

## Szakmai zárójelentés

„Halvány égi rádióforrások szerkezetének nagy felbontású térképezése” (2004–2007)  
OTKA T 046097 sz. projekt

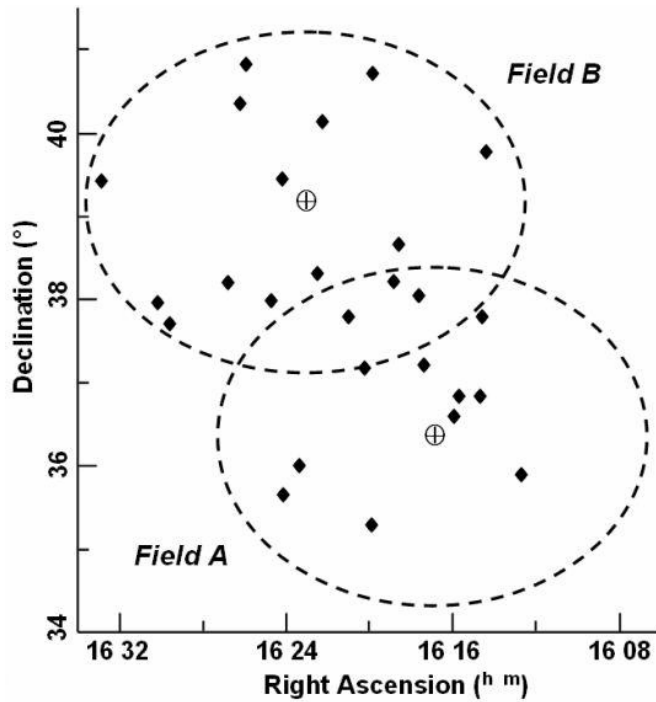
Témavezető: Dr. Frey Sándor (Földmérési és Távérzékelési Intézet)

Kutatási programunk keretében rádió-interferométeres méréseket kezdeményeztünk, azok eredményeit értelmeztük, publikáltuk, illetve a jövőbeli kutatásokat elősegítő eljárásokat dolgoztunk ki. Ehhez elsősorban nagyon hosszú bázisvonalú interferométeres (VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*) csillagászati megfigyelési módszert alkalmaztunk.

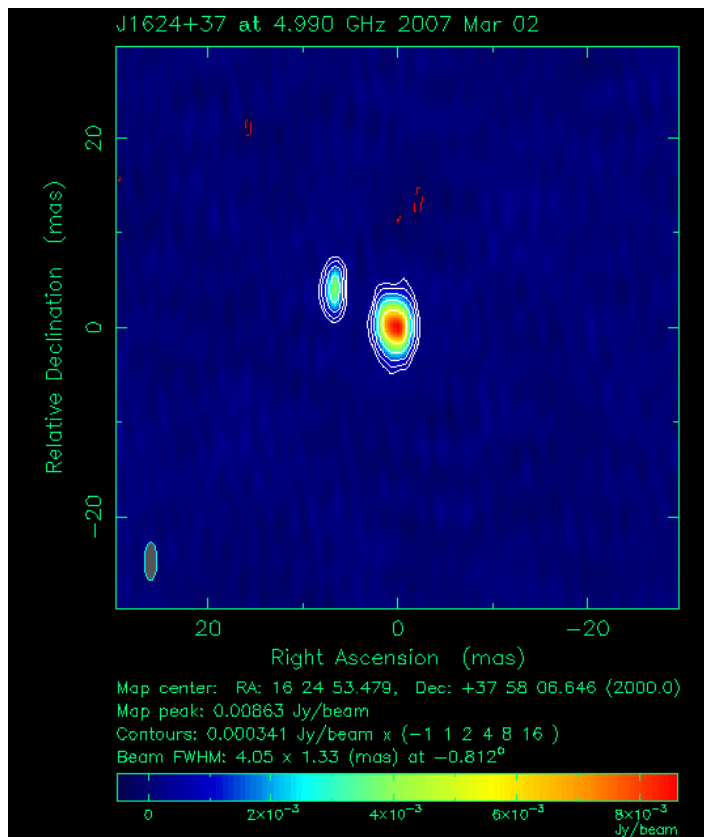
**A kutatási tervben kitűzött fő céljainkat sikerült megvalósítanunk.** A halvány extragalaktikus rádióforrások szisztematikus felmérését céló **DEVOS** (*Deep Extragalactic VLBI–Optical Survey*) programot beindítottuk. Az angliai MERLIN (*Multi-Element Radio Linked Interferometer Network*) rádióinterferométer-hálózattal, majd az európai (EVN, *European VLBI Network*) és amerikai (VLBA, *Very Long Baseline Array*) VLBI hálózatokkal először tesztméréseket végeztünk (*Mosoni et al.* 2006, *Astron. Astrophys.* **445**, 413). A DEVOS célja, hogy nagy számban legyenek feltérképezhetők a jelenleg jól ismerteknél egy-két nagyságrenddel halványabb rádiósugárzó kompakt aktív galaxismagok. A VLBI technika révén az alkalmazott 5 GHz-es rádiófrekvencián a kvazárok szerkezetét néhány ezred-ívmásodperces (mas, *milli-arcsecond*) szögfelbontással vagyunk képesek tanulmányozni, égi pozícióikat pedig  $\sim 1$  mas pontossággal meghatározni. Az így létrehozandó minta például kozmológiai, galaxisfejlődési vagy asztrometria célokra használható.

A DEVOS keretében egyrészt olyan **újszerű VLBI megfigyelési módszert** alkalmaztunk, amelynek segítségével egy-egy referenciaként szolgáló, ismert kvazár  $2^\circ$ -os sugarú égi környezetét fel tudtuk mérni. Másrészt **célpontjaink előzetes kiválasztására** olyan eljárást dolgoztunk ki, amelynek alapján igen kedvező detektálási arányt biztosíthatunk. (Ez utóbbi azért fontos, mert a program folytatását attraktívabbá teszi a túlterhelt VLBI hálózatok számára.) A megvizsgálandó kvazárok kijelölésekor az amerikai VLA (*Very Large Array*) rendszerrel 1,4 GHz frekvencián készült FIRST (*Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters*) felmérés katalógusából indultunk ki. Eredetileg, a VLBI tesztmérések előtt az ott  $5''$  felbontással „pontoszerűnek” tűnő, 30 mJy-nél fényesebb rádióforrásokat a MERLIN hálózattal 5 GHz-en  $\sim 50$  mas felbontással is megvizsgáltuk. Egy részük itt is pontoszerűnek bizonyult, ezek szerkezetét VLBI technikával 1-3 mas szögfelbontás mellett térképeztük fel. Minderre egy olyan égbolterületet választottunk, amely a Sloan Digitális Égboltfelmérésben (SDSS, *Sloan Digital Sky Survey*) is szerepelt, így biztosítva a rádióforrások legalább egy részének optikai azonosítását.

Az észlelési program folytatása szempontjából a leglényegesebb felismerés az volt, hogy a kompakt FIRST rádióforrások, amelyek az optikai tartományban felbontatlan kvazárokkal (és nem galaxisokkal) azonosíthatók az SDSS-ben, gyakorlatilag mind a VLBI hálózattal is feltérképezhetőnek bizonyultak. Ennél az objektumtípusnál tehát kiküszöbölhetők az időigényes MERLIN „szűrővizsgálatok”. Ennek a feltételezésnek a megerősítésére az EVN-hez benyújtott újabb programjavaslatunkban már az SDSS-ben és a FIRST-ben egyaránt felbontatlan objektumokra koncentráltunk. A DEVOS program folytatását jelentő méréseket az EVN 8 antennájából álló hálózatával 2007. március 2-án tudtuk elvégezni. Eredményeink megerősítették az előzetes kiválasztási módszer hatékonyságát, hiszen közel 90%-os detektálási arányt sikerült elérnünk úgy, hogy a FIRST-ből kijelölt kvazárok fluxussűrűségének alsó határát 20 mJy-re szállítottuk le (*Frey et al.* 2008, *Astron. Astrophys.* **477**, 781). Megnyílt tehát az út a DEVOS hatékony folytatása, a halvány rádiókvazárok VLBI-adatbázisának kiépítése előtt.



A DEVOS 2007-es EVN megfigyeléseire kijelölt két, kissé átfedő égi mező, középpontjukban ismert kalibrátor kvazárokkal. A 26 kiválasztott kvazár közül 22-t később sikeresen detektáltunk 5 GHz-en ( $>1$  mJy), s szerkezetüket néhány mas szögfelbontással feltérképeztük.

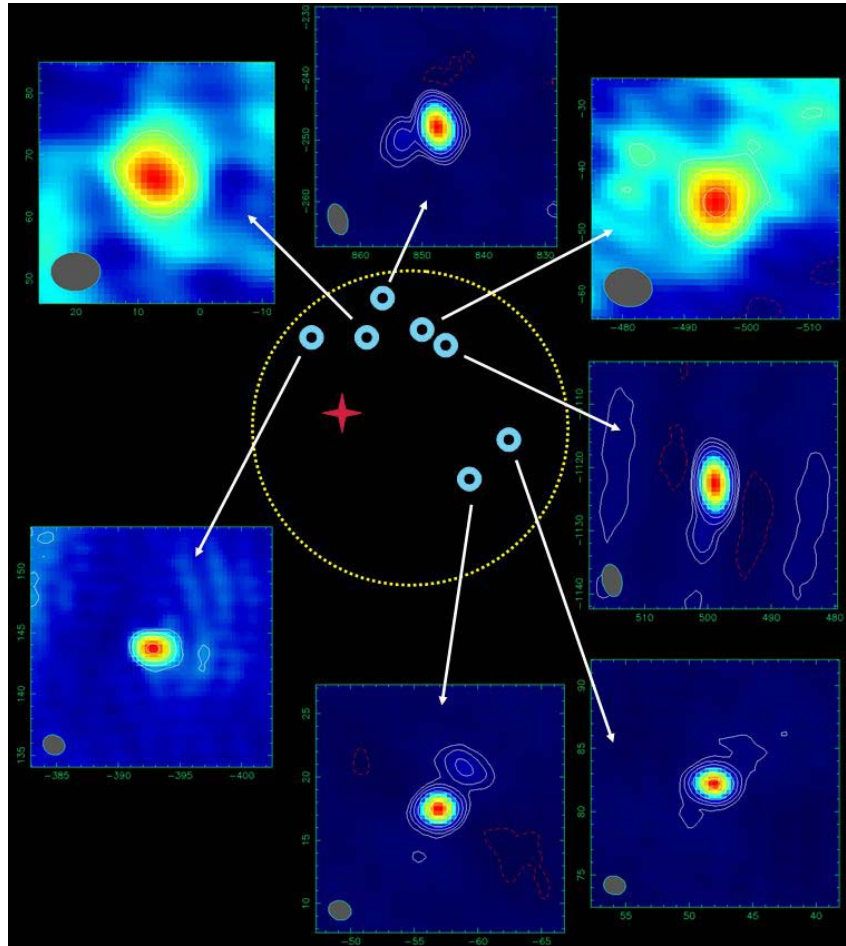


Egy példa: a mintában a legnagyobb vöröseltolódással ( $z=3,38$ ) rendelkező J1624+3758 jelű kvazár 5 GHz-es rádióképe. A skálán egy osztás 10 ezred-ívmásodpercnek (mas) felel meg, ami a kvazár távolságában kb. 250 fényévet jelent. A színek és kontúrok a fényességet kódolják. Az interferométer irányfüggő felbontását a bal alsó sarokban látható ellipszis jelzi. Sikerült igazolnunk azt a sejtést, miszerint ennek a fiatal aktív galaxismagnak a teljes rádiósugárzása mindössze néhány száz fényévnyi méretű térrészből érkezik.

Az SDSS/FIRST kvazároknak a – későbbi VLBI detektálásuk szempontjából – hatékony előzetes kiszűrésére talált módszert máris alkalmaztuk egy új területen. Előzetesen kimutattuk, hogy a Japánból 2012-ben felbocsátani tervetett második generációs űr-VLBI mesterséges hold, az ASTRO-G alkalmas lesz mintegy 50 olyan halvány aktív galaxismag feltérképezésére, amelyek amúgy túl halványak volnának az űr-VLBI hálózat számára (*Frey & Gabányi 2008, ASP Conf. Ser., megjelenés alatt*). Ez speciális égi helyzetüknek köszönhető, ugyanis igen közel (12'-en belül) láthatók olyan fényes kvazárok környezetében, amelyek a megfelelő mérési módszerrel a földi és a műholdra telepített antennák alkotta interferométer érzékenységének javítására használhatók. Az űr-VLBI – a Földön elérhető bázisvonalak megháromszorozása révén – egy adott frekvencián kb. háromszor finomabb szögfelbontás elérését teszi lehetővé.

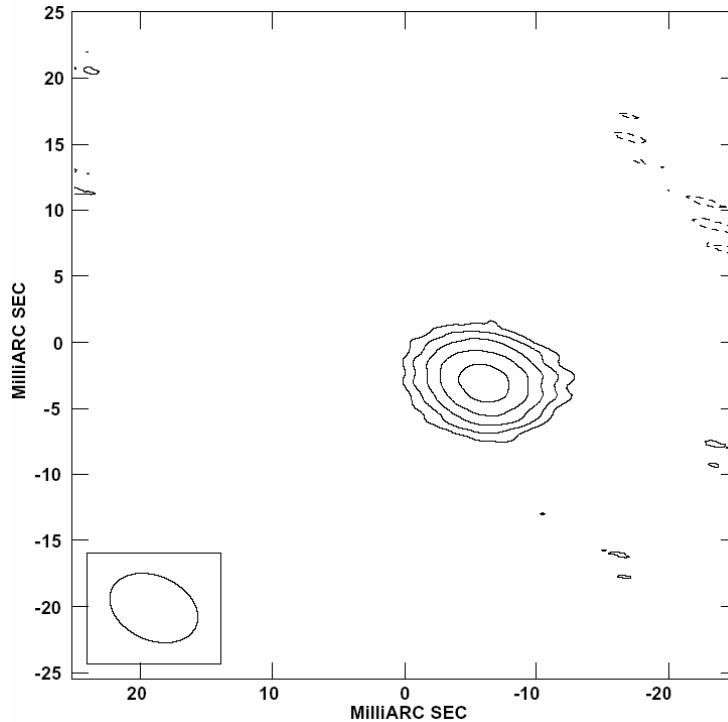
A DEVOS eredményeinek lehetséges alkalmazási területei közül eddig elsősorban az **asztrometriára** összpontosítottunk. A VLBI mérési technikából adódóan az általunk megfigyelt kvazárok pozíciós pontossága ezred-ívmásodperc körüli. A jelenleg elfogadott legpontosabb égi referencia-rendszer (ICRF, *International Celestial Reference Frame*) definíciója is néhány száz kiválasztott kvazár VLBI mérésein alapul. Az optikai asztrometria pontossága – űrprogramok nyomán – a következő egy-két évtizedben meg fogja haladni a VLBI pontosságát. Az összhang biztosításához nagy szükség lesz a rádió és optikai égi vonatkozási rendszerek összekapcsolására, ami jelenleg csak közvetett úton valósítható meg. Az Európai Űrügynökség (ESA, *European Space Agency*) 2010 körül tervezi felbocsátani Gaia űrszondáját. A Gaia az optikai hullámhossztartományban – nagy érzékenysége révén – immár számos (a becslések szerint mintegy félmillió) kvazárt is észlelni tud – milliárdnyi csillag mellett. (A korábban működött HIPPARCOS asztrometria műhold számára a kvazárok túl halványak voltak.) A definiáló pontok hatalmas száma miatt a Gaia extragalaktikus referencia-rendszerének pontossága a 2010-es évek végére várhatóan meg fogja haladni a jelenlegi, VLBI technikán alapuló ICRF-ét is. Ugyanakkor először nyílik lehetőség arra, hogy közvetlenül is összekapcsolhassuk a rádió és optikai égi referencia-rendszert, amiben a DEVOS felépülő adatbázisa is szerepet kaphat. Szép számmal akadnak majd olyan kvazárok, amelyeket mindkét technikával meg tudunk figyelni. A rendszerek összekapcsolására a folyamatosság fenntartása, és a VLBI technika egyedülálló globális geodéziai szerepe (a Föld forgásának leírása a rádiókvazárok által kijelölt kvázi-inerciarendszerben) miatt is szükség lesz.

A DEVOS céljára kidolgozott mérési módszerünk belépőül szolgált egy olyan nemzetközi kutatási programba (DAS, *Deep Astrometric Standards*), amelynek végső célja a közeljövőben építendő, hatalmas mozaik CCD detektorokkal ellátott optikai teleszkópok (pl. LSST, *Large Synoptic Survey Telescope*) pontos asztrometriai kalibrációjának megoldása (*Platais et al. 2008, Proc. IAU Symp. 248, megjelenés alatt*). Ennek keretében egyes kijelölt égi mezők optikai és rádió méréseire kerül sor. A cél, hogy néhány optikailag halvány kvazár pontos koordinátáit meghatározzuk. Ezekkel azután mód nyílik a teljes mezők halvány csillagainak elhelyezésére az ICRF-ben. Az első mező (Gemini-Orion-Taurus) VLBI megfigyelésére az EVN-nel 2006-ban került sor a mi irányításunkkal. A további mezőkben jelenleg optikai megfigyelések folynak, valamint a rádiótartományban a potenciális VLBI célforrások kiválasztásán dolgozunk VLA mérések alapján.



Egy pontos ICRF koordinátákkal rendelkező kalibrátor kvazár (J0603+2159, piros kereszttel jelölve) környezetében az EVN-nel 2006 novemberében talált kompakt rádióforrások (Frey *et al.* 2007, Proc. 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, 111). A szaggatott vonal az Ikrek, Orion és Bika csillagképek egy részét lefedő 2° sugarú kört határolja. Az így megtalált aktív galaxismagok legtöbbje látható fényben is megfigyelhető. Segítségükkel az optikai égi vonatkoztatási rendszer lokálisan, nagy pontossággal az ICRF-hez köthető. A hét halvány kvazár ICRF koordinátáinak pontossága 1 ezred-ívmásodpercen (mas) belüli.

A világegyetem akkor ismert **legtávolabbi rádiósugárzó kvazárját** (SDSS J0836+0054, vöröseltolódása  $z=5,77$ ) az EVN-nel 5 GHz frekvencián feltérképeztük. A rendkívül halvány kvazár ezred-ívmásodperces rádiószerkezetét egy kompakt komponens jellemzi. A VLBI kísérlettel gyakorlatilag egyidőben a VLA rádiótávcső-rendszerrel végzett, ívmásodperces felbontású méréseink alapján a kvazár rádiósugárzása gyakorlatilag teljes egészében a „VLBI-magból” ered. (Frey *et al.* 2005, *Astron. Astrophys.* **436**, L13) Ennek lineáris mérete legfeljebb 130 fényév. Más hullámhosszakon végzett mérésekkel összhangban, ez a kvazár meglepően hasonló a világegyetem többi, lényegesen később keletkezett aktív galaxismagjához. Mindezek alapján nyilvánvaló, hogy az ősrobbanás utáni egymilliárd év elegendő kellett legyen milliárd naptömegnyi fekete lyukak kialakulásához. Az SDSS J0836+0054 rádiósugárzásának forrása ugyanaz a mechanizmus, amely más, szupernagy tömegű fekete lyukakat tartalmazó rádiósugárzó aktív galaxismagokban, de a csillagtömegű fekete lyukakat tartalmazó kettős rendszerekben is: akkréció nyomán létrejövő plazmakilövellések inkoherens szinkrotronsugárzása.



Az SDSS J0836+0054 jelű kvazár ( $z=5,77$ ) 5 GHz-es rádióképe EVN méréseink alapján. Az első kontúrok  $\pm 70$   $\mu\text{Jy}/\text{beam}$  fényességet jelölnek, a továbbiak  $\sqrt{2}$ -szörös növekedésnek felelnek meg. A csúcshényesség 333  $\mu\text{Jy}/\text{beam}$ . A (0,0) pozíció a kvazárnak a mérés előtt ismert legpontosabb koordinátáit jelöli. A kvazár helyzetét az ICRF-ben 2 mas pontossággal sikerült meghatároznunk.

2006-ban egy újabb, még nagyobb vöröseltolódású rádiósugárzó kvazárt fedeztek fel (J1427+3312;  $z=6,12$ ). A korábbi „rekorderrel” kapcsolatos VLBI munkánk folytatásaként javaslatot tettünk ennek a nagyfelbontású térképezésére is. A kétfrekvenciás (1,6 és 5 GHz) észleléseket célzó programot az EVN 2007-ben hajtotta végre, az adatok feldolgozása a projekt futamidejének befejeztével még tart.

Folytattuk a japán VSOP (*VLBI Space Observatory Programme*) **úr-VLBI program** keretében a HALCA mesterséges holddal és a hozzá csatlakozó földi VLBI hálózatokkal aktív galaxismagokról nyert adataink feldolgozását. 2006-ban publikáltuk az AO 0235+164 jelű BL Lac objektumra vonatkozó polarizációs úr-VLBI észleléseink eredményeit (*Frey et al.* 2006, Publ. Astron. Soc. Japan **58**, 217). Két frekvencián (1,6 és 5 GHz), összesen 8 alkalommal végzett mérésorozatunk alapján megállapítottuk, hogy a kezdetben rendkívül kompakt (az eddig közvetlenül mért legnagyobb fényességi hőmérsékletet mutató) aktív galaxismag elhalványodott, s egyidejűleg kiterjedt. Rádiósugárzásának lineáris polarizációja ebben az időszakban nem volt jelentős (kb. 1%). Érdekes, hogy méréseink és a forrás rádió fénygörbéje nincsenek összhangban az AO 0235+164 esetére korábban napvilágot látott precessziós jetmodell jóslataival.

A nagy vöröseltolódású ( $z>3$ ) kvazárok úr-VLBI megfigyelését célzó, részvételünkkel folyó kutatásorozatból a J1405+0415 kvazár ( $z=3,2$ ) esetét emeljük ki. Az ilyen távoli kvazárok esetében meglepően kiterjedt rádiószerkezet vizsgálatával lehetőség nyílt a legbelső, néhány parszek lineáris méretű tartomány egyes fizikai paramétereinek meghatározására. Megbecsültük a kvazár aktivitását biztosító központi fekete lyuk tömegét, amire egymilliárd naptömeg adódott (*Yang et al.* 2008, ASP Conf. Ser., megjelenés alatt).

Adatfeldolgozási és értelmezési munkáinkkal részt vettünk a nagyszámú aktív galaxismag úr-VLBI felmérését célzó *VSOP Survey Program*ban. A hozzájárulásunkkal kapott eredményeket (5 GHz-es úr-VLBI térképeket, a források fényességeloszlását jellemző modellparamétereket, fényességi

hőmérsékleti becsléseket) végső formába öntve is publikáltuk (*Scott et al.* 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **155**, 33; *Dodson et al.* 2008, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **175**, megjelenés alatt).

Foglalkoztunk az ún. **közepes tömegű** – vagyis méretben az aktív galaxismagokban található, akár sok milliárdnyi naptömegű, illetve a csillagtömegű **fekete lyukak** közé eső – fekete lyukak VLBI technikával való detektálhatóságával. Megállapítottuk, hogy azok – halványságuk ellenére – az EVN jelenlegi érzékenysége mellett is megfigyelhetők lennének a legközelebbi extragalaxisok távolságából. Az M82 galaxisban levő X-1 jelű ultrafényes röntgenforrás, az egyik legígéretesebb közepes tömegű feketelyuk-jelölt érzékeny EVN megfigyelése nyomán a detektálás ugyanakkor nem sikerült. Ebből kb. 500 naptömegnyi felső határt lehetett adni a feltételezett fekete lyuk tömegére.

Az SS433 jelű galaktikus **mikrokvazár** VLBI vizsgálatával próbáltuk kimutatni a cirkuláris polarizáció jelenlétét a kompakt belső tartományból érkező rádiósugárzásban. Korábban – gyengébb felbontással – sikerült cirkuláris polarizációt találni az SS433-ban. Méréseink idején a távolodó irányú belső jet a szokásosnál halványabb volt, lineáris polarizációt nem lehetett kimutatni. Valószínű, hogy a mások által észlelt cirkuláris polarizáció nem származhat giro-szinkrotron hatásból.

A közelmúltban felfedezett, napi időskálán belüli jelentős **fényességváltozásokat** (IDV, *Intra-Day Variability*) mutató J1128+592 jelű kvazárral kapcsolatban jelenleg is folyó VLBI megfigyeléssorozatot kezdeményeztünk. Ebből kiderülhet, hogy az észlelt változásokban mekkora szerepe van a kvazár kompakt rádiószerkezetének, s mekkora a hatása a Tejútrendszerben, a látóirányba eső turbulens csillagközi anyagfelhőkben végbemenő szóródásnak.

A projekt teljes futamideje alatt – csak vezető kutatói (PI) szinten – összesen 7 megfigyelési programjavaslatot nyújtottunk be nemzetközi rádióinterferométer-hálózatokhoz (EVN: 5, VLBA: 2), amelyekből azok ötöt el is fogadtak (EVN: 3, VLBA: 2), a tervezett méréseinket pedig végrehajtották (ill. végrehajtják). Az EVN-től származó adatok alapján a hálózat egy órai működtetésére eső költség kb. 2500 euró. Talán érdeklődésre tarthat számot az a becslés, hogy ennek alapján a mi vezetésünkkel folyó programok csak ennél a hálózatnál közvetve mintegy 70 ezer eurós európai uniós „támogatásnak” felelnek meg, aminek elnyerésére az OTKA pályázati támogatása adta meg az esélyt.

Munkánkkal kapcsolatban impakt faktoriall rendelkező kiadványokban eddig összesen 8 szakcikkünk jelent meg (ill. elfogadva, megjelenés előtt áll). Összesített impakt faktoruk meghaladja a 24-et. Emellett konferencia-előadásokon és -közleményekben ismertettük eredményeinket. Végül fontosnak tartjuk még megemlíteni, hogy munkánkat igyekeztünk hazai tudományos és ismeretterjesztő fórumokon (szakmai konferenciákon, folyóiratokban, internetes portálokban) is megismertetni, népszerűsíteni. A témavezető az ELTE Csillagászati Tanszékén óraadóként speciális előadásokat (*Radio Astronomy I-II.*) tartott csillagász és fizikus hallgatóknak, doktoranduszoknak, valamint diplomamunka témavezetést is vállalt. Kutatásaink egyik résztvevője, Mosoni László a futamidő alatt *summa cum laude* minősítéssel védte meg PhD értekezését az ELTE Fizika Doktori Iskolájában, a DEVOS programmal kapcsolatban végzett kutatómunkája nyomán. Ezt is a projekt legkiemelkedőbb eredményei közt tartjuk számon.

Összességében elmondható, hogy a négy éves futamidejű OTKA támogatás lehetővé tette hozzáférésünket a világszínvonalú nemzetközi rádió-interferométeres infrastruktúrához. Hozzásegített bennünket jelentős új tudományos eredmények publikálásához, nemzetközi kutatócsoportok vezetéséhez, más csoportok munkájába való bekapcsolódáshoz. A kapott támogatás révén sikerült fenntartani és fejleszteni a hazai VLBI kutatásokat végző csoportot, megalapozni a közeljövő kutatómunkáját. *Mindezt a projekt résztvevői ezúton is köszönetüket fejezik ki.*