

Rádiósugárzás eredete halvány extragalaktikus rádióforrásokban

1. Bevezetés

Doktori kutatásom célja a TeV-sugárzó aktív galaxismagok (active galactic nuclei, AGN) (Urry és Padovani 1995) halvány rádiósugárzásának vizsgálata nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (very long baseline interferometry, VLBI) (Walker 1999) technikával, amely ezred-ívmásodperces felbontásának köszönhetően lehetővé teszi a rádiósugárzás eredetének meghatározását. Balmaverde és tsai. 2020 összeállítottak egy mintát, ami feltételezhetően a készülő Cserenkov Teleszkóp Hálózattal (Cherenkov Telescope Array, CTA Knödlseider 2020) detektálható TeV-sugárzó AGN-eket tartalmaz. Két célforrásról állnak rendelkezésemre Európai VLBI hálózattal (EVN) és az enhanced Multi Element Remotely Linked Interferometer hálózattal (e-MERLIN) mért adatok 1,7 GHz és 5 GHz frekvenciákon. Kutatásom részeként ezeket vizsgáltam különös tekintettel a jet-eredet igazolására és a CTA detektálhatóság becslésére.

2. Az előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése

A vizsgálatokhoz a National Radio Astronomical Observatory (AIPS, Greisen 1990) és a Difmap (Shepherd 1997) szoftvercsomagokat használtam, illetve a CASA programmal (CASA Team és tsai. 2022) is megkezdtem az adatok feldolgozását.

Először elvégeztem a rendelkezésemre álló EVN és e-MERLIN mérések kalibrálását, kezdeti korrekcióit. Ezek után CLEAN algoritmussal és Gauss modell illesztéssel készítettem térképeket. Ezen adatok segítségével kiszámítottam a források fényességi hőmérsékletét, rádioluminozitását és spektrálindeket. Az értékek alapján mindkét vizsgált célforrás esetén valószínűsíthető az AGN eredet.

Pozícióanalízis keretében a VLBI-intenzitásmaximum helyét összevetettük Gaia DR3 (Gaia Collaboration és tsai. 2023) és Sloan Digital Sky Survey (SDSS, Ahumada és tsai. 2020) optikai katalógusok adataival. A J1832+5302 forrás esetén jelentős asztrometriai zajt tapasztaltunk, a J1519+2053 forráshoz nem találtunk Gaia galaxist, de van egy optikai megfelelője az SDSS-ben. Ez a galaxis kelet-nyugati irányban elnyúlt, csak úgy, mint az általunk mért forrás 5 GHz-es szerkezete. Továbbá a VLBI mérésből kapott fluxussűrűség adatokat összevetettük korábbi rádiómérésekkel (NRAO VLA Sky Survey (NVSS, Condon és tsai. 1998) és Very Large Array Sky Survey (VLASS, Gordon és tsai. 2021)). A tapasztalható fluxushány feltehetően arra utal, hogy az alacsonyabb felbontással tapasztalható többlet fluxus ~ 750 mas-nál nagyobb területről származik, ami az általunk használt hálózat által felbontható legnagyobb méret.

A doktori kutatásom további részeként megkezdtem egy másik AGN minta feldolgozását, ahol a blazár-jelöltek besorolását az Ausztrál LBA (Long Baseline Array) VLBI-mérések segítségével vizsgálom.

3. Az aktuális félévben végzett kutatás

Ebben a félévben további 6 archív VLBI-méréssel rendelkező forrás vizsgálatát végeztem el. Ehhez a Difmap rádiócsillagászati szoftvert használtam, a passzívnak mutató mintához hasonlóan modelleztem a rádiósugárzó objektumok fényességeloszlását. A mérési adatok számszerűsítése érdekében Gauss modellkomponenseket illesztettem és a kapott értékekből kiszámítottam a fényességi hőmérsékletet. Ez alapján megállapítható, hogy egyik objektum esetében sem tapasztalunk Doppler-erősítést, viszont a fényességi hőmérséklet mindegyik objektum esetén nagyságrendekkel meghaladja az aktív galaxismagot nem tartalmazó galaxisokra empirikusan felállított határértéket. Az egyik forrás esetén (J1215+0732, 1. ábra) több epochában és frekvenciatartományban is elérhetőek voltak mérések, megkísértem következtetéseket levonni a rádiószerkezet és fluxussűrűség időbeli változásából. A többi 5 objektum a vizsgált frekvenciatartományokban kompaktnak mutatkozott. Mind a 6 forrás esetén hibán belül megfeleltethető az archív VLBI mérésből kapott pozíció a GAIA DR3 optikai katalógusban szereplő értékkel.

Különböző rádiómérések segítségével vizsgáltam a források spektrumát. A VLBI és az alacsony felbontású mérések is az AGN eredetű rádiósugárzásra utaló lapos spektrálindeket adtak 2.

Mind a 6 forrást detektálta a Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE, Wright és tsai. 2019) is, aminek segítségével lehetőség nyílt arra, hogy az infravörös színük alapján is megvizsgáljam, hogy AGN-ként azonosíthatóak-e. Ahogy az 3. ábrán látható, különböző kiválasztási kritériumokat figyelembe véve nem mindegyik objektum azonosítható egyértelműen AGN-ként az infravörös sugárzásuk alapján. Rendelkezésre álló röntgen-mérések alapján ezen források esetén is kiszámolom a rádió-röntgen luminozitás arányt. Az eredményeinket összefoglaló cikk várhatóan a hetekben kerül beküldésre.

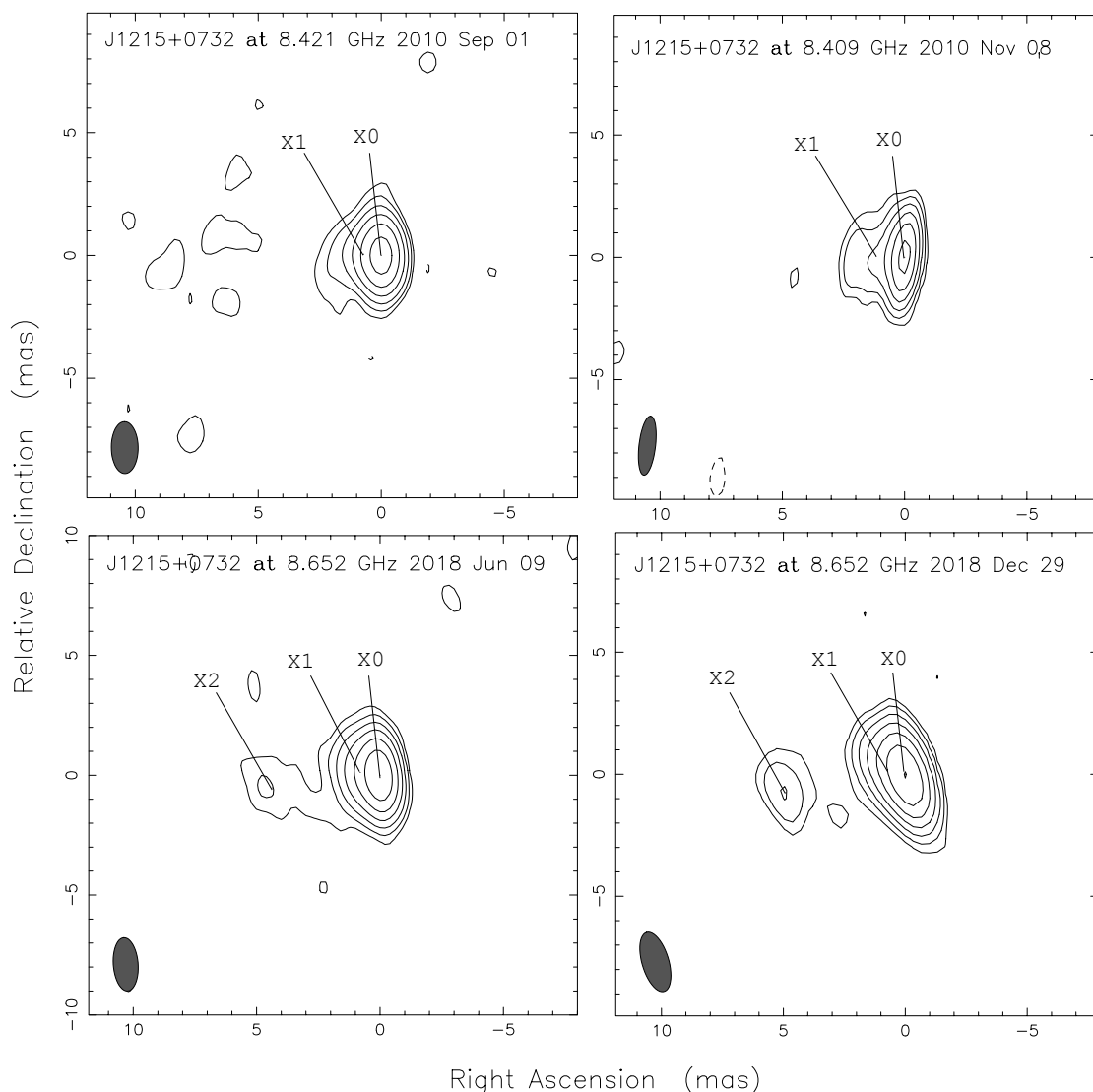
2025 Áprilisában elfogadták a vezetésemmel beadott távcsőidő kérelmünket az EVN és az e-MERLIN hálózatokkal további 4 darab Te-REX rádióforrásra. A mérések időpontjáról még nincs információm.

4. Publikáció

- **Kőmíves J.**, Gabányi K., Frey S., Kun E. (2023) VLBI Analysis of a Potential High-energy Neutrino Emitter Blazar UNIVERSE (2218-1997): 10 2 Paper 78. (2024) <https://www.mdpi.com/2218-1997/10/2/78>
- **Kőmíves J.**, Gabányi K., Frey S., Paragi Z., An T., Kun E. (2024) High-resolution radio observations of TeV candidate sources, Proceedings of the 16th EVN Symposium, Ed. E. Ros, P. Benke, S.A. Dzib, I. Rottmann, & J.A. Zensus, Bonn:Max-Planck-Institut für Radioastronomie, (2024) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.03097>
- Hamarosan beküldésre kerül egy cikkünk a feltehetően TeV-sugárzó aktív galaxismagokról, VLBI technika segítségével folytatott kutatásunk eredményeiről.

5. Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

- FIZ/5/044 - (Exo)Bolygó légkörök szeminárium II. (Forgácsné Dr. Dajka Emese Zelmira, Dr. Kiss Csaba)
- FIZ/5/027 - Csillagrendszerek dinamikája I. (Dr. Balázs Lajos György)



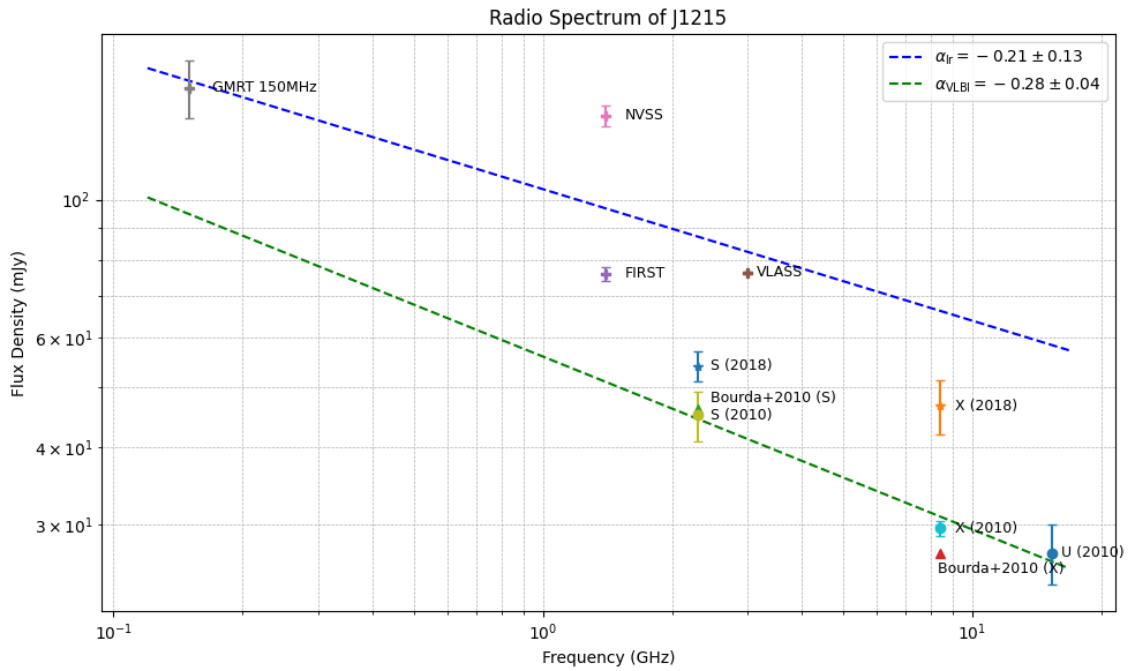
1. ábra. VLBI térképek a J1215 forrásról, 8 GHz frekvencián, a 4 különböző epochában.

6. Konferenciák a képzés alatt

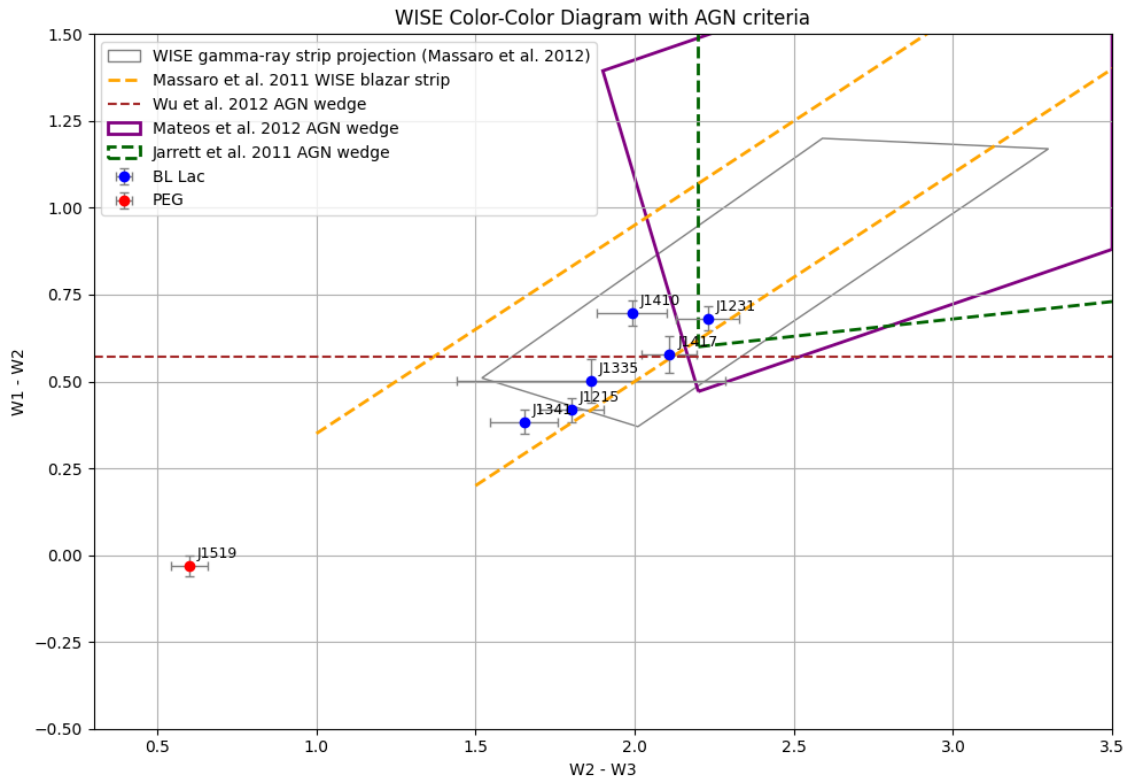
- Részt vettem az ERIS2024 egyhetes rádióinterferometria iskolán Granadában.
- Eddigi eredményeim poszter formájában bemutatásra kerültek a 2024 őszén Bonn-ban megrendezésre kerülő EVN Szimpóziumon.
- Hallgatóként részt vettem a Lectures on Modern Scientific Programing 2024 konferencián a Wigner Kutatóközpontban.
- Előadóként részt vettem a 2025-ös „31st Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (online tartott) konferencián, ahol bemutattam a készülő cikkem eredményeit.

7. Egyéb tanulmányi tevékenység a képzés alatt

- Részt vettem az ELTE TTK felvételi nyíltnapján (2023.12.12) a csillagász specializáció és mesterképzés népszerűsítésében.



2. ábra. J1215 forrás rádió spektruma, α_{VLBI} és α_{lr} jelölik a 2010-es archív VLBI mérésekből és az alacsony frekvenciás adatokból illesztett spektráindexeket.



3. ábra. A $[3,4]$ - $[4,6]$ - $[12]\mu\text{m}$ WISE szín-szín diagram különböző AGN kiválasztási kritériumokkal. A kék pontok jelölik az archív BL Lac forrásokat, a piros pont pedig azt a látszólag passzív elliptikus galaxist a Te-REX mintából, amiről rendelkezésre álltak infravörös mérések. Az értékek mindkét tengelyen magnitúdóban értendők.

- Részt vettem a Joint Institute for Very Long Baseline Interferometry European Research Infrastructure Consortium (JIVE) EVN hálózat használatáról szóló online képzésen

- A mesterszakos kutatásom eredményeit előadtam a Kovács Tamás és Frei Zsolt szervezésében heti rendszerességgel megvalósuló Astrophysics pizza lunch alkalmával.
- Planetáriumi bemutatót tartottam nyáron az Eötvös természettudományos tábor keretein belül középiskolás hallgatóknak.
- A 2024-es Kutatók éjszakáján planetáriumi előadásokat tartottam és segítettem a távcsöves bemutatónál.

8. Oktatási tevékenység a képzés alatt

- ft2mermeg0g17ga - Mérések és megfigyelések csillagászat gyakorlat - $3 \times 1,5$ óra planetáriumi gyakorlat (tárgyfelelős: Dr. Székely Balázs) (1. és 3. szemeszter)
- cseszlgylg17ga - Csillagászati észlelési gyakorlatok 1. - heti 1,5 óra planetáriumi gyakorlat (tárgyfelelős: Szentirmayné Gabányi Krisztina Éva) (2. szemeszter)

Hivatkozások

- Ahumada, Romina és tsai. (2020. júl.). „The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra”. 249.1, 3, 3. old. DOI: [10.3847/1538-4365/ab929e](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab929e). arXiv: [1912.02905](https://arxiv.org/abs/1912.02905) [astro-ph.GA].
- Balmaverde, B. és tsai. (2020. márc.). „Te-REX: a sample of extragalactic TeV-emitting candidates”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 492.3, 3728–3741. old. DOI: [10.1093/mnras/stz3532](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3532). arXiv: [1912.07613](https://arxiv.org/abs/1912.07613) [astro-ph.HE].
- CASA Team és tsai. (2022. nov.). „CASA, the Common Astronomy Software Applications for Radio Astronomy”. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 134.1041, 114501, 114501. old. DOI: [10.1088/1538-3873/ac9642](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac9642). arXiv: [2210.02276](https://arxiv.org/abs/2210.02276) [astro-ph.IM].
- Condon, J. J. és tsai. (1998. máj.). „The NRAO VLA Sky Survey”. 115.5, 1693–1716. old. DOI: [10.1086/300337](https://doi.org/10.1086/300337).
- Gaia Collaboration és tsai. (2023. jún.). „Gaia Data Release 3. The extragalactic content”. 674, A41, A41. DOI: [10.1051/0004-6361/202243232](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243232). arXiv: [2206.05681](https://arxiv.org/abs/2206.05681) [astro-ph.GA].
- Gordon, Yjan A. és tsai. (2021. aug.). „A Quick Look at the 3 GHz Radio Sky. I. Source Statistics from the Very Large Array Sky Survey”. 255.2, 30, 30. old. DOI: [10.3847/1538-4365/ac05c0](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac05c0). arXiv: [2102.11753](https://arxiv.org/abs/2102.11753) [astro-ph.GA].
- Greisen, E. W. (1990. jan.). „The Astronomical Image Processing System.” *Acquisition, Processing and Archiving of Astronomical Images*, 125–142. old.
- Knödseder, J. (2020. ápr.). „The Cherenkov Telescope Array”. *arXiv e-prints*, arXiv:2004.09213, arXiv:2004.09213. DOI: [10.48550/arXiv.2004.09213](https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.09213). arXiv: [2004.09213](https://arxiv.org/abs/2004.09213) [astro-ph.IM].
- Shepherd, M. C. (1997. jan.). „Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging”. *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*. Szerk. Gareth Hunt és Harry Payne. 125. köt. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 77. old.
- Urry, C. Megan és Paolo Padovani (1995. szept.). „Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei”. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 107, 803. old. DOI: [10.1086/133630](https://doi.org/10.1086/133630).
- Walker, R. C. (1999. jan.). „Very Long Baseline Interferometry”. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II*. Szerk. G. B. Taylor, C. L. Carilli és R. A. Perley. 180. köt. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 433. old.
- Wright, Edward L. és tsai. (2019. jan.). *AllWISE Source Catalog*. DOI: [10.26131/IRSA1](https://doi.org/10.26131/IRSA1).