

Szakmai zárójelentés

„Kompakt extragalaktikus objektumok vizsgálata rádió-interferométeres technikával” (2008–2012)

OTKA K 72515 sz. projekt

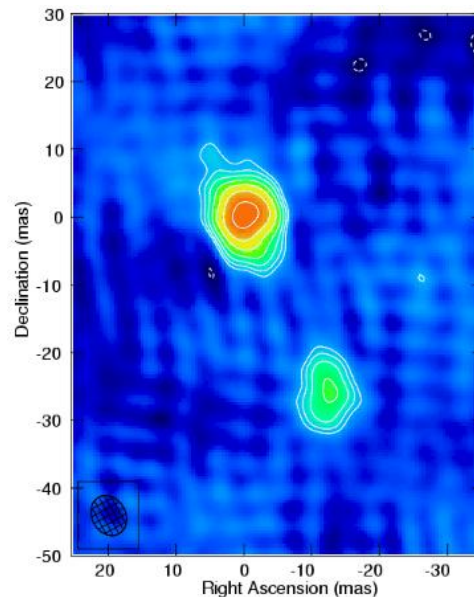
Témavezető: Dr. Frey Sándor (Földmérési és Távérzékelési Intézet)

Bevezetés

Programunk egy 2007-ben eredményesen lezárult OTKA projekt (T 46097) folytatásaként indult. Elsősorban extragalaktikus asztrofizikai kutatásokat tűztünk ki célul, rádió-interferométeres mérési technika alkalmazásával. A nagyon hosszú bázisvonalú interferométeres (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) megfigyelési módszernek ugyanakkor az asztrometriai és geodéziai alkalmazásait is érintettük. A most záruló projekt alapvető szerepet játszott abban, hogy a hazai rádió-interferométeres kutatásokkal foglalkozó kis, de nemzetközileg is számon tartott csoport működése folytatódott. A kutatási tervben megfogalmazott céljainkat – egy külön részletezett, objektív okok miatt meghíúsult pont kivételével – sikerült megvalósítanunk, sok tekintetben túl is teljesítenünk. A projekttel kapcsolatos eredményeinket bemutató, referált nemzetközi szakfolyóiratokban megjelent, megjelenés alatt álló, vagy beküldött cikkeink összesített impakt faktora közel 100. Az alábbiakban röviden bemutatott kutatási eredményeinken túl a téma hosszú távú továbbélése szempontjából kiemelkedően fontosnak tartjuk, hogy egyetemi előadásokkal, diplomamunka és tudományos diákköri témavezetésekkel hozzájárultunk a következő kutatói generáció kineveléséhez is.

Tudományos eredmények

A kutatási tervben megfogalmazott egyik fő cél a **legtávolabbi ismert rádiósugárzó kvazárok** szerkezetének tanulmányozása volt. A projekt futamideje alatt fedezték fel az első, majd a második olyan rádiósugárzó kvazárt, amelyek színképvonalainak vöröseltolódása a $z > 6$ tartományba esik. Ez azt jelenti, hogy sugárzásuk az univerzum jelenlegi kora kb. 7%-ának megfelelő időszakból származik. Mindkét objektumra sikeres megfigyelési programokat kezdeményeztünk az Európai VLBI Hálózatnál (*European VLBI Network*, EVN), két különböző frekvencián (1,6 GHz és 5 GHz). Mindkettőt detektáltuk, s megállapítottuk, hogy ezred-ívmásodperces rádiószerkezetük kompakt, a rádiósugárzásuk igen kis (legfeljebb néhány száz parszekes) térrészből ered, ami egyértelműen igazolja, hogy aktív galaxismagokról van szó. A **J1427+3312** jelű kvazárról ($z=6.12$) kiderítettük, hogy ezred-ívmásodperces rádiószerkezete kettős. Ez, és a rádiószínképéről rendelkezésre álló információ arra enged következtetni, hogy egy igen fiatal, akár csupán néhány száz vagy ezer éves objektumról lehet szó: az aktív galaxismagban található szupernagy tömegű fekete lyuk környezetében a rádiótartományban megfigyelhető aktivitás csak a közelmúltban indult be (Frey et al. 2008, *Astron. Astrophys.* **484**, L39).



A *J1427+3312* ($z=6.12$) a jelenleg ismert második legtávolabbi rádiókvazár. Az 1.6 GHz-es VLBI térkép jellegzetes kompakt kettős szerkezetet mutat.

A jelenleg ismert legtávolabbi rádiókvazár (**J1429+5447**, $z=6.21$) is ún. meredek spektrummal rendelkezik, vagyis a magasabb, 5 GHz-es megfigyelési frekvencián lényegesen halványabb, mint 1,6 GHz-en (Frey et al. 2011, *Astron. Astrophys.* **531**, L5). Tulajdonságai hasonlítanak az eddig ismert másik két, $z=6$ körüli vöröseltolódással rendelkező kvazáréira, amelyeket ugyancsak mi vizsgáltunk. Feltételezésünk szerint a legtávolabbi rádiókvazárok a közeli univerzumból jól ismert ún. kompakt szimmetrikus objektumok (*Compact Symmetric Object*, CSO), illetve a (kvazárral együtt mozgó rendszerben) GHz-es tartományba eső szinképi csúcsot mutató (*Gigahertz Peaked Spectrum*, GPS) objektumok távoli megfelelői, ami fiatal korokra utalhat. Ennek eldöntéséhez egyrészt nagyobb, még felfedezés előtt álló minta vizsgálatára, valamint további frekvenciákon történő mérésekre lesz szükség. Ez utóbbiakat nehezíti, hogy ezek a távoli kvazárok igen halványak.

Valamivel kevésbé, de még mindig kivételesen távoli ($z>4,5$), így meglehetősen ritka rádiókvazárok egy új, ötelemű mintáját is tanulmányoztuk kétfrekvenciás EVN mérésekkel. Közel megdupláztuk az irodalomban eddig fellelhető, hasonlóan vizsgált rádióforrások számát. Azt találtuk, hogy az ismert és VLBI technikával nagy felbontással feltérképezett $z>4,5$ kvazárok többsége kompakt, de némileg felbontott szerkezetet mutat, meredek rádióspektrummal. Fényességi hőmérsékletük nem extrém nagy, ami arra utal, hogy a relativisztikus nyalábolás nem játszik szerepet megjelenésükben. Inkább nagy luminozitású, **fiatal, aktivitási ciklusuk kezdetén levő rádiókvazárokról** van szó (Frey et al. 2010, *Astron. Astrophys.* **524**, A38).

A fenti vizsgálathoz a mintát a korábbi OTKA projektünk keretében kidolgozott, a halvány extragalaktikus rádióforrások szisztematikus felmérését célzó DEVOS (*Deep Extragalactic VLBI-Optical Survey*) programunk (Mosoni et al. 2006, *Astron. Astrophys.* **445**, 413; Frey et al. 2008, *Astron. Astrophys.* **477**, 781) eredményeinek alkalmazásával állítottuk össze. Ott olyan eljárást dolgoztunk ki, amely meglevő optikai és rádiókatalógusok adatainak alapján közel 90%-os biztonsággal előre kiválasztja a VLBI technikával detektálható kompakt rádióforrásokat. Az ennek nyomán készült, kb. 100 távoli ($z>3$) kvazárt tartalmazó listát (Cseh Dávid: *Nagy vöröseltolódású, kompakt rádiófényes kvazárok vizsgálata*, diplomamunka, ELTE TTK csillagász szak, 2009) használtuk még két különleges, ún. **magdominálta hármas kvazár** részletes VLBI vizsgálatához is. Kimutattuk, hogy a megfigyelt ívmásodperces skálájú hármas rádiószerkezet magyarázatához – egyes, a szakirodalomban tárgyalt elképzelések ellenére – nincs szükség extrém feltételezésekre, a galaxismag-aktivitás újraindulására és közben a rádiójet irányának jelentős elfordulására (Cseh et al. 2010, *Astron. Astrophys.* **523**, A34).

Ugyancsak a DEVOS kiválasztási módszerével összeállítottunk egy listát, amelynek alapján kb. 20 **halvány kvazár** lett volna vizsgálható az *ASTRO-G* űr-VLBI műhold és a földi rádióteleszkóp-hálózatok nyújtotta példátlanul finom szögfelbontással, 8,4 GHz-es frekvencián, az antennanyalábon belüli fázisviszonyítás módszerével (Frey et al. 2009, *Publ. Astron. Soc. Japan* **61**, 123). Az *ASTRO-G* (VSOP-2) műholdas programot a JAXA japán űrügynökség – technikai és pénzügyi okokból – egyelőre nem valósítja meg, erről 2010 végén született döntés. Ezért ennek a vizsgálatunknak csak hosszabb távon lehet majd jelentősége. Itt kell megemlíteni, hogy az eredeti kutatási tervünkben az a pont, amelyben vállaltuk tudományos megfigyelési javaslatok, programok kidolgozását és benyújtását a japán *ASTRO-G* számára, így sajnos *nem teljesülhetett*. Pedig foglalkoztunk új, fényes **űr-VLBI kalibrátor rádióforrások** kiválasztásával is. Kidolgoztunk egy módszert, amivel a mikrohullámú háttérsugárzást vizsgáló WMAP űrszonda pontforrás-katalógusából kijelölhetők az *ASTRO-G* legmagasabb, 43 GHz-es észlelési frekvenciáján használható kalibrátorok (Geréb Katinka: *Extragalaktikus rádióforrások a WMAP pontforrás-katalógusában*, diplomamunka, ELTE TTK csillagász szak, 2010; Geréb & Frey 2011, *Adv. Space Res.* **48**, 334). Mindezek az űr-VLBI technikával kapcsolatos vizsgálatok azonban hosszabb időtávon hasznosulhatnak. Egyrészt 2011-ben pályára állították az évtizedek óta készülő orosz *RadioAstron* űr-VLBI műholdat, amellyel hamarosan (várhatóan 2012 végétől) megnyílhatnak a megfigyelési lehetőségek. Másrészt Kínában 2012-ben elkezdődtek egy egyszerre két űr-VLBI műholdból álló rendszer előzetes megvalósíthatósági tanulmányai. Ha elnyeri a remélt támogatást, a rendszer talán

már az évtized végére elkészülhet.

A kvazárok látszó szögátmérő–vöröseltolódás összefüggéséről, mint klasszikus kozmológia tesztéről korábban kiderült, hogy a nagy felbontású VLBI térképek bizonyos feltételekkel alkalmazhatók lehetnek egyes kozmológiai modellparaméterek becslésére. Az igazán megbízható eredmények eléréséhez a jelenleg elérhetőnél nagyobb elemszámú mintára volna szükség. Egy minden eddiginél nagyobb, kb. 3000 aktív galaxismag VLBI adatait tartalmazó mintán vizsgáltuk, hogy a rádióforrások szögmérete hogyan függ a megfigyelési frekvenciától. Egyrészt sikerült egy alkalmas definíciót találni a szögméretre, másrészt kimutattuk, hogy a szinkrotron önabszorpció határozza meg a megfigyelt összefüggést (Yang et al. 2009, *Proc. 10th Asian-Pacific Regional IAU Meeting*, 270).

A VLBI technika sajátossága, hogy – a csillagászatban páratlanul finom szögfelbontása révén – nem csak asztrofizikai kutatások céljára lehet alkalmazni. Az **égi vonatkoztatási rendszer** jelenlegi legjobb megvalósítása (*International Celestial Reference Frame*, ICRF) távoli aktív galaxismagok pontos, VLBI-vel rögzített égi pozícióin alapul. Ezekre a galaxismagokra immár akár több évtizedes VLBI mérésorozatok állnak rendelkezésre, amelyek alapján a vonatkoztatási rendszer definícióját 2009-ben egyébként pontosították is (ICRF2). Mi kísérletet tettünk arra, hogy a rendszert kifesztítő kvazárok igen kis látszó sajátmozgásait – egy nagyobb mintát vizsgálva most először – összefüggésbe hozzuk ezred-ívmásodperces rádiószerkezetükkel. Egy 62 elemű, szignifikáns, 10-100 mikroívmásodperc/év nagyságrendű sajátmozgással rendelkező kvazárokból álló minta alapján megállapítottuk, hogy a belső rádiójet iránya és a sajátmozgás iránya között statisztikai értelemben mutatkozik ugyan összefüggés – ez megfelel az előzetes várakozásoknak és egy-egy kvazárokra végzett korábbi vizsgálatok eredményeinek –, viszont léteznek olyan egyedi objektumok (pl. az OJ 287 jelű kvazár), ahol a jet jellegzetes iránya és sajátmozgás iránya lényegesen eltérő (Moór et al. 2011, *Astron. J.* **141**, 178).

A pozíciós csillagászat (asztrometria) területén részt vettünk még az amerikai kezdeményezésű *Deep Astrometric Standards* (DAS) projektben, amelynek célja kiválasztott égboltterületek felmérése, a jövőben megépítendő nagy látómezejű optikai égtérképező teleszkópok asztrometriai kalibrációjának elősegítésére (Platais et al. 2008, *Proc. IAU Symp.* **248**, 320). Végeztünk a Gemini-Orion-Taurus régió potenciális közös rádió–optikai kalibrátorainak VLBI megfigyeléseivel és asztrometriai kiértékelésével. A projekt – rajtunk kívül álló okok miatt – a tervezettnél lassabban halad, további mezők vizsgálatára még csak az előkészületek történtek meg (rádiómérések a VLA interferométerrel, optikai mérések).

Az égi vonatkoztatási rendszert kijelölő aktív galaxismagoknak nem csak a pozíciós stabilitását kutattuk, de **a rádió és optikai tartományban mért koordinátaik összefüggését** is vizsgáltuk. Az esettanulmányhoz az ICRF2 katalógusból vett kvazárok megfelelőit kiválogattuk a Sloan Digitális Égboltfelmérés (*Sloan Digital Sky Survey*, SDSS) legújabb adatbázisaiból (*Data Release 7 & 8*, DR7 és DR8). Az elemzés egyrészt megerősítette, hogy az SDSS DR7 kvazárjainak pozíciós pontossága az optikai tartományban, mindkét kordináta tekintetében kb. 50 ezred-ívmásodperc (*milli-arcsecond*, mas). Másrészt kimutattunk egy durva asztrometriai kalibrációs hibát (mintegy 260 mas értékű, északi irányú deklinációs eltolódást) az SDSS DR8-ban, amely a kb. 40°-os deklinációnál északabbra fekvő objektumokat érinti (Orosz Gábor: *Kvazárok optikai és rádiótartománybeli koordinátáinak vizsgálata*, diplomamunka, BME ÉK földmérő és térinformatikai mérnök szak, 2012; Orosz & Frey 2012, *Mem. Soc. Astron. Italiana* **83**, megjelenés alatt). A munka távlati célja azonban a közeljövőben az európai *Gaia* asztrometriai űrszondától (tervezett indítása: 2013) várható, a mostaniaknál sokkal pontosabb optikai kvazárkatalógus megjelenésére való felkészülés volt. A *Gaia* mérésorozatának feldolgozása után, 2020 körülre az égi vonatkoztatási rendszert a rádiós (VLBI) technikával elérhetőhöz hasonló vagy azt még meg is haladó pontossággal tudják majd definiálni. Először nyílik majd lehetőség a legjobb rádió és optikai rendszerek közvetlen, nagyszámú közös objektumon alapuló összekapcsolására. Ennek pontosságát pedig meghatározza, hogy milyen mértékben esnek egybe a rádió és optikai fényességi csúcsok. Már az ICRF2–SDSS esettanulmány során is a statisztikailag várhatónál lényegesen több olyan eltérést találtunk, aminek az asztrofizikai magyarázata még további vizsgálatokat igényel.

Egy négy éven át tartó kutatási program végrehajtása során számos előre nem látható, **nem tervezhető eredmény** is születhet. Az alábbiakban ezeket foglaljuk össze röviden, hivatkozással a rájuk vonatkozó tudományos közleményekre. Közös bennük a rádió-interferométeres mérési technika alkalmazása és az extragalaktikus csillagászatához való kapcsolódás.

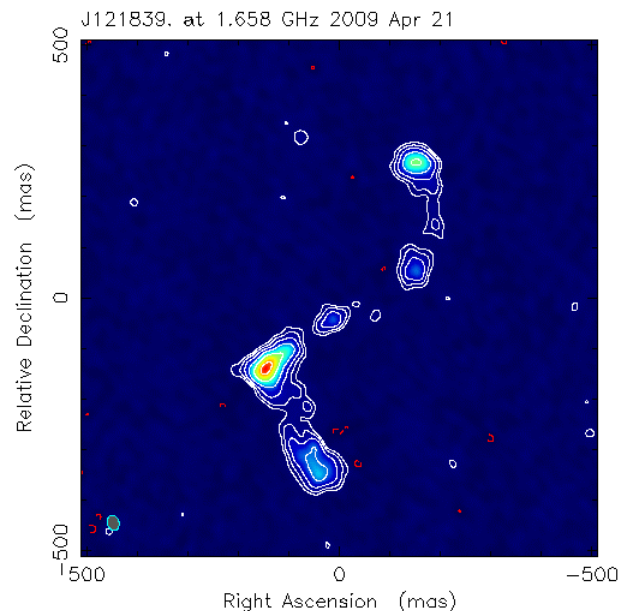
Publikáltuk egy fényes, nagy vöröseltolódású kvazár (PKS 1402+044, $z=3.2$) rádió szerkezetére vonatkozó, több frekvencián és más-más felbontással (VLA, VLBI, űr-VLBI) készült térképeinket. A jet szerkezetét a parszekestől a kiloparszekesig terjedő skálákon vizsgáltuk, és megbecsültük a központi fekete lyuk tömegét, amire $\sim 10^9$ naptömeg adódott (Yang et al. 2008, *Astron. Astrophys.* **489**, 517).

Tanulmányoztunk **napi időskálán belüli jelentős fényességváltozásokat** (*intra-day variability*, IDV) mutató kvazárokat. A J1128+5925 jelzésű kvazárt az amerikai VLBA (*Very Long Baseline Array*) hálózattal több frekvencián monitoroztuk. Sikertült egy kelet-nyugati irányú kiterjedést azonosítani a kvazár mas-skálájú szerkezetében, ami jó összhangban van a fényességváltozások éves modulációjára alkotott modellel. A megfigyelések megerősítik, hogy az IDV jelenséget ebben az esetben a Tejútrendszer látóirányba eső csillagközi anyagában fellépő szcintilláció okozza. A szórófelhő tőlünk mért távolságára 110 fényév adódott. Ugyanakkor a változásokat a forrásra jellemző egyedi (kompakt) szerkezet is befolyásolja (Gabányi et al. 2009, *Astron. Astrophys.* **508**, 161).

Megvizsgáltuk a szakirodalomban elérhető, a lokális csillagközi anyagban (a Naprendszer 30 pc-es környezetében) levő ionizált gázfelhők elhelyezkedését és sebességét. Az IDV jelenséget ilyen, a látóirányukba eső ionizált felhők okozhatják úgy, hogy a távoli kvazárból érkező rádiósugárzást szórják. Három IDV forrást vizsgáltunk (kettőt szakirodalmi, egyet saját részletes rádiós mérési adatok alapján). A kapott összefüggés nem egyértelmű: két rádióforrásnál valóban az abba a látóirányba eső csillagközi felhő okozhatja az IDV jelenséget, a harmadiknál viszont nem mutatható ki kapcsolat [Gabányi et al. 2011, *Proceedings of Science*, PoS(10th EVN Symposium)078].

EVN mérések sorozatával megállapítottuk, hogy a J1218+2953 jelzésű, a Hubble-űrtávcső felvételein kivehető gravitációs lencsehatást létrehozó, de optikailag azonosítatlan rádióforrás (egy feltételezett, de eddig még sosem látott „**sötét lencse**”) nem lehet egy kizárólag az ún. sötét anyagból álló, galaxistömegű objektum, hanem egy aktív maggal rendelkező, a jelek szerint a szokásosnál sokkal több fényelnyelő port és gázt tartalmazó nagy tömegű galaxis. Ehhez hasonló különleges objektummal kapcsolatban most először végeztek ilyen részletes rádió-interferométeres méréseket (Frey et al. 2010, *Astron. Astrophys.* **513**, A18).

A J1430+4204 jelű távoli ($z=4.72$) blazárról (vagyis egy rendkívül kompakt, optikai színekében emissziós vonalakat nem mutató rádiósugárzó aktív galaxismagról) az amerikai VLBA hálózattal végzett méréseink és a rádió fénygörbe alapján sikerült több módszerrel, egybeeső adatokat kapva meghatározni a **rádióforrás fizikai paramétereit** (Doppler-faktor, Lorentz-faktor, a kidobódott plazmacsomó sebessége; Veres et al. 2010, *Astron. Astrophys.* **521**, A6).

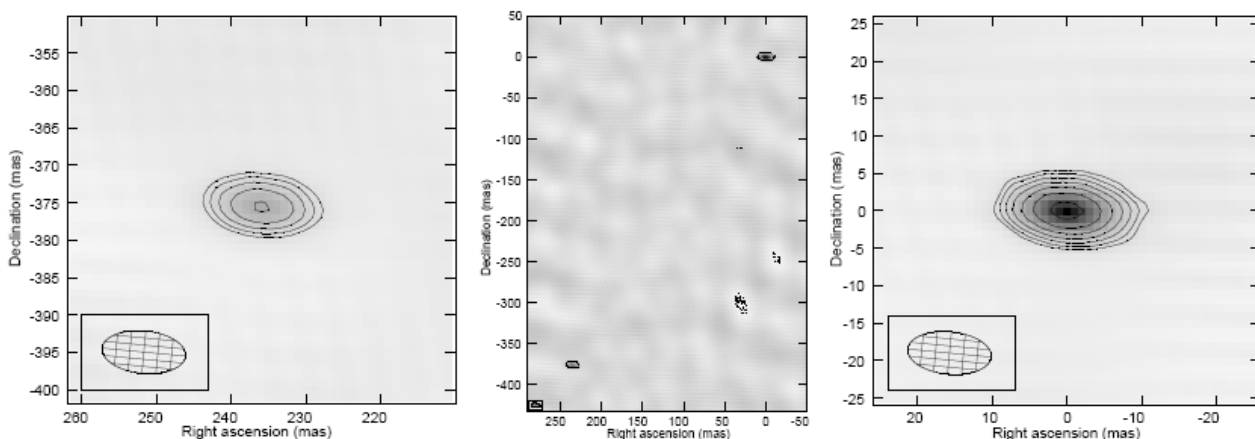


A J1218+2952, egy optikailag azonosítatlan „sötét lencse” az 1,6 GHz-es VLBI térképe alapján inkább egy torzult kétirányú rádiójettel rendelkező, sűrű csillagközi por- és gázanyaggal, erős fényelnyeléssel jellemzett fiatal galaxis lehet.

A 4C 02.27 jelű rádióforrást, mint az elsőként azonosított, ívmásodperces skálán ún. **dupla-dupla rádiószerkezetet mutató kvazárt** EVN mérések segítségével kb. 3 nagyságrenddel nagyobb felbontással sikerült megvizsgálnunk. A korábban ismert, általában meglehetősen ritka dupla-dupla források között csak néhány rádiógalaxis volt található. Kialakulásuk oka valószínűleg a leálló, majd újrainduló jetaktivitás, amely során a korábbi ciklus elhalványodó nyoma a külső régiókban még megfigyelhető. A 4C 02.27 kvazár magjáról megállapítottuk, hogy a mért fényességi hőmérséklet és a jet látóiránnyal bezárt szöge, aszimmetrikus megjelenésének jellegzetes iránya összhangban van a jelenlegi aktivitási ciklusra vonatkozó feltételezésekkel [Frey & Paragi 2011, *Proceedings of Science*, PoS(10th EVN Symposium)077].

Bekapcsolódtunk a *Fermi* gamma-úrteleszkóp egyik felfedezése nyomán indult kutatásba. Olyan típusú aktív galaxismagot találtak, amelyekről korábban nem volt bizonyított, hogy relativisztikus rádiójetekkel rendelkeznek. A gamma-tartományban végzett mérések viszont erre utalnak. A PMN J0948+0022 jelű, ún. **keskeny vonalas Seyfert-1 galaxis (NLS1)** magja esetében a jetet sikerült globális VLBI hálózattal végzett megfigyeléssel kimutatni. A mérésben részt vevő antennák Európában, Ázsiában és Ausztráliában helyezkedtek el. Ez volt az első alkalom, hogy valós idejű e-VLBI technikával globálisan, a három kontinensre kiterjedő bázisvonalakon tudományos célú csillagászati megfigyelést végeztek (Giroletti et al. 2011, *Astron. Astrophys.* **528**, L11).

A galaxisok kialakulása és kozmológiai időskálán végbemenő fejlődése megértésének egyik kulcsa a galaxisok (és magjaik) összeolvadásának tanulmányozása. Ennek a fejlődési fázisnak a megfigyelése azonban nem könnyű feladat. Egészen a legutóbbi időkig nagyon kevés bizonyított esetet ismertünk, amelyekben kb. 1–10 kpc távolságban levő aktív galaxismagokat sikerült azonosítani. Ezek ugyanis a hagyományos optikai távcsövekkel még felbontatlanok maradnak. Azonban az SDSS optikai spektrumokban az egyes objektumoknál látható megkettőződött emissziós színképvonalak (elsősorban a kétszeresen ionizált oxigén 495,9 és 500,7 nm-es hullámhosszaknak megfelelő vonalpárja) egyik lehetséges magyarázata, hogy azok két, közös tömegközéppont körül keringő, ezért eltérő látóirányú sebességgel rendelkező galaxismag környezetéből származnak. Elfogadott tény ugyanakkor, hogy a kettős emissziós vonalaknak más, csupán egyetlen galaxismagot igénylő magyarázatai is lehetnek. Különös jelentősége van az olyan gyanús objektumoknak, amelyek egyúttal rádiósugárzók is. Interferométeres képalkotással ugyanis – ha valóban két aktív galaxismag van ott – ezek felbonthatók komponenseikre.



A J1425+3231 jelű kvazár nagyfelbontású rádiószerkezete kettősnek bizonyult az 1,7 GHz-es EVN térképen (középen). A két szélső ábra a két kompakt komponenst külön-külön, kinagyítva mutatja. Az alsó fényességi kontúrok $50 \mu\text{Jy}/\text{beam}$ értéknek felelnek meg, a további kontúrok $\sqrt{2}$ -es szorzóval növekednek.

Az SDSS színképe alapján **kettős aktív galaxismagnak** sejtett J1425+3231 jelű kvazárt VLBI technikával vizsgálva sikerült kimutatnunk, hogy az valóban két, egymástól (az égbolt síkjára eső vetületben) 2,6 kpc távolságban levő kompakt rádióforrásból áll. A felfedezés nem csak azért érdekes, mert egyelőre csupán egy maroknyi hasonló rádiósugárzó kettős objektum ismert, hanem

azért is, mert utat nyithat további, nagyobb minták rádió-interferométeres vizsgálata előtt is (Frey et al. 2012, *Mon. Not. R. Aston. Soc.*, megjelenés alatt).

Az aktív galaxismagok mellett más kompakt rádiósugárzó égitestek vizsgálatában is részt vettünk. Elsőként sikerült **relativisztikus jet jelenlétére utaló tágulás jeleit felismerni egy Ic típusú extragalaktikus szupernóvában** (SN 2007gr), e-VLBI mérések alapján. Ez arra engedhet következtetni, hogy akár minden ilyen szupernóvában létrejöhetnek a kétirányú jetek. A különbség az, hogy a sebességük és energiájuk messze nem egyforma – miközben magának a szupernóva-robbanásnak a teljes energiája többé-kevésbé jól meghatározott. Ez jelentheti a kapcsolatot a még a szupernóváknál is fényesebb tranzienst jelenségek, a gamma-felvillanások egyik típusával is. A jelenlegi elképzelések szerint ugyanis a hosszú lefutású gamma-kitörések szintén nagy tömegű csillagok összeomlása során keletkeznek (Paragi et al. 2010, *Nature* **463**, 516).

Egyéb eredmények

Új eredményeink elérésének egyik alapfeltétele, hogy hozzáférjünk a nemzetközi rádió-interferométer-hálózatokhoz. A megfigyelési időket nyílt versenyben, szakértők által elbírált pályázatokon tudjuk elnyerni. Az OTKA projekt 4 éves futamideje alatt az Európai VLBI Hálózat (EVN) vezető kutatói (PI) minőségben beadott 14 pályázatunkból 13-at bíráltak el pozitívan, ami kiemelkedő sikerarányának számít a kb. 2-3-szoros túljelentkezést figyelembe véve. Emellett társkutatói szinten, valamint más interferométereknél és rádiótávcsöveknél (*Westerbork Synthesis Radio Telescope* – Hollandia; *Very Large Array* – USA, *Giant Metrewave Radio Telescope* – India, Arecibo rádióteleszkóp – Puerto Rico) is részt vettünk/veszünk megfigyelési programokban, nemzetközi együttműködésben. E programok egy része, illetve a kapott adatok feldolgozása, értelmezése még folyamatban van.

Az EU 7. Keretprogramja által finanszírozott, az európai rádiócsillagászati infrastruktúrához való hozzáférést támogató *RadioNet* program keretében nem csak jelentős megfigyelési időhöz jutottunk, de esetenként adatfeldolgozási célú külföldi utazásainkhoz is kaptunk pénzügyi támogatást. Minderre végső soron az OTKA pályázati támogatása adta meg számunkra az esélyt. Ugyancsak bekapcsolódtunk egy 2009-ben kezdeményezett új európai COST akció (MP0905 *Black holes in a violent Universe*) munkájába, mind a menedzsment bizottság magyar póttagjaiként, mind a szupernagy tömegű fekete lyukakkal foglalkozó munkacsoportban (Frey S., Gabányi K.). Az akció keretében kutatási célú utazási támogatást is nyertünk (Gabányi K.).

2011-ben és 2012-ben is sikerrel indultunk a Kínai Tudományos Akadémiánál egy kínai–magyar kutatócsere-pályázaton (kb. 1,2 MFt/év). Ennek kínai témavezetője T. An (Sanghaji Csillagászati Observatórium), és mind a kínai, mind a magyar fél résztvevő kutatóinak évente összesen 6-6 heti tartózkodásra (szállásra, ellátásra) ad lehetőséget a partnerintézményben. Ezt a kitűnő lehetőséget is az OTKA támogatásának segítségével tudtuk kihasználni, a kiutazás úti-költségének fedezése révén. A fentiek alapján elmondhatjuk, hogy a megpályázott észlelési időkkal és kutatócsere támogatásokkal a kapott OTKA projekt támogatással összemérhető egyéb forrást sikerült elnyernünk és felhasználnunk.

Végül megemlíthetjük egy hosszabb távú, a Naprendszer kutatásával kapcsolatos programban való részvételünk lehetőségét. A halvány rádióforrások VLBI megfigyelésére vonatkozó korábbi eredményeink (DEVOS) alapján részt vettünk az Európai Űrügynökséghez (ESA) beadott, az EJSM (*Europa-Jupiter System Mission*) űrszondához kapcsolódó programjavaslat kidolgozásában is. A PRIDE (*Planetary Radio Interferometry and Doppler Experiment*) kísérlet célja a szonda mozgásának precíz követése VLBI technikával, az extragalaktikus rádióforrásokhoz viszonyítva. A nemrég az ESA *Cosmic Vision 2015–2025* programjában elfogadott, 2022-ben indítani tervezett JUICE (*Jupiter Icy moons Explorer*) űrszonda az EJSM utóda, így esély kínálkozhat a PRIDE kísérlet megvalósítására is.

Oktatás és ismeretterjesztés

Elsősorban az ELTE TTK Csillagászati Tanszékén, valamint a BME ÉK Általános és Felsőgeodézia Tanszékén részt vállaltunk egyetemi oktatási és témavezetési feladatokban is. Önkéntes óraadóként, angol nyelven *Radio Astronomy I-II.* címmel minden második évben két féléves speciális előadást tartottunk csillagász és fizikus MSc, valamint fizika PhD hallgatók számára (Frey S., Gabányi K.), valamint szeminárium vezetésében is részt vettünk (Gabányi K.). Az OTKA projekt futamideje alatt, a hallgatói javadalmazás lehetőségével is élve, sikerült MSc diplomamunkájukat készítő hallgatókat is bevonnunk a munkába (Frey S. témavezetésével).

Az ELTE csillagász szakán:

- *Cseh Dávid:* Nagy vöröseltolódású, kompakt rádiófényes kvazárok vizsgálata (2009)
- *Szutyányi Márk:* A 0620+389 (J0624+3856) jelű kvazár űr-VLBI feltérképezése (2010)
- *Fuhl Ádám:* Különleges szerkezetű rádiósugárzó aktív galaxismagok vizsgálata rádió-interferometriai technikával (2010)
- *Dénes Helga:* A J1715+2147 jelű távoli kvazár vizsgálata (2010)
- *Geréb Katinka:* Extragalaktikus rádióforrások a WMAP pontforrás-katalógusban (2010)

A BME földmérő és térinformatikai mérnök szakán:

- *Orosz Gábor:* Kvazárok optikai és rádiótartománybeli koordinátáinak vizsgálata (2012)

A fenti hat egyetemi hallgató közül azóta egy Magyarországon, hárman pedig külföldön a PhD fokozat megszerzésére irányuló tanulmányokat folytatnak, mindegyikük a rádió-interferometriához kapcsolódó témában. Mindezt nagy sikernek, a kutatási terület utánpótlása szempontjából alapvető fontosságúnak értékeljük. Tudományos diákköri munkák elkészítésében is segítettünk témavezetőként (Frey S.):

- *Fuhl Ádám:* Egy különleges rádiógalaxis nagyfelbontású rádió-interferometriai vizsgálata (ELTE TTK, 2008)
- *Fogasy Olimpia Judit, Nagy Melinda:* Mi történt 4 év alatt egy távoli rádiókvazárban? (ELTE TTK, 2011)

Fontosnak tartottuk, hogy eredményeinket bemutassuk hazai tudományos és ismeretterjesztő fórumokon is. Írtunk cikkeket hagyományos nyomtatott (Fizikai Szemle, Meteor, Meteor Csillagászati Évkönyv, Élet és Tudomány), valamint internetes (hirek.csillagaszat.hu) kiadványokba. Indultunk az OTKA–Élet és Tudomány kutatásismertető cikkpályázatán (2008, 3. díj). A témavezető interjút adott az OTKA honlap „A hónap kutatója” rovatában (2009. március) és a Civil Rádió OTKA projekteket bemutató műsora számára (2012). Eredményeinkből számos helyen tartottunk szakmai és ismeretterjesztő előadásokat is.

Végül ezúton mondunk köszönetet az OTKA támogatásáért, ami a fentiekben összefoglalt eredmények elérését lehetővé tette számunkra.