

3C 403: 一个候选的中微子辐射射电星系

Gabriele Bruni^a Loredana Bassani^b Sergio Alves Garre^c Manuela Molina^d Angela Malizia^b Mariateresa Fiocchi^a James Rodi^a Antoine Kouchner^e Alexis Coleiro^e Julien Aublin^e Giulia Illuminati^f Francesca Panessa^a Angela Bazzano^a Lorenzo Natalucci^a Pietro Ubertini^a

^aINAF – Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali,
via del Fosso del Cavaliere 100, Roma, 00133, Italy

^bINAF – Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio,
Via Piero Gobetti 93/3, I-40129 Bologna, Italy

^cIFIC – Instituto de Física Corpuscular (CSIC - UV),
C/ Catedrático José Beltrán nº2, E-46980, Paterna, Spain

^dINAF – Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica cosmica,
via Corti 12, I-20133 Milano, Italy

INAF – Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali,
via del Fosso del Cavaliere 100, Roma, 00133, Italy

INAF – Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali,
via del Fosso del Cavaliere 100, Roma, 00133, Italy

^eUniversité Paris Cité, CNRS, Astroparticule et Cosmologie,
F-75013 Paris, France

^fINFN, Sezione di Bologna,
v.le C. Berti-Pichat, 6/2, Bologna, 40127 Italy

E-mail: gabriele.bruni@inaf.it, loredana.bassani@inaf.it, salves.phys@gmail.com,
manuela.molina@inaf.it, angela.malizia@inaf.it, mariateresa.fiocchi@inaf.it,
mariateresa.fiocchi@inaf.it, kouchner@apc.in2p3.fr, coleyro@apc.in2p3.fr,
julien.aublin@apc.in2p3.fr, giulia.illuminati3@unibo.it, francesca.panessa@inaf.it,
angela.bazzano@inaf.it, lorenzo.natalucci@inaf.it, pietro.ubertini@inaf.it

Abstract. 3C 403 是一个著名的 FR II 类射电星系，其喷流延伸至 kpc 尺度。在这封信中，我们报告它在使用 ANTARES 协作组的 15 年中微子数据集检查超过 150 个源时被识别为第二显著的源，可能使其成为首个具有中微子辐射的射电星系。继之前将类星体与中微子事件关联起来后，我们旨在研究喷流的性质及其在中微子产生中的可能作用。我们收集了多尺度的射电观测数据来评估从千秒差距到秒差距尺度的喷流性质。此外，还检查了其活动星系核的高能特性。通过对不同尺度上的喷流方向进行分析，我们验证了无论是内喷流还是扩展喷流似乎都没有接近视线的视角。相反，喷流似乎位于天空平面上。此外，我们测试了最近提出的中微子和硬 X 射线通量之间的标度关系，该关系是针对类星体和塞佛特星系识别出来的，并将其与 3C 304 的测量通量进行了对比。我们发现该源位于类星体和塞佛特星系之间的区域，尽管当前对中微子通量的上限还不足以得出关于相关性的结论。在这方面，3C 403 是之前中微子关联案例之间的中间情况，为未来模型提供了一个有用的测试案例。

目录

1	介绍	1
2	射电星系 3C 403	2
3	从千秒差距到秒差距尺度的喷流特性	3
4	高能特性	3
5	提出的硬 X 射线与中微子通量之间的相关性	5
6	结论	6
A	观测与数据缩减	7
A.1	ANTARES	7
A.2	e-MERLIN	8
A.3	甚大阵列	8
A.4	甚长基线干涉测量	8
A.5	积分/IBIS	8
A.6	核光谱望远镜阵列	8

1 介绍

在 2013 年, IceCube 合作组织宣布探测到超出预期背景水平的中微子数量, 显示了与各向同性一致的空间分布, 因此具有星系外起源的可能性 [1]。几年后, 同一研究团队又宣布探测到了一个极高能量的中微子, 该中微子可追溯至耀变体 TXS 0506+056 [2], 在 2017 年 9 月期间, 费米/LAT 和 MAGIC 望远镜观测到了强烈的伽马射线发射 [3]。此外, 在分析从 2014 年 10 月至 2015 年 2 月获取的先前 IceCube 数据时, 还发现来自同一源方向存在 3.5σ 的中微子发射过剩 [2]。然而, 这最后的中微子过剩并未伴随伽马射线耀发现象 [4], 暗示了 GeV 光子/TeV 中微子通量之间或源特性的一些特殊性存在复杂的关系。

两种模型被用于中微子发射的模拟: 一个光子-强子 ($p\gamma$) 模型, 预测质子与环境中的光子 (来自吸积盘、喷流发出的同步辐射光子、进入喷流的 CMB 光子) 相互作用; 另一个是强子 (pp) 模型, 在这个模型中, 质子在日冕内或喷流内与其他质子相互作用, 或者与被卷入喷流中的外部物质的质子相互作用 [5–8] 然而, 如果没有遮蔽机制, 这些过程伴随产生的 γ 射线会比宇宙伽马射线背景更亮, 后者是通过费米/LAT [8, 9] 测量得到的。

第二个与中微子关联的来源是 Seyfert 星系 NGC 1068 [2]。在 NGC 1068 中观察到的中微子和 γ -射线通量之间的差异无法通过星系际背景光 (EBL) [10] 的吸收来解释。因此, NGC 1068 内部产生中微子的区域必须能够遮挡预期与中微子一起发射的 GeV – TeV γ -射线。中央黑洞周围的环境, 即冠冕, 非常符合这一方案, 提供了一个富含强子的环境, 在此环境中可以同时发生中微子生产和 γ -射线遮挡。确实, 前几年提出了模型, 其中冠层被视为中微子 [7, 10–15, 15–18] 的产生地, 并预见了未被吸收的硬 X 射线与中微子通量 [19] 之间的线性相关性, 在这些模型中 NGC 1068 已经被认为是中微子关联的最佳候选者之一 [8]。最近, 这些模型被用来重新解释耀变体 TXS 0506+056 中的中微子产生过程, 而无需喷流贡献 [18, 20]。

最近, 进一步的来源与冰立方天文台检测到的中微子事件相关联: 两个耀变体 (PKS 1502+106 和 PKS 1424-41, [21, 22]) 和三个赛弗特星系 (NGC 4151、NGC 3079 和 CGCG 420-015, [9, 23])。

这种增加的统计数据首次允许测试预测的硬 X 射线/中微子通量相关性：[20] 显示了两个耀变体 GB6 J1542+6129 和 TXS 0506+0566，尽管它们拥有强大的喷流，仍然与赛弗特星系 NGC 1068、NGC 3079、NGC 4151 和 CGCG 420-015 一起位于预期的相关性上，这表明中微子具有共同的起源。

进一步测试喷流在中微子产生中的作用的方法是研究可能与位于天球平面上的喷流相关的情况，因此不对喷流内部区域正在进行的过程呈现特权视角（即非耀变体）。这种方法可能会导致实际模型的改进，允许测试替代生产区域的作用。在这项工作中，我们介绍了第一个可能是与 ANTARES 实验中微子事件相关的射电星系（Seyfert 2）从射电到硬 X 射线的研究。在下文中，我们将讨论关于该来源之前的背景研究（第 2 节）、收集的多波段数据（附录 A）、喷流和冕性质（第 3 和 4 节）以及可能与硬 X 射线相对于中微子通量相关性的吻合（第 5 节）。

我们采用一个 Λ CDM 宇宙学模型，其中 $H_0 = 67.7 \text{ km/s/Mpc}$, $\Omega_\Lambda = 0.691$, 和 $\Omega_M = 0.307$ 。在源红移 ($z = 0.058$) 处，物理尺度为 $1.168 \text{ kpc}''$ 。

2 射电星系 3C 403

最近，ANTARES 合作组使用了 2007 年至 2018 年间收集的数据来寻找与几个 AGN 目录的可能相关性，其中包括由 [24] 编译的一份软 γ 射线选定的无线电星系样本。他们发现了两个事件（分别为 $\sim 5 \text{ TeV}$ 和 $\sim 10 \text{ TeV}$ ），位于射电星系 3C 403 小于 0.5° 的地方，暗示了一个预试验 p 值等同于 3.7σ 的过剩，并且是 2.5σ 后试验 [25]。在合作组织进行的最终 15 年候选名单分析中，该来源仍作为与中微子关联的第二大候选源具有显著性，有三个事件距离小于 1° ，并且事前试验 p 值为 3.4σ [26]。

这颗星系，在红移 0.0589 处，从许多角度来看都是特殊的：它是一个具有高激发发射线的类型 2 射电源星系，并且承载着兆赫兹激变源辐射（在射电源星系中唯一被检测到的一个 - 详见 [27–29]）。来源被列为持久对象，分别存在于快速/BAT[30] 和积分/IBIS[31] 目录中，这些目录收集了过去 ~ 20 年的数据，然而它在 4FGL-DR3 目录 [32] 中未被费米/LAT 检测到。在射电波段，它被归类为一种具有奇特形态的 FR II 型星系，被称为有翼或 X 形（参见图 1），其中存在两对类似瓣状的特征：翅膀不那么明亮，弥散，并且由缓慢膨胀的等离子体发出陡峭光谱，而主瓣更亮并且与持续存在的喷流相连，后者为它们补充了高能粒子（参见例如 [33, 34]）。

X 形或翼状形态形成的可能机制可以是：1) 由于激活了具有不同方向的新射电源而导致的喷流轴变化——可能是双黑洞合并或与较小星系合并的迹象 [35]；2) 等离子体从侧翼向核心回流，被宿主星系晕层偏转（参见例如 [36]）；3) 喷流轴的相对缓慢圆锥预cession，导致通过投影观察到的 X 形形态 [37, 38]。在 3C 403 的情况下，[39] 讨论了合并证据不足：该源位于稀疏环境中，并且对文献中光学连续谱和发射线图像的分析显示没有干扰迹象。同一作者也不支持圆锥预cession：如果形态源于缓慢预cession 源的特定排列，则侧翼与侧叶之间的相对高表面亮度结构可能会出现。此外，侧翼在基部处的收缩也表明涉及缓慢喷流轴运动的解释不太可能。最后，高达 32 MHz 频段中缺乏光谱弯曲使得等离子体年龄过年轻，无法归因于前一个射电源期。或者需要非常快速的喷流重新定向（几百万年，[39]），而直接与喷流相关的回流会更自然地解释缺乏陡峭化现象。

[40] 对这个 X 形射电源的首次钱德拉观测进行了成像分析，并发现 3C 403 主星系的 X 射线发射高度椭圆化且与光学等光度线对齐。这支持了 X 形射电源从喷流通过不均匀密度区域传播而产生的假设。此外，同一作者们还发现没有迹象表明翼或叶比星际介质 (ISM) 更具压强，这支持了翅膀起源于喷头后物质的强烈回流并随后经历浮力演化的假说。这一场景也得到了更近期对类似来源的研究的支持，这些研究利用新一代低频射电望远镜如低频率阵列 (LOFAR) 能够恢复由浮力效应产生的扩展区域。确实，[41] 展示了原型 X 形源 NGC 326 的翅膀在兆赫兹域观测时比实际叶部更延伸和复杂，最终暗示了一种流体动力学起源而非喷流

进动。不幸的是，由于其赤道视差，3C 403 不在 LOFAR 两米天空调查 (LoTSS) 的覆盖范围内，不允许我们进行类似的研究。

鉴于这些前提，为了进一步刻画这个奇特源的喷流特性，我们收集了从千秒差距到秒差距尺度的新多尺度射电数据，使我们能够评估喷流的方向和数百万年时间尺度上的演化。

3 从千秒差距到秒差距尺度的喷流特性

我们通过多尺度、多分辨率的观测探索了该源从 pc 到 kpc 规模的射电特性。导出的数量见表 2。中心区域，包括核心和喷流及反喷流内部的 kpc 部分，在我们的 e-Merlin 1.5 GHz 图像中清晰可见（参见图 1，左下方面板）。喷流的位置角 ($70^\circ \pm 5^\circ$) 与在较大尺度 VLA 图像上可见的瓣体轴向连接一致 ($72^\circ \pm 2^\circ$ ，见图 1 的顶部面板)。e-Merlin 检测到的射电辐射（喷流加核心）总角尺寸为 2.4 弧秒，相当于 2.8 kpc。

此外，我们还进行了 VLBA 观测以放大喷流中心的几秒差距：在这个尺度上，5 GHz（见图 1，右下角）和 8 GHz 图像中的喷流与反喷流都清晰可见，排除了视线接近喷流轴的可能性。在 15 GHz 处，仅检测到核心部分（参见附录）。5 GHz 测量的喷流位置角度 (64 ± 5 度) 与 e-Merlin 和 VLA 测量的结果一致，排除了整个 pc 至 kpc 尺度上的喷流进动。之前对源进行的 VLBI 研究由 [28] 提出，使用的是同年 (4.8 GHz) 进行的 EVN 观测，在 2004 年完成。尽管沿喷流方向的角度分辨率较低，那些作者还是能够估计出一个与上述多尺度观测结果在误差范围内一致的位置角度 (72.5 ± 3 度)。

总体而言，我们 VLBA 和 e-Merlin 观测结果（连同存档的 VLA 数据）恢复了从千秒差距到秒差距尺度上的喷流辐射和形态，证实了喷流束散射的缺失以及不同尺度上喷流轴的一致性，这并不表明存在进动。这暗示了一种与最初为 blazar TXS 0506+056 提出的涉及喷流的中微子产生机制不同的机制。在接下来的部分中，我们将探讨 3C 403 的高能特性，表征其日冕辐射，并探索其可能与中微子发射的关系。

4 高能特性

在过去的几年里，3C 403 在从软 X 射线到硬 X 射线的高能范围内被广泛观测。正如已经提到的，3C 403 在 2002 年由钱德拉望远镜进行过观测，并且由 [40] 进行了详细的分析。他分析了来自活跃星核以及几个无线电成分（包括电波源和射流中的紧致区域）的 X 射线辐射。核子成分可以用两个幂律加上一条来自冷物质的荧光铁线很好地描述。第一个幂律有一个 1.7 的光子指数，并且如预期那样在 II 型 AGN 中从冕发射出的辐射是高度吸收的 ($N_H \sim 4 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$)。第二个幂律吸收较少，其亮度比主要连续谱弱超过 100 倍。这个额外成分被 [40] 解释为来自未解析射流的 X 射线辐射。这得到了所观察到的 X 射线与无线电通量比率的支持，这一比率符合在低功率电波星系中一般发现的情况，而且射流中的吸收水平比环形结构要低得多，并且还存在一个靠近核心的 pc 规模射流。冠状区域和未解析射流都可能是中微子发射的来源，但结合前一节得出的结论，第一个成分占据主导地位，这表明冠状区域是最可能的中微子发射源。

为了更详细地描述 3C 403 的核辐射，我们分析了 2013 年同时进行的 Swift/XRT 和 NuSTAR 观测数据，并使用双幂律加上铁线进行了拟合（见附录中有关数据分析的详情，由 [40] 完成）。利用 XSPEC v.12.12.1 (Arnaud 等人, 1996) 进行 X 射线光谱分析，并将光谱按每束至少 20 计数进行了分箱处理以便使用 χ^2 统计；所有误差均在 90% 置信水平下给出（对于一个感兴趣的参数， $\Delta\chi^2=2.71$ ）。如表 3 所示，我们的结果与 Chandra 研究中发现的结果一致。假设两个幂律分量分别代表 3C 403 的冕和喷流辐射，我们首次能够同时在高能区域测量它们，并确认主要的幂律成分即使在更高能量下也大大超过了后者。作为进一步步骤，我们测试了宽频谱是否包含高能截止和反射成分，但数据并不需要这些成分的存在，从而得出截止能量的下限约为 50 keV 以及反射分数上限为 ~ 1.3 。这些发现与平坦的光子指数和相对较小的铁线 EW（等宽）

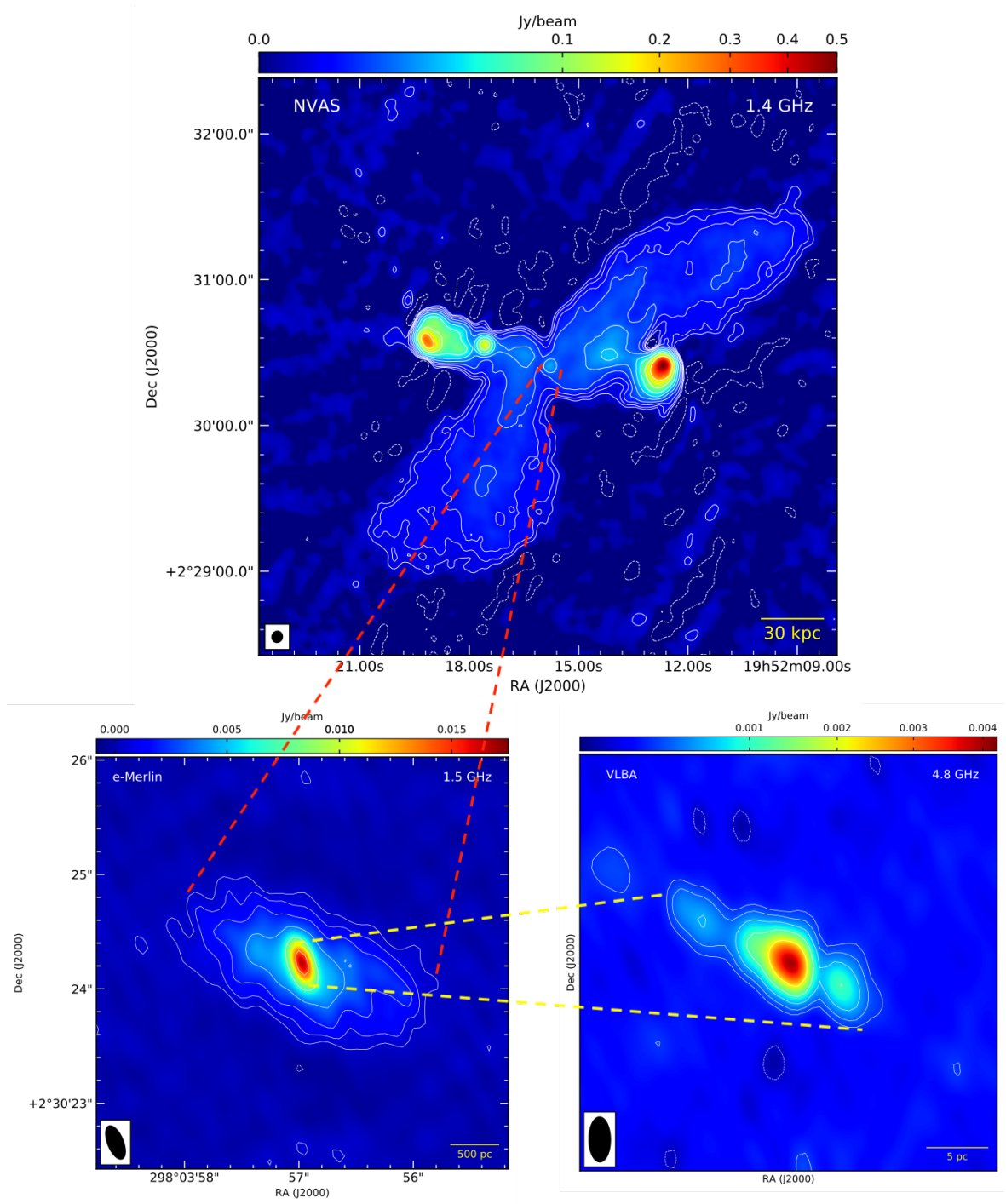


图 1. 3C 403 射电图像从千秒差距到秒差距尺度。顶部：档案 VLA 图像 (NVAS) 在 B 配置下 1.4 GHz 的频率，显示了源的翼状形态。底部左侧：e-Merlin 观测到的核心千秒差距，频率为 1.5 GHz。底部右侧：VLBA 观测到的核心 20 秒差距，频率为 4.6 GHz。喷流的位置角在所有图像中保持一致。

表 1. 软 X 射线通量和 3C 403 的吸收历史

Date	Telescope	$F_{2-10\text{keV}}$ $10^{-12}\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	N_{H} 10^{23}cm^{-2}
Dec. 2002	Chandra	1.1	4 ± 2
Oct./Nov. 2006	XRT	$1.30^{+2.63}_{-1.23}$	$2^{+2.7}_{-1.1}$
March 2008	XRT	$3.0^{+4}_{-1.54}$	$4.7^{+5.3}_{-2}$
June 2008	XRT	$2.23^{+2.34}_{-1.06}$	$2.8^{+2.3}_{-1.2}$
Apr. 2009	Suzaku	0.7	6^{+6}_{-5}
Apr. 2010	XMM Slew	7	NA
May 2013	XRT	$2.24^{+1.67}_{-1.04}$	$3.7^{+1.9}_{-1.2}$
June 2023	XRT	$2.03^{+2.76}_{-1.04}$	$0.9^{+1.7}_{-0.5}$

一致，并符合射电星系的 X 射线特性，后者通常表现出比普通 AGN 更不显著的反射特征（参见例如 [42–44]）。虽然快速/XRT 和 NuSTAR 数据代表了 2013 年源状态的快照，但积分/IBIS 和快速/BAT 的数据可以提供近二十年的时间段内的平均信息。对于 IBIS，我们分析了自己的数据，汇总了从 2003 年 3 月到 2024 年 9 月期间进行的观测：15–55 keV 光谱可以用一个简单的幂律 $\Gamma = 2.4 \pm 1.0$ 很好地描述，结果得到未被吸收的通量为 $1.8 \pm 0.4 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 。BAT 光谱¹，涵盖了稍有不同的时期（2004 年 12 月至 2017 年 12 月），提供了非常相似的结果（ $\Gamma = 1.8 \pm 0.2$ 以及 15–55 keV 的通量为 $1.2 \pm 0.2 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）。两者均与同一时期的单一光谱 NuSTAR 在同一频段（ $1.58 \pm 0.47 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ）一致，排除了硬 X 射线频段的变化。

为了检查变化是否出现在较低能量，我们收集了文献中的软 X 射线数据（2–10 千电子伏特）（见表 1），包括 2009 年采集的 Suzaku 数据结合快速/BAT[45] 以及 2010 年采集的 XMMslew 数据²。3C 403 在 2006 年至 2013 年间多次被快速/XRT 观测，最后一次是在 2023 年 6 月和 2024 年底。所有数据均按照附录中报告的方法进行处理，并按上述方法进行了分析。

在表 1 中，我们报告了 3C 403 的通量和吸收历史，列出了所有可用的测量值。如表格中所报导的数值所示，在考虑两个参数的大不确定性的情况下，该源无论是通量还是吸收特性都不表现出明显的变异性。所有的 2–10 keV 通量都与平均值 $3^{+1.1}_{-0.7} \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 相容，即类似于 NuSTAR 所测量的数值。此外， N_{H} 值与平均值 $3.4^{+1.3}_{-0.9}$ 原子每厘米⁻² 一致，这再次类似于 NuSTAR 的结果。这表明 3C 403 在 X 射线能量下的变化不大（两个参数的变化幅度不超过 30–40%），并且 XRT 和 NuSTAR 观测结果代表了该源的流量状态。

5 提出的硬 X 射线与中微子通量之间的相关性

如前所述，日冕环境已被指出可能是中微子的生产场所，特别是 [19] 预见是来自日冕的未被吸收的硬 X 射线通量与中微子通量之间的线性相关。最近的工作 [20] 收集了所有已知与中微子有关的类星体和塞佛特星系以测试这种情景。在图 3 中，我们重现了来自 [20] 的相同诊断图，并添加了 3C 403。对于硬 X 射线波段，我们从上述的 NuSTAR 数据中估计了 15–55 keV 的通量。值得注意的是，来自 ANTARES 的估计中微子通量（见附录 A.1），以及来自核光谱望远镜阵列的测量未被吸收通量（见第 4 节），将 3C 403 定位在样本中的两个类星体（TXS 0506+056 和 GB6 J1542+6129，在左下角）与赛弗特星系（右上角）之间的中间区域。尽管 3C 403 似乎落在图的预期区域内，但目前对中微子通量的上限并不能最终确认 3C 403 是否遵循 [20] 所提出的关联：未来的测量将能够对此得出更明确的结论。

¹<https://swift.gsfc.nasa.gov/results/bs105mon/>

²<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/xsa>

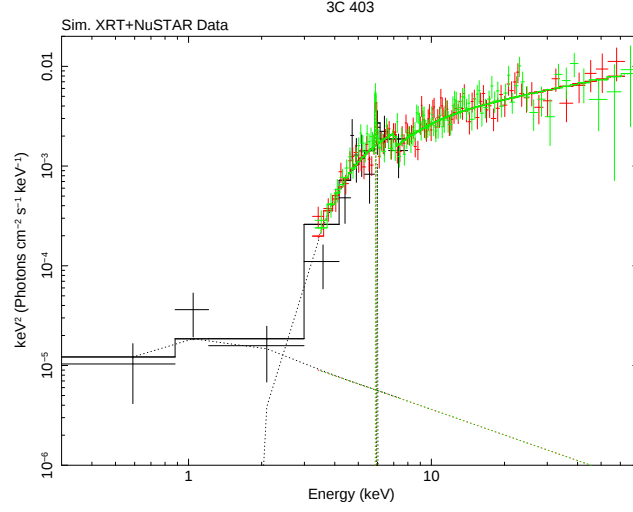


图 2. 同时进行的 Swift XRT/NuSTAR 光谱拟合宽频带观测结果的 3C 403。

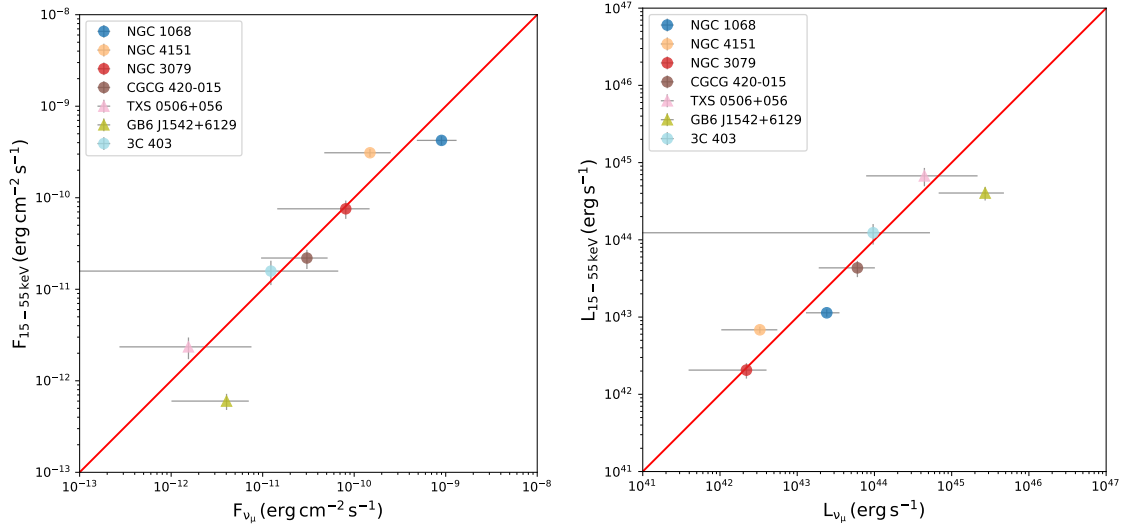


图 3. 来自 [20] 的图的改编，增加了 3C 403。样本中的两个耀变体 (TXS 0506+056 和 GB6 J1542+6129) 用三角形表示。

6 结论

我们分析了射电和高能属性的 3C 403，这是一个著名的射电星系，其与 ANTARES 探测到的中微子存在候选关联，探测时间跨度为 15 年。对射电数据的多尺度分析，从 kpc 到 pc 尺度，表明射流位于天空平面上，并且在其 $\sim$ 百万年活跃期内没有表现出进动迹象。该源在硬 X 射线目录和先前观测中被很好地探测到，表明其冕层发出的辐射。为了检验最近提出的中微子可以在冕层环境中产生，无论是否存在或射流方向的假设，我们将 3C 403 放置在预期中微子 (0.3-100 TeV) 和硬 X 射线 (15-55 keV) 通量之间的相关性上，发现该源位于类星体和赛弗特星系区域之间。然而，当前中微子通量的上限不允许进一步约束相关性。

由于 3C 403 是一个具有强大喷流且方向偏离观测者视线的 AGN，它代表了先前已知与中微子关联的对象（即，类星体或塞弗特星系）之间的中间案例，允许评估日冕在中微子产生中的作用。如果未来中微子设施确认这一点，3C 403 将成为第一个具有中微子关联的射电星系，为正确建模中微子产生机制提供至关重要的信息。

Acknowledgments

非 ANTARES 合作组成员的作者感谢该合作组提供 15 年数据收集结果的私人信息访问权限。感谢 Emma Kun 提供的有用讨论，并慷慨提供数据以重现她工作的图表。GB 感谢 GRACE 项目所获得的资金支持，该项目通过 Open Space 创新平台 (<https://ideas.esa.int>) 作为共同赞助研究协议选定并在欧洲空间局的 Discovery 计划下进行并由其资助（协议编号 4000142106/23/NL/MGu/my）。GB 感谢 Bando Ricerca Fondamentale INAF 2023 为项目“GRACE 项目：高能巨型射电星系及其活跃周期”提供的资金支持。JR 和 GB 感谢 ASI/INAF No. 2019-35.HH.0 下的积分的资金支持，以及欧盟 Horizon 2020 计划下 AHEAD2020 项目（资助协议号 871158）的资助。MF 感谢 Bando Ricerca Fondamentale INAF 2024 为 Guest Observer Grant“银道面的积分视图”提供的资金支持。国家射电天文台是美国国家科学基金会通过 Associated Universities, Inc. 合作协议运营的一个设施。这项工作使用了 Swinburne 大学技术软件相关器，该相关器作为澳大利亚重大国家级研究设施计划的一部分开发，并在许可下运行。e-MERLIN 是由曼彻斯特大学代表 STFC（英国研究与创新的一部分）在乔德雷尔班克天文台运营的国家设施。

A 观测与数据缩减

在以下内容中，我们报告了本工作中使用不同仪器的多波段数据详情。

A.1 ANTARES

弗朗什孔泰合作组织进行的中微子源搜索基于一种最大似然法，该方法利用了宇宙中微子和大气中微子在能量和空间聚类方面的差异。似然函数中的唯一自由参数是隐藏在数据中的信号事件数量，对于这个最佳估计值 $\hat{\mu}_{\text{sig}}$ 是通过最大化找到的。对于 3C 403 的情况，该方法给出了 $\hat{\mu}_{\text{sig}} = 2.47$ 对应于中微子能谱 $\propto E^{-2}$ 。信号事件数量和中微子通量通过以下方程相关：

$$n_s = \sum_{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau} \int A_{\text{eff}}^{\nu+\bar{\nu}}(E) \times \phi_0^{\nu+\bar{\nu}} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} dE, \quad (\text{A.1})$$

其中， $A_{\text{eff}}^{\nu+\bar{\nu}}$ 是给定中微子味道的探测器的有效面积，并且谱指数 γ 设为 2。因此，鉴于 ANTARES 拟合完全由类似轨迹的事件驱动，这些事件主要与 $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ 充电流相互作用相关，方程 (A.1) 可用于获得缪子中微子通量归一化 $\phi_{1\text{ TeV}}^{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} = 2.63 \cdot 10^{-12} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

能量集成的缪子中微子通量， $F_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}$ ，如图 3 中的 x 轴所示，可以直接通过以下方式获得：

$$F_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} = \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \phi_{1\text{ TeV}}^{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} \left(\frac{E}{1\text{ TeV}} \right)^{-2} \times E \times dE, \quad (\text{A.2})$$

其中 $E_{\text{max}} = 100 \text{ TeV}$ 和 $E_{\text{min}} = 0.3 \text{ TeV}$ 如同 Kun+25 所述。在完成适当的单位转换后，得到能量集成通量 $F_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} = 2.45 \cdot 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，并随后除以二来去除反中微子的贡献。由于其观测意义不高，ANTARES 合作组仅提供一个关于中微子通量的上限，该上限如图 3 所示，在水平误差线的右端极端处。

Telescope	Date (dd/mm/yyyy)	Frequency (GHz)	FWHM (mas×mas)	P.A. (deg)
e-Merlin	19/11/2022	1.5	310×138	22
	20/11/2022	5	95×41	21
VLBA	18/09/2021	4.8	3.1×1.5	0.5
	18/09/2021	8.4	1.8×0.9	-1.9
	18/09/2021	15	1.1×0.5	-1.4

表 2. 无线电观测日志。

A.2 e-MERLIN

2022 年 11 月 19 日至 20 日，在 CY14219 项目（首席研究员 Bruni）下，使用 e-Merlin 在 1.5GHz（L 波段）和 5GHz（C 波段）进行了观测。应用了相位参照方法，每个波段的总观测时间为大约 12 小时。数据使用 e-MERLIN 流水线 [46] 进行校准，并在 DIFMAP 中成像。获得的图像在 1.5GHz 时具有 240 μ Jy/束和 310×138 毫角秒（方位角 22 度）的角分辨率，而在 5GHz 时具有 45 μ Jy/束和 95×41 毫角秒（方位角 21 度）的角分辨率。

A.3 甚大阵列

我们从 NRAO VLA 档案调查（NVAS³）收集了档案数据。特别是，我们使用了 1994 年 6 月 10 日执行的 B 阵型 L 波段（1.5 GHz）观测。角分辨率为 4.56×4.19 角秒（P.A. -17 度），RMS 为 270 μ Jy/beam。

A.4 甚长基线干涉测量

甚长基线阵列（VLBA）于 2021 年 9 月 18 日在三个频率下进行了观测：5 GHz（C 频段），8 GHz（X 频段）和 15 GHz（Ku 频段）。总观测时间为 5.5 小时。应用了相位参照，使用 J1951+0134 作为校准源，而 3C 345 用作条纹寻找器。数据通过标准的 AIPS 程序进行处理。然后导出已校准的可见性，并在差分映射中生成图像。三个不同图像的角分辨率分别为：5 GHz 时为 3.1×1.5 毫角秒（方位角 0.5 度），8 GHz 时为 1.8×0.9 毫角秒（方位角 -1.9），以及 15 GHz 时为 1.1×0.5 毫角秒（方位角 -1.4 度）。均方根分别为 48 μ Jy/束，120 μ Jy/束，和 110 μ Jy/束。

A.5 积分/IBIS

分析的积分/IBIS 数据包括所有于 2003-03-09 开始并在 2024-09-26 结束的观测，在高能探测器的 12 γ 范围内，总计 2.9 兆秒。积分/IBIS[47] 数据使用由积分科学数据中心 [48] 发布的离线科学分析（OSA v11.2）软件进行处理。

A.6 核光谱望远镜阵列

NuSTAR 数据（来自两个焦平面探测器，FPMA 和 FPMB）使用努斯塔达斯 _04 月 21 日 _v2.1.1 和 CALDB 版本 20220118 进行了处理。对于 3C 403，在这项工作中，我们减少了 2013 年 5 月 25 日拍摄的观测 60061293002，其清洁曝光时间为 ~20 千秒；光谱提取以及随后生成响应文件和辅助文件的工作使用了新产品任务，并采用 ~40'' 的抽取半径以最大化信噪比；背景光谱则从探测器上无源区域中直径为 40'' 的圆形区域内提取。

³<https://www.vla.nrao.edu/astro/nvas/>

表 3. XRT-NuSTAR 宽带光谱分析

常数*吸收 [光子+吸收*(光子+中性介子)]	
N_H	$(22.24^{+3.55}_{-3.20}) \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$
Γ_{cont}	1.52 ± 0.09
Γ_{soft}	$2.85^{+1.96}_{-1.45}$
$E_{\text{Fe}} (k\alpha)$	$6.25 \pm 0.09 \text{ keV}$
EW	$201^{+92}_{-93} \text{ eV}$
F_{2-10}	$2.57 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
F_{20-100}	$1.85 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$\chi^2 (\text{d.o.f.})$	191.35 (189)

参考文献

- [1] IceCUBE COLLABORATION collaboration, *First observation of pev-energy neutrinos with icecube*, *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 021103.
- [2] I. Collaboration, M. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers et al., *Neutrino emission from the direction of the blazar txs 0506+056 prior to the icecube-170922a alert*, *Science* **361** (2018) 147 [<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aat2890>].
- [3] S. Gao, A. Fedynitch, W. Winter and M. Pohl, *Modelling the coincident observation of a high-energy neutrino and a bright blazar flare*, *Nature Astronomy* **3** (2019) 88 [[1807.04275](https://doi.org/10.1038/s41550-019-0427-5)].
- [4] S. Garrappa, S. Buson, A. Franckowiak, Fermi-LAT Collaboration, B.J. Shappee, J.F. Beacom et al., *Investigation of Two Fermi-LAT Gamma-Ray Blazars Coincident with High-energy Neutrinos Detected by IceCube*, *ApJ* **880** (2019) 103 [[1901.10806](https://doi.org/10.1086/315006)].
- [5] K. Mannheim and P.L. Biermann, *Photomeson production in active galactic nuclei.*, *A&A* **221** (1989) 211.
- [6] M.C. Begelman, B. Rudak and M. Sikora, *Consequences of Relativistic Proton Injection in Active Galactic Nuclei*, *ApJ* **362** (1990) 38.
- [7] K. Murase, D. Guetta and M. Ahlers, *Hidden cosmic-ray accelerators as an origin of tev-pev cosmic neutrinos*, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 071101.
- [8] K. Murase, S.S. Kimura and P. Mészáros, *Hidden cores of active galactic nuclei as the origin of medium-energy neutrinos: Critical tests with the mev gamma-ray connection*, *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) 011101.
- [9] A. Neronov, D. Savchenko and D.V. Semikoz, *Neutrino signal from a population of seyfert galaxies*, *Phys. Rev. Lett.* **132** (2024) 101002.
- [10] K. Murase, *Hidden hearts of neutrino active galaxies*, *The Astrophysical Journal Letters* **941** (2022) L17.
- [11] Y. Inoue, D. Khangulyan and A. Doi, *On the Origin of High-energy Neutrinos from NGC 1068: The Role of Nonthermal Coronal Activity*, *ApJ* **891** (2020) L33 [[1909.02239](https://doi.org/10.1086/315006)].
- [12] A. Kheirandish, K. Murase and S.S. Kimura, *High-energy Neutrinos from Magnetized Corone of Active Galactic Nuclei and Prospects for Identification of Seyfert Galaxies and Quasars in Neutrino Telescopes*, *ApJ* **922** (2021) 45 [[2102.04475](https://doi.org/10.1086/315006)].
- [13] A. Das, B.T. Zhang and K. Murase, *Revealing the Production Mechanism of High-energy Neutrinos from NGC 1068*, *ApJ* **972** (2024) 44 [[2405.09332](https://doi.org/10.1086/315006)].
- [14] R. Mbarek, A. Philippov, A. Chernoglazov, A. Levinson and R. Mushotzky, *Interplay between*

accelerated protons, x rays and neutrinos in the corona of NGC 1068: Constraints from kinetic plasma simulations, *Phys. Rev. D* **109** (2024) L101306 [2310.15222].

- [15] D.F.G. Fiorillo, L. Comisso, E. Peretti, M. Petropoulou and L. Sironi, *The contribution of turbulent AGN coronae to the diffuse neutrino flux*, *arXiv e-prints* (2025) arXiv:2504.06336 [2504.06336].
- [16] D.F.G. Fiorillo, M. Petropoulou, L. Comisso, E. Peretti and L. Sironi, *TeV Neutrinos and Hard X-Rays from Relativistic Reconnection in the Corona of NGC 1068*, *ApJ* **961** (2024) L14 [2310.18254].
- [17] D.F.G. Fiorillo, L. Comisso, E. Peretti, M. Petropoulou and L. Sironi, *A Magnetized Strongly Turbulent Corona as the Source of Neutrinos from NGC 1068*, *ApJ* **974** (2024) 75 [2407.01678].
- [18] D.F.G. Fiorillo, F. Testagrossa, M. Petropoulou and W. Winter, *Can the neutrinos from TXS 0506+056 have a coronal origin?*, *arXiv e-prints* (2025) arXiv:2502.01738 [2502.01738].
- [19] K. Murase and E. Waxman, *Constraining high-energy cosmic neutrino sources: Implications and prospects*, *Phys. Rev. D* **94** (2016) 103006.
- [20] E. Kun, I. Bartos, J.B. Tjus, P.L. Biermann, A. Franckowiak, F. Halzen et al., *Possible correlation between unabsorbed hard x rays and neutrinos in radio-loud and radio-quiet active galactic nuclei*, *Phys. Rev. D* **110** (2024) 123014 [2404.06867].
- [21] I. Taboada and R. Stein, *IceCube-190730A an astrophysical neutrino candidate in spatial coincidence with FSRQ PKS 1502+106*, *The Astronomer’s Telegram* **12967** (2019) 1.
- [22] M. Kadler, F. Krauß, K. Mannheim, R. Ojha, C. Müller, R. Schulz et al., *Coincidence of a high-fluence blazar outburst with a PeV-energy neutrino event*, *Nature Physics* **12** (2016) 807 [1602.02012].
- [23] R. Abbasi, M. Ackermann, J. Adams, S.K. Agarwalla, J.A. Aguilar, M. Ahlers et al., *IceCube Search for Neutrino Emission from X-ray Bright Seyfert Galaxies*, *arXiv e-prints* (2024) arXiv:2406.07601 [2406.07601].
- [24] L. Bassani, T. Venturi, M. Molina, A. Malizia, D. Dallacasa, F. Panessa et al., *Soft γ -ray selected radio galaxies: favouring giant size discovery*, *MNRAS* **461** (2016) 3165 [1606.05456].
- [25] A. Albert, M. André, M. Anghinolfi, G. Anton, M. Ardid, J.J. Aubert et al., *ANTARES Search for Point Sources of Neutrinos Using Astrophysical Catalogs: A Likelihood Analysis*, *ApJ* **911** (2021) 48 [2012.15082].
- [26] S. Alves Garre, *Search for the Origin of Cosmic Rays with the ANTARES Neutrino Telescope*, Ph.D. thesis, Univesidad de Valencia, 2025.
- [27] A. Tarchi, C. Henkel, M. Chiaberge and K.M. Menten, *Discovery of a luminous water megamaser in the FR II radiogalaxy 3C 403*, *A&A* **407** (2003) L33 [astro-ph/0307068].
- [28] A. Tarchi, A. Brunthaler, C. Henkel, K.M. Menten, J. Braatz and A. Weiß, *The innermost region of the water megamaser radio galaxy 3C 403*, *A&A* **475** (2007) 497 [0709.3417].
- [29] F. Panessa, P. Castangia, A. Malizia, L. Bassani, A. Tarchi, A. Bazzano et al., *Water megamaser emission in hard X-ray selected AGN*, *A&A* **641** (2020) A162 [2006.08280].
- [30] A. Lien, H. Krimm, C. Markwardt, N. Collins, S. Barthelmy, K. Oh et al., *The BAT 157 month survey catalog and beyond*, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, vol. 241 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, p. 254.07, Jan., 2023.
- [31] A.J. Bird, A. Bazzano, A. Malizia, M. Fiocchi, V. Sguera, L. Bassani et al., *The ibis soft gamma-ray sky after 1000 integral orbits**, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **223** (2016) 15.
- [32] S. Abdollahi, F. Acero, L. Baldini, J. Ballet, D. Bastieri, R. Bellazzini et al., *Incremental fermi large area telescope fourth source catalog*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **260** (2022) 53.
- [33] C.C. Cheung, *FIRST “Winged” and X-Shaped Radio Source Candidates*, *AJ* **133** (2007) 2097 [astro-ph/0701278].

- [34] L. Saripalli and D.H. Roberts, *What Are “X-shaped” Radio Sources Telling Us? II. Properties of a Sample of 87*, *ApJ* **852** (2018) 48 [[1710.01652](#)].
- [35] M.C. Begelman, R.D. Blandford and M.J. Rees, *Massive black hole binaries in active galactic nuclei*, *Nature* **287** (1980) 307.
- [36] W.D. Cotton, K. Thorat, J.J. Condon, B.S. Frank, G.I.G. Józsa, S.V. White et al., *Hydrodynamical backflow in X-shaped radio galaxy PKS 2014-55*, *MNRAS* **495** (2020) 1271 [[2005.02723](#)].
- [37] P. Parma, R.D. Ekers and R. Fanti, *High resolution radio observations of low luminosity radio galaxies.*, *A&AS* **59** (1985) 511.
- [38] K.H. Mack, L. Gregorini, P. Parma and U. Klein, *High-frequency radio continuum observations of radio galaxies with low and intermediate luminosity. II. Sources with sizes 4' to 5'*, *A&AS* **103** (1994) 157.
- [39] J. Dennett-Thorpe, P.A.G. Scheuer, R.A. Laing, A.H. Bridle, G.G. Pooley and W. Reich, *Jet reorientation in active galactic nuclei: two winged radio galaxies*, *MNRAS* **330** (2002) 609 [[astro-ph/0110339](#)].
- [40] R.P. Kraft, M.J. Hardcastle, D.M. Worrall and S.S. Murray, *A Chandra Study of the Multicomponent X-Ray Emission from the X-shaped Radio Galaxy 3C 403*, *ApJ* **622** (2005) 149 [[astro-ph/0501031](#)].
- [41] M.J. Hardcastle, J.H. Croston, T.W. Shimwell, C. Tasse, G. Gürkan, R. Morganti et al., *Ngc 326: X-shaped no more*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **488** (2019) 3416 [<https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/488/3/3416/29025886/stz1910.pdf>].
- [42] M. Molina, M. Giroletti, A. Malizia, R. Landi, L. Bassani, A.J. Bird et al., *Broad-band X-ray spectrum of the newly discovered broad-line radio galaxy IGR J21247+5058*, *MNRAS* **382** (2007) 937 [[0709.1895](#)].
- [43] D.J. Walton, E. Nardini, A.C. Fabian, L.C. Gallo and R.C. Reis, *Suzaku observations of ‘bare’ active galactic nuclei*, *MNRAS* **428** (2013) 2901 [[1210.4593](#)].
- [44] J. Kang, J. Wang and W. Kang, *NuSTAR Hard X-Ray Spectra of Radio Galaxies*, *ApJ* **901** (2020) 111 [[2008.03293](#)].
- [45] F. Tazaki, Y. Ueda, Y. Terashima and R.F. Mushotzky, *Suzaku View of the Swift/BAT Active Galactic Nuclei. IV. Nature of Two Narrow-line Radio Galaxies (3C 403 and IC 5063)*, *ApJ* **738** (2011) 70 [[1106.2942](#)].
- [46] J. Moldon, “eMCP: e-MERLIN CASA pipeline.” Astrophysics Source Code Library, record ascl:2109.006, Sept., 2021.
- [47] P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A.J. Bird, K. Broenstad et al., *IBIS: The Imager on-board INTEGRAL*, *A&A* **411** (2003) L131.
- [48] T.J.L. Courvoisier, R. Walter, V. Beckmann, A.J. Dean, P. Dubath, R. Hudec et al., *The INTEGRAL Science Data Centre (ISDC)*, *A&A* **411** (2003) L53 [[astro-ph/0308047](#)].