低, 一般只有百分之几<sup>[15,16]</sup>, 有的甚至为 0<sup>[17]</sup>。这一方面主要是受到观

收稿日期: 2005-12-23; 修回日期: 2006-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10573005); 国家 973 资助项目 (G19990754)

测设备灵敏度的限制; 另一方面, 高分辨率干涉观测显示水脉泽辐射本身具有方向性, 而且辐射立体角小, 检测条件相对苛刻; 此外, 由于河外水脉泽 (更准确地说, 是同活动星系核相关的水脉泽, 即核脉泽) 的激发源直接 (核辐射直接激发) 或间接 (核喷流或外向流) 来源于变化的活动星系核, 这就导致其本身是短寿命的<sup>[18]</sup>, 检测到的可能性也就更小。

近几年, 由于观测设备 (谱线接收机) 灵敏度的提高和新的宽频频谱仪的使用, 使得检测到的水脉泽源数目大为增加<sup>[12,19-21]</sup>。从 2003 年到 2004 年, Braatz 等人<sup>[12]</sup> 利用改进的美国 Green Bank 望远镜 (GBT), 对系统速度小于 12 000 km/s (红移约为 0.04) 的 145 个第二型活动星系进行了巡测, 在 11 个源中检测到水脉泽辐射<sup>[12]</sup>; 从 2002 年到 2005 年, Greenhill 等人<sup>[20]</sup> 和 Kondratko 等人<sup>[21]</sup> 利用 70 m NASA Deep Space Network 天线 (分别在澳大利亚的 Tidbinbilla 和西班牙的 Robledo), 巡测了系统速度小于 14 600 km/s (即红移小于 0.05) 的 1 150 个活动星系, 检测到 15 个水脉泽源<sup>[20,21]</sup>。通过对观测样本的严格筛选, 也可以使检测率大为提高, 减少盲目观测。例如, Henkel 等人<sup>[19]</sup> 成功选取了 2 个样本: 1) “喷流脉泽” 样本, 包括显示出射电喷流和窄线区的分子云相互作用光学证据的赛弗特 II 星系和低电离核发射区星系, 或者具有 100 pc 尺度以内的延展射电结构的正向盘星系 (盘面朝着我们视线方向), 这些星系均满足核水脉泽产生的条件 (见下章)。利用直径 100 m 的德国 Effelsberg 望远镜, 在 14 个符合条件的源中检测到 7 个, 检测率达到 50%; 2) “远红外脉泽” 样本, IRAS 点源流量密度  $S_V > 50 \text{ Jy}$  的星系。这个标准对与大质量恒星形成相关的水脉泽最敏感, 观测得到的水脉泽检测率为 22% (在 45 个符合条件的星系中检测到 10 个水脉泽)。

2005 年, Barvainis 和 Antonucci<sup>[6]</sup> 通过对一个 Type II quasars 样本 (红移范围为 0.3~0.8) 的观测, 检测到一个京脉泽 (光度超过  $10^3 L_\odot$ ) J0804+3607。它是目前检测到的最远的水脉泽源, 其红移为 0.66, 比以前检测到的源至少要远一个数量级; 同时也是最亮的, 它的各向同性光度达到约 23 000  $L_\odot$ , 比之前检测到的最亮的源 TXS2226-184<sup>[22]</sup> 要亮近 4 倍。这类远且亮的水脉泽源的存在和检测, 不仅有助于进一步地了解类星体的吸积盘、分子尘埃环以及中央发动机的基本特性, 更重要的是它能提供一个比 Ia 型超新星更好的宇宙学可观测量, 通过测量它们的距离 (红移的函数) 确定哈勃常数, 这对探究暗能量的本质与特性, 进而验证宇宙学模型具有重要意义<sup>[6]</sup>。

## 2 河外水脉泽源及分类

根据形成机制的不同可将已经发表的 64 个河外水脉泽源大致分为 4 类<sup>[1]</sup>:

1) 同恒星形成有关的, 如 M 33、IC 10、NGC 2146 等。这类脉泽主要是在近邻星系恒星形成区中被发现。其中最早被发现的河外水脉泽就是在近邻旋涡星系 M 33 的巨型 H II 区 IC 133 中被检测到的。其脉泽辐射特性和我们银河系内脉泽相似, 它对于研究大质量的恒星形成具有重要作用。另外, 通过比较同一组脉泽斑的视向速度和自行速度, 还可以准确估计星系纯几何偏差的距离<sup>[23]</sup>, 确定星系的三维速度矢量, 研究本星系群的动力学模型和确定 M 31、M 33、银河系的质量以及暗物质晕等。

2) 同核吸积盘相关的盘脉泽源, 如 NGC 4258、Mrk 1419、IC 2560、NGC 3393 等。高分辨率的 VLBI 观测显示这类脉泽辐射通常示踪侧向旋转的拱核分子盘, 与核中央距离在

pc 尺度范围内, 主要由活动星系核的辐射直接激发盘上密的分子气体而产生<sup>[18]</sup>。这类脉泽谱线具有非常明显的特征, 谱线包含了 3 组分量, 高速的红移分量和蓝移分量对称分布在系统速度分量 2 侧。由于这类脉泽位于转动的环核分子吸积盘上, 因而称为盘脉泽<sup>[24,25]</sup>。对这类脉泽的检测, 除了要求在盘上有非常高密度的气体的存在, 还要求环核盘相对于我们视线是侧向的。目前已经在大约 20 个星系中检测到这种谱线特征的水脉泽辐射<sup>[21]</sup>。现在盘脉泽已经成为一个重要的研究对象, 对于准确确定河外星系的几何距离, 证实转动的环核吸积盘和星系中心大质量黑洞的存在以及确定黑洞质量具有十分重要的意义。

3) 喷流脉泽源, 其核喷流与周边分子云相互作用或喷流中的种子光子被前景源放大, 如 NGC 1068、Mrk 348、NGC 1052 等。NGC 1068 是最早被检测到这种相互作用的星系。它的水脉泽谱线不仅包含 3 组吸积盘特征谱线分量(系统速度分量、高速的红移和蓝移分量), 而且还检测到第四组分量, 这一分量来源于射电喷流处下方  $0''.3$  区域, 被认为是射电喷流和周围稠密的分子云相互作用而产生的<sup>[26,27]</sup>。Mrk 348 和 NGC 1052 是另外 2 个“喷流脉泽”的典型例子。旋涡星系 Mrk 348 中检测到的水脉泽辐射同它的北向喷流相关<sup>[28]</sup>, 而在椭圆星系 NGC 1052 中, 水脉泽可能由其西南方向的喷流触发产生<sup>[29]</sup>。它们的谱线不像“盘脉泽”那样包含 3 组复杂的窄线分量, 而只有单一的宽线分量(约 100 km/s), 类似的脉泽源还有 TXS2226-184<sup>[22]</sup>、NGC 2824 和 F01063-8034<sup>[16]</sup> 等。这种单一宽谱线特征是否是喷流驱动产生的脉泽所固有的, 还有待进一步观测研究<sup>[18]</sup>。

4) 同核外向流有关的, 如 Circinus 等。利用 VLBI 对 Circinus 星系观测, 发现其水脉泽辐射不仅显示“盘脉泽”特征, 而且与一宽角度的外向流相关, 该外向流从估计的吸积盘中心延伸到约 1 pc 的范围<sup>[30]</sup>。而在赛弗特 II 星系 Mrk 1210 中检测到的水脉泽, 被认为可能是由在光学波段检测到的大尺度外向流产生的冲击波触发形成的<sup>[31]</sup>。

由于后 3 类水脉泽同第一类不同, 它们都同活动星系核相关, 核辐射是它们直接或间接的激发能量源, 因此, 又可把它们统称为核水脉泽。当然, 上述分类法有值得商榷的地方。比如在 NGC 1068 中水脉泽辐射既包含了来自环核盘的部分, 又有来自它的喷流部分。在 Circinus 星系, 水脉泽辐射不仅显示盘脉泽辐射的特征, 而且显示与大尺度的核外向流相关的特征<sup>[30]</sup>。

银河系内水脉泽可分为 2 类, 星际脉泽和恒星脉泽<sup>[32]</sup>。星际脉泽起源于恒星形成区的稠密的分子气体, 同超致密的 H II 区、嵌入的红外源、热分子核、H-H 天体和外向流紧密相关, 其平均各向同性光度为  $10^{-4}L_{\odot}$ 。当然也有比较极端的例子, 大家熟悉的分子云 W49 中检测到的水脉泽光度就达到约  $1L_{\odot}$ 。而恒星脉泽起源于围绕演化的巨星和超巨星的分子包层, 其平均各向同性光度为  $10^{-6}L_{\odot}$ , 最亮的可以达到  $10^{-4}L_{\odot}$ <sup>[33,18]</sup>。河外水脉泽各向同性光度从约  $10^{-4}L_{\odot}$  到  $10^3L_{\odot}$ , 甚至达到  $10^4L_{\odot}$ 。检测到各向同性光度大于  $10L_{\odot}$  的河外水脉泽都与寄主星系的活动星系核相关, 称为兆脉泽(因光度差不多达到一般河内水脉泽光度的  $10^6$  倍); 光度小于  $10L_{\odot}$  的水脉泽称为千脉泽, 主要与大质量恒星形成相关, 但也有几个同活动星系核相关的, 例如 NGC 253、NGC 4051 和 NGC 5194; 而光度超过  $10^3L_{\odot}$  的称为京脉泽, 目前只检测到 2 个京脉泽源: 第二型类星体 J0804+3607<sup>[6]</sup> 和 LINER 星系 TXS2226-184<sup>[21]</sup>。

近年来, 对河外水脉泽源高分辨率的 VLBI 观测研究, X 射线的观测研究等已成为这一领域的重要热点, 下面主要介绍这些方面最新的观测及研究进展情况。

### 3 核水脉泽与活动星系核

在目前检测到的河外水脉泽中,核水脉泽占绝大多数。由于其明亮而且近似点状结构,是甚长基线干涉测量(VLBI)非常理想的观测目标,又因为其能量激发源来自活动星系核辐射,且脉泽常位于离中心核区秒差距尺度的最内部区域<sup>[34]</sup>,因此,核水脉泽的干涉测量成为目前研究活动星系核最内部区域结构唯一有效的手段<sup>[5]</sup>。利用它可以证实可能的环核吸积盘的存在,研究吸积盘的形态;可证实中央大质量黑洞的存在及估计其质量,并由此计算出爱丁顿光度和吸积率,最终对大样本这类星系建立独立的动力学质量-速度弥散关系( $M-\sigma$ );可准确确定星系的几何距离;探索环核尘埃和气体环境等<sup>[3,5,23]</sup>。

目前检测到大约 20 个可能的“盘脉泽”(其辐射谱由系统速度分量、高速的红移和蓝移分量 3 组谱线组成),其中 8 个已经被高分辨率(亚毫角秒)的干涉仪成图观测,观测结果揭示了离中央黑洞 0.1~1 pc 的分子盘的结构及动力学特征<sup>[21]</sup>。

最经典的研究实例为盘脉泽源 NGC 4258, Henkel 等人<sup>[15]</sup>和 Claussen 等人<sup>[35]</sup>在该星系里首先检测到水脉泽辐射,发现脉泽源速度接近星系系统速度,速度范围约 200 km/s(由于当时频谱仪的带宽限制,没有能够检测到高速分量的脉泽辐射)。1984 年,VLBI 的观测结果显示这些系统速度脉泽近似沿东西向弧状分布,由西到东随着脉泽位置在弧上的变化;它们的视向速度从 455~528 km/s 均匀递增,最东边的脉泽斑速度最大,这表明可能存在一个侧向旋转盘(水脉泽位于盘上)<sup>[36]</sup>。从 1984 年到 1986 年对这些系统速度脉泽高分辨率的谱线监测发现,它们的速度每年增加约 10 km/s,这一加速度正好可以用旋转盘的向心加速度解释<sup>[8,24,25,37]</sup>。1992 年,利用宽带频谱仪检测到高速的脉泽辐射分量(红移、蓝移分量),它们与此前检测到的系统速度辐射分量的速度差为 1 000 km/s,比一般的星系水脉泽速度大得多,其高速脉泽辐射可能是脉泽源绕中央大质量黑洞旋转的结果,进一步提供了环核转动吸积盘存在的证据<sup>[38]</sup>。1993 年,高分辨率的 VLBA(甚长基线射电望远镜阵)对这些高速脉泽的观测显示,高速分量和系统速度分量脉泽辐射来自不同的位置,红移和蓝移分量脉泽分列在系统速度脉泽 2 侧,近似分布于同一平面;高速脉泽速度与  $r^{-1/2}$  成正比( $r$  为脉泽到旋转中心的距离),准确地符合开普勒旋转速度曲线,从而证实了 NGC 4258 存在环核吸积盘<sup>[39]</sup>。

由于这些脉泽位置非常接近星系中心(小于 1 pc),并且高速度旋转,由此估计出在半径小于 0.13 pc 范围内的中央物体的质量达到约  $3.6 \times 10^7 M_{\odot}$ 。体密度至少大于以前观测到的其他黑洞候选体 40 倍,强有力地证实了在星系 NGC 4258 中心存在大质量黑洞<sup>[39,40]</sup>(见图 1)。

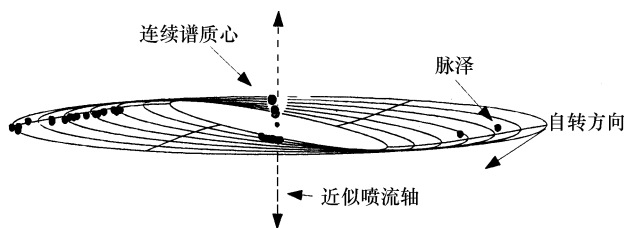


图 1 星系 NGC 4258 水脉泽在翘曲盘上分布示意图<sup>[41]</sup>

### 4 X 射线观测研究

由于核水脉泽源绝大多数为第二型的活动星系核,核区在光学和红外波段是严重模糊的,

而 X 射线由于它的穿透性, 正好提供了一个研究这些模糊的活动星系核环核环境非常有效的工具。既然核水脉泽的抽运能量来自于活动星系核, 环核秒差距尺度内高密度的气体环境是这些亮的水脉泽形成的场所, 水脉泽的辐射光度就可能和环核气体的密度以及核的 X 射线辐射强度相关<sup>[42]</sup>。文献 [43] 对当时检测到的 16 个兆水脉泽源进行了统计分析, 根据已有的 9 个源的 X 射线 (2~10 keV) 的观测结果, 发现兆水脉泽更可能存在于具有非常高 X 射线吸收柱密度的赛弗特 II 星系中。近年来随着 X 射线天文学的迅速发展, XMM-Newton 和 Chandra 卫星相继发射和使用, 已经观测了许多活动星系核, 通过分析拟合它们的 X 射线谱, 可以得到 X 射线吸收柱密度。这有助于更好地了解水脉泽的产生环境及物理机制, 同时为统计研究河外水脉泽辐射强度和环核气体的柱密度关系提供了条件, 反过来又可以为以后的河外水脉泽观测提供有益的指导。

#### 4.1 X 射线吸收柱密度

Zhang 等人<sup>[1]</sup> 调查分析了目前已发表的麦哲伦云以外的 64 个河外水脉泽源 (包括 51 个兆脉泽和 13 个千脉泽) 的 X 射线观测及研究情况, 其工作主要基于 X 射线卫星 ASCA、BeppoSAX、XMM-Newton 和 Chandra 的观测资料。从 Chandra 和 XMM-Newton 卫星观测资料, 得到其中 38 个源的吸收柱密度, 具体情况详见文献 [1] 中的表 5。

由这 38 个源的统计结果显示, 除 NGC 2273 和 NGC 5194 外, 12 个千脉泽源都是康普顿薄的 (即吸收柱密度  $N_{\text{H}} < 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ), 其吸收柱密度 (对数尺度) 的平均值为  $(22.62 \pm 0.37) \text{ cm}^{-2}$ 。而水兆脉泽显然位于更模糊的环境, 即更高气体柱密度的环核区域, 吸收柱密度的峰值 (对数尺度) 位于 24~25, 吸收柱密度的平均值为  $(23.77 \pm 0.14) \text{ cm}^{-2}$ , 水兆脉泽中 85% 的源是严重模糊的 ( $N_{\text{H}} > 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ), 一半是康普顿厚的 ( $N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ), 这一结果与赛弗特 II 星系吸收柱密度的统计结果基本一致<sup>[44,45]</sup>。对 11 个盘脉泽源的吸收柱密度的统计发现, 其中 8 个是康普顿厚的<sup>[46]</sup>, 即它们的吸收柱密度大于  $10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 。显然, 水兆脉泽更倾向于环核高密度的气体环境, 而千脉泽主要与大质量恒星形成相关, 处于密度相对较小的气体环境。

#### 4.2 水脉泽光度和吸收柱密度

目前大家普遍接受水脉泽是碰撞抽运激发产生的<sup>[47,48]</sup>。理论上, 部分饱和的脉泽辐射度随着气体柱密度按指数级增长<sup>[49]</sup>; 饱和脉泽辐射强度正比于柱密度的三次方, 即  $L_{\text{H}_2\text{O}} \propto N^3(\text{H})$ <sup>[50]</sup>。尽管详细的脉泽产生机制目前还不清楚, 但由于核水脉泽同活动星系核相关, 它们的主要能量激发源应当来自于核辐射, 来自核的 X 射线辐射应该和它所激发产生的水脉泽光度相关联。可以相信 X 射线吸收柱密度和水脉泽光度之间存在一定的相关性<sup>[51]</sup>。然而, 文献 [1] 中得到的 38 个水脉泽源的统计结果显示, 26 个水兆脉泽源并没有显示出脉泽光度和柱密度有任何的相关性; 尽管 38 个脉泽源 (包括 12 个千脉泽) 的柱密度有随着脉泽光度增加而上升的趋势, 但相关性弱、弥散度大。缺少这种相关性的原因还很不清楚。可能的主要原因是脉泽和核 X 射线源之间的位置偏差。一方面, 由于 X 射线卫星分辨率的限制 (约  $1''$ ), 接收到的 X 射线辐射不仅来自于核区, 可能还会受到非核区的辐射 (如恒星形成区或延展弥散气体的辐射) 污染, 从而影响吸收气体柱密度的确定 (由拟合 X 射线谱得到); 另一方面, 水脉泽的位置也很复杂而不准确。大部分同恒星形成相关的千脉泽位置明显远离寄主星系的中心 (核区), 期待来自核区的 X 射线辐射和这类脉泽相关是不现实的; 核脉泽的位置和核 X 射

线源的位置也不是完全成协的, 即使是比较理想的盘脉泽, 也只有系统速度脉泽因脉泽正好位于“核发动机”的前方而与核 X 射线源位置成协; 而“红移”和“蓝移”脉泽位置是偏离核区的, 有时位置偏差甚至达到几 pc<sup>[27]</sup>。此外, 即使脉泽和核 X 射线源之间没有位置偏差, 水脉泽辐射还可能受到除气体柱密度外的其他因素的影响。1995 年, Neufeld 和 Maloney<sup>[52]</sup> 讨论了核 X 射线辐射激发核周围气体产生水脉泽的情况, 得到脉泽光度同 X 射线光度和中央黑洞质量相关,  $L_{\text{H}_2\text{O}} \propto L_{41}^{0.766} M_8^{1.234}$  (这里,  $L_{41}$  表示 2~10 keV 吸收改正的 X 射线光度,  $M_8 = 10^8 M_\odot$  表示中央黑洞质量)。因此, 在相同的核周围气体环境下, 不同的核 X 射线光度和中央黑洞质量将可能产生不同强度的水脉泽。这也可能是影响水脉泽辐射光度和气体吸收柱密度的相关性的原因。

## 5 其他

### 5.1 时变研究

河外水脉泽普遍具有时变特征, 具体表现在谱线强度、线宽、线心速度和谱线轮廓等方面。对河外水脉泽的时变的观测与研究, 有助于我们了解它们所产生的物理环境, 探索其产生的物理机制等有关情况。

早期对星系 NGC 4945、NGC 1068 和 NGC 4258 的水脉泽观测发现, 某些单个谱特征存在时变现象<sup>[34]</sup>。Haschick 和 Bann<sup>[8]</sup>, Haschick 等人<sup>[24]</sup> 以及 Bann 和 Haschick<sup>[53]</sup> 从 1984 年到 1993 年, 对 NGC 1068、NGC 3079、NGC 4258、IC 10 和 IC 133 这 5 个水兆脉泽源进行了监测, 平均时间间隔为 1 个月。结果发现这 5 个源的脉泽谱线强度、线宽和线心速度都显示出明显的变化。星系 NGC 4258 的单个谱线特征的强度连续变化, 系统速度特征谱线的线心速度存在长期漂移, 平均漂移速率为每年 7.5 km/s。源 NGC 1068 和 NGC 3079 脉泽谱线也显示出类似的速度漂移。从 1993 年到 2002 年, Braatz 等人<sup>[10,54]</sup> 对 NGC 2639 等另外的 13 个水兆脉泽星系进行了监测。只在星系 NGC 2639 中发现了类似星系 NGC 4258 的系统特征谱线速度的长期漂移, 漂移速率约为每年 6.6 km/s。而其他星系脉泽谱线的线心速度基本保持不变。在线宽和线形方面, 星系 NGC 1052 的宽脉泽谱线 (约 100 km/s) 存在明显的变化, 谱线轮廓也清晰地显示出不断变化的不稳定的变化。谱线强度方面, 变化的时标和大小因源而异。例如, 源 NGC 1386 的脉泽谱线强度在 8 年的监测中基本保持不变, 而源的 Circinus 谱线强度变化频繁, 几乎每次观测显示不同的结果。另外, 在某些源 (如 NGC 5506 和 IC 2560) 中观测到强的、短寿命的耀闪现象, 强度比通常增加几倍, 时标一般为几个月。水脉泽强度的变化, 除了可能的星际消光影响外, 主要原因可能是抽运能源的变化或者脉泽增益的变化。由于水兆脉泽具有非常大的光度, 活动星系核被公认为其能量激发源, 而某些活动星系核的 X 射线源显示出明显的变化, 这种抽运能源的变化可能造成水脉泽辐射的变化。

### 5.2 水脉泽光度和红外光度

Jaffe 等人<sup>[55]</sup> 对检测到的银河系内 25 个位于远红外源附近的水脉泽源进行了讨论分析。发现光度量级为  $10^{-4} L_\odot$  的水脉泽处于远红外光度量级为  $10^5 L_\odot$  的恒星附近; 而光度量级为  $10^{-5} L_\odot$  的水脉泽, 出现在光度 (远红外) 量级为  $10^4 L_\odot$  的恒星周围, 即水脉泽光度和远红外光度存在近似的相关性:  $L_{\text{H}_2\text{O}} \approx 10^{-9} L_{\text{FIR}}$ 。Henkel 等人<sup>[56]</sup> 发现不仅河内水脉泽, 而且河外

水脉泽源同样满足这一近似关系。但是, 当时检测到的河外水脉泽源只有几个, 统计结果缺乏足够的可信度。最近, Henkel 等人<sup>[19]</sup>对 53 个水脉泽源进行研究并重新讨论了这一关系。在远红外样本中检测到的水脉泽源以及同活动星系核相关的水脉泽源, 也大致符合这一关系, 但弥散较大。如果这种相关性确实存在, 接收机灵敏度的提高将会检测到更多的水脉泽源。如果灵敏度提高一个量级, 选择远红外样本时, 远红外流量  $S_{100\mu\text{m}}$  下限可由原来的 50~100 Jy 降到约 10 Jy, 估计能检测的候选源将扩大约 25 倍, 从而能检测到更多的河外水脉泽源。

## 6 结语及展望

由于受到观测设备的限制, 河外水脉泽本身又具有寿命短、发射角小等特性, 对它的检测是比较困难的。随着观测设备的不断发展(包括望远镜以及接收机灵敏度的提高, 频带更宽的频谱仪的使用等)将会大大增加对河外水脉泽源检测的成功率。例如, 将会出现的 SKA(the Square Kilometer Array), 由于其接收面积大(有效接收面积约  $10^6 \text{ m}^2$ ), 它的灵敏度将比当前的望远镜提高至少 2 个量级, 即使按目前的检测率(一般仅为百分之几)进行估算, 预计可能检测到的水脉泽源数目也将能达到  $10^5 \sim 10^6$  个<sup>[5]</sup>。

对同恒星形成相关的脉泽的研究, 有助于进一步了解近邻星系的恒星形成环境; 准确估计星系的几何距离; 研究本星系群的动力学模型以及 M31, M33 和银河系的质量和暗物质晕分布等<sup>[2,57]</sup>。而对更多的核水脉泽, 特别是对盘脉泽的高分辨率的 VLBI 观测及研究, 一方面可以进一步了解核水脉泽的形成机制; 另一方面对探索活动星系核的基本特性(包括环核环境、吸积盘的存在及形态、中央大质量黑洞的存在及质量估计、寄主星系几何距离的确定等)也具有重要的研究价值<sup>[5]</sup>。进一步对高红移水脉泽谱线的检测及研究, 还可以确定最遥远的活动星系核、光学暗的恒星形成星系的距离和光度, 给出它们的距离和红移的关系, 准确确定哈勃常数, 从而进一步地探索暗能量的存在和性质、验证宇宙学模型等<sup>[6,18]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Zhang J S, Henkel C, Kadler M, et al. *A&A*, 2006, 450: 933.
- [2] Brunthaler A, Reid M, Falcke H, et al. *Science*, 2005, 307: 1440.
- [3] Henkel C, Braatz J A, Tarchi A, et al. *Ap&SS*, 2004, 295: 107.
- [4] Tarchi A, Henkel C, Peck A B, et al. *A&A*, 2002, 89: L39.
- [5] Morganti R, Greenhill L J, Peck A B, et al. *New Astron. Rev.*, 2004, 48: 195.
- [6] Barvainis R, Antonucci R. *ApJ*, 2005, 628: 189.
- [7] Churchwell E, Witzel A, Huchtmeier W, et al. *A&A*, 1977, 54: 969.
- [8] Haschick A D, Baan W A. *ApJ*, 1990, 355: L23.
- [9] Henkel C, Wouterloot J G A, Bally J. *A&A*, 1986, 155: 193.
- [10] Braatz J A, Wilson A S, Henkel C. *ApJS*, 1996, 106: 51.
- [11] Narga N M, Oliver E, Marconi A, et al. *A&A*, 2002, 391: L21.
- [12] Braatz J A, Henkel C, Greenhill L J, et al. *ApJ*, 2004, 617: L29.
- [13] Hagiwara Y, Diamond P J, Miyoshi M. *A&A*, 2003, 400: 457.
- [14] Tarchi A, Henkel C, Chiaberge M, et al. *A&A*, 2003, 407: L33.
- [15] Henkel C, Guesten R, Downes D, et al. *A&A*, 1984, 141: L1.

- 
- [16] Greenhill L J, Ellingsen S P, Norris R P, et al. *ApJ*, 2002, 565: 836.
  - [17] Henkel C, Wang Y P, Falcke H, et al. *A&A*, 1998, 335: 463.
  - [18] Lo K Y. *ARA&A*, 2005, 43: 625.
  - [19] Henkel C, Peck A B, Tarchi A, et al. *A&A*, 2005, 436: 75.
  - [20] Greenhill L J, Kondratko P T, Lovell J E L, et al. *ApJ*, 2003, 582: L11.
  - [21] Kondratko P T, Greenhill L J, Moran J M, et al. *ApJ*, 2006, 638, 100.
  - [22] Koekemoer A M, Henkel C, Greenhill L J, et al. *Nature*, 1995, 378: 697.
  - [23] Argon A L, Greenhill L J, Moran J M, et al. *ApJ*, 2004, 615: 702.
  - [24] Haschick A D, Baan W A, Peng E W. *ApJ*, 1994, 437: L35.
  - [25] Greenhill L J, Henkel C, Becker R, et al. *A&A*, 1995, 304: 21.
  - [26] Gallimore J F, Baum S A, O'Dea C P, et al. *ApJ*, 1996, 462: 740.
  - [27] Gallimore J F, Henkel C, Baum S A, et al. *ApJ*, 2001, 556: 694.
  - [28] Peck A B, Henkel C, Ulvestad J S, et al. *ApJ*, 2003, 590: 149.
  - [29] Claussen M J, Diamond P J, Braatz J A, et al. *ApJ*, 1998, 500: L129.
  - [30] Greenhill L J, Booth RS, Ellingsen S P, et al. *ApJ*, 2003, 590: 162.
  - [31] Schulz H, Henkle C. *A&A*, 2003, 400: 41.
  - [32] Reid M J. *IAU Symp*, 2002, 206: 506.
  - [33] Palagi F, Cesaroni R, Comoretto G, et al. *A&AS*, 1993, 101: 153.
  - [34] Claussen M J, Lo K Y. *ApJ*, 1986, 308: 592.
  - [35] Claussen M J, Heiligman G M, Lo K Y. *Nature*, 1984, 310 : 298.
  - [36] Greenhill L J, Jiang D R, Moran J M, et al. *ApJ*, 1995, 440 : 619.
  - [37] Nakai N, Sato N, Yamauchi A. *PASJ*, 2002, 54: L27.
  - [38] Nakai N, Inoue M, Miyoshi M. *Nature*, 1993, 361: 45.
  - [39] Miyoshi M, Moran J, Herrnstein J, et al. *Nature*, 1995, 373: 127.
  - [40] Herrnstein J, Moran J M, Greenhill L J. *Nature*, 1999, 400: 539.
  - [41] Bragg A E, Greenhill L J, Moran J M, et al. *ApJ*, 2000, 535: 73.
  - [42] Maloney P R. *PASA*, 2002, 19: 401.
  - [43] Braatz J A, Wilson A S, Henkel C. *ApJS*, 1997, 110: 321.
  - [44] Bassani L, Dadina M, Maiolino R, et al. *ApJS*, 1999, 121: 473.
  - [45] Risaliti G, Maiolino R, Salvati M. *ApJ*, 1999, 522: 157.
  - [46] Madejski G, Done C, Zycki P T, et al. *ApJ*, 2006, 636: 75.
  - [47] Elitzur M. *IAU JD*, 1997, 21: 7.
  - [48] Kartje J F, Königl A, Elitzur M. *ApJ*, 1999, 513: 180.
  - [49] Goldreich P, Keeley D A. *ApJ*, 1972, 174: 517.
  - [50] Kylafis N D, Norman C. *ApJ*, 1991, 373: 525.
  - [51] Neufeld D A, Maloney P R, Conger S. *ApJ*, 1994, 436: L127.
  - [52] Neufeld D A, Maloney P R. *ApJ*, 1995, 447: L17.
  - [53] Bann W A, Haschick A. *ApJ*, 1996, 473: 269.
  - [54] Braatz J A, Wilson A S, Henkel C, et al. *ApJS*, 2003, 146: 249.
  - [55] Jaffe D T, Güsten R, Downes D. *ApJ*, 1981, 250: 621.
  - [56] Henkel C, Wouterloot J G A, Bally J. *A&A*, 1986, 155: 193.
  - [57] Greenhill L J. *New Astron. Rev.*, 2004, 48: 1079.



## Progress in the Study on Extragalactic H<sub>2</sub>O Masers

ZHANG Jiang-shui<sup>1,2</sup>

(1. Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510400, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract :** Extragalactic H<sub>2</sub>O masers have been observed for nearly 30 years and to date there are about 70 sources detected, including 64 being reported (as of May 2006). The masers are associated with either star formation or active galactic nuclei (AGNs). It can be classified as related to star formation, nuclear accretion disks (disk-masers), interactions of nuclear jet with ambient molecular clouds or amplification of the jet's seed photons by suitably located foreground clouds (jet-masers) and nuclear outflows.

The statistical analysis of extragalactic H<sub>2</sub>O masers shows that almost all the detected H<sub>2</sub>O megamasers ( $L_{\text{H}_2\text{O}} > 10L_{\odot}$ ) are Seyfert 2 or LINERs. Most of them arise from heavily obscured ( $N_{\text{H}} > 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ) AGN, even half from Compton-thick circumstance ( $N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ). And kilomasers ( $L_{\text{H}_2\text{O}} < 10L_{\odot}$ ), mainly associated with star formation, are always Compton-thin, i.e. their absorbing column densities are  $N_{\text{H}} < 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ . The positional deviation between maser spots and nuclear X-ray source as well as a high degree of clumpiness in the circumnuclear interstellar medium may be responsible for the weakness of the correlation between isotropic maser luminosity and X-ray absorbing column density.

The masers associated with star formation have been used to pinpoint sites of massive star-forming regions and to estimate the geometric distance of host galaxies by comparing radial velocity and proper motion in groups of maser spots, and to determine the dynamical model of Local Group. VLBI observation of AGN-related masers has become a very powerful tool to investigate the most inner region of AGN. In addition, the H<sub>2</sub>O masers are detectable at high redshift, potentially providing a new cosmological observable for testing the reality and properties of dark energy and eventually the cosmology model.

**Key words:** astrophysics; water maser; review; AGN; Seyfert 2 galaxies; LINERs galaxies