

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.04.06

X 射线暂现源 Aql X-1 的 2 个历元 VLBI 探测

丁 浩^{1,2}, 赵 薇^{1,3}, 张仲莉¹

(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; 3. 中国科学院 射电天文
重点实验室, 南京 210009)

摘要: 天鹰座 X-1 (Aquila X-1, Aql X-1) 是一个低质量中子星 X 射线双星, 在 X 射线和射电波段表现为暂现源。对该源的甚长基线干涉 (very long baseline interferometry, VLBI) 观测不仅为中子星 X 射线双星的射电-X 射线 (或喷流-吸积盘) 相关性研究提供了观测依据, 而且 VLBI 亚毫角秒级的定位精度还有助于实现对该源的天体测量 (包括位置、视差和自行)。由于 Aql X-1 常伴随着光球层膨胀 (photospheric radius expansion, PRE) 特征的 I 型 X 射线暴 (X-ray burst), 因此, 独立于物理模型的视差测量可以用来估算这类 X 射线暴的本征光度, 并有助于对该类 X 射线暴的理论研究。Aql X-1 已在 2009 年 11 月和 2013 年 6 月的 2 个历元的 VLBI 观测中被探测到, 这使得它在其他历元的 VLBI 观测中的搜寻范围显著变小, 并大大降低了其他历元的 VLBI 观测的探测阈值。处理并分析了观测时间为 2010 年 1 月和 2010 年 7 月的两组 VLBA (Very Long Baseline Array) 的历史数据, 并证认了 Aql X-1 的 2 个新的亚毫秒级精度的 VLBI 探测, 其置信度分别达到 99.998 6% 和 99.998 4%。此外, 2010 年 7 月 Aql X-1 出现在其 2010 年 1 月位置的西南面, 这与之前发布的 Aql X-1 的自行方向大体一致, 意味着 Aql X-1 在 2 个历元间的位移主要来源于自行。最后发现, 这 2 个 VLBI 观测的历元正对于 X 射线的软硬态转换窗口, 这符合之前对该源的射电-X 射线的相关性研究结果。

关 键 词: Aql X-1; X 射线; 中子星; 双星

中图分类号: P172.2 **文献标识码:** A

1 引 言

Aql X-1 是由中子星和一个 K7 或 M0 型伴星^[1]组成的低质量 X 射线双星 (low-mass X-ray binary, LMXB)^[2,3], 同时也是 X 射线和射电波段的暂现源^[4]。Aql X-1 的轨道周期约为 19 h^[5], 中子星的自转周期仅 1.8 ms^[6]。Aql X-1 属于中子星 X 射线双星中较暗的环 (atoll)

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-17

通讯作者: 丁浩, haoding@swin.edu.au

类源^[7,8]。X 射线双星的射电流量通常来源于其喷流,按照其对应的 X 射线状态可分为稳态的射电流量和态转换时产生的射电流量。作为一个典型的环类源, Aql X-1 稳态的射电流量通常很微弱,只有在其爆发 (outburst) 过程中的 X 射线软硬态转换时才能被观测到 (但仍小于 1 mJy)。Aql X-1 爆发较频繁,它在中子星 X 射线双星的射电-X 射线 (或喷流-吸积盘) 相关性研究中扮演重要的角色^[9]。

包括 Aql X-1 在内的很多中子星 X 射线双星在 X 射线爆发过程中时常伴随着有显著光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴 (PRE burst)^[10]。从伴星吸积到中子星表面的物质会堆积起来。当中子星表面达到一定温度,这些堆积物质的底部会足够炙热,以致引发快速的热核爆发。这就是 I 型 X 射线暴 (type I X-ray burst), 它在中子星低质量 X 射线双星中较常出现。有时,热核爆发可能异常强烈,以致光压可达到爱丁顿极限,并抵消对堆积物质的重力,导致光球层膨胀。这就是有显著光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴的产生机制。由于在光球层膨胀和其后的收缩过程中,光球层表面光压始终维持在爱丁顿极限附近,所以我们可以把爱丁顿光度作为近似的标准烛光来测量 X 射线双星的距离。利用 Aql X-1 的有显著光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴, Galloway 等人^[10]测得其距离约为 5 kpc。

在至今所有射电观测中, Aql X-1 都呈点源,故在其射电可见的时间窗口内,通过 VLBI 观测,可以对其精确定位到亚毫角秒水平。亚毫角秒水平的精确定位是进行天体精确测量 (包括视差、自行和初始位置) 的必要条件。Aql X-1 的 VLBI 天体测量将能提供与物理模型无关的 X 射线暴的本征光度,从而有利于对有显著光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴理论的直接检验。不过,由于射电流量小,且时间窗口短,至今, Aql X-1 只在 2 个历元 (2009 年 11 月和 2013 年 6 月) 被 VLBI 观测明确探测到^[11,12]。新的 VLBI 探测将为该源的后续天体测量以及有显著光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴的研究提供重要的观测依据。

本文详尽地说明了存在先验位置信息条件下,弱射电源的认证方法。通过分析历史数据,我们发现,在另外 2 个历元的 VLBI 观测中, Aql X-1 可以被探测到。我们发布了这 2 个历元的 VLBI 图像及其位置 (定位精度达到亚毫角秒级),研究了其射电-X 射线相关性,并利用射电结构的致密性对其喷流尺度进行了限制。

2 数据处理与结果

2.1 数据处理

我们处理的 VLBI 数据来源于 VLBA 的历史数据库^[13]。两组 VLBI 数据的观测编号分别为 BM308* (包括 BM308Z, BM308AA, BM308AB 和 BM308AC) 和 BM335* (包括 BM335A 和 BM335B)。两组数据的观测频率均为 8.4 GHz。BM308Z/AA/AB/AC 的观测时间分别为 2010 年 1 月 13 日、14 日、16 日和 21 日, BM335A/B 的观测时间分别为 2010 年 7 月 23 日和 24 日。其他观测设置参见 Miller-Jones 等人^[14]的工作。

VLBI 的可见度数据主要在 AIPS (Astronomical Image Processing System)^[15] 中进行处理。首先,我们校准了地球自转参数,以消除电离层引发的散射延迟,并改正相关机带来的

采样阈值误差。接着, 我们用明亮类星体 J2253+1608 来进行仪器延迟和带通校准。我们利用各天线的系统温度监控和增益曲线, 校准了可见度数据的流量, 并作了星位角改正。然后我们用相位参考源 J1907+0127 校准各时段可见度数据的相位信息, 并生成 J1907+0127 的单源数据。对每个可见度数据都生成一个 J1907+0127 的单源数据后, 我们把这些单源数据合并成一个 J1907+0127 的单源数据, 以提升 J1907+0127 数据的信噪比。最后, 我们把这个单源数据导入可视化数据处理软件 DIFMAP^[16] 中进行成图。为了提高信噪比, 并把弥散的结构呈现出来, 在对 J1907+0127 成图时我们采用的是自然权。在对 J1907+0127 数据进行成图过程中, 我们对脏图中可信的流量成分进行综合波束的去卷积, 并卷积主波束的操作, 以还原其图像结构; 随后, 我们通过迭代的相位自校准和幅度自校准, 得到 J1907+0127 的高动态范围 (峰值流量密度与噪声的比值大于 1 200) 洁图 (见图 1)。

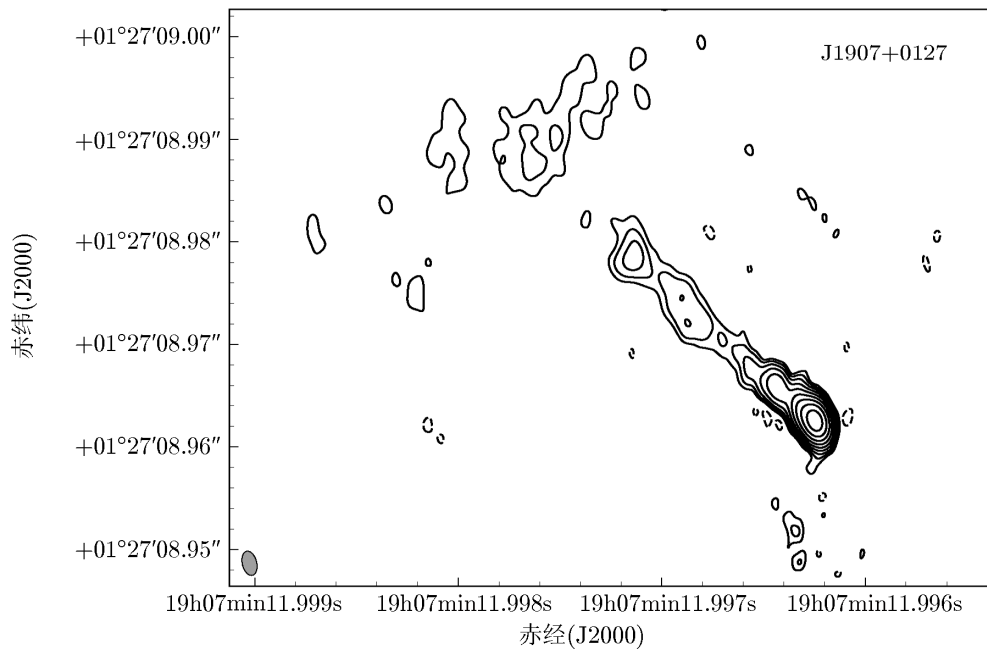
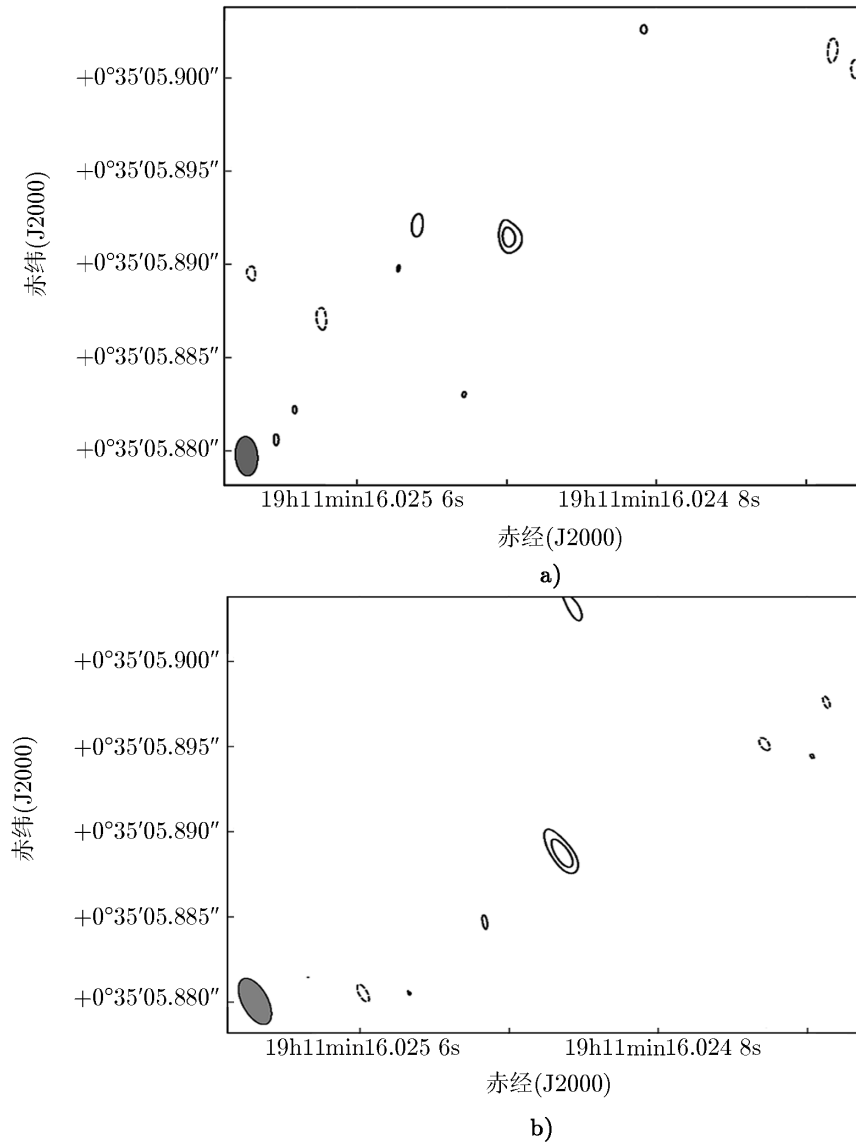


图 1 以自然权成图的 J1907+0127 的高动态范围洁图

图中等高线代表每综合波束 $0.39 \times (-1, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256)$ mJy 的流量密度。左下角的椭圆是 VLBI 的综合波束的主瓣, 其长、短轴的长度分别为 2.39 mas 和 1.07 mas, 其方向角是 8.6° 。图像灵敏度, 即噪声的均方根 (root mean square, RMS) 为每综合波束 0.13 mJy。当完成了对 J1907+0127 的成图后, 我们把这个统一的 J1907+0127 的洁图作为条纹拟合的模型, 并重新以 J1907+0127 为校准源, 对每个数据校准其各时段可见度数据的相位信息, 并把得到的解应用到各自数据中的目标源 Aql X-1。这样, 每个数据生成一个 Aql X-1 的单源数据。

从 BM308AA/AB 的数据中我们得到了 2 个 Aql X-1 的候选体, 两者位置一致。由于 Aql X-1 的自行大约只有 $14 \mu\text{s} \cdot \text{d}^{-1[17]}$, 我们合并 BM308AA/AB 的 Aql X-1 的单源数据,

以提升图像的信噪比。此后，我们将 Aql X-1 的单源数据读入 DIFMAP，并采用自然权来成图。我们对脏图中的候选体进行综合波束的去卷积操作，不辅以自校准。图 2 展示了最后得到的 2 个历元的 Aql X-1 的洁图。图中的等高线代表 RMS 的 $\pm 2^{n/2}$ 倍，其中 n 为 3 或 4。图 2a) 和图 2b) 的 RMS 分别为每综合波束 $29.6 \mu\text{Jy}$ 和 $37.1 \mu\text{Jy}$ ，综合波束主瓣的大小分别为 $2.11 \times 0.89 \text{ mas}$ 和 $2.82 \times 1.08 \text{ mas}$ ，其方向角分别为 3.0° 和 17.4° 。



注：a) 由 BM308AA/AB 数据得到的 Aql X-1 的洁图；b) 由 BM335A 数据得到的 Aql X-1 的洁图。

图 2 2 个历元的 Aql X-1 的自然权洁图

2.2 成图结果

表 1 列出了 Aql X-1 的成图结果。通过对 2010 年 1 月的 VLBA 数据 BM308AA/AB 进行处理和成图, 我们在 19h11min16.025 192(7)s +00°35′05.891 5(2)″(J2000) 位置看到一个峰值流量密度为 4.8 倍 RMS 的点源候选体, 其方向角与 VLBI 综合波束 (synthesized beam, 简称波束) 主瓣的方向角大体相同, 这暗示了其致密性。通过对 2010 年 7 月的 VLBA 数据 BM335A 的处理和成图, 我们在 19h11min16.025 057(8)s +00°35′05.888 8(2)″(J2000) 位置看到了一个峰值流量密度为 5.0 倍 RMS 的点源候选体, 其方向角与波束的方向角相同。另外, 在 BM308Z/AC 和 BM335B 数据中均未发现 Aql X-1 候选体。

表 1 两组数据的 Aql X-1 成图结果

观测历元/年	赤经 (J2000)	赤纬 (J2000)	峰值流量密度 与 RMS 比值	每波束 RMS /μJy
2010.041 ^a	19h11min16.025 192(7)s ^b	00°35′05.891 5(2)″	4.8	29.6
2010.557	19h11min16.025 057(8)s	00°35′05.888 8(2)″	5.0	37.1

注: a 观测时间为观测起止时间 (即 BM308AA 的开始时间和 BM308AB 的结束时间) 的平均值;
b 这里的位置误差仅包括图像噪声引起的随机误差。

2 个历元的观测中发现的点源候选体的认证将在第 3 章详细论述。值得注意的是, 2 个历元的观测对应的 J2000 位置是不一致的, 呈现出往西南方向移动的趋势, 与 Miller-Jones^[17] 发布的 Aql X-1 自行方向 [赤经和赤纬方向自行分别为 $\mu_{\alpha} \cos \delta = (-2.64 \pm 0.14) \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$, $\mu_{\delta} = (-3.53 \pm 1.40) \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$] 比较接近。这意味着 2010 年 1 月和 7 月 Aql X-1 的位移主要来源于 Aql X-1 的自行。

3 存在先验位置信息的 VLBI 探测的认证

3.1 VLBI 探测的阈值及搜寻范围

在没有先验位置信息的情况下, 在 VLBI 的图像里认证一个探测, 其峰值流量密度通常要达到 7 倍 RMS。由于 VLBI 图像的分辨率很小 (毫角秒水平), 在一个大的视场中有大量的像素, 以致可能存在较大的随机噪声, 因此, 认证 VLBI 探测的阈值随着搜寻目标源范围的增大而变大。在没有先验的位置信息时, 搜寻范围等同于 VLBI 图像的视场。视场大小随不同的观测设置而变, 从数角秒到数角分不等, 主要受限于带宽模糊效应 (bandwidth-smearing) 和时间模糊效应 (time-smearing)。

2009 年 11 月和 2013 年 6 月的 2 个历元的 VLBI 观测中, Aql X-1 被明确探测到 (图像信噪比大于 7), 其 J2000 位置分别为 19h11min16.025 165(6)s +00°35′05.892 0(2)″^[14] 和 19h11min16.024 5s +00°35′05.879″^[12]。我们利用这 2 个先验的位置 (以及时间) 信息来确定 2010 年 1 月 Aql X-1 位置的搜寻范围。Aql X-1 在天球上的位置变化主要源于它的自行, 其次是周年变化的视差效应。2009 年和 2013 年两次探测得到的 Aql X-1 自行为 $\mu_{\alpha} \cos \delta =$

$(-2.64 \pm 0.14) \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$, $\mu_\delta = (-3.53 \pm 1.40) \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ (1σ 置信度)^[17]。为了保守估算 Aql X-1 位置在 2010 年 1 月的搜寻范围, 我们采用自行的 7σ 为上下限 (假设自行的估算满足高斯分布), 即 $-3.62 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1} < \mu_\alpha \cos \delta < -1.66 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$, $-13.33 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1} < \mu_\delta < 6.27 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$, 并以 2009 年 11 月的 Aql X-1 位置 $19\text{h}11\text{min}16.025\ 165\text{s} + 00^\circ 35' 05.892\ 0''$ (J2000) 为初始位置以及 (0, 0) 点。2010 年 1 月的观测比 2009 年 11 月的观测晚 0.15 a。如果忽略视差效应, 2009.89 年到 2010.04 年赤经变化范围为 $-0.54 = -3.62 \times 0.15 < \Delta\alpha_{2010.04-2009.89} < -1.66 \times 0.15 = -0.25$, 赤纬变化范围为 $-2.00 = -13.33 \times 0.15 < \Delta\delta_{2010.04-2009.89} < 6.27 \times 0.15 = 0.94$ 。考虑到视差效应, 采用 Aql X-1 曾有过的最小距离估算值 2.5 kpc (此时视差效应最大)^[1], 则视差效应导致的最大位移为 0.8 mas。根据视差效应的数学形式和 Aql X-1 的先验位置可以推导出, Aql X-1 视差效应的最大位移主要在赤经方向, 且赤经和赤纬方向最大位移的比值为 2。所以视差效应导致的赤经和赤纬方向的最大位移分别不超过 0.8 和 0.4。故 $-1.34 = -0.54 - 0.8 < \Delta\alpha_{2010.04-2009.89} < -0.25 + 0.8 = 0.55$, 且 $-2.4 = -2.0 - 0.4 < \Delta\delta_{2010.04-2009.89} < 0.94 + 0.4 = 1.34$ 。

搜寻范围还受到初始位置不确定性的影响。初始位置的随机误差为 $\sigma_{2009.89}^{\text{RA}} = 0.09 \text{ mas}$, $\sigma_{2009.89}^{\text{Dec}} = 0.2 \text{ mas}$ 。仍然采用 7σ 的上下限, 则 $-0.63 < \alpha_{2009.89} < 0.63$, $-1.4 < \delta_{2009.89} < 1.4$ 。最后得到, 2010 年 1 月 Aql X-1 的搜寻范围为 $-1.97 = -1.34 - 0.63 < \alpha_{2010.04} < 0.55 + 0.63 = 1.18$, $-3.8 = -2.4 - 1.4 < \delta_{2010.04} < 1.34 + 1.4 = 2.74$, 搜寻面积为 20.6 mas^2 。

下面采用相似的方法来确定 2010 年 7 月 Aql X-1 位置的搜寻范围。与上述情况不同的是, 下面是以 2010 年 1 月 Aql X-1 的位置 $19\text{h}11\text{min}16.025\ 192\text{s} + 00^\circ 35' 05.891\ 5''$ (J2000) 为初始位置以及 (0, 0) 点。这里已经假设在 2010 年 1 月探测到了 Aql X-1 (这点将在 3.2 节得到确认)。2010 年 7 月的观测比 2010 年 1 月的观测晚 0.52 a。如果忽略视差效应, 则 $-1.88 < \Delta\alpha_{2010.56-2010.04} < -0.86$, $-6.93 < \Delta\delta_{2010.56-2010.04} < 3.26$ 。考虑视差效应, 则 $-2.68 < \Delta\alpha_{2010.56-2010.04} < -0.06$, $-7.33 < \Delta\delta_{2010.56-2010.04} < 3.66$ 。此外, $\sigma_{2010.04}^{\text{RA}} = 0.09 \text{ mas}$, $\sigma_{2010.04}^{\text{Dec}} = 0.21 \text{ mas}$ 。采用 7σ 的上下限, 可得到 $-0.63 < \alpha_{2010.04} < 0.63$, $-1.47 < \delta_{2010.04} < 1.47$ 。故 2010 年 7 月 Aql X-1 的搜寻范围为 $-3.31 < \alpha_{2010.56} < 0.57$, $-8.80 < \delta_{2010.56} < 5.13$, 搜寻面积为 54.0 mas^2 。

搜寻范围的缩小意味着 Aql X-1 在 2010 年 1 月和 7 月 VLBI 探测的阈值可以显著减小。接下去, 我们将尝试性地给出阈值, 并利用 2 个 Aql X-1 的单源数据定量地认证其合理性。

3.2 2 个新认证的 VLBI 探测

对于已经缩小了搜寻范围的 2 个 Aql X-1 的单源数据, 我们尝试性地把探测阈值设定在 4 倍 RMS。评判这个阈值是否合适的标准是: 在搜寻范围内找到一个不小于 4 倍 RMS 的噪声的概率是否小于 0.27% (即 3σ 置信度)。

由于射电天文图像中的噪声不严格遵循高斯分布, 且像素在位置上存在相关性, 所以, 依靠过于简单的理论计算估计这个问题并不准确。我们编写了一个在 DIFMAP 中可以运行的脚本, 来统计 $1024 \text{ mas} \times 1024 \text{ mas}$ 范围内所有不小于 4 倍 RMS 的噪声 (以及可能的真实源)。我们分别对 2010 年 1 月和 7 月的 2 个 Aql X-1 单源数据进行了统计, 结果发现, 2010

年 1 月的数据中存在 42 处不小于 4 倍 RMS 的噪声 (包括可能的真实源), 即 1 mas^2 范围内出现一个不小于 4 倍 RMS 噪声的概率不大于 $42/1024^2$, 即 4.0×10^{-5} 。也就是说, 在 2010 年 1 月的 20.6 mas^2 搜寻范围内, 所有噪声都在 4 倍 RMS 以下的概率达 $(1 - 42/1024^2)^{20.6}$, 即 99.92%, 远大于 99.73% (3σ 置信度)。而在 2017 年 7 月的数据中, 我们找到了 33 处不小于 4 倍 RMS 的噪声 (包括可能的真实源), 因此, 1 mas^2 范围内出现一个不小于 4 倍 RMS 噪声的概率不大于 $33/1024^2$, 即 3.1×10^{-5} 。在 2010 年 7 月对应的 54.0 mas^2 搜寻范围内所有噪声都在 4 倍 RMS 以下的概率为 $(1 - 33/1024^2)^{54.0}$, 即 99.83%, 依旧大于 99.73%。因此可以说, 对于 2010 年 1 月和 7 月的两次观测, 在各自 Aql X-1 的搜寻范围, 4 倍 RMS 的探测阈值是合适的。

我们的结论是: 由于表 1 显示的 2 个点源候选体都达到了 4 倍 RMS 的探测阈值, 且其位置都在各自的搜寻范围内, 因此, 这 2 个点源候选体可以被认证为 Aql X-1 的新探测点。

本文尝试性地给出了探测阈值并予以检验, 同时也说明了搜寻范围变小会导致更小的探测阈值。不过值得指出的是, 给出合适的阈值虽然可以引向候选体的认证, 但却不是必须的。另一种更加直接的检验候选体的评判标准是, 在搜寻范围内找到一个达到候选体流量密度的噪声的概率是否小于 0.27% (3σ 置信度)。具体的实现方法是统计更大范围内所有达到候选体流量密度的噪声 (以及可能的真实的源) 数量。按照这个方法, 我们得到 2010 年 1 月和 7 月的探测置信度分别为 99.9986% 和 99.9984%。

4 讨 论

4.1 射电与 X 射线流量的相关性

对于环类源, 可观测到的射电流量主要产生于 X 射线快速的软硬态转换时^[18]。作为新发现的两处射电流量, 我们也研究了与其对应的 X 射线流量情况, 见图 3。我们分别找到了望远镜 Swift BAT (15~150 keV) 所观测到的硬 X 射线光变曲线和望远镜 MAXI (2~20 keV) 观测到的软 X 射线光变曲线。

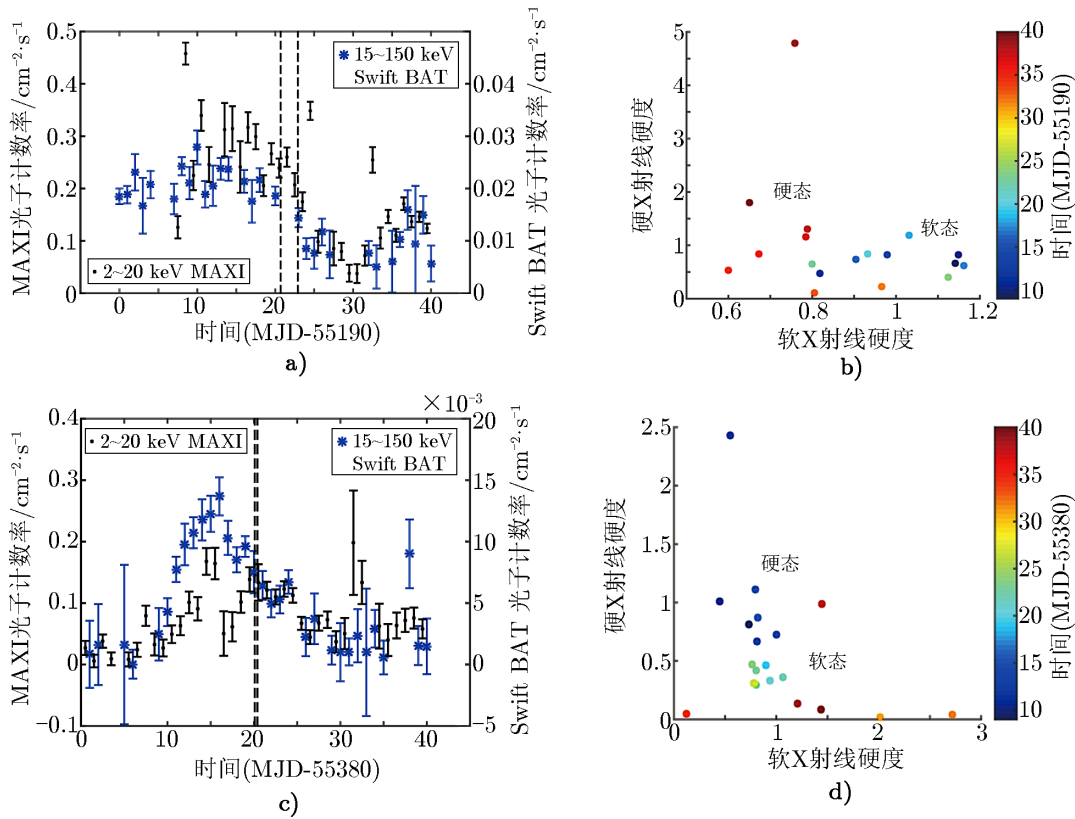
2010 年 1 月和 7 月发现的两处射电流量都伴随着硬/软 X 射线流量的同时衰减, 所以仅凭硬/软 X 射线的光变曲线无法体现 Aql X-1 是否在经历软硬态转换。绘制软 X 射线硬度-硬 X 射线硬度图是了解吸积盘的 X 射线软硬态的常用手段之一。在本研究中, 我们定义软 X 射线硬度为 MAXI 的 4~10 keV 范围的流量与 2~4 keV 范围流量的比值, 硬 X 射线硬度为 Swift BAT 的 15~150 keV 范围的流量与 MAXI 的 10~20 keV 范围流量的比值。

在计算硬 X 射线硬度时, 我们采用了 2 个不同探测器的数据。为了去除探测器自身随时间变化的响应所带来的影响, 15~150 keV 和 10~20 keV 中 Aql X-1 的流量是以各自波段中蟹状星云的流量为单位的。为了提高信噪比, 对于 2 个探测器探测到的 Aql X-1 和蟹状星云, 我们都选择单日流量平均后的日基数据。当流量校准源蟹状星云在某一天的数据缺失时, 我们采用内插法来填补流量校准源数据, 以避免在流量校准中 Aql X-1 数据的丢失。

通过得到的硬 X 射线硬度-软 X 射线硬度图 (见图 3) 可以发现: 在 2010 年 1 月 (MJD-

55190) 的 VLBI 观测前后, Aql X-1 由软态 (banana state) 转变到了硬态 (island state); 而在 2010 年 7 月 (MJD-55380) 的 VLBI 观测前后, Aql X-1 则由硬态过渡到了软态。这两种情况都符合此前对 Aql X-1 及环类源的认识^[14], 即它的射电流量主要源于 X 射线软硬态转换。另一方面, 我们没有在 2010 年 1 月 13 日的 BM308Z 和 2010 年 7 月 24 日的 BM335B 数据中找到 Aql X-1 的候选体。这 2 个数据都仅仅与探测到的 Aql X-1 的数据相隔 1 d, 说明软硬态转换产生射电流量的时间窗口是短暂的 (约为 1 d)。

另外, 从图 3a) 和图 3b) 中可以看出, 在 2010 年 1 月 21 日时 (对应于 MJD 27+55190), 硬/软 X 射线都已接近谷底, 此时 Aql X-1 处于低亮度硬态 (简称低硬态)。这解释了在 2010 年 1 月 21 日 Aql X-1 射电流量的消失, 因为 X 射线流量与射电流量在处于低硬态时是正相关的^[18]。



注: 黑色虚线框出的范围对应 VLBI 探测的时间区段。

图 3 2010 年 1 月和 7 月 VLBI 探测前后的软、硬 X 射线光变曲线及其所对应的硬 X 射线硬度-软 X 射线硬度图

4.2 Aql X-1 喷流尺度的约束

VLBI 观测是研究中子星 X 射线双星喷流的主要手段。到目前为止, 除了 Aql X-1, 人们只观测到少数中子星 X 射线双星的毫角秒尺度 VLBI 图像, 如 Sco X-1^[19] 和 Cir X-1^[20] 这

2 个源。所有中子星 X 射线双星中, 仅在对 Sco X-1 和 Cir X-1 的 VLBI 观测中发现了延展的射电结构^[19,21], 并在 Sco X-1 中看到了如同黑洞 X 射线双星那样的块状射电结构^[19]。尽管如此, 对更多的中子星 X 射线双星的喷流进行 VLBI 成像仍然是非常重要的, 这首先是因为中子星 X 射线双星有着复杂的分类。按照硬 X 射线硬度-软 X 射线硬度图的形状, 中子星 X 射线双星可分为环类源和 Z 类源^[8]。Sco X-1 和 Cir X-1 都属于较亮的 Z 类源^[22]。我们没有在任何环类源内确切地找到延展的喷流结构, 更没有看到过块状喷流结构。另一个原因是, Sco X-1 的喷流形态不同于其他河内射电源, 它一般只有 3 个组成成分, 即喷流的核以及 2 个相反方向喷出的致密团块^[19]。观测其他中子星 X 射线双星的喷流结构可以让我们了解这是否是中子星 X 射线双星所独有的特征。

在已经发布的 Aql X-1 2 个历元的 VLBI 观测结果中, 没有明确发现 Aql X-1 系统中有延展射电结构, 更不存在块状结构。在新发现的 Aql X-1 2 个历元的观测结果中, Aql X-1 也展现了很好的致密性。在这 2 个历元的观测结果中, Aql X-1 喷流的角尺度上限即为 VLBA 波束 (综合波束的主瓣) 的大小, 即 $2.1 \times 0.9 \text{ mas}^2$ (2010 年 1 月) 和 $2.8 \times 1.1 \text{ mas}^2$ (2010 年 7 月), 对应于当距离为 5 kpc 时, 喷流尺寸分别为 10.5 AU 和 14 AU。

为了更好地研究中子星 X 射线双星的喷流结构, 未来对 Aql X-1 的 VLBI 观测需要达到更高的图像灵敏度。用高灵敏度天线 (如 FAST、天马望远镜和 Effelsberg 望远镜等) 或单天线模式的密集阵列 (如单天线模式的 VLA 和 MERLIN 等) 进行观测是极大地提高图像灵敏度的最佳方法, 将有助于我们确认环类中子星 X 射线双星是否存在延展的 (甚至块状的) 喷流结构, 并且丰富我们对中子星 X 射线双星喷流结构的认识。

5 总结与展望

我们设计了一套简单可行的流程。首先, 通过先验位置信息确定源的搜寻范围; 然后, 结合数据本身的统计信息, 检验新的候选体是否被探测到。此流程特别适合于已经拥有先验位置信息的弱源认证。通过这个流程, 我们新认证了 2 个 Aql X-1 的亚毫角秒精度的 VLBI 探测。这个工作对其他弱源在多历元观测中的成分验证工作是有启发性的。随着天文学逐步进入大数据时代, 这种数据挖掘的工作方式也将成为一种常态。如何更好地进行数据共享, 如何更自动化地进行数据处理, 以及如何更好地挖掘数据, 将成为这一新兴科学分支的研究重点。

另一方面, 天体的视差测量需要至少 3 个不同观测历元得到的亚毫角秒精度的位置。新发布的 2 个 VLBI 位置使得 Aql X-1 的已确认的 VLBI 历元总数达到了 4 个, 这使得对该源的初步视差测量工作成为可能。通过视差测量, 我们可以得到独立于物理模型的距离估值, 从而能结合 X 射线观测获得 Aql X-1 的 X 射线暴的光度, 并进而能检验有光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴的光度是否等于爱丁顿光度, 或者说, 检验该类 X 射线暴作为标准烛光的可靠性。这样的工作尚无先例, 因为目前还没有任何有光球层膨胀特征的 I 型 X 射线暴的源的视差测量数据。此外, 对 Aql X-1 的视差测量还会同时给出更精确的 Aql X-1 的初始位置和

自行估值。

参考文献:

- [1] Chevalier C, Ilovaisky S A, Leisy P, et al. *A&A*, 1999, 347: L51
- [2] Koyama K, Ionoue H, Makishima K, et al. *ApJ*, 1981, 247: L27
- [3] Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. *A&A*, 2007, 469: 807
- [4] Priedhorsky W C, Terrell J. *ApJ*, 1984, 280: 661
- [5] Chevalier C, Ilovaisky S A. *A&A*, 1991, 251: L11
- [6] Zhang W W, Jahoda K M, Kelly R L, et al. *ApJ*, 1998, 495: L9
- [7] Reig P, Mendez M, van der Klis M, et al. *ApJ*, 2000, 530: 916
- [8] Hasinger G, van der Klis M. *A&A*, 1989, 225: 79
- [9] Tudose V, Fender R P, Linares M, et al. *MNRAS*, 2009, 400: 2111
- [10] Galloway D K, Munro M P, Hartman J M, et al. *ApJ*, 2008, 179: S360
- [11] Tudose V, Paragi Z, Miller-Jones J C A, et al. *ATel*, 2009, 2317: 1
- [12] Tudose V, Paragi Z, Yang J, et al. *ATel*, 2013, 5158: 1
- [13] NRAO Science Data Archive. [2018-03-09]. <https://archive.nrao.edu/archive/advquery.jsp>
- [14] Miller-Jones J C A, Sivakoff G R, Altamirano D, et al. *ApJ*, 2010, 716: 109
- [15] Greisen E W. *Astrophysics and Space Science Library*, 2003, 285: 109
- [16] Shepherd M C, Pearson T J, Taylor G B. *Bulletin of the Astronomical Society*, 1994, 125: 77
- [17] Miller-Jones J C A. *PASA*, 2014, 31: 501
- [18] Migliari S, Fender R P. *MNRAS*, 2006, 366: 79
- [19] Fomalont E B, Geldzahler B J, Bradshaw C F. *ApJ*, 2001, 558: 283
- [20] Phillips C J, Deller A, Amy S W, et al. *MNRAS*, 2007, 380: L11
- [21] Fender R, Spencer R, Tzioumis T, et al. *ApJ*, 1998, 506: 121
- [22] Shirey R E, Bradt H V, Levine A M. *ApJ*, 2011, 517: 472

Two New VLBI Detections Verified of the X-ray Transient Aql X-1

DING Hao^{1,2}, ZHAO Wei^{1,3}, ZHANG Zhong-li¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210009, China)

Abstract: Aquila X-1 (Aql X-1) is a neutron-star (NS) low-mass X-ray binary (LMXB), and a transient in radio and X-ray observations. VLBI (very long baseline interferometry) observations of Aql X-1 play an essential role in the jet-disk coupling study of NS-LMXBs. They also offer locations of Aql X-1 with sub-mas precision, which can be used in astrometric

purpose. Since Aql X-1 exhibits X-ray bursts with evident photospheric radius expansion (PRE burst), the model-independent astrometry (here parallax) can help estimate the luminosity of the PRE bursts, and facilitate the theoretical modeling of PRE bursts. The two reported (in 2009 November and 2013 June) VLBI detections of Aql X-1 reduce the search area of Aql X-1 in other VLBI observations, and effectively lower the S/N threshold of new detections. We devised a procedure to a) determine the search region of the target source with its prior positional information, b) estimate the confidence level of the potential detection using the search region and the statistical information from the relevant VLBI dirty map. This procedure is especially suitable for radio-weak sources with prior positional information. Following this procedure we re-analysed two sets of VLBA (Very Long Baseline Array) data obtained in the 2010 January and 2010 July observations, and find two new detections with confidence level of 99.9986% and 99.9984% respectively. The detections, suitable for astrometric usage, correspond to inconsistent locations showing a displacement towards southwest, which agrees with the previously reported proper motion of Aql X-1. Additionally, the two new radio detections are associated with state transitions of X-ray emission, supporting the widely accepted belief that radio flux of an atoll source is mainly generated at the transitions between hard and soft X-ray state during X-ray outbursts.

Key words: Aql X-1; X-rays; neutron-star; binaries