

ÚT A TÖBBCSATORNÁS CSILLAGÁSZAT ÉS ASZTROFIZIKA VILÁGÁBA

Kun Emma

Fizikai és Csillagászati Kar,
Plazma-Asztrorészecske Fizikai (TP4) és Csillagászati Intézetek,
Ruhr Egyetem, Bochum, Németország

Egyetemi évek

Egyetemi tanulmányaimat 2005-ben kezdtem a Szegedi Tudományegyetem akkori Természettudományi Karának osztatlan csillagász szakán. Szinte már a kezdetektől érdekelt a kutatói munka. Szakgazdánk, *Szatmáry Károly* javaslatára RR Lyrae típusú pulzáló változócsillagok fotometriai megfigyeléseit végeztem a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es Newton-teleszkópjával.

Csillagász nyári gyakorlat keretében 2008 augusztusában két hetet töltöttem az akkori Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillag-

szati Kutatóintézetében (MTA KTM CSKI), ahol *Jurcsik Johanna* témavezetésével RR Lyrae változócsillagokat figyeltem meg az Intézet 60 cm-es Newton-távcsövével, fénygörbéikben Blazskó-effektusra utaló moduláció jeleit keresve.

Ezután *Székelly Péter* (SZTE TTK Kísérleti Fizikai Tanszék) témavezetésével az NGC 6834 nyílthalmaz fotometriai vizsgálatával foglalkoztam. Eredményeimet először 2010 őszén a helyi TDK, majd 2011 tavaszán a XXX. OTDK keretében mutattam be, ahol megkaptam a Magyar Csillagászati Alapítvány észlelői különdíját.

Diplomamunkámat Jurcsik Johanna témavezetésével végeztem az MTA KTM CSKI-ben, 2010–2011-ben. A téma gömbhalmazbeli RR Lyrae csillagok fénygörbéinek spektrofotometriája, az $[\text{Fe}/\text{H}]-(P, \varphi_{31})$ „vasformula” ellenőrzése volt. Egyrészt fémszegény gömbhalmazbeli, RRab típusú változócsillagok archív fénygörbéinek Fourier-felbontását végeztem el, másrészt feldolgoztam az extrém fémszegény M15 gömbhalmazról felvett piszkésetői archív CCD-méréseket, majd elvégeztem a gömbhalmazban található RR Lyrae csillagok fénygörbéjének analízisét. Közben bekapcsol-



Kun Emma 2012-ben kapott csillagász diplomát, 2017-ben pedig doktori fokozatot szerzett a Szegedi Tudományegyetemen. Junior Prima-díjas csillagász (2018). Az MTA Prémium Posztdoktori ösztöndíja (ELKH CSFK KTM CSD) zárását követően a Ruhr Egyetem Bochum (Németország) DFG és Humboldt Alapítvány ösztöndíjasa (2022–). Fő kutatási területe az aktív galaxisok többcsatornás csillagászata és asztrofizikája.

lódtem az MTA KTM CSKI *Konkoly Blazhko Survey* munkájába (PI Jurcsik Johanna), valamint többször végeztem gömbhalmaz-megfigyeléseket is a Piszkestetői Observatóriumban. Diplomamunkámat végül jeles minősítéssel védtem meg, 2012 januárjában.

PhD-s és predoktori évek

A történet ezen fejezete a 2011 őszén hallgatott *Relativisztikus asztrofizika* kurzussal indul. Oktatónk három témakört jelölt ki, amelyek kapcsán beadandó dolgozatot kellett készítenünk: akkréció, mágnesség vagy relativisztikus részecskenyalábok témájában. Én az utóbbit választottam. A téma feldolgozása és a beadandó megírása közben tetszett meg az aktív galaxismagok és részecskenyalábjaik világa, amellyel gyakorlatilag azóta is foglalkozom.

A 2012 szeptemberében kezdődő doktori munkám fő témája már az összeolvadó szupernagy tömegű feketelyuk-kettősök jeleinek keresése volt, rádióhangos aktív galaxismagok (active galactic nuclei, AGN) részecskenyalábjaiban. A doktori témámon *Gergely Árpád László* (SZTE TTIK Elméleti és Kísérleti Fizikai Tanszékek) elméleti fizikus témavezetésével és *Gabányi Krisztina* (akkor MTA CSFK KTM CSI, most ELTE Csillagászati Tanszék és ELKH CSFK KTM CSI) rádiócsillagász társ-témavezetésével dolgoztam. Egyszerre kellett kutatási témámat megérteni és művelni egy rádiócsillagász és egy elméleti fizikus szemszögéből is, ami igen hasznos tréningnek bizonyult. Doktori munkámban egyrészt AGN-nyalábok akár több évtizedet átfogó nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) módszerével készült észleléseit dolgoztam fel, másrészt modellt dolgoztam ki feketelyuk-kettős által perturbált aktív galaxismag nyalábalakja idő- és térbeli változásának leírására, és ezt teszteltem a kielemezett nyalábstruktúrákon [1, 2]. A doktori munka kapcsán említtem *Frey Sándor* rádiócsillagászt is (akkor Kozmikus Geodéziai Observatórium, most ELKH CSFK KTM CSI). Vele és a PhD témavezetőimmel is a mai napig együttműködünk.

Erasmus-ösztöndíjas hallgatóként 2013-ban négy hónapot töltöttem az Argelander-Institute für Astronomie intézetben, ami a bonni Rheinische Friedrich Wilhelm Universität csillagászati tanszéke Németországban. Itt angol nyelven tanultam magneto- és hidrodinamikát, gravitációs lencsézést, kozmológiát, valamint galaktikus és extragalaktikus mágnességet. Ebben az időben indultak el együttműködéseim a bonni Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) több kollégájával is. Kiemelem *Silke Britzen* és *Peter L. Biermann* kutatókat, akikkel a mai napig szorosan együttműködünk változatos témákon dolgozva.

2015 májusában és júniusában másfél hónapot töltöttem újfent a bonni MPIfR intézetben, a Balassi Intézet–Campus Hungary ösztöndíjasaként. A téma AGN-

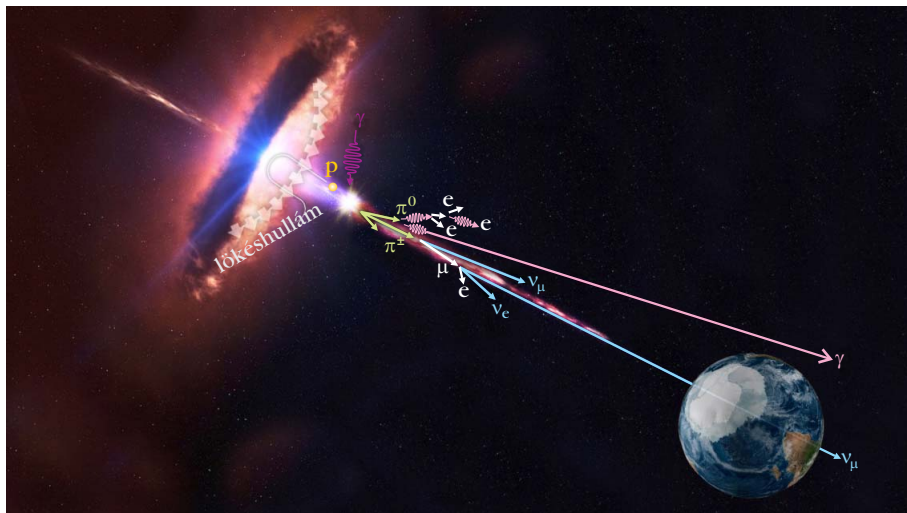
nyalábok VLBI-megfigyeléseinek feldolgozása, valamint a mérési eredmények alapján a nyalábszerkezet morfológiai és kinematikai vizsgálata volt. Habár az AGN-nyalábok részecskefizikája már korábban is érdekelt [3], ezen bonni látogatásom kapcsán kezdtem el az antarktiszi IceCube Neutrínóobszervatóriumban detektált nagy energiájú neutrínók égi forrásainak azonosításával foglalkozni. Az asztrofizikai neutrínók fontosságát főként az adja, hogy a kozmikus sugarakkal és nagy energiájú gamma-fotonokkal ellentétben az Univerzum legtávolabbi szegleteiből is észlelhetjük azokat, ezzel lehetővé téve energikus kozmikus részecskegyorsítók égi pozícióinak meghatározását. A nagyenergiás neutrínócsillagászat az egyik legfiatalabb csillagászati ág, hiszen az asztrofizikai neutrínófluxust először csupán bő egy évtizede detektálta az IceCube [4]. A kozmikus neutrínók eredetéről és detektálásukról írt összefoglaló cikkem a *Fizikai Szemlében* jelent meg [5].

2016 elejére datálható a bochumi (Németország) Ruhr Egyetem Elméleti Fizika IV tanszékét vezető *Julia Becker Tjus*-szal és csoportjával való együttműködésünk kezdete. A tanszék kutatási palettája igen csak sokszínű, fő csoportjaik a Plazma- és Asztrórészecske-fizika (én ide kapcsolódtam be), Űr- és Asztrofizika, valamint Heliofizika csoportok.

Szupernagy tömegű fekete lyuk kettősökre utaló jelek rádió-hangos aktív galaxismagok jeteiben címmel írt doktori értekezésem 2017 májusában summa cum laude minősítéssel védtem meg. A doktori fokozat megszerzése után folytattam munkám az SZTE TTIK Fizikai Intézetében, amelynek 2017 és 2019 között közkapcsolati felelőse voltam. Többek között oktatási roadshow-kat, TTIK napot, Fizika Napját szerveztünk.

Szegedi posztdoktori évek

A doktori fokozat megszerzése után folytattam a periodikus AGN-részecskenyalábokkal foglalkozó kutatásokat [6], illetve fő témám ekkor már neutrínóforrás-jelölt blazárok VLBI rádiócsillagászati vizsgálata volt [7, 8]. *A blazárok részecskenyalábjaikat a Föld felé irányító aktív galaxismagok, extragalaktikus rádió-, optikai, röntgen- és némely esetben gamma-források. Két alcsoportjukat különböztetjük meg, a Bl Lacertae objektumokat és a lapos-spektrumú rádió kvazárokat.* A blazár-részecskenyalábokban felgyorsított kozmikus sugarak kölcsönhatnak a környező gázzal és/vagy sugárzási térrel (*1. ábra*), nagy energiájú neutrínók emissziójához vezetve [9, 10]. Az akkor még egyetlen azonosított IceCube-neutrínóforrás, a TXS 0506+056 blazár [11, 12] VLBI-nyalábszerkezetét vizsgálva arra a következtetésre jutottunk [13], hogy a látóiránnyal extrém kis szöget bezáró nyalábirány kulcsfontosságú a neutrínóemisszió magyarázatához.



IceCube által detektált diffúz neutrínóégbolt alapján vár-nánk ($E < 100$ TeV energiá-kon). Habár a blazár-részecs-kenyalábok minden tekintet-ben ideális kozmikus részecs-kegyorsítók és a Fermi gam-ma-égbolt domináns forrásai, a blazárok az IceCube diffúz neutrínóháttér szubdomináns forrásai. Hosszú távú kutatási céljaink egyike ezen feszültség feloldása. MTA PPD posztdok-tori témában állandó kollabo-rátoraim (ábécé-sorrendben): *Bartos Imre* (Floridai Egye-tem, USA), *Julia Becker-Tjus* és csoportja (Ruhr-Egyetem Bochum, Németország), *Peter L. Biermann* (MPIfR, Bonn, Németország), *Francis Hal-zen* (University of Wisconsin, USA), *Anna Franckowiak* és csoportja (Ruhr Egyetem Bo-chum, Németország).

2020 tavaszán elsajátítot-tam a Fermi-űrtávcső LAT műszerével készült mérések feldolgozását. Az analíziseket

1. ábra. A blazárok nyalábjából származó kozmikus sugarak fotopion kölcsönhatásaiban keltett nagy energiájú neutrínók érik el a Föld felszínét. A blazárokból a legvalószínűbb gyorsítási folya-mat a Fermi-gyorsítás, amely nagy, illetve ultranagy energiákra gyorsítja fel a nyalábbeli kozmikus sugarakat (p). Ezek a sugárzási térrel kölcsönhatva (γ) Delta+ részecskéket hoznak létre (a megfe-lelő energiakövetelmények teljesülése esetén), amelyek 2/3 valószínűséggel semleges töltésű pionná (π^0) és protonná, vagy 1/3 valószínűséggel pozitív töltésű pionná (π^+) és neutronná bomla-nak. A felgyorsított kozmikus sugarak óriási, nem-termális eredetű energiája miatt (akár EeV) a bomlási láncban pozitívan töltött müon (μ^+) keltésén keresztül létrejövő neutrínók (ν) energiája a PeV energiát is elérheti, vagy akár meg is haladhatja azt. A semleges töltésű pionok energiáját (gamma-)fotonok viszik el. Ha a kozmikus sugarak anyaggal hatnak kölcsön, akkor az energiakö-vetelmény teljesülése esetén a kölcsönhatásban ugyanakkora valószínűséggel jön létre semleges, pozitív vagy negatív töltésű pion ($\pi^{0,\pm}$ és egyéb részecskék). Ezek bomlása ugyancsak nagy en-ergiájú neutrínók és gamma-fotonok emissziójához vezet, amelyek egyidejű észlelése a blazár-típusú neutrínóforrás-jelöltek keresését megcélzó jelenlegi stratégiák alapja. Forrás: IceCube/NASA.

Bekapcsolódtam az SZTE Fizikai Intézetben zajló sötétanyag-kutatásokba is. Gergely Árpád Lászlóval és *Keresztes Zoltánnal* galaxisok forgásgörbéit modellez-tünk világító (barionos) és különböző típusú sötét-anyag-járlékokat figyelembe véve [14–16]. Társ-téma-vezetésemmel *Simkó Attila* BSc szakdolgozatot, *Deák Bence* pedig MSc szakdolgozatot védett a témában.

2018 novemberében abban a megtiszteltetésben ré-szesültem, hogy átvehettem a Junior Prima Díjat Ma-gyar Tudomány kategóriában.

MTA Prémium Posztdoktori évek

2019 áprilisában MTA Prémium Posztdoktori (PPD) pályázatot adtam be *Aktív galaxismagok nagy ener-giájú részecskesugárzása* címmel, és az ösztöndíjat sikerült elnyernem. 2019 szeptemberében immár tu-dományos munkatársként kezdtem a pályázaton dol-gozni befogadó intézetem, a budapesti ELKH Csilla-gászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet (ELKH CSFK KTM CSI) kötelékében, *Kiss László* főigazgató és *Szabó Róbert* igazgató vezetésével.

A kozmikus sugarak, nagy energiájú neutrínók és gamma-fotonok energiaspektruma hasonló hatvány-függvényalakot követ, viszont a Fermi-űrtávcső által észlelt diffúz gamma-égbolt halványabb, mint amit az

számításigényük miatt az ELKH Cloud kapacitásain végzem. Fermi-LAT adatok maximum-likelihood elemzésével kimutattam [17], hogy a PKS 1502+106 blazár gamma-fluxusa mély, hosszan tartó lokális mi-nimumban volt, amikor az IceCube detektálta a forrás irányából érkező nagy energiájú neutrínót. Hasonló, időleges gamma-gyengítést mutattunk ki két másik neutrínóforrás-jelölt blazár esetén is (TXS 0506+056, PKS B1424-418, 2. ábra). A nagy energiájú neutrínók keltésekor pionikus MeV–TeV energiájú gamma-foto-nok is keletkeznek, amelyek nagy gamma-gamma op-tikai mélység esetén keV–MeV röntgenkaskádokat indítanak el (a legintenzívebb neutrínóemisszió idején várjuk ezt). Azaz nagy targetsűrűség esetén antikorre-lációt várunk a gamma- és neutrínófluxusok között. Ez új neutrínóforrás-keresési stratégiát kínál a koráb-biakhoz képest, lehetővé téve új neutrínóforrás-jelöl-tek azonosítását, akár archív IceCube-adatokban is. Ezen munkám nyomán 2020 szeptemberében felvételt nyertem az IceCube Kollaborációba.

Az IceCube Neutrínóobszervatórium 2009 és 2019 között 70 track-típusú, nagy valószínűséggel asztrofi-zikai eredetű neutrínóeseményt detektált. A Fermi-LAT 4FGL-DR2 (gamma, 0,1–100 GeV), a Swift-XRT 2SXPS (röntgen, 0,3–10 keV) és a CRATES (rádió, 4,8 és 8,4 GHz) katalógusok alapján neutrínóforrás-jelölt almintákat hoztam létre [19], amelyek fluxus és térbeli korreláció alapján $\sim 2\sigma$ szignifikanciával választanak ki

speciális populációkat a teljes katalógusokból. A 4,8 GHz-es (8,4 GHz) rádió-alminta a neutrínók 4% és 53% (3% és 42%) közötti részét képes magyarázni 90% konfidenciaszinten, ami hasonló a korábbi tanulmányokban számolt valószínűségekhez.

Következő lépésként a Fermi-LAT almintánk [19] fényesebb gamma-forrásainak fénygörbét hoztam létre és elemeztem. Nyolc neutrínóforrás-jelölt blazár Fermi-LAT fénygörbét hoztam létre a megfelelő neutrínók körüli egy éves időablakban (a többi forrás-jelölt fotonstatisztikája nem volt elég megbízható fénygörbék létrehozásához, túl halványak voltak). Habár a detektált IceCube-neutrínók kis száma korlátozta a mintánk elemszámára, eredményeink alátámasztani látszanak azt a hipotézist, miszerint létezhet egy, legalább tranziens módon gammasötét neutrínóforrás blazárpopuláció.

Doktori témát folytatva egy excentrikus pályát is kezelő nyalábszerkezeti modellt kifejtve azt találtuk, hogy a J1918+4937 jelű, optikai fénygörbéjében keskeny tüskét mutató kvazár („Spikey”) hullámzó nyalábalakja konzisztens egy szupernagy tömegű feketelyuk-kettős jelenlétével [20].

A 14 nemzetközi kutató munkáját összefogó cikkünkben [21] a J1048+7143 jelű rádióhangos, periodikus kitörés-alkitörés struktúrát mutató gamma-fénygörbéjű AGN gamma- és rádióészleléseit elemeztük és foglaltuk össze közös többcsatornás fizikai képbe, amelynek központi eleme egy összeolvadó szupernagy tömegű feketelyuk-kettős spin-pálya precessiója. A modellt alkalmazva később megjósoltuk a TXS 0506+056 blazár negyedik neutrínóepizódját [22]. A

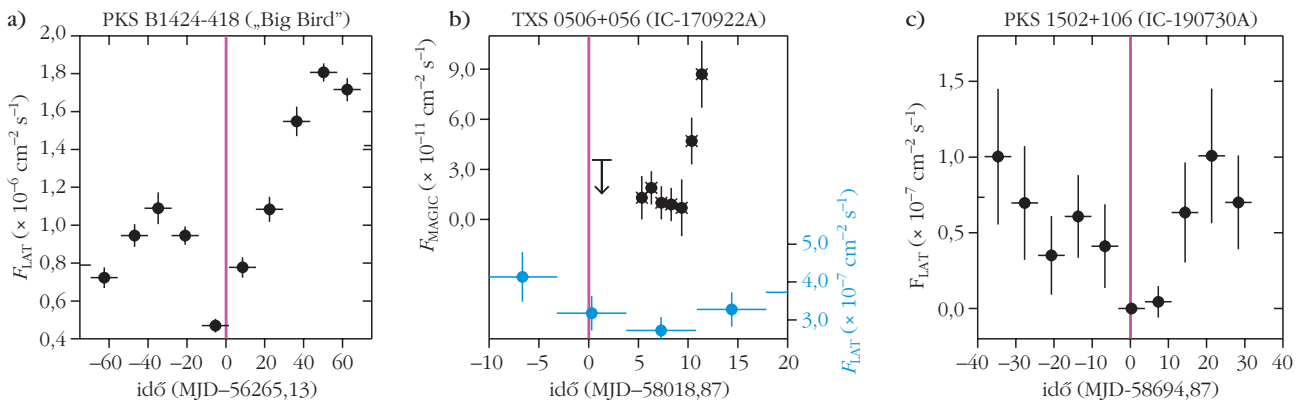
J1048+7143 blazárral kapcsolatos második, jelenleg készülő cikkben a forrás pekuliáris gamma-fénygörbéjét egy úgynevezett „spine-sheath” szerkezetű nyaláb precessiójával magyarázzuk.

Medveczky Attila, az ELTE fizika szakos hallgatója az északi égbolt harmadik legszignifikánsabb neutrínóforrás-jelölt blazárjáról készült VLBI-észlelések feldolgozását és elemzését végezte el témavezetéssel. Eredményeiből 2021-ben TDK-dolgozatot, majd 2022-ben BSc szakdolgozatot írt és védett meg. Az általam elvégzett gamma-tartománybeli elemzéssel kiegészítve eredményeinket 2023 elején publikáltuk [23].

Külföldi posztdoktori évek kezdete, kitekintés

Az ELKH CSFK KTM CSI-ben az MTA Prémium Posztdoktori ösztöndíjasként eltöltött 3 év óriási lendületet hozott szakmai karrieremben. PPD befogadó intézménnyel önkéntes szerződés alapján a budapesti affiliációt megtartva 2022 októberétől a Ruhr Universitát Bochum (RUB, Németország) posztdoktoraként folytatom a munkát, először fél évig egy DFG-projekt keretében Julia Becker-Tjus vendégeként, majd 2023 áprilisától másfél évig a Humboldt Alapítvány tapasztalt posztdoktori ösztöndíjával Anna Franckowiak vendégeként (aki a RUB Multiwavelength and Multimessenger Astronomy tanszékének vezetője). Utóbbi ösztöndíj témája az IceCube-neutrínóadatok „stacking” analízisének megtanulása. A különböző forrás-jelölt katalógusok tulajdonképpen csak különböző súlyozást jelentenek, így az alapmódszer, a „stacking”

2. ábra. Három neutrínóforrás-jelölt blazár gamma-tartománybeli fénygörbéje. A lila függőleges vonalak a blazárokkal kapcsolatba hozott IceCube-neutrínók detektálási idejét jelölik (a pontos detektálási idő a vízszintes tengely alatti címkék alapján határozható meg). Az egybeeső neutrínók azonosítói a panelek felett, a blazárok azonosítói után zárójelben találhatók. a) A PKS B1424-418 jelű blazár Fermi-LAT fénygörbéje (100 MeV és 300 GeV között, 14 napos binelés), [18] nyomán. b) A felső panelen a TXS 0506+056 jelű blazár nagyon nagy energiájú gamma-fénygörbéje a MAGIC-kel mérve (90 GeV energia felett), az alsó panelen ugyanezen blazár nagy energiájú gamma-fénygörbéje a Fermi-LAT-tal mérve (100 MeV energia felett, 7 napos bineléssel), [11] nyomán. c) A PKS 1502+106 Fermi-LAT észlelésekből előállított gamma-fénygörbéje (100 MeV és 300 GeV energiák között, 7 napos binelés, saját munka). Jól látható, hogy a blazárokkal kapcsolatba hozható nagy energiájú IceCube-neutrínók detektálásakor a blazárok gamma-fluxusa lokális, illetve a PKS 1502+106 esetében globális minimumban volt. Habár a nagy energiájú neutrínók és pionikus gamma-fotonok ugyanazon hadronikus folyamatokban jönnek létre, a neutrínók keltésének kedvező nagy optikai mélységek esetén, pár 100 GeV feletti energiákon a neutrínókat a közeg átlátszatlaná válik a pionikus fotonok számára (tipikus blazárkörnyezetekben a foton-foton optikai mélység 1-2 nagyságrenddel nagyobb a proton-foton és proton-proton optikai mélységeknél). Ezen gamma-fotonok energiája elektron-pozitron párkeltésen keresztül többszöri elnyelődés és kisugárzás után ön-szinkrotron módon, röntgen (~keV) esetleg lágy gamma (néhány ~MeV) energiaszinteken sugárzódik ki [17].



analízis elsajátítása után képes leszek neutrínóforrásjelölteket keresni zárt IceCube-adatbázisokban bármilyen forráskatalógus alapján. A Julia Becker-Tjus és Anna Franckowiak által vezetett csoportok összesen több mint 50 tagú, igazán stimuláló szakmai közösséget jelentenek, a közvetlen témáimon belül és kívül is változatos projektlehetőségekkel.

A neutrínócsillagászat műveléséhez szükséges szakmai jártasság megszerzése után hosszú távon a többcsatornás csillagászat és asztrofizika területein tervezem folytatni tudományos pályafutásom. Jelenleg épül az IceCube-Gen2, ami az IceCube 1 köbkilométeres detektortérfogatót 10 köbkilométer nagyságúra növeli. Az IceCube-Gen2 célja kozmikus neutrínók statisztikailag teljes mintájának észlelése a PeV–EeV energiatartományban, valamint ízenként több száz neutrínó észlelése a TeV feletti energiákon. Ezzel lehetővé válik az individuális pontforrások neutrínóspektrumának észlelése, ami alapjaiban fogja befolyásolni a nagyenergiás Univerzumból alkotott fizikai képünket. Valóban, a kozmikus neutrínófluxus eredetének megértése a modern csillagászat és asztrofizika egyik legforróbb területe, számos megfejtésre váró vagy akár még fel sem tett tudományos kérdéssel, igazán izgalmassá téve a frontvonalbeli kutatást.

Irodalom

1. Kun, E.; Gabányi, K. É.; Karouzos, M.; Britzen, S.; Gergely, Á. L.: A spinning supermassive black hole binary model consistent with VLBI observations of the S5 1928+738 jet. *MNRAS* 445 (2014) 1370.
2. Kun, E.; Frey, S.; Gabányi, K. É.; Britzen, S.; Cseh, D.; Gergely, Á. L.: Constraining the parameters of the putative supermassive binary black hole in PG 1302-102 from its radio structure. *MNRAS* 454 (2015) 1290.
3. Kun, E.; Wiita, P. J.; Gergely, Á. L.; Keresztes, Z.; Gopal-Krishna; Biermann, P. L.: Constraints on supermassive black hole spins from observations of active galaxy jets. *AN* 334 (2013) 1024.
4. Aartsen, M. G. és tsai (IceCube): Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. *Science* 342 (2013) 1.
5. Kun, E.: Kozmikus neutrínók égen és Földön. *Fizikai Szemle* 70/11 (2020) 370.
6. Kun, E.; Karouzos, M.; Gabányi, K. É.; Britzen, S.; Kurtanidze, O. M.; Gergely, Á. L.: Flaring radio lanterns along the ridge line: long-term oscillatory motion in the jet of S5 1803+784. *MNRAS* 478 (2018) 359.
7. Kun, E.; Biermann, P. L.; Gergely, Á. L.: A flat-spectrum candidate for a track-type high-energy neutrino emission event, the case of blazar PKS 0723-008. *MNRAS* 466 (2017) 34.
8. Kun, E.; Biermann, P.; Britzen, S.; Gergely, Á. L.: On the High-Energy Neutrino Emission from Active Galactic Nuclei. *Universe* 4 (2018) 24.
9. Mannheim, K. és tsai: Cosmic ray bound for models of extragalactic neutrino production. *Phys. Rev. D* 63 (2001) 023003.
10. Mücke, A. és tsai: BL Lac objects in the synchrotron proton blazar model. *Astroparticle Phys.* 18 (2003) 593.
11. Aartsen, M. G. és tsai: Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science* 361 (2018) eaat1378.
12. Aartsen, M. G. és tsai (IceCube): Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science* 361 (2018) 147.
13. Kun, E.; Biermann, P. L.; Gergely, Á. L.: Very long baseline interferometry radio structure and radio brightening of the high-energy neutrino emitting blazar TXS 0506+056. *MNRAS* 483 (2019) 42.
14. Kun, E.; Keresztes, Z.; Simkó, A.; Szűcs, G.; Gergely, Á. L.: Comparative testing of dark matter models with 15 HSB and 15 LSB galaxies. *A&A* 608 (2017) 42.
15. Kun, E.; Keresztes, Z.; Das, S.; Gergely, Á. L.: Dark Matter as a Non-Relativistic Bose–Einstein Condensate with Massive Gravitons. *Symmetry* 10 (2018) 520.
16. Kun, E.; Keresztes, Z.; Gergely, Á. L.: Slowly rotating Bose–Einstein condensate compared with the rotation curves of 12 dwarf galaxies. *A&A* 633 (2020) 75.
17. Kun, E.; Bartos, I.; Becker-Tjus, J.; Biermann, P. L.; Halzen, F.; Mező, Gy.: Cosmic Neutrinos From Temporarily Gamma-suppressed Blazars. *ApJL* 911 (2021) L18.
18. Kadler, M. és tsai: Coincidence of a high-fluence blazar outburst with a PeV-energy neutrino event. *NatPh* 12 (2016) 807.
19. Kun, E.; Bartos, I.; Becker-Tjus, J.; Biermann, P. L.; Franckowiak, A.; Halzen, F.: Multiwavelength Search for the Origin of IceCube's Neutrinos. *ApJ* 934 (2022) 180.
20. Kun, E.; Frey, S.; Gabányi, K. É.: A self-lensing supermassive binary black hole at radio frequencies: the story of Spikey continues. *MNRAS* 496 (2020) 3336.
21. Kun, E.; Jaroschewski, I.; Ghorbanietmad, A.; Frey, S.; Becker-Tjus, J.; Britzen, S.; Gabányi, K. É.; Kiselev, V.; Schlegel, L.; Schroller, M.; Reichherzer, P.; Cui, L.; Wang, X.; Shen, Y.: Multimessenger Picture of J1048+7143. *ApJ* 940 (2022) 163.
22. Becker-Tjus, J.; Jaroschewski, I.; Ghorbanietmad, A.; Bartos, I.; Kun, E.; Biermann, P. L.: Neutrino Cadence of TXS 0506+056 Consistent with Supermassive Binary Origin. *ApJL* 941 (2022) L25.
23. Kun, E.; Medveczky, A.: Multiwavelength Analysis of the IceCube Neutrino Source Candidate Blazar PKS 1424+240. *Symmetry* 15 (2023) 270.