

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.06

中微子事件 IC220624A 候选射电对应体 J1458+4121 的 VLBI 观测研究

曾艾玲^{1,2,3}, 杨小龙^{2,3}, 赵薇^{2,3}, 洪晓瑜^{1,2,3}

(1. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 收集并分析了中微子发射事件 IC-220624A 的候选体 J1458+4121 仅有的几次甚大天线阵 (VLA) 的历史数据; 在此基础上, 利用甚长基线阵列 (VLBA) 对其进行首次 VLBI 观测, 观测波段为 L 和 C 波段。通过数据处理和分析研究, 得到 J1458+4121 VLBA 的射电辐射形态。此外, 利用相位参考技术, 还获得 J1458+4121 更精确的坐标 ($\alpha=14:58:20.772$, $\delta=41:21:01.911$)。VLA 观测的射电总流量强度在 1.4~8.4 GHz 范围内呈下降趋势, 说明 J1458+4121 的射电能谱可能是幂律谱; 而 VLBA 观测的射电总流量强度在 1.5~5 GHz 范围内呈上升趋势, 意味着其射电能谱在 GHz 波段是反转谱。因此, J1458+4121 极有可能是一个年轻射电源, 其中微子产生可能是由于新喷流成分的出现。该结果有助于 J1458+4121 的后续研究, 并将中微子起源的关注对象从明亮的耀变体扩展至其他类型的活动星系核。

关键词: 中微子; 活动星系核; 甚长基线干涉测量

中图分类号: P157.2 **文献标识码:** A

1 引言

宇宙线自 1912 年被发现以来, 其起源至今未完全确定, 其中的困难主要体现在三个方面: (1) 宇宙线很容易与传播路径上的介质粒子相互作用, 产生次级粒子, 从而混淆其起源地; (2) 带电高能宇宙线的传播方向容易受到宇宙中磁场的偏转, 为反溯其起源带来了巨大的困难; (3) 星际介质和地球大气吸收会进一步使信号变弱。天体物理活动中产生的高能宇宙线能通过自发衰变, 或者与周围介质相互作用产生中微子。有意思的是, 中微子几乎不受其他物质的影响, 因此它能够在宇宙中自由地穿行, 携带来自遥远天体的信息。中微子呈电

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2024-01-16

资助项目: 国家重点研发专项 (2018YFA0404602)

通讯作者: 杨小龙, yangxl@shao.ac.cn

中性, 它的传播也不会受宇宙中磁场的影响, 因此中微子的传播方向直指起源天体。作为宇宙中传播信息的特殊信使, 中微子几乎是我们探寻宇宙线起源仅有的媒介^[1, 2]。

中微子的特殊性质使得探测中微子非常困难, 因此, 关于中微子的研究发展得十分缓慢。自泡利 1930 年提出中微子存在假说后不久, 来自宇宙中的中微子被探测到。20 世纪 60 年代末太阳中微子首次被发现^[3]; 1987 年, 中微子在超新星 SN 1987A 中被发现^[4]。这些中微子的发现第一次确定了 MeV 量级高能粒子的起源, 具有里程碑式的意义。但是宇宙中还存在能量更高 (TeV 甚至 PeV 量级) 的中微子, 这些中微子的起源至今仍存在异议。为了探索这些高能中微子起源, 各国开始建造灵敏度更高的中微子探测器, 其中位于南极冰盖中的中微子探测器 IceCube 是目前灵敏度最高的设备。

IceCube 中微子天文台^[5]于 2010 年 9 月竣工; 在 2013 年, 其报道了第一例宇宙高能中微子事例的发现^[6]。这一发现打开了高能中微子研究的新窗口, 标志着中微子天文学研究时代正式到来。2017 年 9 月 22 日, 中微子事例 IC-170922A 被报道, 其对应体被确认为蝎虎耀变体 (BL Lac object) TXS 0506+056^[7], 这是第一个在多波段上被确认的中微子对应体。此后 IceCube 每年报导多次中微子事件, 但只有射电平谱类星体 (flat spectrum radio quasars) PKS 1502+106 (IC-190730A)^[8, 9]和潮汐瓦解事件 (tidal disruption event, TDE) AT2019dsg (IC-191001A)^[10]被明确地认证为中微子对应体。为增加中微子源样本以寻找宇宙线中微子的起源, 亟待研究更多中微子事例。

2022 年 6 月 24 日 16:13:16.41 (UT), IceCube 探测到中微子簇射事例 IC-220624A^[11], 其坐标为 $\alpha = 224.12^{\circ} \pm_{-1.95}^{+2.23}$, $\delta = 41.31^{\circ} \pm_{-1.56}^{+1.56}$, 定位精度为 1° 。这次事例属于高置信度的黄金事例, 极有可能起源于宇宙中的天体物理学现象。然而, 费米大视场望远镜源表 (fermi large area telescope fourth source catalog, 4FGL)^[12]中, 没有源位于此事例位置的误差范围内。随后, 通过分析近 14 年的 Fermi 数据, 一个新的源 (Fermi J1458.0+4119) 被发现位于该位置误差区域内, 距离 IC-220624A 事例最大概率位置仅为 0.2° , 非常可能是此次中微子事例的对应体。

WISEA J145820.77+412101.9 (简称 J1458+4121, 坐标为 $\alpha = 224.586^{\circ}$, $\delta = 41.350^{\circ}$, 红移为 0.176 ^[13]) 距 Fermi J1458.0+4119 仅 $4'$, 位于 Fermi J1458.0+4119 最佳拟合位置的 68% 置信度区域内 ($5'$), 因此被提出是 IC-220624A 事例的对应体^[14]。J1458+4121 目前被归类为频谱存在峰值的耀变体 (high-synchrotron peaked blazar, HSP)^[15], 峰值频率为 $\lg(\nu/\text{Hz}) = 15.5$ 。Arsioli 等人^[16]曾提出它是产生甚高能能量 (very high energy, VHE) 的候选源。目前没有文献对这颗源有详细研究, 它在各波段的观测数据也非常少, 因此非常值得我们深入探索。

本文收集了 J1458+4121 仅有的 4 次美国甚大天线阵 (Very Large Array, VLA) 的历史数据, 并利用美国的甚长基线干涉阵 (Very Long Baseline Array, VLBA) 对其进行首次甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI), 分析了这个源在射电波段的性质以及探讨了其中微子起源。第 2 章介绍了观测情况和数据处理方法, 第 3 章描述了观测结果, 第 4 章对结果进行深入分析, 第 5 章给出总结和展望。本文采用标准 Λ CDM 宇宙学模型, $H_0 = 71 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_{\Lambda} = 0.73$, $\Omega_{\text{m}} = 0.27$, 因此 1 mas 约为 2.945 pc 。

2 观测与数据处理

2.1 观测

我们利用 VLBA 对该目标源实施了 L 波段（中心频率为 1.548 GHz）和 C 波段（中心频率为 4.980 GHz）观测。L 波段观测于 2023 年 3 月 24 日进行（观测代码 BZ096A），C 波段观测于 2023 年 3 月 29 日进行（观测代码为 BZ096B）。两个频率的观测日期较接近，保证了后续计算射电谱指数的可靠性。每个波段均使用 2h 总观测时间，用在目标源上的观测时间均为 78 min，剩余时间用于校准源观测。本项目使用双偏振观测模式，总数据记录率为 $2 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其包含 8 个 IF，每个 IF 的带宽为 32 MHz，具体的观测参数如表 1 所列。VLBA 包含 10 台 25 m 望远镜，在本项目的 L 波段观测中，天线 MK 和天线 PT 分别出现俯仰电机故障和记录错误，未获有效观测数据；C 波段观测中，天线 MK 和天线 FD 分别出现电机故障和记录错误，也未获得有效观测数据。

表 1 观测参数

观测代码	观测台站	观测日期	中心频率 /GHz	带宽 /MHz	IF 的数目	比特率 /(Mb·s ⁻¹)	目标源时长 /min
BZ096A	VLBA	2023-03-24	1.548	32	8	2048	78
BZ096B	VLBA	2023-03-29	4.980	32	8	2048	78

根据 VLA 阵列对目标源的 4 次观测数据（如表 2 所示）可知，J1458+4121 是一颗较弱的射电源，流量只有毫央斯基量级。因此，本次 VLBA 观测采用相位参考模式^[17]，选取与目标源非常接近（通常在 2° 以内）的射电源作为相位参考源，由于两源的辐射几乎来自同一方向，相位参考源条纹拟合的解可直接应用于目标源上，从而实现目标源的校准和成图。我们检查了通过 VLBI 观测建立的全天射电参考架 (rfc.2023b^①)，选择了可用的相位参考源。表 3 列出位于 J1458+4121 附近的 5 个射电源。显然，射电源 J1457+4158 与目标源之间的角距离最小，仅为 0.64°，但它的流量较弱，仅为几十毫央斯基；J1506+4239 虽然与目标源之间的角距离为 2°，但流量达到 500 mJy，远比其他源明亮。为了保证观测成功，此次观测同时使用 J1457+4158 和 J1506+4239 作为相位参考源。在实际观测中，我们先对 J1506+4239 观测 30 s，再对 J1457+4158 观测 90 s，最后观测目标源 8 min，如此循环往复。

表 2 J1458+4121 的 VLA 观测信息

观测设备	观测日期	频率/GHz	总流量/mJy
VLA-B	1994-09-02	1.4	9.43±0.17
VLA-B	2019-04-14	3	5.11±0.33
VLA-B	2021-11-14	3	5.48±0.33
VLA-A	1995-08-14	8.4	2.17±0.33

^①<http://astrogeo.org>

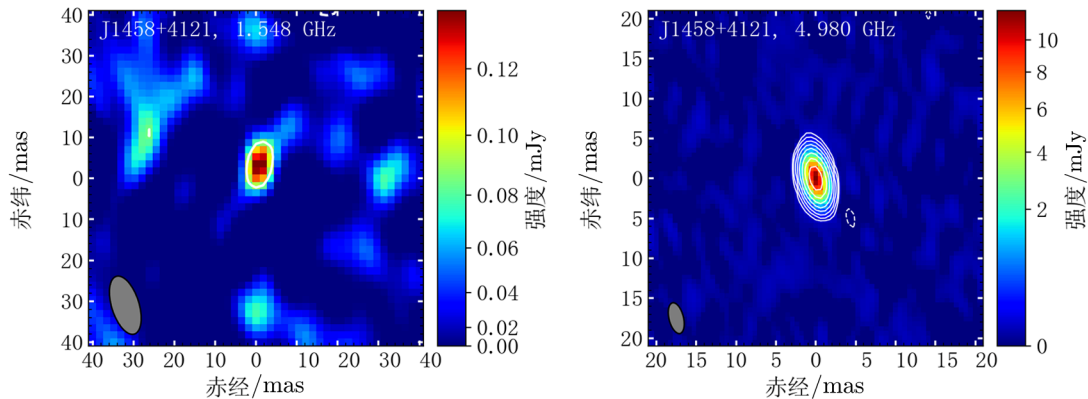
表 3 候选相位参考源信息

源	坐标 (α, δ)	离目标源距离 / ($^{\circ}$)	观测日期	观测波段	总流量 /mJy
J1457+4158	14:57:40.6861, +41:58:41.892	0.64	2020-11-14	C	57
				X	46
J1453+4148	14:53:55.5087, +41:48:44.767	0.947	2020-11-14	C	62
				X	46
J1451+4154	14:51:07.2960, +41:54:41.898	1.462	2015-11-17	C	46
				X	19
J1449+4221	14:49:20.7084, +42:21:01.344	1.952	2006-08-03	C	67
J1506+4239	15:06:53.0419, +42:39:23.036	2.054	2018-10-23	C	466
				X	541
			2018.12.04	S	510
				X	599

注: J1457+4158 和 J1506+4239 被选为相位参考源进行观测。

2.2 数据处理

我们利用 VLBI 通用的数据处理软件 AIPS^①(Astronomical Image Processing System package^[18]) 对数据进行校准, 例如校准由地球自转、地球电离层、仪器效应、台站时钟误差等导致的相位误差, 校准由大气层温度和不透明度、接收机温度等引起的幅度误差。这些校准过程均按照 AIPS 手册^②中的标准流程进行。此次观测中, 3C 279 被用作主校准源和带通校准源。在 AIPS 中完成初步校准后, 我们将目标源的数据在 DIFMAP^[19] 中进行反卷积成像。J1458+4121 的 VLBA 观测形态如图 1 所示。



注: 图像分别为目标源 J1458+4121 在 L 波段和 C 波段的图像。分辨率的卷积束如各子图左下角的灰色椭圆所示。强度轮廓线的最小值均为 $3\sigma_{\text{rms}}$, 轮廓线以 2 的倍数递增。色带表示辐射强度的大小。

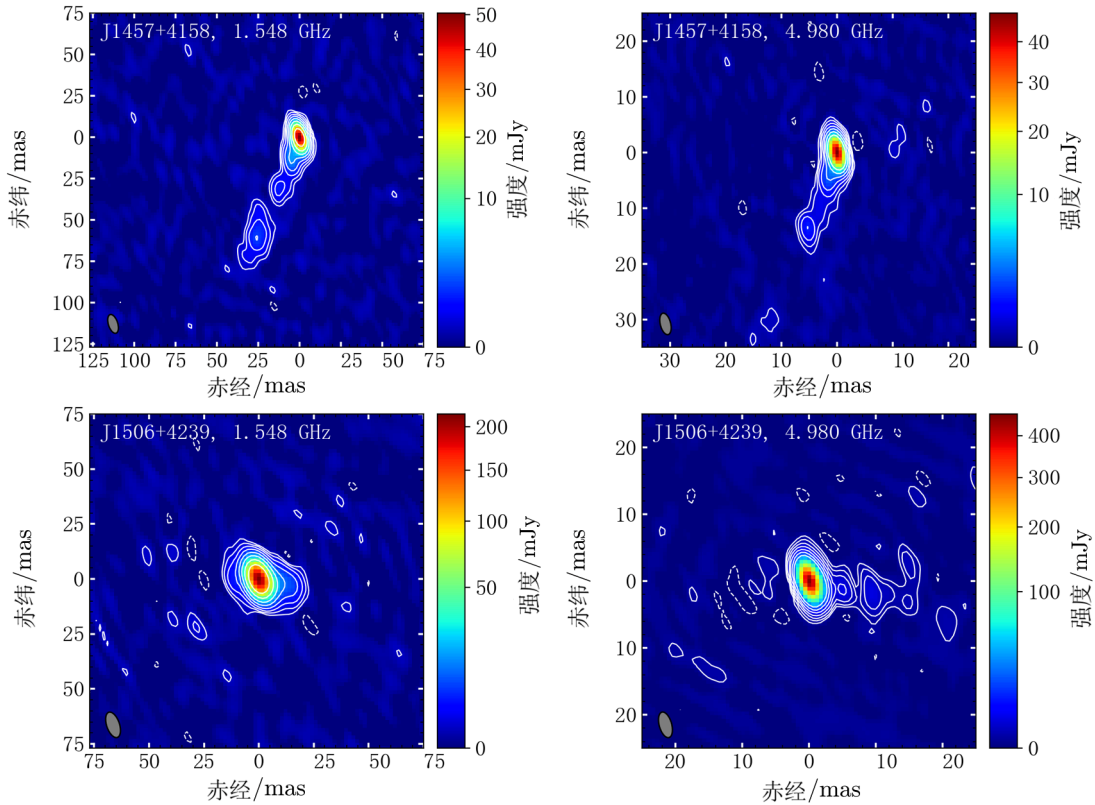
图 1 VLBA 观测获得的 J1458+4121 形态

^①<http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>

^②<http://www.aips.nrao.edu/cook.html>

3 结果

依据 2.2 节中所述的方法, 我们得到了相位参考源 J1457+4158 和 J1506+4239 的高空间分辨率图像和图像参数, 如图 2 和表 4 所示。尽管 J1506+4239 的流量远大于 J1457+4158, 但分别使用两颗校准源得到的目标源结果几乎一致。相位参考实验要求相位参考源与目标源在位置上尽可能相近, 因此本文以 J1458+4121 得到的结果为准, 如图 1 和表 5 所示。



注: 图像分别为相位参考源 J1457+4158 和 J1506+4239 在 L 波段和 C 波段的图像。表示分辨率的卷积束如各子图左下角的灰色椭圆所示。图像中的强度轮廓线最小值均为 $3\sigma_{\text{rms}}$, 轮廓线以 2 的倍数递增。图像右方的色带表示辐射强度的大小。

图 2 VLBA 观测获得的相位参考源的形态

在 L 波段的图像中, 目标源 J1458+4121 的流量密度非常小, 仅 0.179 mJy, 强度的峰值为 0.136 mJy, 图像信噪比为 5 (强度峰值与图像噪声水平之比), 可见目标源在该波段非常微弱。在 C 波段的图像中, 目标源结构变得十分致密, 源的大小约为 10 mas, 即 29 pc; 此时强度峰值比 L 波段的高出约 100 倍, 为 11.987 mJy, 图像信噪比为 600。因此, 在 pc 尺度上, 目标源可能呈现出反转谱, 谱的峰值频率大于 5 GHz。由于 $S_\nu \propto \nu^\alpha$, 其中 S_ν 为在观测

表 4 相位参考源的图像参数

相位参考源	观测日期	频率 /GHz	B_{\max}	B_{\min}	B_{pa} /(°)	噪声 σ_{rms} /(mJy·b ⁻¹)	I_{peak} /(mJy·b ⁻¹)	S_{tot} /mJy
J 1457+4158	2023-03-24	1.548	11.81	5.67	17.77	0.073	50.430	68.802
	2023-03-29	4.980	3.95	1.86	14.14	0.046	47.860	57.070
J 1506+4239	2023-03-24	1.548	12.10	5.85	18.89	0.238	216.280	311.776
	2023-03-29	4.980	3.95	1.87	15.73	0.015	456.270	528.713

注: 第 4—6 列分别为表示卷积束的长轴、短轴和长轴方向; 第 7 列表示图像噪声水平; 第 8 列表示射电源的峰值强度; 第 9 列表示射电源的总流量。

表 5 J1458+4121 的图像参数

观测日期	频率 /GHz	B_{\max}	B_{\min}	B_{pa} /(°)	噪声 σ_{rms} /(mJy·b ⁻¹)	I_{peak} /(mJy·b ⁻¹)	S_{tot} /mJy
2023-03-24	1.548	14.79	6.71	17.45	0.028	0.136	0.179
2023-03-29	4.980	3.95	1.82	14.07	0.020	11.987	12.587

注: 第 3—5 列分别为表示卷积束的长轴、短轴和长轴方向; 第 6 列表示图像噪声水平; 第 7 列表示射电源的峰值强度; 第 8 列表示射电源的总流量。

频率为 ν 时探测到的流量, α 为射电能谱的谱指数, 我们可得 $\alpha = \lg(S\nu_1/S\nu_2) / \lg(\nu_1/\nu_2)$ 。由此可计算出两频率之间的射电能谱的谱指数约为 $\alpha_{1.548}^{4.980} = 3.64$ 。

除此之外, VLA 历史数据的结果显示目标源 kpc 尺度的结构也十分简单, 在 8.4 GHz 下整个辐射区域的大小约为 0.4", 即 1.2 kpc。如表 2 所示, 从 1.4 GHz、5 GHz 到 8.4 GHz, 流量密度随频率增加而减小 (分别约为 9 mJy、5 mJy、2 mJy), 但需注意表中的流量密度来自于不同观测历元, 5 GHz 的值比其他两个频率的大约晚 25 a。由于 1.4 GHz 和 8.4 GHz 的 VLA 数据仅相差约 1 a, 我们推断在 kpc 尺度下, J1458+4121 呈现出同步辐射常见的幂律谱。

相位参考实验观测, 不仅能给出目标源的流量密度和形态, 还能给出目标源最准确的位置。通常情况下, 相位参考源为较强的射电源, 观测时, 默认相位参考源的位置坐标代表它在天空中的真实位置; 在数据校准过程中, 能得到目标源与相位参考源的相对距离, 进而得到目标源的真实位置。在本次观测中, 目标源坐标采用 VLA 观测给出的坐标 ($\alpha=14:58:20.804$, $\delta=41:21:01.470$), 然而, 将相位参考源的解应用到目标源上后, 我们得到 J1458+4121 的坐标为 $\alpha=14:58:20.772$, $\delta=41:21:01.911$, 此坐标比 VLA 观测中的坐标更准确。

4 讨论

如引言所述, J1458+4121 是中微子事例 IC-220624A 对应体的可能性很大。不论是在较低空间分辨率的 VLA 阵列观测中, 还是在高空间分辨率的 VLBA 阵列观测中, J1458+4121 都表现为点源结构。VLA 的观测结果显示它的射电谱为陡谱 (谱指数小于

-0.5), 即流量密度随着观测频率增加而变小。然而, VLBA 的结果显示其为反转谱 (谱指数大于 0), 在 1.5 ~ 5 GHz 范围内, 射电谱的谱指数为 $\alpha_{1.548}^{4.980} = 3.64$, 这可以归为一类具有 GHz 频谱峰值的活动星系核。通常情况下, 依据频谱峰值对应的频率, 可将具有反转谱的射电源归为三类: 致密陡谱源 (compact steep spectrum, CSS)、具有 GHz 频谱峰值的活动星系核 (GHz-peaked spectrum sources, GPS) 以及高频频谱峰值的活动星系核 (high frequency peakers, HFP), 它们的频谱峰值频率分别约为 100 MHz、1 GHz 和 10 GHz。这些源通常被认为是处于演化早期阶段的射电源, 峰值频率越高, 源的年龄越小。对这些年轻射电源的解释常为这三种: (1) 射电源处于演化的早期, 随时间流逝, 喷流持续喷出粒子并成长为更大的形态; (2) 喷流有间歇性活动; (3) 射电源为暂现源。后两种情况属于突然爆发出射电辐射的现象。目前 IceCube 报道的所有中微子事例^{①②} 与后面两种情况类似, 没有任何事例是持续的中微子辐射^[20]。

目前, 最著名的两例高置信度的中微子源为 TXS 0506+056 和 PKS 1502+106, 两者都是非常明亮的耀变体。MOJAVE 项目 (Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments) 的监测结果显示, 前者的流量范围为 306~2324 mJy^③, 后者为 793~3397 mJy^④, 然而 J1458+4121 仅为 10 mJy 左右。两类源有不同的射电形态, 比如 TXS 0506+056 和 PKS 1502+106 均有明显的喷流, 而 J1458+4121 是简单的点源。MOJAVE 和 OVRO (The Owens Valley Radio Observatory) 均监测到, 在中微子事件发生之前, TXS 0506+056 和 PKS 1502+106 的射电波段流量持续增加; 中微子事件发生后, 流量增加到有记录以来的最大值, 而后流量开始降低。然而, J1458+4121 没有被任何射电单镜或射电阵列监测, 关于它的观测数据非常缺乏, 本次观测是 J1458+4121 第一次被 VLBA 观测到, 因此, 为了得到更可靠的结论, 还需要将此源纳入更多观测和监测中。

除此之外, TXS 0506+056 和 PKS 1502+106 的中微子事例同时伴随着其他波段的光变, 尤其是 γ 射线上的光变, 这与理论预言一致。由于耀变体的喷流方向几乎沿着视线方向, 其具有强烈的相对论聚束效应, 喷流中包含的相对论性质子, 与喷流、吸积盘、尘埃环或宽线区等的光子场相互反应, 产生中微子、电子和 γ 射线。因此 γ 射线的产生伴随中微子事例的发生也是一个寻找中微子源的方法, 但不是唯一的方法。与理论不符的是, 继 IC-220624A 事例报道后, 紧随其后的一些观测并没有发现 J1458+4121 在各波段的光变。光学波段上, 史维基瞬变探测器在中微子事例发生 13h 后对该事例位置 8.1 平方度范围内进行了 g 波段和 r 波段的观测, 没有找到任何对应体^[21]; 2022 年 6 月 28 日 15:07 UT, Swift XRT 对目标源进行了观测, 并将观测结果与历史数据进行对比, 没有发现目标源在 X 射线上有流量爆发^[22]; HAWC 分析了中微子事例时间段内的数据, 没有在高能 γ 射线上探测到明显信号^[23]; IceCube 天文台分析了此事例两天内的数据, 没有发现额外的中微子产

^①https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon_icecube_gold_bronze_events.html

^②https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon_icecube_cascade_events.html

^③<https://www.cv.nrao.edu/MOJAVE/sourcepages/0506+056.shtml>

^④<https://www.cv.nrao.edu/MOJAVE/sourcepages/1502+106.shtml>

生^[24]。

目前, 观测上对中微子的产生原因众说纷纭。较早的一种解释是, TXS 0506+056 的中微子可能产生于喷流进动引起的喷流不同部分互相碰撞^[25]。Becker Tjus 等人^[26]随后提出新的说法: TXS 0506+056 包含正在合并的双黑洞, 两条喷流在合并时周期性地产生中微子。根据它三次中微子事例的产生时间, 该文章预言了下次中微子事例将发生于 2023 年 1 月至 2026 年 8 月中的某个时间。PKS 1502+106 的中微子产生原因也有几种说法, 如喷流里的相对论性电子与尘埃环发出的红外波段光子发生逆康普顿散射, 从而产生了中微子^[27]; 喷流与窄线区相撞产生了 γ 射线, 这些高能光子又与喷流中的质子相互作用产生中微子^[9]。然而, J1458+4121 与这两个强源完全不同, 因此很可能是其他天体物理现象促使中微子产生。通常情况下, 当有新鲜粒子持续注入喷流时, 喷流的核心区域常表现为平坦的射电谱, 而喷流间歇性活动或者喷流突然爆发, 则表现为类似于 J1458+4121 这样的反转谱。由于 J1458+4121 在 VLBA 观测下, 10 mas 区域内的流量已经与 VLA 观测下 0.4'' 区域内的流量相当, 所以 0.4'' 区域内的辐射很可能是上次喷流活动的遗迹, 10 mas 的核心区域则可能突然出现了新喷流成分, 此时相对论性喷流里的质子与喷流里的高能光子碰撞产生了中微子。

5 总结与展望

根据 IceCube 报道的位置, 我们确定了 IC-220624A 可能的射电源对应体 J1458+4121。我们收集了 J1458+4121 仅有的几个 VLA 存档数据, 这些数据显示在角秒量级的空间分辨率下, J1458+4121 的流量已经十分微弱 (mJy 量级) 且结构为点源。基于此情形, 我们开展了 VLBA 在 L 和 C 波段的相位参考实验观测。为了观测的顺利实施, 我们选用两个相位参考源, 分别为 J1457+4158 和 J1506+4239。最终, 此次观测成功得到了目标源在 VLBA 下的流量和形态, 以及此源更精确的坐标。

VLBA 的观测结果显示, J1458+4121 在毫角秒分辨率下依然为点源结构, 流量与 VLA 的观测结果一致。在 VLA 探测下, 它的射电谱为常见的同步辐射幂律谱; 在 VLBA 观测中, 它则是一个典型的 GPS 源或 HFP 源, 频谱峰值频率在 5 GHz 以上, 说明它十分年轻。相比于两个典型的中微子源 TXS 0506+056 和 PKS 1502+106, J1458+4121 的性质则完全不同。一方面, 由于严重缺乏 J1458+4121 的数据, 我们无法进行更深入的研究; 另一方面, 没有相关报道提到此源有多波段流量爆发。因此, 根据目前的结果我们倾向于 IC-220624A 事例的发生可能是由于突然出现了新的喷流成分, 相对论性喷流里的质子与喷流里的高能光子碰撞产生了中微子。

本研究第一次通过 VLBA 探测到 J1458+4121 并给出其毫角秒尺度的图像, 从而得到其射电性质, 为中微子源样本多增加了一个与其他源性质不同的案例。这不仅有助于后续对此源开展更多监测, 还有助于从新的角度理解中微子的产生, 将中微子起源问题的关注点从耀变体扩展至类似于 J1458+4121 这样的弱源。本研究也引起了更多有待探索的问题, 如是

否弱源产生中微子是常见的？弱源产生中微子是否有其他原因？弱源与强源产生中微子的不同之处和相同之处，等等。我们仍须长期关注 J1458+4121 和更多中微子事例，进一步扩大中微子源的样本，研究不同源产生中微子的原因，进而揭示宇宙线的起源。

致谢

本文使用了来自美国国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory, NRAO) 的 VLA 和 VLBA 的观测数据，其中 JVLA 数据来自 NRAO 数据库，而 VLBA 数据来自项目号为 BZ096 的观测。感谢审稿人提出的宝贵意见，这些意见使本论文更加完善。

数据可用性声明：本篇论文的关联数据目前为不宜共享的数据，可依据合理理由从作者处获取。

参考文献：

- [1] Learned J G, Mannheim K. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2000, 50: 679
- [2] Halzen F, Hooper D. *Reports on Progress in Physics*, 2002, 65: 1025
- [3] Davis R, Harmer D S, Hoffman K C. *Phys Rev Lett*, 1968, 20: 1205
- [4] Hirata K, Kajita T, Koshiba M, et al. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 1490
- [5] Abbasi R, Ackermann M, Adams J, et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 601: 294
- [6] Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 021103
- [7] IceCube Collaboration, Aartsen M G, Ackermann M, et al. *Science*, 2018, 361: 1378
- [8] Plavin A, Kovalev Y Y, Kovalev Y A, et al. *ApJ*, 2020, 894: 101
- [9] Britzen S, Zajaček M, Popović L Č, et al. *MNRAS*, 2021, 503: 3145
- [10] Winter W, Lunardini C. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 472
- [11] IceCube Collaboration. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32260: 1
- [12] Abdollahi S, Acero F, Ackermann M, et al. *ApJS*, 2020, 247: 33
- [13] Albareti F D, Allende Prieto C, Almeida A, et al. *ApJS*, 2017, 233: 25
- [14] Garrappa S, Buson S. *The Astronomer's Telegram*, 2022, 15478: 1
- [15] Chang Y -L, Arsioli B, Giommi P, et al. *A&A*, 2019, 632: A77
- [16] Arsioli B, Fraga B, Giommi P, et al. *A&A*, 2015, 579: A34
- [17] Beasley A J, Conway J E. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 1995, 82: 327
- [18] Greisen E W. *Astrophysics and Space Science Library*, 2003, 285: 109
- [19] Shepherd M C. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 1997, 125: 77
- [20] Abbasi R, Ackermann M, Adams J, et al. *ApJ*, 2024, 964: 40
- [21] Reusch S, Necker J, Stein R, et al. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32270: 1
- [22] Evans P A, Kennea J A. *The Astronomer's Telegram*, 2022, 15482: 1
- [23] Heo W-H, Ayala H, HAWC Collaboration. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32274: 1
- [24] IceCube Collaboration. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32275: 1
- [25] Britzen S, Fendt C, Böttcher M, et al. *A&A*, 2019, 630: A103
- [26] Becker Tjus J, Jaroschewski I, Ghorbanietemad A, et al. *ApJ*, 2022, 941: L25
- [27] Oikonomou F, Petropoulou M, Murase K, et al. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021, 20: 2182

VLBI Observations for J1458+4121 the Candidate of Radio Counterpart of the Neutrino Event IC220624A

ZENG Ai-ling^{1,2,3}, YANG Xiao-long^{2,3}, ZHAO Wei^{2,3}, HONG Xiao-yu^{1,2,3}

(1. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We have collected and analyzed the limited the Very Large Array (VLA) archival data of J1458+4121, which is a possible candidate of neutrino event IC-220624A, based on which we observed the source first time with the Very Long Baseline Array (VLBA) at L and C bands. Through data processing and analysis, we obtained the VLBA images of J1458+4121. In addition, its more precise coordinate ($\alpha=14:58:20.772$, $\delta=41:21:01.911$) was obtained by phase reference technique. The total flux density observed by VLA decreases from 1.4 to 8.4 GHz, so its radio spectrum may be power-law. However, the total flux density observed by VLBA shows an increasing trend from 1.5 to 5 GHz, which means an inverted spectrum in the GHz band. Therefore, it is highly likely that J1458+4121 is a young radio source, and its neutrino production may be caused by the emergence of a new jet component. The results of this paper are beneficial to the follow-up study of J1458+4121, and extend the focus on neutrino origin from bright blazars to other types of active galactic nuclei.

Key words: neutrino; active galactic nuclei; very long baseline interferometry